



**УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА  
У НОВОМ САДУ**



Милош Пљакић

**ПРЕДИКЦИЈА САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА У  
УРБАНИМ СРЕДИНАМА**  
ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Нови Сад, 2019



## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, <b>РБР</b> :		
Идентификациони број, <b>ИБР</b> :		
Тип документације, <b>ТД</b> :	Монографска документација	
Тип записа, <b>ТЗ</b> :	Текстуални штампани материјал	
Врста рада, <b>ВР</b> :	Докторска дисертација	
Аутор, <b>АУ</b> :	маст. инж. саобр. Милош Пљакић	
Ментор, <b>МН</b> :	др Драган Јовановић, редовни професор	
Наслов рада, <b>НР</b> :	Предикција саобраћајних незгода у урбаним срединама	
Језик публикације, <b>ЈП</b> :	Српски	
Језик извода, <b>ЈИ</b> :	Српски / Енглески	
Земља публиковања, <b>ЗП</b> :	Република Србија	
Уже географско подручје, <b>УГП</b> :	АП Војводина	
Година, <b>ГО</b> :	2019.	
Издавач, <b>ИЗ</b> :	Ауторски репринт	
Место и адреса, <b>МА</b> :	Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад	
Физички опис рада, <b>ФО</b> : (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	10/154/245/17/62/0/0	
Научна област, <b>НО</b> :	Саобраћајно инжењерство	
Научна дисциплина, <b>НД</b> :	Безбедност саобраћаја	
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО</b> :	Безбедност саобраћаја, Предикција саобраћајних незгода	
<b>УДК</b>		
Чува се, <b>ЧУ</b> :	Библиотека Факултета техничких наука у Новом Саду	
Важна напомена, <b>ВН</b> :		
Извод, <b>ИЗ</b> :	У оквиру дисертације развијени су предиктивни модели у циљу препознавања утицајних обележја урбане средине на саобраћајне незгоде, као и одабир математичког модела који апроксимира најбољу предиктивну функцију између обележја урбаних средина и саобраћајних незгода. Прикупљање обележја и карактеристика урбаних средина може се спровести са различитих просторних нивоа. У оквиру истраживања разматрани су макро и микро ниво. Примена макроскопског приступа односи се на шири спектар приказа утицајних карактеристика на основу којих се могу предложити дугорочне мере које се односе на спровођење политике безбедности саобраћаја, организацију контроле и регулисања саобраћаја, доношењу правних норми, као и спровођење одређених образовних и инжењерских мера. Са друге стране, микроскопски приступ односи се на одређене објекте на путевима у циљу оцене нивоа безбедности саобраћаја са највишим степеном тачности.	
Датум прихватања теме, <b>ДП</b> :	18.12.2018.	
Датум одбране, <b>ДО</b> :		
Чланови комисије, <b>КО</b> :	Председник: др Драган Кукољ, редовни професор	
	Члан: др Далибор Пешић, ванредовни професор	
	Члан: др Светлана Бачкалић, доцент	Потпис ментора
	Члан: др Валентина Басарић, ванредовни професор	
	Члан, ментор: др Драган Јовановић, редовни професор	



## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monographic publication
Type of record, <b>TR</b> :	Textual printed material
Contents code, <b>CC</b> :	Ph.D. thesis
Author, <b>AU</b> :	M.Sc. Miloš Pljakić
Mentor, <b>MN</b> :	Ph.D. Dragan Jovanović
Title, <b>TI</b> :	Prediction of traffic accidents in urban areas
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian / English
Country of publication, <b>CP</b> :	Republic of Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	AP of Vojvodina
Publication year, <b>PY</b> :	2019
Publisher, <b>PB</b> :	Author's reprint
Publication place, <b>PP</b> :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Physical description, <b>PD</b> : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	10/154/245/17/62/0/0
Scientific field, <b>SF</b> :	Traffic engineering
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Road Safety
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Road safety, Prediction of traffic accident
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	Library of the Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	Within the framework of the dissertation, predictive models have been developed in order to identify the influential features of the urban environment on traffic accidents, as well as the selection of a mathematical model that approximates the best predictive function between urban characteristics and traffic accidents. The collection of features and characteristics of urban areas can be carried out from different spatial levels. Macro and micro levels were considered in the research. The application of the macroscopic approach refers to a broader range of influential characteristics that can be used to propose long-term measures related to the implementation of traffic safety policy, the organization of traffic control and regulation, the adoption of legal norms, as well as the implementation of certain educational and engineering measures. On the other hand, microscopic approach refers to certain objects on the roads in order to evaluate the level of traffic safety with the highest degree of accuracy.
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	18.12.2018.
Defended on, <b>DE</b> :	
Defended Board, <b>DB</b> :	
President:	Ph.D Dragan Kukolj, full professor
Member:	Ph.D. Dalibor Pešić, associate professor
Member:	Ph.D. Svetlana Bačkalić, assistant professor
Member:	Ph.D. Valentina Basarić, associate professor
Member, Mentor:	Ph.D. Dragan Jovanović, full professor
	Mentor's sign

*Посвећено мојој породици*

## **ЗАХВАЛНИЦА**

*Дугујем велику захвалност проф. др Драгану Јовановићу, као ментору, за несебичну помоћ, поверење и подршку током студија.*

*Такође захвалност упућујем и колегама који су дали допринос истраживањима у циљу израде докторске дисертације.*

*Посебно бих се захвалио својој породици на подршци и разумевању свих ових година током студија.*

## САДРЖАЈ:

<b>1. УВОД</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. СТРУКТУРА ИСТРАЖИВАЊА</b> .....	<b>4</b>
<b>2. МЕТОДОЛОГИЈА</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1. ПРОБЛЕМ БЕЗБЕДНОСТИ САОБРАЋАЈА У УРБАНИМ СРЕДИНАМА</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2. ЦИЉЕВИ И ЗАДАЦИ ИСТРАЖИВАЊА</b> .....	<b>10</b>
<b>2.3. ДРУШТВЕНА И НАУЧНА ОПРАВДАНОСТ</b> .....	<b>11</b>
<b>2.4. ИСТРАЖИВАЧКЕ ХИПОТЕЗЕ</b> .....	<b>12</b>
<b>2.5. МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА</b> .....	<b>12</b>
<b>3. ПРОСТОРНИ ЕНТИТЕТИ ЗА ПРЕДИКЦИЈУ САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1. УВОД</b> .....	<b>15</b>
<b>3.2. МАКРОСКОПСКЕ АНАЛИЗЕ</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2.1. Државе и окрузи</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2.2. Просторне јединице поштанске мреже</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2.3. Саобраћајни дистрикти</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2.4. Саобраћајне зоне</b> .....	<b>20</b>
<b>3.2.5. Пописни блокови</b> .....	<b>22</b>
<b>3.2.6. Мрежа просторних јединица</b> .....	<b>23</b>
<b>3.2.7. Компарација просторних јединица</b> .....	<b>24</b>
<b>3.3. МЕЗОСКОПСКЕ АНАЛИЗЕ</b> .....	<b>25</b>
<b>3.4. МИКРОСКОПСКЕ АНАЛИЗЕ</b> .....	<b>26</b>
<b>3.4.1. Раскрснице</b> .....	<b>27</b>
<b>3.4.2. Деонице пута</b> .....	<b>28</b>
<b>3.4.3. Мостови</b> .....	<b>29</b>
<b>3.4.4. Тунели</b> .....	<b>30</b>
<b>3.4.5. Кривине</b> .....	<b>30</b>
<b>3.4.6. Зоне радова</b> .....	<b>31</b>
<b>3.4.7. Пружни прелази</b> .....	<b>31</b>
<b>3.5. ДИСКУСИЈА</b> .....	<b>32</b>
<b>4. ПРЕДИКЦИЈА САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА У УРБАНИМ СРЕДИНАМА</b> .....	<b>34</b>
<b>4.1. УВОД</b> .....	<b>34</b>
<b>4.2. ПРЕДИКЦИЈА САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА ПО САОБРАЋАЈНИМ ЗОНАМА</b> .....	<b>34</b>
<b>4.2.1. Фактори који утичу на саобраћајне незгоде у саобраћајним зонама</b> .....	<b>35</b>
<b>4.2.1.1. Мере изложености</b> .....	<b>37</b>
<b>4.2.1.2. Демографске и социо-економске карактеристике</b> .....	<b>37</b>
<b>4.2.1.3. Саобраћајне карактеристике</b> .....	<b>39</b>
<b>4.2.1.4. Карактеристике пута</b> .....	<b>40</b>
<b>4.2.1.5. Карактеристике намене површина</b> .....	<b>42</b>
<b>4.2.1.6. Ограничења</b> .....	<b>44</b>
<b>4.2.2. Модели за предикцију саобраћајних незгода у саобраћајним зонама</b> .....	<b>45</b>

<b>4.3. ПРЕДИКЦИЈА САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА НА РАСКРСНИЦАМА .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2.1. Фактори који утичу на саобраћајне незгоде на раскрсницама ...</b>	<b>52</b>
4.3.1.1. <i>Мере изложености .....</i>	<i>53</i>
4.3.1.2. <i>Демографске и социо-економске карактеристике .....</i>	<i>57</i>
4.3.1.3. <i>Саобраћајне карактеристике .....</i>	<i>59</i>
4.3.1.4. <i>Геометријске карактеристике пута .....</i>	<i>63</i>
4.3.1.5. <i>Карактеристике намене површина .....</i>	<i>66</i>
4.3.1.6. <i>Ограничења .....</i>	<i>69</i>
<b>4.3.2. Модели за предикцију саобраћајних незгода на раскрсницама ..</b>	<b>70</b>
<b>4.4. ДИСКУСИЈА .....</b>	<b>73</b>
<b>5. СТАТИСТИЧКИ МОДЕЛИ ЗА ПРЕДИКЦИЈУ САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА .....</b>	<b>76</b>
<b>5.1. УВОД .....</b>	<b>76</b>
<b>5.2. РАЗВОЈ ПРЕДИКТИВНИХ МОДЕЛА САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА</b>	<b>77</b>
<b>5.3. МОДЕЛИ ЗА ЦЕЛОБРОЈНЕ ПОДАТКЕ .....</b>	<b>78</b>
<b>5.3.1. Процена регресионих коефицијената .....</b>	<b>79</b>
5.3.1.1. <i>Метод максималне веродостојности .....</i>	<i>79</i>
5.3.1.2. <i>Бејзова анализа .....</i>	<i>80</i>
<b>5.3.2. Поасонов регресијски модел .....</b>	<b>81</b>
<b>5.3.3. Негативни биномни регресијски модел .....</b>	<b>82</b>
<b>5.3.4. Хијерархијски Бејзови модели .....</b>	<b>83</b>
<b>5.4. ПРОСТОРНИ АУТОРЕГРЕСИОНИ МОДЕЛИ .....</b>	<b>84</b>
<b>5.4.1. Просторна матрица .....</b>	<b>85</b>
<b>5.4.2. Просторни ауторегресиони модел првог реда .....</b>	<b>86</b>
<b>5.4.3. Мешовити ауторегресиони модел .....</b>	<b>86</b>
<b>5.4.4. Модел просторних грешака .....</b>	<b>87</b>
<b>5.5. ПОРЕЂЕЊЕ ПРЕДИКТИВНИХ МОДЕЛА .....</b>	<b>88</b>
<b>6. ИСТРАЖИВАЊЕ ПРЕДИКЦИЈЕ САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА У САОБРАЋАЈНИМ ЗОНАМА .....</b>	<b>91</b>
<b>6.1. УВОД .....</b>	<b>91</b>
6.1.1. <i>Демографске карактеристике .....</i>	<i>91</i>
6.1.2. <i>Саобраћајне карактеристике и карактеристике пута .....</i>	<i>92</i>
6.1.3. <i>Карактеристике окружења .....</i>	<i>92</i>
6.1.4. <i>Развој предиктивних модела .....</i>	<i>93</i>
<b>6.2. ПРИПРЕМА ПОДАТАКА .....</b>	<b>93</b>
6.2.1. <i>Подаци о саобраћајним незгодама .....</i>	<i>94</i>
6.2.2. <i>Подаци о потенцијалним утицајним факторима .....</i>	<i>96</i>
<b>6.3. АНАЛИЗА ПРОСТОРНЕ АУТОКОРЕЛАЦИЈЕ .....</b>	<b>98</b>
<b>6.4. АНАЛИЗА МУЛТИКОЛИНЕАРНОСТИ .....</b>	<b>100</b>
<b>6.5. РАЗВОЈ ПРЕДИКТИВНИХ ФУНКЦИЈА .....</b>	<b>102</b>
6.5.1. <i>Предикција укупног броја саобраћајних незгода .....</i>	<i>102</i>
6.5.2. <i>Предикција саобраћајних незгода у којима су учествовала моторна возила .....</i>	<i>105</i>
6.5.3. <i>Предикција саобраћајних незгода са рањививим учесницима ...</i>	<i>107</i>
<b>6.6. ДИСКУСИЈА ПРЕДИКЦИЈЕ НЕЗГОДА У САОБРАЋАЈНИМ ЗОНАМА .....</b>	<b>109</b>

<b>7. ИСТРАЖИВАЊЕ ПРЕДИКЦИЈЕ САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА НА РАСКРСНИЦАМА .....</b>	<b>112</b>
7.1. УВОД .....	112
7.1.1. Саобраћајне карактеристике .....	112
7.1.2. Геометријске карактеристике .....	113
7.2. ПРИПРЕМА ПОДАТАКА .....	114
7.2.1. Подаци о саобраћајним незгодама .....	115
7.2.2. Подаци о независним променљивима .....	116
7.3. РАЗВОЈ ПРЕДИКТИВНИХ ФУНКЦИЈА .....	117
7.3.1. Анализа мултиколинеарности .....	118
7.3.2. Предикција укупног броја незгода .....	119
7.3.3. Предикција незгода у којима су учествовала моторна возила ....	123
7.3.4. Предикција незгода са рањивим учесницима у саобраћају .....	127
7.4. ДИСКУСИЈА ПРЕДИКЦИЈЕ НЕЗГОДА НА РАСКРСНИЦАМА .....	131
<b>8. ДИСКУСИЈА .....</b>	<b>133</b>
8.1. ПРЕДИКЦИЈА НЕЗГОДА НА МАКРО НИВОУ .....	133
8.2. ПРЕДИКЦИЈА НЕЗГОДА НА МИКРО НИВОУ .....	136
<b>9. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА .....</b>	<b>140</b>
9.1. УВОДНЕ НАПОМЕНЕ .....	140
9.2. КЉУЧНИ РЕЗУЛТАТИ .....	140
9.3. БУДУЋИ ПРАВЦИ ИСТРАЖИВАЊА .....	141
<b>10. ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>143</b>



## СПИСАК СЛИКА:

Слика 1.1.	Број и стопа саобраћајних незгода са погинулима међу светској популацији у периоду 2000-2016.....	1
Слика 1.2.	Погинули у саобраћајним незгодама на 100.000 становника .....	2
Слика 1.3.	Погинули у саобраћајним незгодама у односу на 1.000.000 становника у 2010. и 2018. години .....	3
Слика 1.4.	Јавни ризик страдања у саобраћајним незгодама у Србији и земљама Европске уније .....	3
Слика 1.5.	Структура докторске дисертације .....	4
Слика 2.1.	Процент погинулих у саобраћајним незгодама у руралним и урбаним срединама на подручју САД .....	8
Слика 2.2.	Процент саобраћајних незгода у урбаним срединама на подручју Србије .....	9
Слика 2.3.	Процентуално учешће погинулих и повређених лица у саобраћајним незгодама према полу и својству учесника у насељу и ван насеља за период 2014-2018 .....	9
Слика 2.4.	Процентуално учешће погинулих и повређених лица у саобраћајних незгодама према полу и својству учесника у насељу за период 2014-2018.....	10
Слика 3.1.	Анализиране просторне јединице у Француској .....	17
Слика 3.2.	Графички приказ анализираних просторних јединица, Пенсилванија, 2000. ....	18
Слика 3.3.	Графички приказ саобраћајних дистрикта на подручју Флориде ....	20
Слика 3.4.	Идентификоване саобраћајне зоне са највећом густином превиђеног броја незгода .....	21
Слика 3.5.	Структура мреже на подручју Флориде (10 x 10 миље <sup>2</sup> ) .....	23
Слика 3.6.	Просторне јединице које су коришћене у компарацији .....	24
Слика 3.7.	Анализиране деонице уличне мреже на мезо нивоу у Шангају .....	25
Слика 3.8.	Пример посматране просторне јединице на мезо нивоу .....	26
Слика 3.9.	Пример делова уличне мреже који се посматрају на микро нивоу .....	28
Слика 4.1.	Систематизација фактора у саобраћајним зонама .....	36
Слика 4.2.	Класификација мреже у оквиру саобраћајних зона .....	42
Слика 4.3.	Издвајање саобраћајних незгода које су се догодиле на граници саобраћајних зона .....	45
Слика 4.4.	Идентификација густине посматраних независних променљива Кернеловном функцијом .....	47
Слика 4.5.	Предвиђен и посматран број незгода у односу на одабир просторне матрице .....	48
Слика 4.6.	Приказ креиране мреже у циљу поређења просторних ентитета на подручју Флориде .....	50
Слика 4.7.	Систематизација фактора који утичу на саобраћајне незгоде на раскрсницама .....	52
Слика 4.8.	Проблем безбедности саобраћаја приказан у тродимензионалном простору .....	53
Слика 4.9.	Ситуације у којима се догађају саобраћајне незгоде између два возила на раскрсници .....	60
Слика 4.10.	Концептуални оквир утицаја геометријских карактеристика и околине пута на мере изложености и саобраћајне незгоде .....	64
Слика 4.11.	Одабране јединице посматрања у Лисабону .....	65
Слика 4.12.	Интеграција података у циљу испитивања везе између намене површина и саобраћајних незгода у Њукаслу .....	67
Слика 4.13.	Поступак анализе утицаја намене површина на саобраћајне незгоде .....	69
Слика 4.14.	Процес примене одабраних модела у истраживању .....	72
Слика 5.1.	Подела статистичких регресионих модела .....	76

Слика 5.2.	Припрема података као први корак развоја предиктивних модела саобраћајних незгода .....	<b>77</b>
Слика 5.3.	Процес примене одабраних модела у истраживању .....	<b>79</b>
Слика 5.4.	Класичан приступ за статистичко закључивање .....	<b>82</b>
Слика 6.1.	Анализиране саобраћајне зоне на подручју града Новог Сада .....	<b>94</b>
Слика 6.2.	Анализиран број саобраћајних незгода на подручју Новог Сада у току трогодишњег периода (2015-2017) .....	<b>95</b>
Слика 6.3.	Мерни и зонски ефекат у процесу агрегације саобраћајних незгода .....	<b>95</b>
Слика 6.4.	Фреквенција саобраћајних незгода по саобраћајним зонама .....	<b>96</b>
Слика 6.5.	Моранов коефицијент за посматране зависне варијабле .....	<b>98</b>
Слика 6.6.	Коефицијент просторне аутокорелације саобраћајних незгода за посматрани временски период .....	<b>100</b>
Слика 6.7.	Пирсонов коефицијент корелације између независних варијабли .....	<b>101</b>
Слика 6.8.	Предвиђен и посматран укупан број саобраћајних незгода по саобраћајним зонама .....	<b>103</b>
Слика 6.9.	Густина предвиђеног укупног броја незгода по саобраћајним зонама .....	<b>104</b>
Слика 6.10.	Посматран и предвиђен број саобраћајних незгода у којима су учествовала моторна возила по саобраћајним зонама .....	<b>106</b>
Слика 6.11.	Густина предвиђеног броја саобраћајних незгода у којима су учествовала моторна возила по саобраћајним зонама .....	<b>106</b>
Слика 6.12.	Посматран и предвиђен број саобраћајних незгода са рањивим учесницима по саобраћајним зонама .....	<b>108</b>
Слика 6.13.	Густина предвиђеног броја саобраћајних незгода са рањивим учесницима по саобраћајним зонама .....	<b>109</b>
Слика 7.1.	Улична мрежа на подручју града Новог Сада .....	<b>114</b>
Слика 7.2.	Одабране раскрснице за предикцију саобраћајних незгода на микро нивоу .....	<b>115</b>
Слика 7.3.	Поступак припреме података саобраћајних незгода за развој модела .....	<b>115</b>
Слика 7.4.	Визуелни приказ Пирсоновог коефицијента за независне променљиве ...	<b>118</b>
Слика 7.5.	Посматран и предвиђен укупан број саобраћајних незгода на раскрсницама помоћу методе максималне веродостојности .....	<b>120</b>
Слика 7.6.	Симулациони приказ процене параметара .....	<b>121</b>
Слика 7.7.	Посматран и предвиђен укупан број саобраћајних незгода, применом Бејзових симулација .....	<b>123</b>
Слика 7.8.	Посматран и предвиђен број саобраћајних незгода у којима су учествовала моторна возила .....	<b>124</b>
Слика 7.9.	Симулациони приказ процене параметара .....	<b>125</b>
Слика 7.10.	Посматран и предвиђен број незгода у којима су учествовала само моторна возила применом Бејзових симулација .....	<b>127</b>
Слика 7.11.	Посматран и предвиђен број саобраћајних незгода са рањивим учесницима на раскрсницама .....	<b>128</b>
Слика 7.12.	Визуелизација симулације и процене статистички значајних параметара .....	<b>129</b>
Слика 7.13.	Посматран и предвиђен број незгода методом Бејзових симулација .....	<b>131</b>

## СПИСАК ТАБЕЛА:

Табела 3.1.	Просторне јединице у оквиру три категорије посматраних нивоа .....	15
Табела 4.1.	Број просторних ентитета анализиран од стране Abdel-Aty et al. (2013). ..	36
Табела 4.2.	Обележја намена површина која су разматрана у макроскопској студији у Шангају .....	44
Табела 6.1.	Дескриптивна статистика независних променљивих .....	97
Табела 6.2.	Дескриптивна статистика саобраћајних незгода по годинама .....	99
Табела 6.3.	Основни параметри зависних променљива .....	102
Табела 6.4.	Резултати предикције укупног броја саобраћајних незгода .....	103
Табела 6.5.	Резултати предикције саобраћајних незгода у којима су учествовала моторна возила .....	105
Табела 6.6.	Резултати предикције саобраћајних незгода са рањивим учесницима .....	107
Табела 7.1.	Дескриптивна статистика независних променљивих .....	116
Табела 7.2.	Основни параметри зависних променљива .....	118
Табела 7.3.	Развој предиктивних модела класичним статистичким приступом .....	120
Табела 7.4.	Предикција саобраћајних незгода помоћу Бејзових симулација .....	122
Табела 7.5.	Променљиве које имају утицај на незгоде са моторним возилима .....	124
Табела 7.6.	Предикција незгода са моторним возилима помоћу Бејзових симулација .....	126
Табела 7.7.	Променљиве које имају утицај на незгоде са рањивим учесницима у саобраћају .....	128
Табела 7.8.	Променљиве које имају утицај на незгоде са рањивим учесницима у саобраћају проценом Бејзових симулација .....	130

## СПИСАК ЈЕДНАЧИНА:

Једначина	4.1. ....	41
Једначина	4.2. ....	53
Једначина	4.3. ....	56
Једначина	4.4. ....	60
Једначина	4.5. ....	62
Једначина	4.6. ....	63
Једначина	5.1. ....	78
Једначина	5.2. ....	78
Једначина	5.3. ....	79
Једначина	5.4. ....	79
Једначина	5.5. ....	80
Једначина	5.6. ....	80
Једначина	5.7. ....	80
Једначина	5.8. ....	80
Једначина	5.9. ....	80
Једначина	5.10. ....	81
Једначина	5.11. ....	81
Једначина	5.12. ....	81
Једначина	5.13. ....	81
Једначина	5.14. ....	82
Једначина	5.15. ....	82
Једначина	5.16. ....	82
Једначина	5.17. ....	82
Једначина	5.18. ....	83
Једначина	5.19. ....	83
Једначина	5.20. ....	83
Једначина	5.21. ....	83
Једначина	5.22. ....	83
Једначина	5.23. ....	85
Једначина	5.24. ....	85
Једначина	5.25. ....	85
Једначина	5.26. ....	86
Једначина	5.27. ....	86
Једначина	5.28. ....	86
Једначина	5.29. ....	87
Једначина	5.30. ....	87
Једначина	5.31. ....	87
Једначина	5.32. ....	87
Једначина	5.33. ....	88
Једначина	5.34. ....	88
Једначина	5.35. ....	89
Једначина	5.36. ....	89
Једначина	6.1. ....	104
Једначина	6.2. ....	107
Једначина	6.3. ....	109
Једначина	7.1. ....	120
Једначина	7.2. ....	122
Једначина	7.3. ....	124
Једначина	7.4. ....	126
Једначина	7.5. ....	128
Једначина	7.6. ....	130

## НОМЕНКЛАТУРА КОРИШТЕНИХ ПОЈМОВА

---

### Списак скраћеница на српском језику

---

АБС	Агенција за безбедност саобраћаја
ПГДС	Просечан годишњи дневни саобраћај
ПДС	Просечан дневни саобраћај
ГИС	Географски информациони систем
НБ	Негативни биномни модел

---

---

### Списак скраћеница на енглеском језику

---

WHO -	World Health Organization
CARE	Community Road Accident Database
MCMC	Markov Chain Monte Carlo
MAE	Mean absolute error
RMSE	Root-mean-square deviation
AIC	Akaike information criterion
BIC	Bayesian information criterion
DIC	Deviance information criterion
OLS	Ordinary least squares
SLM	Spatial lag model
SEM	Spatial error model
SE	Standard error

---

## РЕЗИМЕ

У оквиру докторске дисертације спроведена су истраживања која су усмерена на предикцију саобраћајних незгода у урбаним срединама. Истраживања су спроведена на макро и микро нивоу у циљу идентификовања утицајних фактора на различит тип саобраћајних незгода.

У оквиру макроскопског истраживања посматране су саобраћајне зоне као просторне јединице у процесу развоја модела. Циљ истраживања је био да се идентификују утицајни фактори који су груписани око демографских карактеристика, саобраћајних карактеристика, карактеристика пута и карактеристика намене површина. Поред тога, циљ се односио и на компарацију предиктивних модела који су развијени за различите типове саобраћајних незгода. У оквиру овог истраживања посматран је укупан број саобраћајних незгода, број незгода у којима су учествовала само моторна возила као и број незгода са рањивим учесницима у саобраћају. Фреквенција саобраћајних незгода је посматрана у трогодишњем периоду (2015-2017). Предиктивни модели који су коришћени за ову анализу су просторни предиктивни модели које чини класични предиктивни модел, просторни лаг модел и простори модел грешака. Према критеријумима за оцену модела, просторни лаг модел је показао најбоље предиктивне способности код укупног броја незгода и код незгода у којима су учествовала моторна возила. Међутим, када су у питању незгоде са рањивим учесницима онда се истиче просторни модел грешака. Поред одабира модела, резултати су показали да просечна дневна путовања, величина паркинга простора, присуство петокраких раскрсница као и светлосно сигнализационе раскрснице позитивно утичу на све типове незгода. Остали фактори су показали различит утицај у зависности од посматране зависне варијабле.

Истраживање на микро нивоу односи се на развој предиктивних модела посматрајући раскрснице као просторне јединице. У оквиру овог истраживања разматран је утицај саобраћајних и геометријских карактеристика раскрсница на саобраћајне незгоде током трогодишњег периода на подручју Новог Сада. У предиктивним моделима саобраћајне незгоде представљају зависну променљиву а њих чини укупан број незгода, број незгода са моторним возилима и број незгода са рањивим учесницима. Процена коефицијената у моделима спроведена је помоћу методе максималне веродостојности и Бејзових симулација. Резултати су показали да мере изложености које представља проток моторних возила, као и присуство одређених обележја хоризонталне и вертикалне сигнализације има директан утицај на фреквенцију свих типова незгода. Поред тога, променљиве које садрже обележја присуства тротоара, разделних острва, аутобуских стајалишта, као и присуства паркинга простора у близини раскрснице имају утицај на саобраћајне незгоде. Све ове променљиве су идентификоване на основу два различита приступа који указују на сличне сетове статистичких значајних фактора.

Коначни закључак дисертације указује да развојем предиктивних модела може се предвидети фреквенција саобраћајних незгода на макро и микро нивоу, посматрајући различита обележја урбаних средина. Резултати овог истраживања могу користити субјектима који се баве саобраћајним инжењерством у циљу припреме одређених активности које су потребне за унапређење безбедности саобраћаја на анализираном подручју.

**Кључне речи:** макроскопске анализе, саобраћајне зоне, просторни модели, микроскопске анализе, раскрснице, Бејзове симулације, урбане средине

## ABSTRACT

In this Doctoral Theses are carried out researches were conducted that focused on the prediction of accidents in an urban area. Researches have been conducted at the macro and micro levels to identify factors that affect different types of traffic accidents.

Within the scope of macroscopic research, traffic analysis zones were considered as spatial units in the process of model development. The purpose of the study was to identify influential factors grouped around demographic, traffic, road and land used characteristics. In addition, the secondary objective was to compare the predictive models developed for different types of traffic accidents. This research analyzed at the total number of traffic accidents, the number of accidents involving only motor vehicles, and the number of accidents involving vulnerable road users. The frequency of accidents has been observed over a three-year period (2015-2017). The models used for this analysis were spatial predictive models comprised of the classical predictive space model, spatial lag model and spatial error model. The spatial lag model showed the best performances concerning the total number of accidents and number of motorized mode accidents, whereas the spatial error model was prominent within the number of non-motorized mode accidents. The results found that increasing Daily Vehicle-Kilometers Traveled, parking spaces, 5-legged intersections and signalized intersections increased all types of accidents. The other demographic, traffic, road and environment characteristics showed that they had a different effect on the observed types of accidents.

Micro-level research refers to the development of predictive models by analysis intersections as spatial units. The influence of traffic and geometric characteristics of intersections on traffic accidents over a three-year period in the city of Novi Sad. In predictive models, traffic accidents are a dependent variable, accounting for the total number of accidents, the number of motorized mode accidents, and the number of non-motorized mode accidents. The development of predictive functions was carried out using the method maximum likelihood and Bayesian simulations. The results showed that exposure measures represented by the average daily traffic, as well as the presence of certain features of horizontal and vertical traffic signalization, have a direct impact on the frequency of all types of accidents. In addition, variables that include the presence of sidewalks, road islands, bus stops, and the presence of parking spaces near the intersection have an impact on all accidents. All of these variables were identified on the basis of two different approaches that indicate similar sets of statistically significant factors.

The conclusion of the dissertation indicates that the development of predictive models can predict the frequency of accidents at the macro and micro levels, observing the different characteristics of urban areas. The results of this research can be used by traffic engineering entities to prepare specific activities that are required to improve traffic safety in analyzed area .

**Keywords:** macroscopic analysis, traffic analysis zones, spatial models, microscopic analysis, intersections, Bayesian simulations, urban area

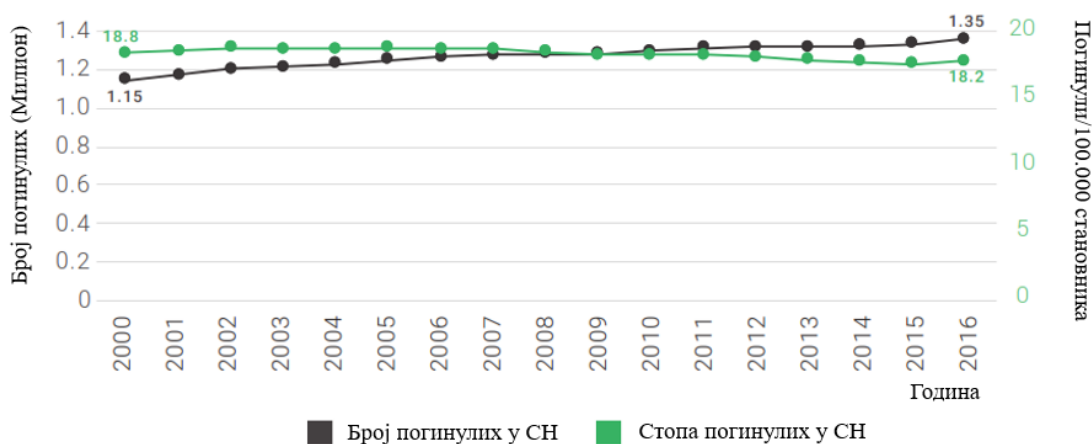
# **1. УВОД**



## 1. УВОД

У последњих неколико деценија савремени свет карактерише развој кретања материја, енергије и информација. У склопу ових карактеристика и општег развоја науке и технике, дошло је и до брзог развоја саобраћаја, који се у савременом друштву сматра једним од основних чинилаца повезивање људи. Развој саобраћаја подстиче просторну интеракцију између одређених локација кроз ефикасан и сложен саобраћајни систем. Развој саобраћајног система омогућава унапређење путне инфраструктуре што доводи до повећања мобилности људи уз одређене предности и недостатке. Поред тога, унапређење овог система има јак утицај на културу, урбанизам, економију, друштвене норме и друге појаве у друштву. Предности саобраћајног система карактерише функционисање друштва као и интензивно поље људских комуникација. Са друге стране, друштво не може лако прихватити штетне последице које прате ову корисну друштвену делатност. Недостаци саобраћајног система окупљају све непожељне и штетне појаве које настају у процесу одвијања саобраћаја. Безбедност саобраћаја представља научну дисциплину која изучава негативне ефекте и појаве у друштву. Једну од кључних негативних појава представљају саобраћајне незгоде чија је улога у морталитету савременог човечанства и разарања материјалних добара велика.

Главни циљ безбедности саобраћаја усмерен је ка смањивању последица саобраћајних незгода. У данашње време, саобраћајне незгоде представљају проблем светских размера који узрокује смртност, физичке повреде или материјалну штету. У свету око 1,24 милиона људи изгуби живот у саобраћајним незгодама на годишњем нивоу. Сваког часа око 150 живота се изгуби и неколико хиљада људи буде повређено у саобраћајним незгодама. Већина ових саобраћајних незгода се догодила у ниско и средње развијеним земљама, где је економски раст праћен са повећањем степена моторизације и становништва. Процењени економски трошкови саобраћајних незгода су од 1,5 % до 4,5 % бруто домаћег производа (WHO, 2015). Поред тога, индиректни трошкови, попут губитка продуктивности, оштећења возила и имовине, смањеног квалитета живота и других фактора, такође морају бити укључени у прорачун стварних трошкова за друштво. Све ове чињенице указују да негативне последице друмског саобраћаја представљају значајан глобални проблем који је у свету препознат на прави начин.



Слика 1.1. Број и стопа саобраћајних незгода са погинулима у свету у периоду 2000-2016. (WHO, 2018).

Утврђивање укупног броја настрадалих у саобраћајним незгодама може бити корисно за сагледавање величине проблема, потребних превентивних напора као и за процену потенцијалних здравствених ресурса. Упркос повећању апсолутног броја саобраћајних незгода, стопа смртних случајева у саобраћају на путевима остала је приближно константна и износила је 18 погинулих на 100.000 становника, током последњих 15 година (слика 1.1). Иако ово указује да се проблем не погоршава, свет је далеко од постизања одрживог развојног циља од 3,6 погинулих на 100.000 становника (UNGA, 2015). Овај циљ захтева смањење броја погинулих у саобраћајним незгодама за близу 50 % до 2020.

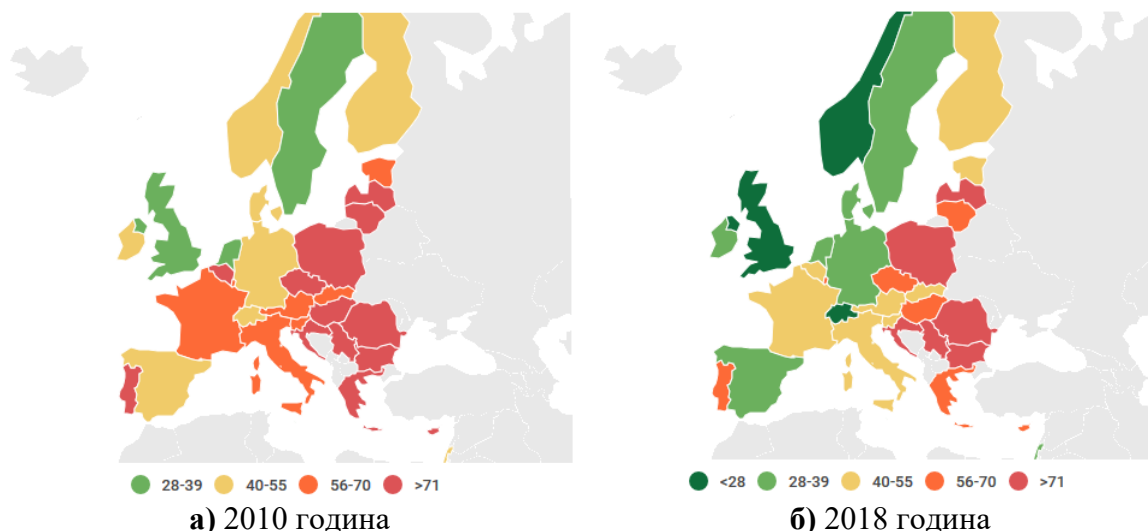
Међутим, у поређењу одређених макроскопских анализа које разматрају државе или регионе потребно је узети у обзир анализе јавног ризика. Употреба јавног ризика, или стопе смртности на 100.000 становника, детаљније одражава величину проблема него апсолутни број. Употреба апсолутних показатеља може бити погрешна, јер доводи до поређења популације која је неједнаке величине. Генерално, густина становништва у свету није једнако распоређена, поред тога у зависности од посматраног континента разликује се и стопа настрадалих у саобраћајним незгодама. На слици 1.2 приказан је јавни ризик страдања у саобраћајним незгодама по регионима света (WHO, 2018).



Слика 1.2. Погинули у саобраћајним незгодама на 100.000 становника.

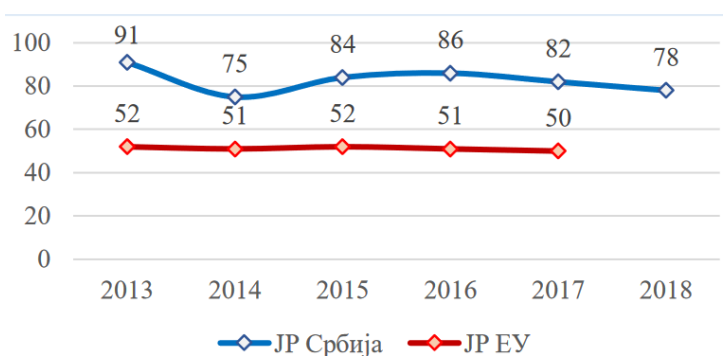
Када се сагледа ниво безбедности на светском нивоу, може се закључити да подручје Европског континента има најмању стопу погинулих у саобраћајним незгодама (слика 1.2). Ове резултате оправдавају јасно дефинисани циљеви Европске комисије да се број погинулих на путевима смањи за више од 50 % до 2010. године. Поред тога, према програму „Програм безбедности на путевима 2011-2020“, Европска Унија је поставила нови циљ да се број погинулих такође смањи за 50 % у односу на период пре 2010. године (Facts, 2016).

Анализом примењеног програма на Европском подручју, може се уочити смањена стопа погинулих 2018. године у односу на 2010. годину (слика 1.3). На слици 1.3 може се видети просторни приказ држава уз тенденцију смањења стопе погинулих у саобраћајним незгодама. Анализом је утврђена тенденција смањења стопе погинулих код земаља на северу континента за разлику од јужног дела на коме промене нису евидентирани (Adminaite et al., 2019).



Слика 1.3. Погинули у саобраћајним незгодама у односу на 1.000.000 становника у 2010. и 2018. години (Adminaite et al., 2019).

Јавни ризик у југоисточном делу Европе остаје не промењен последње две деценије. Ово изискује посебну пажњу и разматрање проблема безбедности саобраћаја на територији Бугарске, Румуније, Хрватске и Србије (Adminaite et al., 2019). Јавни ризик у овим земљама износи преко 71 погинулих/1.000.000 становника. Када је у питању Република Србија, на слици 1.4 приказан је однос вредности јавног ризика са земљама Европске уније по годинама (ABS, 2019).



Слика 1.4. Јавни ризик погинулих у саобраћајним незгодама у Србији и земљама Европске уније (ABS, 2019).

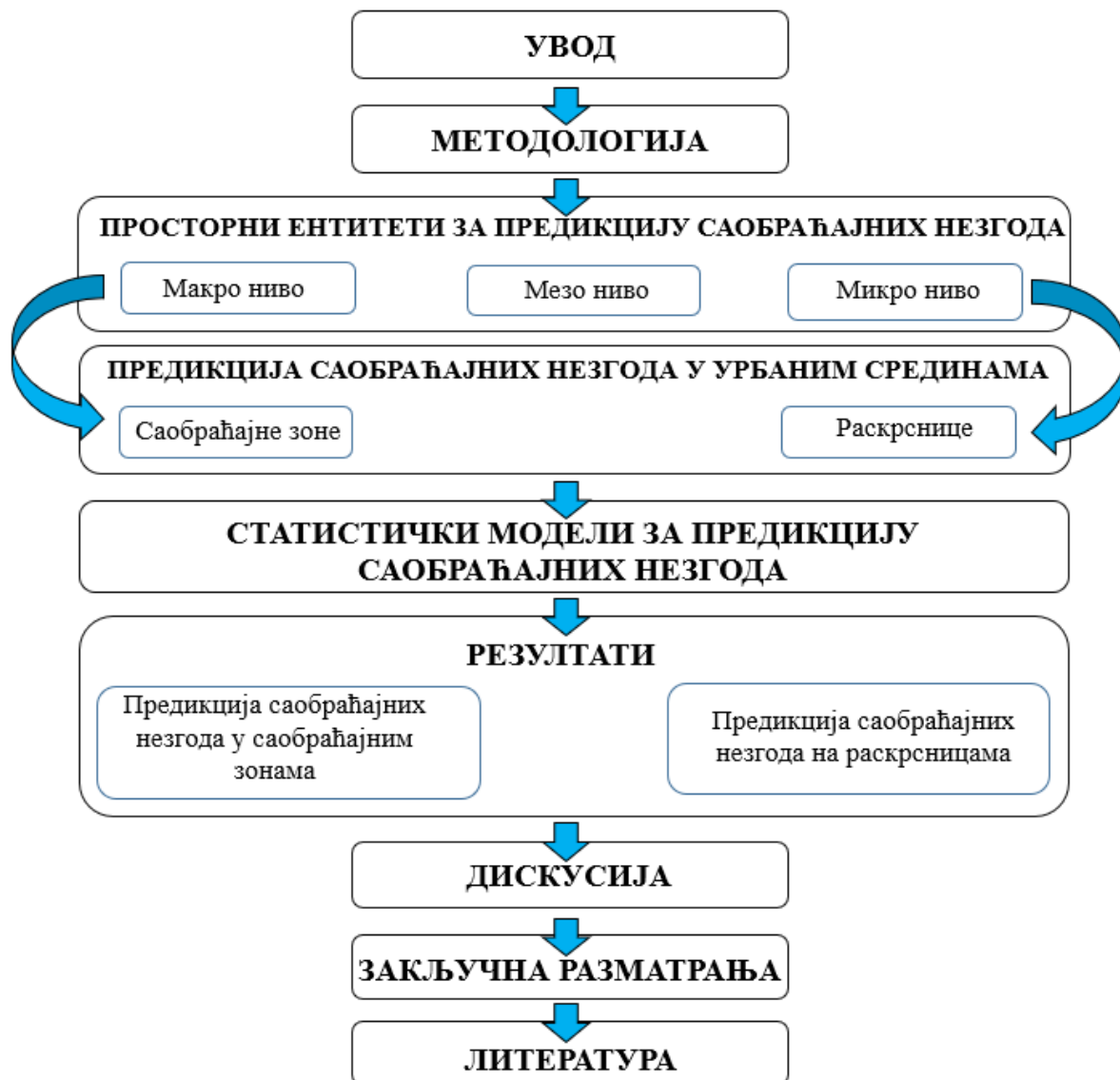
У анализираном петогодишњем периоду (2014-2018.) на подручју Србије се догодило 177.427 саобраћајних незгода у којима је погинуло 2.867 лица. Посматрајући сваку годину појединачно, највећи број настрадалих лица се догодио 2017. године и он чини око 22 % од укупног броја настрадалих у анализираном периоду. Поред тога, у циљу прецизнијег дефинисања постојећег стања, анализа безбедности саобраћаја може да се сведе на ниво локалне заједнице посматрајући различите просторне нивое.

Анализа проблема безбедности саобраћаја на подручју локалних заједница може се сагледати са макро, мезо и микро аспекта. Сви просторни нивои могу се применити код анализе саобраћајних незгода у урбаним и руралним срединама. Разлика између урбаних и руралних средина огледа се у садржају и разноликости утицајних карактеристика које је потребно посебно испитати. Због сложености и атипичности урбаних средина, потребно је испитати све утицајне факторе са различитих просторних нивоа и донети

поуздане закључке који обухватају одређене мере и активности у циљу смањења фреквенције саобраћајних незгода.

### 1.1. СТРУКТУРА ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру овог поглавља приказана је структура докторске дисертације кроз основна поглавља и потпоглавља рада (Слика 1.5).



Слика 1.5. Структура докторске дисертације.

1. Прво поглавље садржи уводни део рада, где су представљане саобраћајне незгоде као глобални друштвени проблем.
2. Друго поглавље се односи на методолошки приступ спровођења истраживања. У оквиру овог поглавља дати су: проблем безбедности саобраћаја у урбаним срединама, предмет и циљеви рада, друштвена и научна оправданост, истраживачке хипотезе и примењен метод истраживања.
3. Треће поглавље се односи на преглед досадашњих истраживања која се односе на просторне анализе безбедности саобраћаја на одређеним подручјима. У оквиру овог поглавља дефинисан је приступ сагледавања проблема са макро, мезо и микро

- просторног нивоа.
4. Четврто поглавље садржи преглед досадашњих истраживања која су спроведена са макро и микро нивоа. У поглављу су систематизоване специфичне карактеристике које утичу на агрегиран број саобраћајних незгода које су се догодиле у саобраћајним зонама и на раскрсницама.
  5. Пето поглавље обухвата статистичке моделе који су предвиђени за предикцију саобраћајних незгода у урбаним срединама.
  6. Шесто поглавље обухвата испитивање утицајних фактора на агрегиран број саобраћајних незгода у саобраћајним зонама.
  7. Седмо поглавље обухвата испитивање утицајних фактора на агрегиран број саобраћајних незгода на раскрсницама.
  8. Осмо поглавље се односи на дискусију истраживања. Овде је представљен критички осврт досадашњих истраживања, тренутног истраживања као и компарација резултата са другим истраживањима која су спроведена на другим просторима.
  9. Девето поглавље представља закључак спроведеног истраживања. У поглављу је истакнут значај добијених резултата као и њихов допринос у циљу побољшања безбедности саобраћаја у анализираној урбаној средини.
  10. Десето поглавље садржи списак литературе која је коришћена за израду дисертације.

## **2. МЕТОДОЛОГИЈА**

## 2. МЕТОДОЛОГИЈА

У оквиру овог поглавља представљен је основни концепт методологије који је разматран у циљу реализације истраживања. Сагледавањем одређених специфичности истраживања, методологија је сагледана кроз одређене облике и начине који доводе до објективног и системског научног сазнања. Почетак сагледавања методолошког приступа односи се на техничке и логичке методе које се користе у многим научно-истраживачким областима. Техничке методе спровођења истраживања односе се на организацију, посматрање, спровођење и тачно прикупљање података. Други приступ, тачније логичке методе односе се на систематизацију посматраних и добијених података, извођење закључака као и креирање научних теорија и доказа.

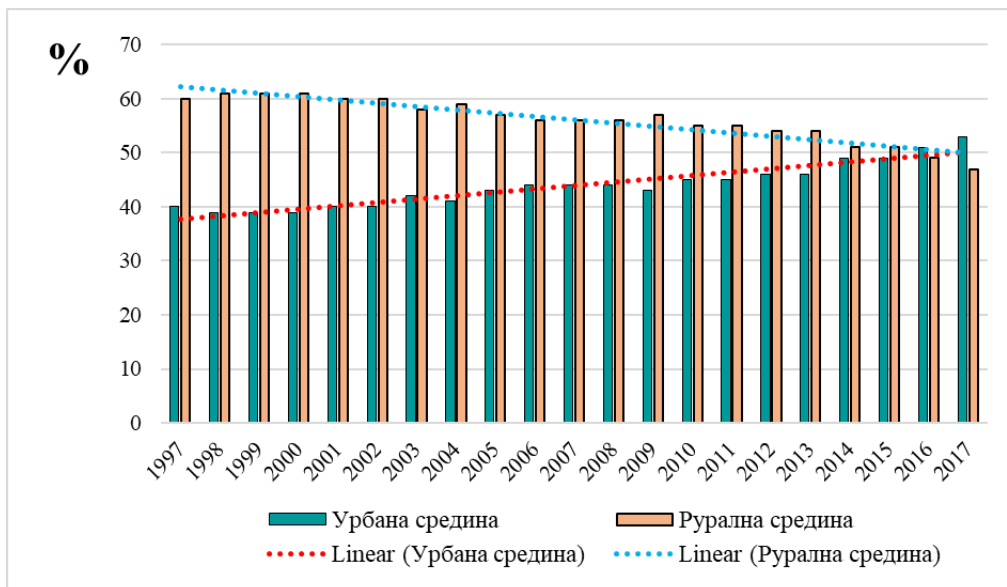
Суштина логичких и техничких метода односи се на различита поља науке која између осталог имају основну улогу у проверавању одређених чињеница као и да проналазе нове научне чињенице. У оквиру разматрања проблема саобраћајних незгода, разматрани су основни критеријуми за вредновање научног доприноса у овој области. Основни критеријуми за вредновање науке односе се на формалност, свеобухватност, уједначеност, извесност, тачност, креативност и научну саморегулацију (Tzeng and Jackson, 1991). На основу ових критеријума, у овом поглављу дефинисани су проблем, предмет и циљ истраживања, као и истраживачке хипотезе и методе. Поред тога истакнута је друштвено научна оправданост спровођења истраживања.

### 2.1. ПРОБЛЕМ БЕЗБЕДНОСТИ САОБРАЋАЈА У УРБАНИМ СРЕДИНАМА

Последњих година забележен је пораст развоја урбаних средина који уједно представља огромне изазове за безбедно функционисање саобраћајног система. У досадашњим анализама утврђено је да број становника у урбаним срединама расте око 4 % годишње, а процењује се ће до 2045. године више од половине становништва живети у градовима (UNDESA, 2006). Како би се задовољио овај раст, многи градови повећавају капацитет својих саобраћајница што је често на штету безбедности свих учесника у саобраћају. Као резултат тога, велики број становника губи свој живот или буде повређен у саобраћајним незгодама што доводи до друштвених, економских и здравствених оптерећења која намећу велика ограничења одрживом развоју.

Урбане и руралне средине имају различите карактеристике посматрајући густину уличне мреже, намену површина као и омогућавање различитих начина путовања. Због ових карактеристика фреквенција саобраћајних незгода се разликује између руралних и урбаних средина. Страдање рањивих учесника у саобраћају је учесталије у урбаним срединама за разлику од руралних средина где је израженије страдање возача моторних возила. Према истраживању које је спроведено на подручју Сједињених Америчких Држава (САД), проценат погинулих у саобраћајним незгодама које су се догодиле у урбаним срединама указује на значајан пораст протеклих неколико година (слика 2.1) (FARS, 2017).

Када је у питању подручје Европске уније, у саобраћајним незгодама које су се догодиле у урбаним срединама смртно страда око 11.000 становника сваке године. Поред тога, много већи број становника буде тешко повређен у саобраћајним незгодама. У последњих неколико година, према статистичким извештајима који разматрају незгоде у урбаним срединама, забележено је смањење фреквенције саобраћајних незгода, што је испод просека у односу на посматрани период (CARE, 2019).



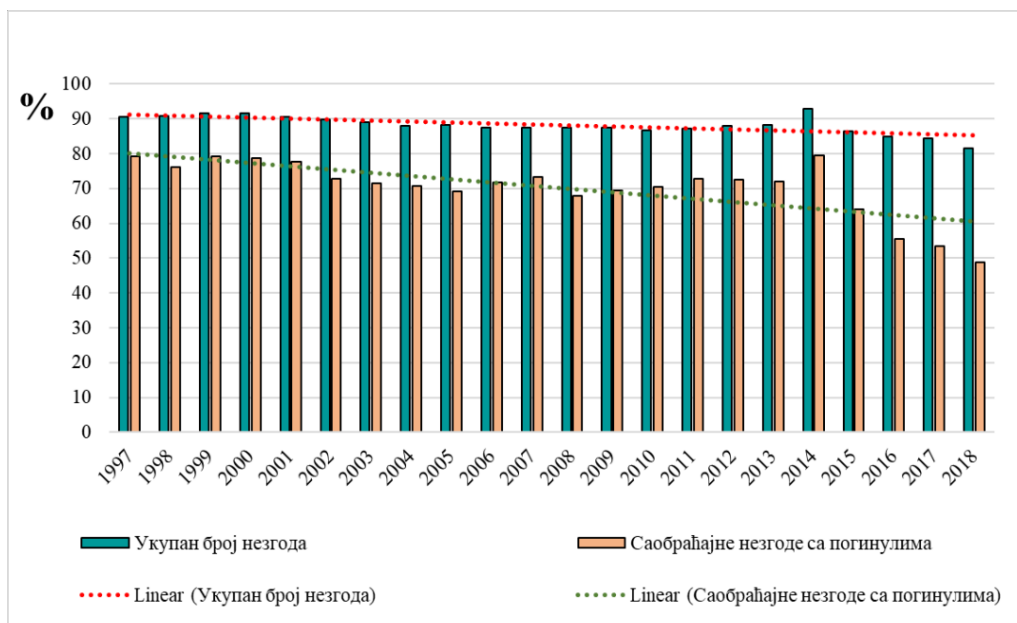
Слика 2.1. Процент погинулих у саобраћајним незгодама у руралним и урбаним срединама на подручју САД, 1997-2017. (CARE, 2019).

Упркос значајном напретку у прошлости, број смртних случајева и тешких повреда услед саобраћајних незгода је и даље висок. У земљама Европске Уније, око 40 % смртних случајева догоди се на путевима који пролазе кроз урбану средину. Међутим, анализом безбедности саобраћаја током десетогодишњег периода (2000-2009.), утврђено је да се број саобраћајних незгода са смртним исходом смањило за 32 % у урбаним срединама. Када је у питању укупан број незгода, евидентирано је смањење за 38 % у истом анализираном периоду (CARE, 2019).

Број саобраћајних незгода у одређеним урбаним срединама зависи од величине посматране средине као и броја становника који живи у урбаним условима. Сагледавањем карактеристика урбане средине често се доводи у итеракцију са рањивим учесницима у саобраћају. Рањиви учесници у саобраћају формирају мешовите групе становништва у односу на пол, старост и социоекономски статус. Анализом незгода према полу утврђено је да становништво мушког пола, обично деца и стари, највише учествују у саобраћајним незгодама (Clifton and Livi, 2005). Када је у питању старосна структура становништва, у саобраћајним незгодама на подручју Европске Уније, рањиви учесници у саобраћају најчешће страдају у старосној групи преко 65 година (European Commission, 2015). Са друге стране, социо-економски статус становништва има велики утицај на саобраћајне незгоде у урбаним срединама. Генерално, становништво које потиче са простора где преовладава нижи економски статус, има већи ризик за учешће у саобраћајним незгодама. Roberts et al. (1995) су истражили да деца са мањим социоекономским статусом, имају двоструко већу вероватноћу да ће учествовати у саобраћајним незгодама него када су у питању деца са већим социоекономским статусом.

Анализом саобраћајних незгода на подручју Србије утврђен је много већи проценат саобраћајних незгода које су се догодиле у урбаним срединама него што је то случај са земљама у Европској унији. Према подацима Агенције за безбедност саобраћаја (ABS, 2019), у анализираном периоду 1997 – 2018., у урбаним срединама на подручју Србије, догодило се око 88 % незгода од укупног броја саобраћајних незгода. На слици 2.2. приказана је расподела саобраћајних незгода у урбаним срединама на подручју Србије.

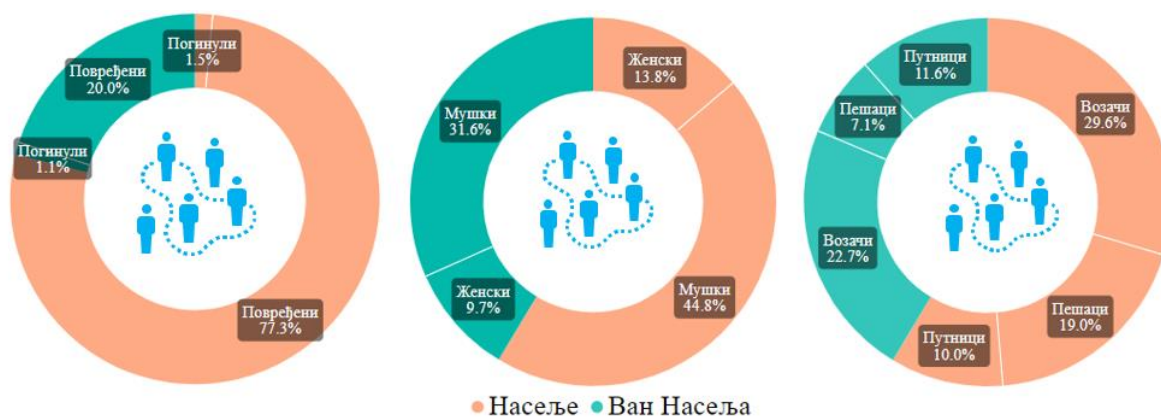




Слика 2.2. Процент саобраћајних незгода у урбаним срединама на подручју Србије, 1997-2018. (ABS, 2019).

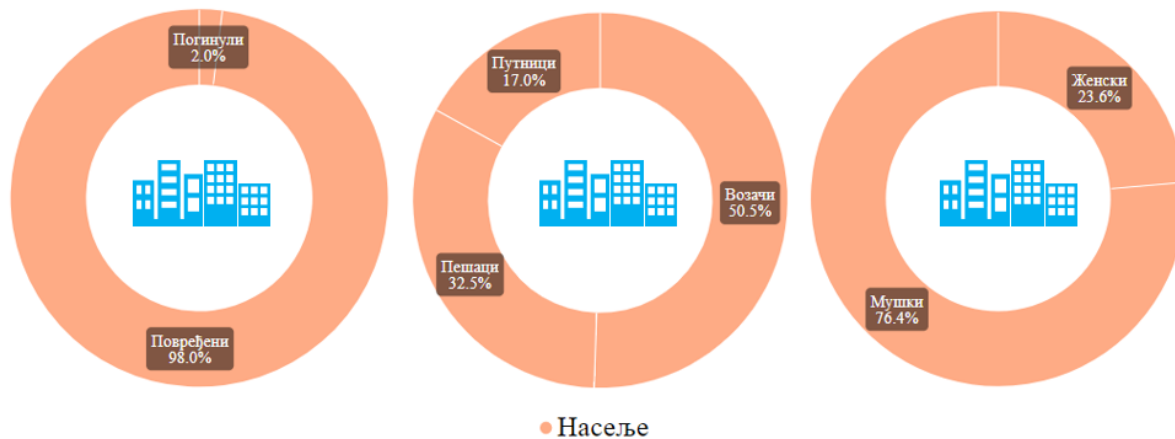
Евидентан је велики проценат саобраћајних незгода у урбаним срединама па из тог разлога потребно је усмерити одређене активности како би се број незгода смањио. Када су у питању саобраћајне незгоде са погинулима, у истом анализираном периоду, на подручју Србије догодило се у просеку око 70 % незгода у урбаним срединама. У поређењу са земљама Европске Уније, на подручју Србије се догоди значајно више незгода у урбаним срединама. Ово може оправдати чињеница да је Србија земља у развоју и да је потребно уложити додатне напоре како би се број незгода смањио (ABS, 2019).

За разлику од анализа које су спроведене на националном нивоу, захтева се потреба за анализом саобраћајних незгода посматрајући одређене урбане средине у циљу прецизнијег сагледања проблема безбедности саобраћаја на подручју Србије. Када су у питању последице саобраћајних незгода које су се догодиле у насељу и ван насеља на подручју Србије, може се рећи да је већи број погинулих и повређених лица забележен у насељеним местима (слика 2.3).



Слика 2.3. Процентуално учешће погинулих и повређених лица у саобраћајним незгодама према полу и својству учесника у насељу и ван насеља, Република Србија, 2014-2018.

Ови резултати указују на потребу да се анализира број саобраћајних незгода у насељу као и да се утврде утицајни фактори који утичу на њих. Разматрањем различитих специфичности незгода у насељу, може се закључити да у великом броју незгода учествују возачи (50,5 %), пешаци (32,5 %) и путници (17 %). Ови резултати представљају озбиљан проблем урбаних средина на подручју Србије, који је потребно детаљно испитати (слика 2.4).



Слика 2.4. Процентуално учешће погинулих и повређених лица у саобраћајних незгодама према полу и својству учесника у насељу, Република Србија, 2014-2018.

## 2.2. ЦИЉЕВИ И ЗАДАЦИ ИСТРАЖИВАЊА

У циљу припреме одређених мера потребно је анализирати факторе који доприносе фреквенцији саобраћајних незгода у урбаним срединама. Анализа фактора може се утврдити предиктивним процесима у зависности од просторних нивоа. До сада су развијени многи предиктивни модели који се односе на различите просторне ентитете. Разматрањем просторних ентитета утврђено је да велики број просторних јединица има примену код анализе незгода у урбаним срединама. На основу прегледа литературе, уочено је да предикција саобраћајних незгода у урбаним срединама није довољно истражена у оквиру различитих просторних јединица. Приступ проблему може се остварити помоћу систематизације и утврђивања одређених фактора који утичу на фреквенцију саобраћајних незгода. Овај начин анализе може бити од велике помоћи субјектима који су посвећени безбедности саобраћаја у циљу доношења мера како би смањили проблем безбедности саобраћаја.

Предмет истраживања односи се на предикцију саобраћајних незгода са различитих просторних ентитета у урбаним срединама. Анализа безбедности саобраћаја у урбаним срединама је представљена кроз утврђивање утицаја појединих фактора на фреквенцију саобраћајних незгода са макро и микро нивоа. Модели који су коришћени у ову сврху односе се на предиктивне моделе који су засновани на регресионим анализама који се прилагођавају просторним, временским или случајним ефектима. Улазни параметри истраживања чине специфичне карактеристике локације, а излазни параметри су предвиђен и очекиван број саобраћајних незгода.

У складу са предметом рада, главни циљ истраживања односи се на идентификацију фактора који утичу на фреквенцију саобраћајних незгода, користећи податке о саобраћајним незгодама у претходном периоду. Фактори који су такође укључени у анализу односе се на демографске и социоекономске карактеристике, саобраћајне карактеристике, геометријске карактеристике и карактеристике намене површина у

зависности од посматране просторне јединице. Како би се реализовао планирани циљ, потребно је реализовати следеће задатке:

1. Детаљно истражити и анализирати досадашњу литературу која се односи на развој предиктивних модела;
2. Идентификовати факторе који имају статистички значајан утицај на фреквенцију саобраћајних незгода у досадашњим истраживањима;
3. Анализирати ограничења постојећих предиктивних модела у различитим просторним и временским јединицама;
4. Припремити и креирати базу података за процес предикције саобраћајних незгода.
5. Развити одговарајуће предиктивне моделе у циљу одређивања најбољих предиктивних перформанси у урбаним срединама;
6. Проверити поузданост примењених предиктивних модела;
7. Утврдити факторе који утичу на фреквенцију саобраћајних незгода са макро и микро нивоа у одабраној урбаној средини;
8. Дефинисати закључке и правце даљих истраживања.

### 2.3. ДРУШТВЕНА И НАУЧНА ОПРАВДАНОСТ

У последњих неколико година уложени су напори да се обезбеди одржив концепт управљања безбедношћу саобраћаја на глобалном нивоу. У циљу сагледавања овог концепта успостављен је приступ безбедном систему. Он представља холистички поглед, који пружа оквир за процену, вођење и побољшање безбедности саобраћаја на путевима. Оновни принципи приступа безбедном систему су: људи чине грешке, људи су подложни повредама, подељена одговорност, смрт и тешке повреде нису прихватљиве и превентивно vs. реактивно. Како би се спровели основни принципи потребно је укључити економске анализе, планирање, праћење, евалуацију и свеобухватно управљање и руковођење системом. Поменути алати чине елементе језгра овог приступа у различитим областима деловања. Кључне акционе области деловања на безбедност саобраћаја су:

1. Планирање коришћења земљишта;
2. Инжењерство и пројектовање улица;
3. Побољшање мобилности;
4. Управљање брзинама;
5. Закони, правилници и остале правне норме;
6. Едукација и изградња капацитета;
7. Технологија и пројектовање возила;
8. Брз одзив служби и бригаа о повређенима након саобраћајних незгода.

Према Директиви 2008/96/ЕК о управљању путном инфраструктуром, једна од основних процедура јесте процена утицаја пута на безбедност саобраћаја (Sacchi et al., 2012). Утврђивање фактора пута и околине представља један од првих корака савремене анализе безбедности саобраћаја, што указује на изузетну важност како за управљаче путне инфраструктуре тако и за учеснике у саобраћају. Из овог разлога потребно је применити савремене процедуре и алате у циљу идентификовања специфичних фактора који утичу на фреквенцију саобраћајних незгода у урбаним срединама. Поред тога, уз помоћ предиктивних модела може се вршити и процена саобраћајних незгода на посматраним локацијама у циљу сагледавања проблема са научног аспекта.

## 2.4. ИСТРАЖИВАЧКЕ ХИПОТЕЗЕ

На основу анализираних литературе која се односи на предикцију саобраћајних незгода у урбаним срединама формиране су полазне хипотезе које представљају срж истраживања. Полазне хипотезе су следеће:

1. *Хипотеза 1:* Анализа и предикција саобраћајних незгода у урбаним срединама може се спровести помоћу одговарајућих предиктивних модела;
2. *Хипотеза 2:* Различити просторни ентитети могу се користити за предикцију саобраћајних незгода у урбаним срединама;
3. *Хипотеза 3:* Развој модела са макро и микро нивоа може се спровести анализом саобраћајних зона и раскрсница;
4. *Хипотеза 4:* Одређене мере изложености побољшавају предиктивне перформансе модела.
5. *Хипотеза 5:* Различите просторне јединице могу да апроксимирају потребне мере изложености;
6. *Хипотеза 6:* Демографске и социоекономске карактеристике имају значајну улогу код настанка саобраћајних незгода;
7. *Хипотеза 7:* Саобраћајне карактеристике имају утицај на агрегиран број саобраћајних незгода посматрајући саобраћајне зоне и раскрснице;
8. *Хипотеза 8:* Карактеристике уличне мреже имају утицај на настанак саобраћајних незгода у саобраћајним зонама;
9. *Хипотеза 9:* Геометријске карактеристике пута и околине имају утицај на настанак саобраћајних незгода на раскрсницама;
10. *Хипотеза 10:* Карактеристике намене површина утичу на агрегиран број саобраћајних незгода у саобраћајним зонама које се налазе у урбаној средини.

## 2.5. МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

У циљу откривања научних чињеница потребно је сагледати природне појаве у друштву на основу одређеног узорка. Ове појаве могу се сагледати кроз одговарајуће методе преко којих се долази до конзистентних закључака. У оквиру спровођења истраживања потребно је размотрити основне нивое који у себи садрже одређене методе. Овај процес може се реализовати преко четири нивоа која се могу представити кроз дескриптивни, класификовани, објашњени и предвиђени ниво.

Дескриптивни ниво представља најнижи ниво у којем је пре интерпретације резултата дат опис добијених резултата користећи основне статистичке параметре. Класификовани ниво односи се на одређена груписања резултата који се могу формирати као посебне целине. У оквиру овог нивоа сагледана је структура резултата, где су резултати хијерархијски груписани. Ниво који се односи на објашњавања и интерпретацију резултата усклађен је са основним приступима који се односе на утврђивање повезаности између појава као и утврђивања узорка како је дошло до одређених појава. Последњи ниво указује на предикцију одређених догађаја на основу претходног посматрања у одређеном временском интервалу.

У циљу реализације истраживања потребно је дефинисати методолошки оквир који ће обезбедити поуздане резултате. Опште методе научног истраживања које ће бити разматране у оквиру израде дисертације су:

1. Технике анализе досадашњих истраживања. У овом делу разматрана су предходна истраживања која се односе на ужу област приступа проблему. Поред тога, сагледавају се и технике прикупљања података у циљу утврђивања везе

између посматраних обележја.

2. Методе анализе досадашњих истраживања. Овај део се односи на системске примене начина закључивања кроз методе: индукције, дедукције, анализе, синтезе, апстракције, конкретизације, генерализације и класификације.
3. Опште научне и техничке методе. Ове методе се односе на прикупљање и анализу података. У оквиру ове методе обухваћене су:
  - a) Методе доказивања – начин утврђивања поузданости одређене претпоставке;
  - b) Математичка метода – истраживачки поступак који се састоји од математичких модела, алата, операција и функција;
  - c) Статистичка метода – представља поступак који омогућава откривање везе између посматраних обележја као и оцене поузданости посматраних података.

У оквиру реализације истраживања и примене одговарајућих метода неопходно је користити одређене програмске алате. Као помоћ у раду користиће се програмски алати који се односе на просторне, статистичке и математичке методе. У оквиру просторних метода обухваћена је припрема и анализа просторних података у програмском пакету „ArcGIS“ (верзија 10.6). Статистичке методе споводиће се у програмским пакетима „STATA“ и „R statistics“, а математичке методе у програмском пакету MATLAB.

### **3. ПРОСТОРНИ ЕНТИТЕТИ ЗА ПРЕДИКЦИЈУ САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА**

### 3. ПРОСТОРНИ ЕНТИТЕТИ ЗА ПРЕДИКЦИЈУ САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА

#### 3.1. УВОД

Саобраћајне незгоде су најчешћи показатељ постојећег стања у процесу управљања безбедности саобраћаја на путевима. У циљу дефинисања постојећег стања, саобраћајне незгоде чине један од основних улазних параметара у многим истраживачким сферама безбедности саобраћаја. Поред тога, саобраћајне незгоде се такође могу разматрати из перспективе која је усмерена на случајне процесе. Ово потврђује и чињеница да су саобраћајне незгоде окарактерисане као случајни догађаји што захтева додатне напоре у приступу њихове аналитике. Саобраћајне незгоде као случајни догађаји често могу бити резултат различитих утицајних фактора у зависности од просторног и временског приступа. Идентификација утицајних фактора на поједине саобраћајне незгоде доводи до непоузданих закључака, што указује на потребу да се посматра агрегиран број саобраћајних незгода. Агрегација саобраћајних незгода може се спровести на различитим просторним ентитетима у зависности од циља спровођења истраживања.

Агрегиран број саобраћајних незгода на просторним ентитетима може се предвидети на одређеном посматраном подручју уз помоћ предиктивних модела. Предиктивни модели су засновани на статистичком приступу који сагледава варијације у броју незгода и низа мерљивих узрочних фактора. Сврха примене предиктивних модела је идентификација фактора који значајно доприносе настанку саобраћајних незгода на анализираним просторним ентитетима. Приступ примене предиктивних модела је веома популаран последњих година, тако да је направљен и значајан напредак у статистичким методологијама (Lord & Mannering, 2010).

Први корак у примени предиктивних модела представља спровођење просторне анализе саобраћајних незгода у циљу одређивања посматраних просторних ентитета и агрегације незгода на тим ентитетима. Одређивање посматраних ентитета зависи од природе истраживања као и подручја на коме је потребно да се спроведе поступак анализе незгода. У досадашњим истраживањима анализирани су различити просторни ентитети који се могу систематизовати у три категорије које чине: макро ниво, мезо ниво и микро ниво (табела 3.1) (Li and Wang, 2017).

Табела 3.1. Просторне јединице у оквиру три категорије посматраних нивоа

	Ниво	Просторна јединица	
	Макро ниво	Просторне површинске јединице	
	Мезо ниво	Део уличне мреже или простора	
	Микро ниво	Деонице Раскрснице	

Прву категорију обухватају анализе саобраћајних незгода које се врше на макро нивоу. Према досадашњим истраживањима утврђено је да на саобраћајне незгоде често утичу различита обележја која су карактеристична за посматране просторне јединице (Abdel-Aty et al., 2013; Lee et al., 2014a,b; Levine et al., 1995; Pljakić et al., 2019a и Quddus, 2008). Макроскопске анализе омогућавају шири спектар приказа резултата на основу којих се могу предложити дугорочне мере засноване на спровођењу политике безбедности саобраћаја, доношење правних норми, организацији контроле саобраћаја, спровођењу одређених кампања и едукација као и инжењерским мерама.

Другу категорију чине мезоскопске анализе које карактеришу умањене просторне јединице у односу на прву категорију. Ове просторне јединице се комбинују са макроскопским подацима и посматрају одређене делове уличне мреже. Мезоскопске анализе се обично користе за урбана подручја где се узима у обзир повезаност између деоница и раскрсница као и утицај суседне уличне мреже на посматране ентитете (Li and Wang, 2017).

Трећу категорију представљају анализе које се заснивају на микро нивоу. Анализа на микро нивоу се фокусира на одређене објекте на путевима као што су деонице и објекти пута, раскрснице, кривине, тунели, мостови, зоне радова на путу, итд. На основу овог приступа спроведена су многа истраживања где је испитана безбедност саобраћаја на микро нивоу (Abdel-Aty and Radwan, 2000; Milton and Mannering, 1998; Poch and Mannering, 1996; Pljakić et al., 2018b, 2019b; Shankar et al 1995).

## 3.2. МАКРОСКОПСКЕ АНАЛИЗЕ

У последњих неколико деценија улажу се велики напори да се безбедност учесника у саобраћају значајно размотри при дугорочном процесу планирања саобраћаја на одређеном простору. У многим досадашњим планским и законским документима истиче се важност укључивања безбедности саобраћаја кроз спровођење макроскопских анализа (Houston, 1998; Washington et al., 2006). Генерално, макроскопске анализе у безбедности саобраћаја имају за циљ да пронађу везу између карактеристика посматраних просторних јединица и саобраћајних незгода које су се догодиле у одређеној просторној јединици (Levine et al., 1995). Поред тога, анализе на макро нивоу обухватају простор површинских размера. Досадашња истраживања често су обухватала просторне јединице као што су државе (Aguero-Valverde and Jovanis, 2006), региони и области (Amoros et al. 2003; Noland and Oh, 2004; Huang et al., 2010), јединице поштанске мреже (Stamatiadis and Puccini, 2000; Lerner et al., 2001; Lee et al., 2014b), саобраћајни дистрикти (Cai et al., 2017), саобраћајне зоне (Ng et al., 2002; Hadayeghi et al., 2006; Abdel-Aty et al., 2011; Siddiqui and Abdel-Aty, 2012; Pulugurtha et al., 2013) и блокови (LaScala et al., 2000; Loukaitou-Sideris et al., 2007; Wier et al. 2009; Ukkusuri et al., 2011; Abdel-Aty et al., 2013; Wang and Kockelman, 2013).

### 3.2.1. Државе и окрузи

Највеће просторне јединице за макроскопске анализе у безбедности саобраћаја представљају државе, региони и окрузи. Показатељи безбедности саобраћаја се разликују између земаља, па је веома значајно анализирати ове разлике како би се боље разумели фактори који утичу на саобраћајне незгоде. Међутим, ове анализе имају и одређена ограничења која се односе на методе прикупљања података које се разликују између држава. Ова ограничења се не узимају у обзир при поређењу одређених области



у оквиру једне државе (Amoros et al., 2003). Користећи ове предности, Amoros et al. (2003) су спровели истраживање које се односи на утврђивање разлика између осам области у Француској (слика 3.1). Циљ истраживања је анализа безбедности саобраћаја у посматраним областима како би се боље идентификовали могући фактори који доприносе саобраћајним незгодама. У истраживању су укључене две групе фактора, прва се односи на расподелу и категоризацију путне мреже, а друга представља групу социо-економских карактеристика посматране области. Резултати истраживања показали су да постоје значајне разлике између анализираних области. Према досадашњим истраживањима интеракције између социо-економских карактеристика и саобраћајних незгода имају смисла јер људи имају тенденцију да учествују у саобраћајним незгодама у областима у којима живе (Laumon et al., 1997).



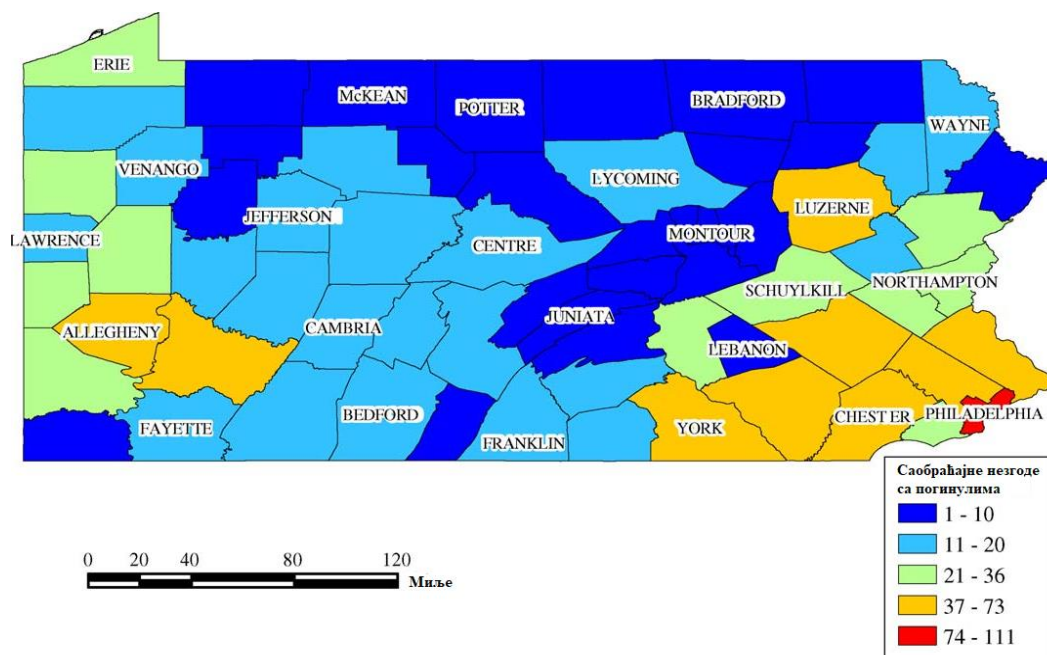
Слика 3.1. Анализирани просторне јединице у Француској (Amoros et al., 2003)

Noland and Oh (2004) су спровели истраживање које је имало за циљ да утврди да ли различите промене у инфраструктури путне мреже могу бити повезане са променом фреквенције саобраћајних незгода у држави Илиноис. Анализа је обухватила 102 округа у којима станује око 12,4 милиона становника. Различите карактеристике инфраструктуре прикупљене су за државне путеве на нивоу једног округа. Ово укључује: укупну дужину коловоза, просечан број саобраћајних трака, просечну ширину разделних острва као и димензије хоризонталних и вертикалних кривина. Анализа истраживања спроведена је применом негативног биномног модела где су резултати показали да већина посматраних карактеристика не утиче на фреквенцију саобраћајних незгода. Статистички значајне променљиве које утичу на фреквенцију незгода су просечан број саобраћајних трака и просечна ширина банкина. Аутори су на основу добијених резултата закључили да је потребно укључити и додатне емпиријске анализе како би се адекватно испитао утицај других фактора на појаву саобраћајних незгода. Недостаци истраживања су недовољне базе података, посебно када су у питању фактори и околности настанка саобраћајних незгода, као и карактеристике учесника у саобраћају и возила.

Када су у питању рањиви учесници у саобраћају, Noland and Quddus (2004) су анализирали факторе који утичу на саобраћајне незгоде у којима су учествовали пешаци и бициклисти, у периоду од 20 година (1979-1998.) у Великој Британији. За потребе

истраживања прикупљени су подаци са 11 стандардних статистичких региона. База података је обухватала карактеристике пута, податке о регистрованим моторним возилима и социодемографске карактеристике становништва. Утицај фактора испитан је применом негативног биномног модела, где су аутори посебно анализирали саобраћајне незгоде у којима су учествовали пешаци и бициклисти. Аутори су дошли до закључка да су озбиљне повреде пешака повезане са подручјима са малим приходима, дужином путева, конзумирању алкохола по глави становника као и густином становништва.

Aguero-Valverde and Jovanis (2006) су развили просторне моделе како би испитали утицај социоекономских фактора, саобраћајних фактора и фактора окружења на фреквенцију саобраћајних незгода на путевима у Пенсилванији (слика 3.2). Посебна пажња у овом раду је усмерена ка укључивању времена као предикторске варијабле и испитивању просторне корелације између суседних округа. У раду су упоређени резултати који су добијени пуном Бајесовом хијерархијском анализом и традиционалним приступом користећи негативну биномну расподелу. Окрузи са већим процентом становништва са малим приходима, већим проценатом становништва по групама (0-14, 15-24 и преко 64 година), дужим пређеним километрима и већом густином путне мреже представљају округ са повећаним ризиком страдања у саобраћају. Укупна количина падавина представља значајни фактор у негативном биномном моделу, али са друге стране није значајан у пуном Бајесовом моделу. Поред тога, просторна корелација, временски аспекти и просторно-временска интеракција су значајни код пуног Бајесовог модела.



Слика 3.2. Графички приказ анализираних просторних јединица, Пенсилванија, 2000. (Aguero-Valverde and Jovanis, 2006)

Према критеријумима за оцену модела, аутори су истакли да пун Бајесов модел има боље предиктивне вредности. Ово се може оправдати чињеницом да пун Бајесов хијерархијски модел узима у обзир просторну корелацију између посматраних јединица која указује на боље предиктивне перформансе модела када се посматрају веће просторне јединице.

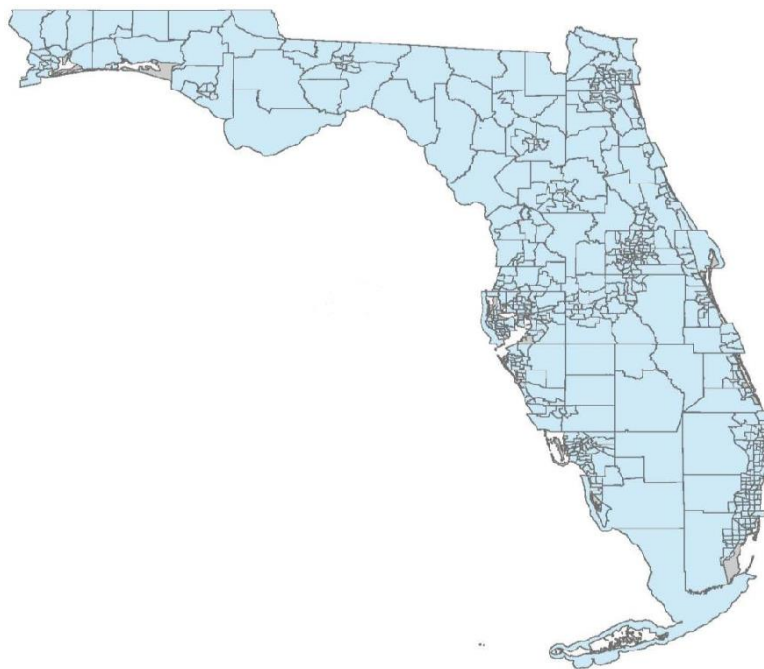
### 3.2.2. Просторне јединице поштанске мреже

Јединице поштанске мреже представљају просторне јединице на подручју једне државе у којима важи унифицирани број додељен и коришћен од стране поштанских служби. Подаци којима располажу поштанске службе често су обезбеђени из пописа становништва укључујући информације о пребивалишту становника на националном нивоу што омогућава ширу дисперзију истраживања на посматраним ентитетима. На основу доступности података, поједина истраживања су заснована на анализи саобраћајних незгода као и на просторној расподели путовања од места незгоде до адресе пребивалишта (Blatt and Furman, 1998). Са друге стране, многи аутори су утврдили утицај демографских и социо-економских карактеристика на агрегиран број саобраћајних незгода у оквиру јединица поштанске мреже (Stamatiadis and Puccini, 2000; Lerner et al., 2001; Lee et al., 2013; Lee et al., 2014b).

Lee et al. (2013) су спровели истраживање у циљу утврђивања утицаја демографских и социо-економских фактора на саобраћајне незгоде. Ово истраживање је реализовано у девет округа на подручју централне Флориде, где је посматран укупан број незгода, незгоде са тешким последицама, незгоде са пешацима и незгоде са бициклистима. Просторне јединице у овом истраживању представљају површине које су дефинисане према јединицама поштанске мреже. Анализа је спроведена применом традиционалних предиктивних модела где је укључено 26 променљивих које представљају: демографске карактеристике, социо-економске карактеристике, начин путовања становништва, време путовања становништва и локација стамбених објеката. Статистички значајне варијабле за све типове саобраћајних незгода су старост становништва, етничка припадност, просечни доходак по домаћинству, поседовање стамбеног објекта, начин путовања на посао, просечно време путовања на посао, као и карактеристике локације. Аутори су анализирали само карактеристике пребивалишта где су изостављене физичке карактеристике локације, што представља ограничења ове студије.

### 3.2.3. Саобраћајни дистрикти

Саобраћајни дистрикти представљају највеће просторне јединице које садрже детаљне податке о карактеристикама саобраћаја. Ове просторне јединице се креирају спајањем више саобраћајних зона (Lee, 2014a). Међутим, саобраћајне зоне се често граниче са главним градским саобраћајницама на којима се јавља и повећан број саобраћајних незгода. Анализа саобраћајних незгода на границама зона или дистрикта може довести до погрешног тумачења резултата због неадекватног одређивања карактеристика (Lee et al., 2014b; Siddiqui et al., 2012). На Флориди, просечна површина саобраћајног дистрикта (103,3 миља<sup>2</sup>) је знатно већа од просечне површине саобраћајних зона (6,5 миља<sup>2</sup>) (Cai et al., 2017). На основу површине просторних јединица може се закључити да се у саобраћајном дистрикту јавља више путовања што доводи и до веће вероватноће да возачи који учествују у незгодама долазе из истог саобраћајног дистрикта. Због тога поједини аутори оправдавају коришћење саобраћајних дистриката за анализу саобраћајних незгода на макро нивоу (слика 3.3.) (Abdel-Aty et al., 2016; Cai et al., 2017).



Слика 3.3. Графички приказ саобраћајних дистриката на подручју Флориде  
(Abdel-Aty et al., 2016)

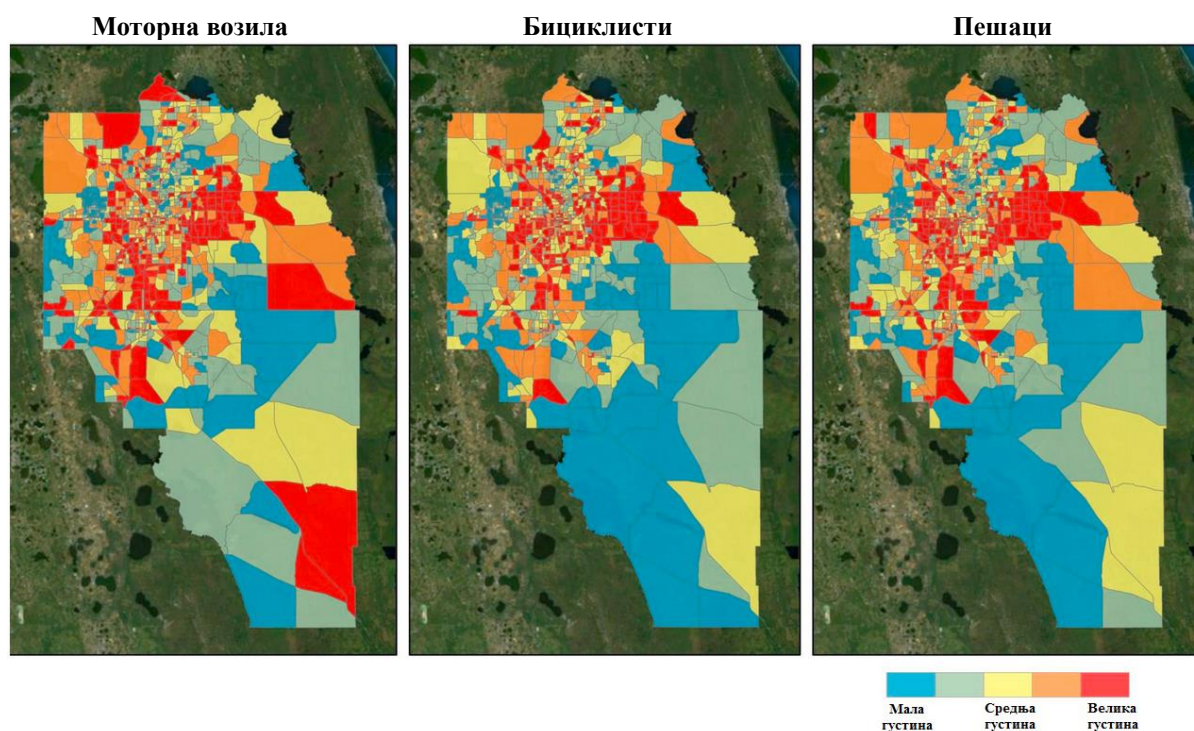
Cai et al. (2017) су анализирали безбедност рањивих учесника у саобраћају посматрајући 594 саобраћајна дистрикта на Флориди. Полазне хипотезе истраживања су усмерене на утврђивање фактора који доприносе страдању рањивих учесника у саобраћају у анализираним саобраћајним дистриктима. Фактори који су разматрани у анализи односе се на саобраћајне карактеристике, карактеристике пута и социо-демографске карактеристике. Анализа утицаја фактора извршена је помоћу негативног биномног модела и удруженог модела који посматра предвиђени број незгода и процењен проценат незгода са учешћем рањивих учесника у саобраћају. Према негативном биномном моделу у саобраћајном дистриктима, статистички значајне варијабле су: укупни пређени километри (обим саобраћаја  $\times$  дужина путне мреже), проценат теретних возила, проценат дужине локалних путева, дужина тротоара, густина становништва, просечан приход домаћинства, проценат путника у јавном градском превозу и проценат бициклиста. Поред ових фактора, према удруженом моделу значајни су и фактори: густина сигнализаних раскрсница и проценат популације старости 65 година и више. На основу претходних модела, аутори су идентификовали саобраћајне дистрикте на којима се очекује велики број саобраћајних незгода, где су указали да је потребно спровести одговарајуће мере како би се побољшала безбедност свих учесника у саобраћају. Упркос доприносима ове студије, где је анализирана безбедност рањивих учесника у оквиру саобраћајних дистриката, уочени су и одговарајући недостаци. Основни недостатак је изостављање испитивања просторне аутокорељације између посматраних саобраћајних дистриката.

#### 3.2.4. Саобраћајне зоне

Саобраћајне зоне су статистичке просторне јединице које одређују државни органи у циљу прикупљања података у области саобраћаја. Због тога, у циљу постизања оптималних резултата ове просторне јединице су најпогодније у односу на друге просторне ентитете (Lee, 2014). Међу свим просторним јединицама, саобраћајне зоне

имају широку примену у анализи безбедности саобраћаја (Ng et al., 2002; Hadayeghi et al., 2006; Abdel-Aty et al., 2011; Siddiqui and Abdel-Aty, 2012; Siddiqui et al., 2012; Wang et al., 2012; Huang et al., 2013; Pulugurtha et al., 2013; Abdel-Aty et al., 2013; Lee, 2014a; Lee et al., 2015).

Lee et al. (2015) су анализирали саобраћајне незгоде према категорији учешћа на макро нивоу у циљу доношења одлука које би допринеле смањењу саобраћајних незгода у саобраћајним зонама. У овом истраживању анализирано је 1.116 саобраћајних зона у централној Флориди. За анализу саобраћајних незгода на посматраним саобраћајним зонама у истраживању су обухваћене саобраћајне карактеристике, карактеристике пута, демографске и социо-економске карактеристике. У циљу предикције агрегираног броја незгода примењени су Бајесов мултиваријантни и Бајесов униваријантни модел, где су аутори закључили да Бајесов мултиваријантни модел даје боље процене параметара при добијању очекиваног броја саобраћајних незгода у саобраћајним зонама. Поред тога, у раду је спроведена просторна анализа очекиваног броја незгода, где су дати резултати према категорији учешћа. Очекивани број незгода у којима су учествовали рањиви учесници у саобраћају забележен је у саобраћајним зонама у насељеном делу града (слика 3.4). Међутим, када је у питању очекивани број незгода у којима су учествовала само моторна возила, резултати су показали да се највећи број незгода јавља у различитим саобраћајним зонама у насељу и ван насеља. На основу ових резултата могу се предузети одговарајуће мере у циљу унапређења безбедности саобраћаја у оквиру идентификованих саобраћајних зона.



Слика 3.4. Идентификоване саобраћајне зоне са највећом густином предвиђеног броја незгода (Lee et al. 2015)

Siddiqui et al., (2012) су спровели истраживање где су анализирали просторну корелацију између саобраћајних зона применом Бајесовог модела. Аутори су упоредили резултате које су добили применом Бајесовог модела и традиционалних предиктивних модела у циљу процене ефеката просторне корелације у процесу моделовања саобраћајних незгода. У оквиру истраживања укључен је ефекат различитих

карактеристика саобраћаја, окружења, демографских и социо-економских обележја зона на саобраћајне незгоде. Анализом наведених фактора, резултати су показали да модели који укључују просторну корелацију између саобраћајних зона имају боље перформансе у односу на класичне предиктивне моделе. Поред тога, резултати указују да просторну корелацију треба узети у обзир приликом моделовања саобраћајних незгода, посебно када се посматрају саобраћајне зоне.

### 3.2.5. Пописни блокови

Пописни блокови представљају најмању просторну јединицу где су подаци о становништву доступни у многим земљама. Ове просторне јединице су веома мале, посебно када се посматрају у урбаним срединама. У просеку, један пописни блок обухвата око 85 становника, где се у урбаним подручјима један објект за колективно становништво може поделити на неколико блокова (U.S. Census Bureau, 1994). Многа досадашња истраживања усмерена су ка анализама безбедности саобраћаја на пописним блоковима (Levine et al., 1995; Wier et al., 2009; Abdel-Aty et al., 2013).

Levine et al. (1995) су испитали просторну корелацију између активности становништва и саобраћајних незгода на подручју Хонолула, главног и највећег града у америчкој савезној држави Хаваји. У овом истраживању представљен је опис метода за испитивање просторних варијација међу саобраћајним незгодама на малим просторним јединицама. Аутори су применом просторног модела испитали утицај карактеристика становништва, економских карактеристика и карактеристика пута на фреквенцију саобраћајних незгода у оквиру малих просторних јединица. Резултати су показали да утицај фактора варира у зависности од активности становништва у различитим временским периодима. Поред тога, аутори су идентификовали подручја у којима се јавља повећан број саобраћајних незгода. На основу резултата, аутори су установили да просторни ефекат између две просторне јединице игра велику улогу када је у питању повећање предиктивности модела. Удаљеност између две посматране просторне јединице представља важну променљиву коју треба узети у обзир приликом предикције саобраћајних незгода на посматраном подручју. У циљу побољшања просторних анализа, аутори су предложили:

- узимање у обзир саобраћајних карактеристика које се односе на проток возила као мере изложености,
- разматрање фактора који се односе на намену површина,
- развој метода за доделу очекиваног броја незгода на одређеним просторним ентитетима.

Анализом саобраћајних незгода у којима су учествовали пешаци, Wier et al. (2009) су развили предиктивне моделе на подручју 176 пописних подручја у Сан Франциску. Фактори који су разматрани у овом истраживању обухватили су карактеристике пута, намену површина и карактеристике становништва. Коначни модел у овом истраживању објаснио је 72 % варијације зависне променљиве, коју чине саобраћајне незгоде са учешћем пешака на нивоу једног пописног блока. Поред тога, број становника, улице у којима се крећу возила јавног градског превоза, проценат становништва испод границе сиромаштва и проценат становништва старијих од 65 година показали су статистички значајан утицај на саобраћајне незгоде са пешацима. У складу са претходним студијама (Roberts et al., 1995; Lee and Abdel-Aty, 2005; Brugge et al., 2002; LaScala et al., 2000), ово истраживање потврђује повезаност између протока возила и саобраћајних незгода на некој просторној јединици. Аутори су у овом истраживању закључили да велику улогу

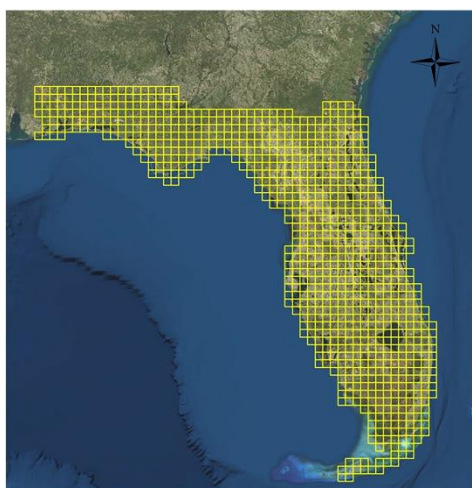
у предикцији саобраћајних незгода има намена површина, карактеристике саобраћаја и демографске карактеристике становништва.

### 3.2.6. Мрежа просторних јединица

Одређене просторне јединице које су дефинисане и креиране за специфичне сврхе њиховог коришћења могу се значајно разликовати у различитим зонским системима. Диференцијација зонских система у великој мери зависи од одређеног броја јединица, нивоа агрегације и конфигурирања зонирања. На основу наведених чињеница, [Kim et al., \(2006\)](#) развили су јединствену мрежу од 0,1 квадратне миље како би истражили утицај социо-демографских карактеристика, економских карактеристика и карактеристика намене површина на фреквенцију саобраћајних незгода у оквиру једне ћелије.

У поређењу са другим дефинисаним просторним јединицама, структура мреже је равномерно димензионисана и обликована што може у значајној мери елиминисати просторне ефекте који утичу на развој предиктивних модела. Међутим, узимајући у обзир доступност и употребу различитих зонских система за друге сврхе планирања саобраћаја, стварање јединствене структуре мреже не би било изводљиво из перспективе државних и локалних агенција које су посвећене планирању простора.

[Cai et al., \(2017\)](#) су спровели компарацију модела уз помоћ мреже једнаких дужина и облика на посматраном подручју (слика 3.5). У истраживању су посматрани саобраћајни дистрикти, саобраћајне зоне и пописни блокови, где је на основу просечне површине посматраних просторних јединица креирано десет нивоа мрежних структура дужине од 1 до 10 миља. На основу броја просторних јединица и агрегираног броја незгода, аутори су закључили да су блокови, зоне и дистрикти упоредиви са мрежом 4 x 4, 3 x 3 и 10 x 10. На основу дефинисаних параметара мреже, аутори су спровели предикцију агрегираног броја саобраћајних незгода применом просторних и не просторних модела. У раду су посматране саобраћајне карактеристике, демографске карактеристике и карактеристике пута. Резултати су показали да у оквиру различитих величина мреже истичу се различите значајне карактеристике које утичу на агрегиран број саобраћајних незгода.



Слика 3.5. Структура мреже на подручју Флориде (10 x 10 миље<sup>2</sup>)  
([Cai et al., 2017](#)).

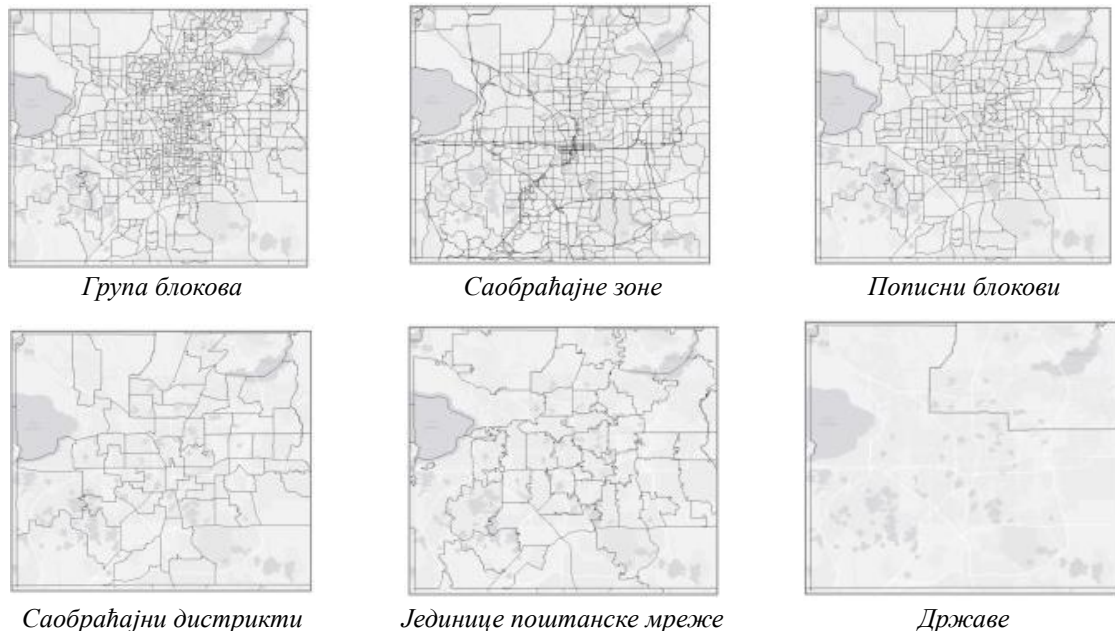
[Xu et al., \(2014\)](#) су креирали различите шеме зонирања како би агрегирали саобраћајне зоне са динамичким предиктивним моделом. Модели за укупан број незгода и агрегиран

број незгода са тежим последицама су процењени да би се истражиле варијације по мрежи зонирања са различитим нивоима агрегације. Поред тога, спроведена је компарација модела одређеним критеријумима где је могућ утицај броја опсервација и посматране вредности. Резултати поређења могу бити ограничени јер су мере израчунате на основу зонских система са различитим бројем зона. Занемаривање таквог ограничења може резултирати нетачним резултатима предвиђања незгода.

### 3.2.7. Компарација просторних јединица

Анализа безбедности саобраћаја на одређеним просторним јединицама зависи од избора одређене просторне јединице која има најбоље предиктивне способности на посматраном подручју. У последњих неколико година, поред анализе једне просторне јединице, спроведено је и неколико истраживања за поређење различитих просторних јединица. [Abdel-Ati et al., \(2013\)](#) су спровели анализу укупног броја незгода, незгода са тешким телесним повредама и незгода у којима су учествовали пешаци, посматрајући групе блокова, саобраћајне зоне и пописне блокове. У оквиру овог истраживања идентификовани су одређени значајни фактори потврђујући присуство зонских варијација. Ови резултати навели су друге ауторе да агрегирају саобраћајне зоне у зоне безбедности саобраћаја на основу броја незгода ([Lee et al., 2014](#)). За потребе поређења ова два зонска система коришћене су четири различите мере веродостојности (средње апсолутно одступање, средња квадратна грешка, сума дисперзије и проценат средње апсолутне девијације). Резултати су показали да предиктивни модел заснован на новом зонском систему показује боље предиктивне перформансе.

За разлику од претходних истраживања, [Lee et al., \(2017\)](#) су развили моделе за различите зонске нивое и спровели компарацију просторних јединица на макро ниво. На слици 3.6 приказане су просторне јединице коришћене у овом истраживању.



Слика 3.6. Просторне јединице коришћене у компарацији ([Lee et al., 2017](#)).

Резултати поређења просторних јединица су указали да модели примењени код укупног броја незгода, незгода са тежим последицама и код незгода у којима су

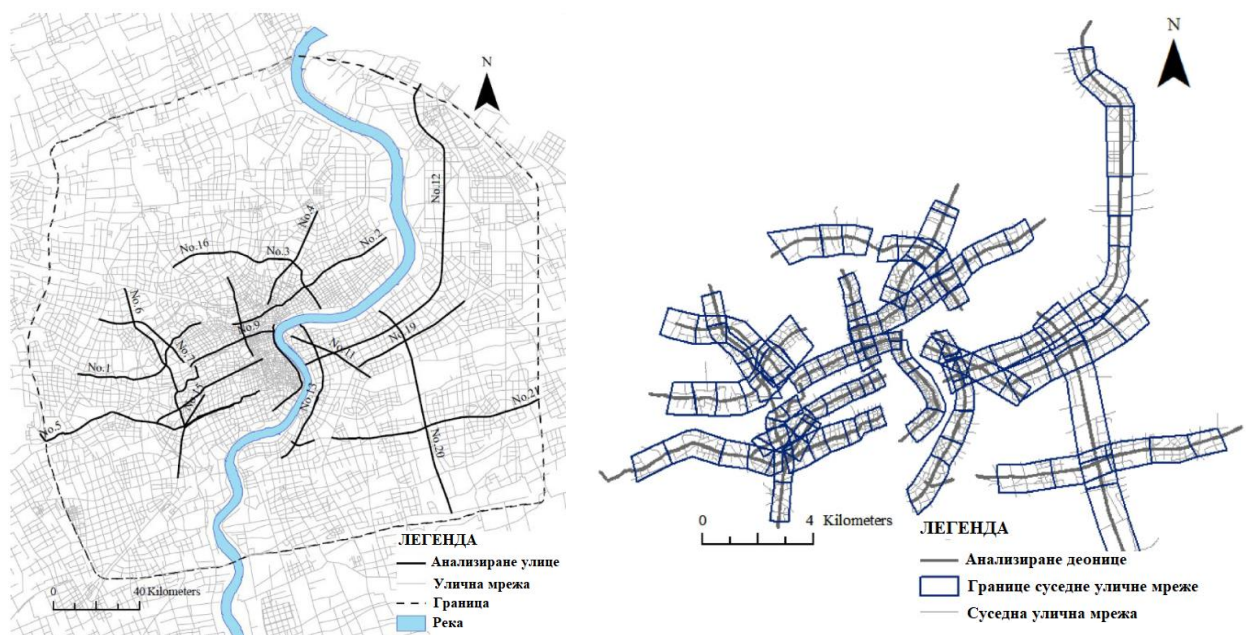


учествовали бициклисти имају најбоље предиктивне способности када се посматрају подаци прикупљени на површини јединица поштанске мреже. Са друге стране, модели који предвиђају незгоде у којима су учествовали пешаци, су показали најбоље перформансе када се узму у обзир подаци на пописним блоковима (Lee et al., 2017). Досадашња анализа и компарација зонских система показала је различите резултате у зависности од посматраног подручја. На основу тога потребно је креирати различите зонске системе на другим подручјима и идентификовати просторне јединице у циљу примене предиктивних модела.

### 3.3. МЕЗОСКОПСКЕ АНАЛИЗЕ

Анализе безбедности саобраћаја које посматрају одређене деонице на целокупној уличној мрежи морају узети у обзир интеракцију између одређених деоница и раскрсница, удаљеност између две раскрснице и утицај суседних деоница. Ове интеракције захтевају употребу мезоскопских анализа при утврђивању безбедности на главним саобраћајницама у насељу. Многа истраживања су анализирала безбедност саобраћаја на подручју микро нивоа, где је посебна пажња усмерена ка раскрсницама или деоницама између раскрсница, као посебним елементима путне мреже (Sawalha and Sayed, 2001; Lord and Mannering, 2010; Li and Wang, 2017). Одвајањем ова два елемента путне мреже може се довести до нетачног закључка када се узме у обзир интеракција између њих (Lord, 2006). Просторна корелација између раскрсница и њених најближих сегмената је већа од корелације између две раскрснице или два сегмента (Zeng and Huang, 2014).

У недавном истраживању, Li and Wang (2017) предложили су приступ груписања раскрсница и деоница уличне мреже у јединствене веће просторне јединице по уздужном смеру градских саобраћајница у циљу моделовања саобраћајних незгода (слика 3.7). Како би постигли овај циљ, аутори су анализирали суседне деонице уличне мреже са сличним геометријским и саобраћајним карактеристикама.



Слика 3.7. Анализирание деонице уличне мреже на мезо нивоу у Шангају (Li and Wang, 2017).

[Sawalha and Sayed \(2001\)](#) су анализирали утицај удаљености између две раскрснице на саобраћајне незгоде које су се догодиле на сегментима који спајају две раскрснице. Аутори су на основу анализе дошли до закључка да је дужина сегмената између раскрсница повезана са повећаним бројем саобраћајних незгода. Ово се може оправдати чињеницом да на дужим сегментима долази до повећања брзине возила што често доводи до губитка контроле над возилом које проузрокује саобраћајну незгоду ([Wang et al., 2015](#); [Wang et al., 2016](#)). [Mauga and Kaseko \(2010\)](#) су открили да мало растојање између две раскрснице има утицај на велики број саобраћајних незгода. Аутори су ово оправдали чињеницом да возачи морају на кратким растојањима уличне мреже чешће да мењају саобраћајне траке уколико желе да промене свој правац и смер кретања на раскрсници. Овај начин кретања често доводи до повећања фреквенције саобраћајних незгода.

[Li and Wang \(2017\)](#) су испитали утицај гаметријских карактеристика, саобраћајних карактеристика и карактеристике уличне мреже на фреквенцију саобраћајних незгода. Аутори су посматрали просторне јединице на мезо нивоу (слика 3.8), где су узели у обзир: дужину коловоза, растојање између две сигнализоване раскрснице, број приступних путева, присуство хоризонталних кривина, просечан број саобраћајних трака, присуство разделног острва, намену површина, карактеристике уличне мреже, проток возила и брзину саобраћајног тока. У овом истраживању примењени су негативни биномни модел и условни ауто-регресиони модел. Резултати су показали да је мало растојање између две раскрснице повезано са великим број саобраћајних незгода са материјалном штетом као и укупним бројем саобраћајних незгода, али то није случај када се узму у обзир саобраћајне незгоде са повређеним лицима. Поред тога, карактеристике уличне мреже су показале позитивну везу са свим врстама саобраћајних незгода. На основу добијених резултата, аутори су закључили да анализе на мезо нивоу могу бити корисне у многим инжењерским активностима посебно у фази планирања и пројектовања саобраћајница.



Слика 3.8. Пример посматране просторне јединице на мезо нивоу ([Li and Wang, 2017](#))

Мезоскопске анализе представљају везу између макроскопских и микроскопских анализа, што омогућава детаљније усмеравање активности у погледу планирања саобраћаја. На основу мезоскопских анализа често се могу утврдити фактори који карактеришу регулисање саобраћајних токова као и симулације саобраћајних сигнала када се посматрају главне градске саобраћајнице ([Aljamal et al., 2018](#)).

### 3.4. МИКРОСКОПСКЕ АНАЛИЗЕ

Анализе на микро нивоу имају за циљ да оцене ниво безбедности саобраћаја са највишим степеном тачности и са што више детаља у односу на претходне нивое. Ове анализе обухватају просторне јединице на којима се могу прикупити прецизни подаци у оквиру посматраних елемената и објеката уличне мреже. Прецизни подаци омогућавају идентификацију потенцијалних опасности које се могу оценити са аспекта дизајна одређених просторних јединица, као и у погледу функционалности. У многим истраживањима просторне јединице које се анализирају на микро нивоу су: краће деонице пута (Milton and Mannering, 1998; Abdel-Aty and Radwan, 2000), раскрснице (Poch and Mannering, 1996; Wang and Abdel-Aty, 2006; Pulugurtha and Sambhara, 2011; Wang et al., 2017), мостови (Räsänen et al., 2007; Elvik et al., 2019), тунели (Caliendo et al., 2013; Hou et al., 2018), кривине (Shankar et al., 1995; Saleem and Persaud, 2017), зоне радова на путу (Chen and Tarko, 2014; Theofilatos et al., 2017), пружни прелази (Liang et al., 2017; Liang et al., 2018) као и други елементи путне мреже.

Методе и модели који се користе у микроскопским анализама узимају у обзир специфичне карактеристике локација. Карактеристике посматраних локација обухватају геометријске карактеристике, саобраћајне карактеристике и карактеристике учесника у саобраћајним незгодама. Поменуте карактеристике често садрже широк спектар фактора који доприносе настанку саобраћајних незгода. Један од проблема који се јавља у микроскопским анализама односи се на неиспитивање утицаја фактора са других просторних јединица који такође могу допринети саобраћајним незгодама.

#### 3.4.1. Раскрснице

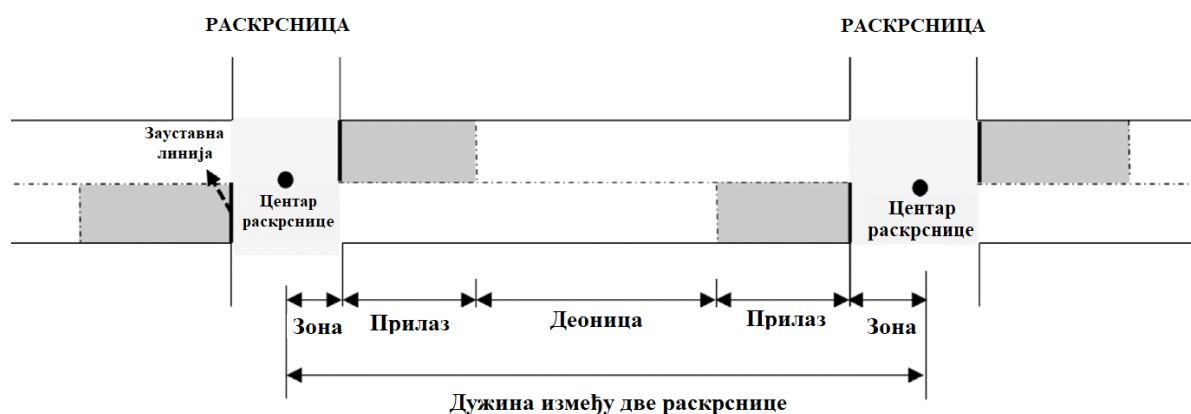
Раскрснице представљају најсложенији део путне мреже у односу на све просторне ентитете на микро нивоу. Анализа саобраћајних незгода на раскрсницама зависи од просторног положаја раскрснице на путној мрежи, геометрије као и начина регулисања. У последњих неколико година примена предиктивних модела добија све већи значај код анализе саобраћајних незгода на раскрсницама. Досадашње студије су применом предиктивних модела покушали да утврде утицај одређених карактеристика на фреквенцију саобраћајних незгода на раскрсницама (Miranda Moreno et al., 2011; Strauss et al., 2014; Wang et al., 2017).

Фреквенција саобраћајних незгода се често доводи у везу са индивидуалним карактеристикама учесника у саобраћају. Фактори који представљају индивидуалне карактеристике односе се на пол, старост, образовање, присуство алкохола као и друга карактеристична понашања возача и пешака (Ryb et al., 2007). Често индивидуални фактори нису доступни како би се интегрисали у предиктивне моделе. Овај недостатак замењују индиректни фактори који утичу на фреквенцију незгода на раскрсницама, а добијају се са макро нивоа. Ти фактори често репрезентују густину популације, намену површина у близини раскрснице као и одређене економске показатеље (Christoffel and Gallagher, 1999).

Избор репрезентативних фактора као и избор одговарајућих аналитичких метода су два важна критеријума за добијање поузданих предиктивних модела. Током протекле три деценије, значајни истраживачки напори су били посвећени развоју и примени софистицираних методолошких приступа везаних за анализу фреквенције незгода на раскрсницама. Статистичке методе као што су просторна и временска корелација, вишенивоиски ефекти, случајни ефекти, случајни параметри и приступ латентних класа су развијени како би се смањио утицај непосматране хетерогености у моделовању

саобраћајних незгода ([Anastasopoulos and Mannering, 2009](#), [Dong et al., 2016](#), [Mannering et al., 2016](#), [Xu et al., 2016](#)). Непосматрана хетерогеност у предиктивним моделима утиче на резултат процене утицајних фактора као и присуство мултиколинеарности између одабраних фактора.

Предикција саобраћајних незгода у урбаним срединама често се заснива на посматрању раскрсница у одређеној зони као и сегмената између две раскрснице. При одабиру раскрсница, истраживач одређује посматрану зону раскрснице па се на основу тога развијају посебни модели за раскрснице, а посебно за сегменте. [Li and Wang \(2017\)](#) су представили посматране јединице које се могу узети код предикције саобраћајних незгода на целокупној уличној мрежи (слика 3.9).



Слика 3.9. Пример делова уличне мреже који се посматрају на микро нивоу ([Li and Wang, 2017](#))

### 3.4.2. Деонице пута

Поступак предикције саобраћајних незгода на посматраним деоницама пута представља један од основних метода за побољшање безбедности путне инфраструктуре. Због распрострањене и сложене природе узрока саобраћајних незгода, тешко је анализирати сложене деонице путева као и указати на одређене мере како би се број саобраћајних незгода смањило. Да би се предвиделе саобраћајне незгоде на путу, потребно је поделити посматрани пут на одређене сегменте, а затим применити предиктивне моделе како би се проценио ризик од незгода ([Boroujerdian, et al., 2014](#)). За поделу путне инфраструктуре на одређене деонице често се примењује процес сегментације, који један пут дели на одређени број деоница са сличним карактеристикама. У досадашњим истраживањима, процес сегментације је различит у многим студијама спроведеним на различитом простору ([Kononov and Allery, 2003](#); [Pant et al., 2003](#); [Elvik, 2008](#)).

Подела пута на одређене хомогене деонице одређује посматране јединице у примени предиктивних модела. Применом предиктивних модела на посматраним деоницама долази се до идентификовања одређених фактора који утичу на фреквенцију незгода. Многи аутори до сада су идентификовали одређене саобраћајне карактеристике, геометријске карактеристике и карактеристике намене површина које утичу на фреквенцију незгода на деоницама. [Persaud and Dzbik \(1993\)](#) су утврдили утицај протока возила на посматран број незгода. У овом истраживању посматран је просечан годишњи

дневни саобраћај и проток возила у току једног часа, где резултати указују да ако се повећа проток возила долази до повећања саобраћајних незгода. [Knuiman et al. \(1993\)](#) су испитали утицај ширине разделног острва код вишетрачних путева на саобраћајне незгоде. Применом негативног биномног модела дошли су до резултата да шири разделни појас доводи до смањења саобраћајних незгода на посматраним деоницама. [Fridstrøm et al. \(1995\)](#) су уложили напоре да утврде утицај карактеристика саобраћајног тока, ограничења брзине, временских и дневних услова на саобраћајне незгоде. Разматрањем ових фактора, предиктивни модел је показао да анализирани фактори објашњавају између 85 % и 95 % варијације зависне променљиве коју чине саобраћајне незгоде.

### 3.4.3. Мостови

Мост као објекат на путној инфраструктури, представља специфичан елемент путне мреже, који се може користити као посматрана јединица у развоју предиктивних модела. За мостове је често карактеристично да имају ограничен простор за маневрисање као и простор за маневре избегавања новонастале опасности. Услови изградње као и сагледавање потребних финансија за изградњу моста често не уважавају кретање рањивих учесника у саобраћају. Ово подразумева да нема довољног простора за кретање пешака или бициклиста што може да се доведе у везу са њиховим страдањем. На основу истраживања која су спровели [Khan et al., \(2009\)](#), истакнуто је да се поледица на коловозу пре очекује на површини моста него што је то случај са коловозом на земљаном застору. Нагиб коловоза на мосту као и присуство хоризонталних кривина такође представљају специфичне карактеристике моста које је потребно испитати. Све ове карактеристике указују да примена предиктивних модела, који посматрају деонице и мостове заједно, доводи до непоузданих информација када је у питању идентификација утицајних фактора на незгоде које су се догодиле само на мостовима. На основу тога, многи аутори су одабрали мостове као просторне јединице за предикцију саобраћајних незгода ([Turner, 1984](#); [Ranes, 2000](#); [Retting et al., 2000](#); [Elvik et al., 2019](#)).

[Turner \(1984\)](#) је применио предиктивне моделе како би анализирао утицајне факторе који утичу на стопу саобраћајних незгода које су се догодиле на двосмерним мостовима у Тексасу. У оквиру овог истраживања посматрано је 25 независних променљивих чији је утицај испитан на стопу незгода. Најзначајнији фактори који су показали утицај за саобраћајне незгоде су просечан годишњи дневни саобраћај, ширина коловоза као и ширина прилазног пута.

Када је у питању анализа различитог типа саобраћајних незгода, [Retting et al. \(2000\)](#) су испитали стопу незгода на четири моста у Њујорку. Посматрали су проток возила као меру изложености на анализираним мостовима (забележен проток је између 68.000 и 133.000 возила дневно). Поређењем посматраних јединица утврђено је да су поједини мостови имали знатно већу стопу незгода. Поред тога, на анализираним мостовима најчешћи тип незгода је налет возила на друго возило, где аутори истичу да се овај тип незгода посебно истражи у неким будућим истраживањима.

[Elvik et al., \(2019\)](#) су утврдили факторе који доприносе настанку саобраћајних незгода на мостовима у Норвешкој током седмогодишњег периода (2010-2016.). Аутори су анализирали 6.824 моста на којима се догодило 1.368 саобраћајних незгода. Применом негативног биномног модела утврђено је да проток саобраћаја представља најважнији фактор који утиче на број саобраћајних незгода. Поред овог фактора, аутори су идентификовали значајне факторе као што су дужина и старост моста. На основу тога, аутори су закључили да су мостови веће дужине безбеднији од кратких мостова. Са друге

стране, недавно изграђени мостови пружају већи степен безбедности у односу на старије мостове.

#### 3.4.4. Тунели

Изградња тунела често се манифестује смањењем времена путовања јер тунели су често изграђени због превазилажења подручја са великом густином насељености становништва као и природних граница као што су планине и реке. Управљање возилом унутар тунела у нормалним ситуацијама може изазвати анксиозност међу возачима из разлога што су тунели тамни, уски и монотони (PIARC, 2008). Уважавајући све ове чињенице, многа истраживања су усмерена ка испитивању фактора који доприносе настанку незгода у тунелима (Lemke, 2000; Caliendo et al., 2013; Hou et al., 2018).

Caliendo et al., (2013) су испитали утицајне факторе на саобраћајне незгоде које су се догодиле у тунелима у Италији. Аутори су посматрали различите типове саобраћајних незгода које су се догодиле у тунелима у периоду од 2006. до 2009. године. Анализирани тунели су регулисани у једном смеру, где је на основу негативног биномног модела показано да дужина тунела, просечан годишњи дневни саобраћај по смеру, проценат теретних возила, број саобраћајних трака и присуство тротоара има утицај на фреквенцију саобраћајних незгода у тунелима у Италији.

Hou et al., (2018) су анализирали саобраћајне незгоде у тунелима на аутопутевима у Кини. У оквиру овог истраживања посматран је четворогодишњи временски период (2009-2012.), где су примењени негативни биномни модел са случајним ефектима, негативни биномни модел са некорелисаним случајним ефектима и негативни биномни модел са корелисаним случајним ефектима. Поређењем сва три модела, негативни биномни модел са корелисаним случајним ефектима је показао најбоље перформансе моделовања незгода у тунелима. Поред избора модела, аутори су утврдили факторе који утичу на незгоде. Идентификовани значајни фактори у моделу су: проток возила, дужина тунела, проценат теретних возила, закривљеност трасе коловоза, стање коловоза и коефицијент трења.

#### 3.4.5. Кривине

Пут у гео-информационим системима често се представља као линија која се може поделити на прав и закривљен део. Поводом тога, пут се може поделити на праве и закривљене сегменте које је потребно посебно анализирати. Кривине које се налазе у хоризонталној равни представљају опасност за возаче због утицаја центрифугалних сила које делују на возило и тако стварају додатне напоре возачима (Hummer et al., 2010a). Поред понашања возача, значајни утицај на саобраћајне незгоде у кривинама могу представљати и геометријски фактори који се разликују у зависности од посматране кривине (Glennon, 1987). Применом предиктивних модела, многи аутори су потврдили везу између геометријских елемената кривина и саобраћајних незгода (Zegeer et al., 1991; Strathman et al., 2001; AASHTO, 2010; Saleem and Persaud, 2017).

Elvik (2013) је представио преглед утицаја одређених карактеристика на саобраћајне незгоде које су се догодиле у кривинама на различитим посматраним подручјима. Један од најчешће испитаних фактора који је показао утицај на незгоде је радијус кривине на подручју Аустралије, Канаде, Данске, Немачке, Велике Британије, Новом Зеленду, Норвешкој, Португалу, Шведској и САД. Поред тога, аутор је истакао и друге факторе који су повезани са незгодама, а они су: дужина кривине, угао рефлексије, присуство

прелазних кривина, нагиб коловоза као и дужина прелазница. Уз то, спроведена је и компарација између фактора где је утврђено да се фактори не разликују у значајној мери од посматраног подручја.

#### 3.4.6. Зоне радова

Безбедно кретање у близини радова на путу представља један од кључних захтева који се намеће за све субјекте који су посвећени регулисању посматране зоне. Са друге стране, у досадашњим истраживањима утврђено је да зона радова на путу директно утиче на повећање ризика од саобраћајних незгода као и њихових последица (Juergens, 1972). Поред тога, постоје многи фактори који се могу довести у везу са настанком незгода, неки од њих су: смањење броја саобраћајних трака, промена сигнализације, присуство радника, присуство грађевинских машина, препреке за изградњу и други објекти. Сви ови фактори могу створити једно веома сложено окружење у којима је повећан број конфликта који доводе до високог ризика од повреда у саобраћају.

У многим досадашњим истраживањима примењени су предиктивни модели како би се пронашла веза између карактеристика зоне радова и са друге стране фреквенције саобраћајних незгода (Pal and Sinha, 1996; Khattak et al., 2002; Venugopal and Tarko, 2000; Chen and Tarko, 2014). Khattak et al. (2002), су спровели анализу саобраћајних незгода које су се догодиле у оквиру зоне радова у САД. За потребе овог истраживања посматране су зоне на аутопутевима у Калифорнији, где су прикупљени подаци о саобраћајним карактеристикама и карактеристикама зоне радова. Саобраћајне карактеристике обухватају проток возила, који је добијен посебно за руралне, а посебно за урбане путеве, као и брзину кретања возила у близини зоне. Посматране карактеристике зоне радова су: временско трајање зоне радова, дужина зоне, као и локација где се радови одвијају. Применом негативног биномног модела, аутори су дошли до закључка да са повећањем временског интервала радова на путу, дужином зоне као и протоком возила долази до повећања фреквенције саобраћајних незгода у оквиру зона.

#### 3.4.7. Пружни прелазни

Саобраћајне незгоде на пружним прелазима представљају први узрок смртности у железничком саобраћају у многим анализираним подручјима. Иако се саобраћајне незгоде на пружним прелазима сматрају ретким и случајним догађајима, њихови исходи често заврше са озбиљним последицама. Пружни прелазни представљају конфликтне тачке између друмског и железничког саобраћаја чији ризик учесника зависи од многих фактора (Medina et al., 2016).

Анализа безбедности пружних прелазна са микро нивоа захтева разматрање детаљних информација као што су саобраћајне карактеристике, геометријске карактеристике и карактеристике околине. Многи аутори су развили предиктивне моделе на основу који су истакли све значајне факторе (Eluru et al., 2012; Liang et al., 2017; Liang et al., 2018; Iranitalab et al. 2018; Soleimani et al. 2019). Са аспекта геометријских карактеристика до сада су често идентификовани фактори који представљају: угао укрштања, прегледност као и висина и дужина заштитне оgrade. Поред тога, анализирајући саобраћајне карактеристике идентификовани су фактори који представљају: проток железничких кола, проток друмских возила, брзину возила, тип возила и присуство пешака. Карактеристике околине које су значајне у досадашњим студијама односе се на временске

услове, начин и присуство осветљења као и специфичности окружења у којем се налази.

### 3.5. ДИСКУСИЈА

Одабир просторних ентитета представља први корак у процесу моделовања саобраћајних незгода. Поступак одабира просторних ентитета зависи од многих фактора као што су: циљ истраживања, просторно планирање посматраног подручја, примена одређених предиктивних модела као и доступност потребних података. Циљ истраживања се креира на основу посматраног нивоа просторних јединица које помажу у откривању проблематике саобраћајних незгода. У зависности од посматраног подручја, просторно планирање се доводи у везу са већ дефинисаним одређеним просторним јединицама, што омогућава лакши приступ моделовања у урбаним срединама. Предиктивни модели на одређеним просторним ентитетима могу се применити у циљу процене деловања одређених мера на побољшање безбедности учесника у саобраћају, откривање и рангирање посматраних локација као и процена потенцијалног броја незгода. Последњи фактор који утиче на одабир просторних ентитета је доступност потребних података. Подаци представљају један од главних ресурса када је у питању моделовање саобраћајних незгода, с тим у вези, многи истраживачи усмеравају своје циљеве у складу са доступним подацима. Све ове факторе потребно је сагледати код одабира просторних јединица у зависности од посматраног подручја.

Предикција саобраћајних незгода у урбаним срединама често се посматра независно са сва три нивоа просторних јединица. Када су у питању макроскопске анализе, многа истраживања су анализирали ниво безбедности саобраћаја у урбаним срединама посматрајући саобраћајне дистрикте, саобраћајне зоне, пописне блокове и урбанистичке блокове. Многи аутори су разматрали почетне услове за одабир просторних јединица, међутим доступност података као и примена одређених модела често су усмеравале истраживаче на анализу саобраћајних зона.

Поред макроскопских анализа, када се сагледа микро ниво, раскрснице представљају једне од најопаснијих просторних ентитета на путној мрежи. Дефинисање раскрсница као најопаснијих елемената саобраћајне инфраструктуре огледа се кроз укрштање саобраћајних токова као и садржај великог броја конфликтних тачака. У наредном поглављу истакнут је преглед досадашњих истраживања која су разматрала саобраћајне зоне и раскрснице као посебне просторне ентитете у циљу сагледавања утицајних фактора, као и примењене методологије како би се спровела предикција саобраћајних незгода.



## **4. ПРЕДИКЦИЈА САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА У УРБАНИМ СРЕДИНАМА**

## 4. ПРЕДИКЦИЈА САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА У УРБАНИМ СРЕДИНАМА

### 4.1. УВОД

Анализа саобраћајних незгода у урбаним срединама може се посматрати са сва три просторна нивоа. У оквиру макроскопских анализа, многа досадашња истраживања су усмерена на анализу саобраћајних незгода посматрајући саобраћајне зоне (Hezaveh et al., 2019) као и урбанистичке блокове (Wang and Kockelman, 2013). Поређењем ова два просторна ентитета, Abdel-Aty et al., (2013) су истакли да саобраћајне зоне представљају приоритетне просторне јединице у поређењу са урбанистичким блоковима. Ово се може оправдати чињеницом да су саобраћајне зоне једини зонски систем који обухвата највећи сет података у области саобраћаја и транспорта. У процесу развоја предиктивних модела, доступност података представља један од основних услова на основу чега истраживачи постављају своје циљеве. Поводом тога, потребно је анализирати досадашњу литературу која је усмерена на предикцију саобраћајних незгода по саобраћајним зонама у циљу сагледавања простора истраживања, утицајних фактора као и одабраних модела.

Када су у питању мезоскопске и микроскопске анализе у урбаним срединама, један од основних просторних ентитета који се често разматра јесу раскрснице. Са мезо нивоа, просторне јединице често чине одређени делови урбаних средина где се фокус истраживања ставља на раскрснице и деонице између њих (Li and Wang, 2017). Са друге стране, раскрснице представљају један од најчешћих просторних ентитета који је коришћен у микро анализама (Chen et al., 2019; Wang et al., 2017). Развој предиктивних модела за раскрснице могу се реализовати са оба просторна нивоа. Из тог разлога, потребно је сагледати досадашња истраживања у циљу разматрања узорка, утицајних фактора као и модела који су примењени у циљу предикције саобраћајних незгода у урбаним срединама.

### 4.2. ПРЕДИКЦИЈА САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА ПО САОБРАЋАЈНИМ ЗОНАМА

Саобраћајне зоне су често дефинисане као просторни ентитети који су одређени од стране државних или локалних самоуправа у циљу прикупљања и визуелизације података који моделују саобраћај и транспорт (Siddiqui et al., 2012; Cai, 2017; Pljakic et al., 2019). Доступност и прецизност података у оквиру саобраћајних зона омогућило је развој предиктивних модела на многим различитим просторним подручјима (Martínez et al., 2009; Lee et al., 2015). На основу тога, Wang et al. (2016) су истакли да анализе саобраћајних незгода по саобраћајним зонама су најефикасније у погледу идентификације проблема безбедности саобраћаја у урбаним срединама.

Предност просторне јединице може да варира у односу на зависну променљиву која се разматра у моделу. Поред тога, за специфичну зависну променљиву модели могу бити непромењени према различитим просторним јединицама (Abdel-Aty et al., 2013). У досадашњим истраживањима многи аутори су агрегирали различите типове саобраћајних незгода у циљу утврђивања оптималних модела за саобраћајне зоне. У развоју предиктивних модела на саобраћајним зонама често је разматран:

- укупан број саобраћајних незгода (Hadayeghi et al., 2003, 2006, 2010b; Naderan and

- Shahi, 2010; Abdel-Aty et al., 2013; Dong et al., 2015);
- саобраћајне незгоде са погинулим (De Guevara et al., 2004);
  - саобраћајне незгоде са повређеним (De Guevara et al., 2004; Naderan and Shahi, 2010; Abdel-Aty et al. 2013);
  - саобраћајне незгоде са материјалном штетом (De Guevara et al., 2004; Hadayeghi et al., 2003, 2006, 2010b; Naderan and Shahi, 2010);
  - саобраћајне незгоде у којима су учествовала само моторна возила (Noland et al., 2004);
  - саобраћајне незгоде са пешацима (Noland et al., 2004; Miranda-Moreno et al. 2011; Siddiqui et al., 2011; Siddiqui and Abdel-Aty, 2012; Abdel-Aty et al. 2013; Cai et al., 2016);
  - саобраћајне незгоде са бициклистима (Siddiqui et al., 2011; Cai et al., 2016);
  - саобраћајне незгоде настале у току дана (Hadayeghi et al., 2006).

У односу на друге просторне ентитете на подручју саобраћајних зона јавља се највећи број идентификованих фактора у области саобраћаја као и способност да се фактори интегришу у процес планирања саобраћаја. Процес идентификовања фактора најчешће се спроводи применом предиктивних модела у циљу предвиђања будућих исхода на основу историјских података и аналитичких техника као што су статистичко моделовање и машинско учење. До сада су спроведена многа истраживања усмерена ка идентификовању фактора са једне стране као и развоју и калибрацији предиктивног модела са друге стране. У наредном делу дат је преглед истраживања, која су утврдила утицајне факторе на агрегиран број саобраћајних незгода по саобраћајним зонама као и истраживања усмерена ка развоју у погледу методолошких достигнућа.

#### 4.2.1. Фактори који утичу на саобраћајне незгоде у саобраћајним зонама

Анализа безбедности саобраћаја на макро нивоу може се разматрати преко различитих карактеристика које садрже велики број утицајних фактора. У односу на посматрану ситуацију као и проблематику истраживања утицајни фактори често се могу поделити на субјективне и објективне. Субјективни фактори односе се на особине личности и понашање које карактерише људски фактор, док се објективни фактори односе на сагледавање карактеристика посматраних просторних јединица. У оквиру овог подпоглавља разматрана су истраживања која су испитала утицај објективних карактеристика на агрегиран број саобраћајних незгода по саобраћајним зонама.

За разлику од микроскопских студија, које делом разматрају субјективне факторе, у макроскопским студијама фокус је усмерен ка објективном приступу сагледавања различитих просторних јединица. На основу досадашњих истраживања, утврђени су различити макроскопски фактори који утичу на саобраћајне незгоде на различитим просторним јединицама (Ng et al., 2002; Hadayeghi et al., 2006; Abdel-Aty et al., 2011; Siddiqui and Abdel-Aty, 2012; Pulugurtha et al., 2013; Wang et al. 2016; Saha et al. 2018; Wang et al. 2019). Утицајни фактори често су систематизовани у одређене карактеристике посматране просторне јединице. Посматрајућу саобраћајне зоне као просторне јединице, до сада су најчешће разматране: демографске карактеристике, социо-економске карактеристике, саобраћајне карактеристике, карактеристике пута и карактеристике намене површина (слика 4.1.). Поред тога, применом предиктивних модела потребно је уважити изложеност, која је често повезана са фреквенцијом незгода посебно када се ради о демографским или саобраћајним карактеристикама.



Слика 4.1. Систематизација утицајних фактора у саобраћајним зонама

Abdel-Aty et al. (2013) су анализирали три зонска система за агрегирање саобраћајних незгода на макро нивоу и утврђивање утицајних фактора. У овом истраживању посматран је укупан број саобраћајних незгода, саобраћајне незгоде са тешким последицама и саобраћајне незгоде са пешацима на три просторна ентитета која чине групе блокова, саобраћајне зоне и пописни окрузи. Површина саобраћајних зона и групе блокова у раду показују да су њихове величине сасвим упоредиве, тачније просечна површина групе блокова (82,1 %) је већа у односу на саобраћајне зоне (74,8 %) у урбаним срединама. Ови подаци говоре о узорку који је разматрала ова студија на подручју Хилсбора и Пинеласа на Флориди (табела 4.1)

Табела 4.1. Број просторних ентитета анализиран од стране Abdel-Aty et al. (2013).

Локација	Број просторних посматраних јединица		
	Пописни окрузи	Групе блокова	Саобраћајне зоне
Урбана	357 (78,1%)	1099 (82,1%)	1106 (74,8%)
Рурална	100 (21,9%)	239 (17,9%)	373 (25,2%)
Укупно	457 (100%)	1338 (100%)	1479 (100%)

Према одабраном узорку, на број посматраних ентитета агрегирано је 87.718 саобраћајних незгода, које обухватају незгоде са тешким последицама (8,1 %) и незгоде са учешћем пешака (1,9 %). Резултати су показали конзистентан утицај фактора у свим моделима саобраћајних незгода на различитим просторним ентитетима. Поред тога, саобраћајне незгоде трпе највећи утицај карактеристика саобраћајних зона, где је препорука да се у будућности најчешће анализирају.

#### 4.2.1.1. Мере изложености

Мере изложености се примењују у циљу поузданог поређења ризика од настанка саобраћајних незгода на различитим посматраним локацијама. Изостанак мера изложености у процесу предикције саобраћајних незгода може да доведе до непоузданих резултата посебно када је у питању процена утицајних фактора (Qin et al., 2004). Са друге стране, поузданост и ефикасност мера изложености може бити користан само у случају када је однос између посматране изложености и фреквенције саобраћајних незгода линеаран (Hauer, 1995).

У развој предиктивних модела на макро нивоу често су укључене различите мере изложености. Одабир мере изложености је субјективан приступ истраживача и зависи од доступности података који обухватају демографске или саобраћајне карактеристике просторне јединице. Посматрајући саобраћајне зоне као просторне јединице, најчешће разматране мере изложености су:

- возило-миља путовања (De Guevara et al., 2004; Abdel-Aty et al. 2013; Dong et al., 2015; Lee et al., 2015; Cai et al., 2016; Rhee et al., 2016; Cai et al., 2017);
- возило-километар путовања (Hadayeghi et al., 2006);
- густина становништва (De Guevara et al., 2004; Siddiqui and Abdel-Aty, 2012; Lee et al., 2015; Cai et al., 2016; Wang et al., 2016);
- број становника (Noland et al., 2004);
- степен незапослености (Siddiqui and Abdel-Aty, 2012);
- активности пешака (Miranda-Moreno et al., 2011; Wang et al., 2013);

Укључивање одређене мере изложености у предиктивни модел зависи од зависне променљиве која се разматра у истраживању. Када су у питању рањиви учесници у саобраћају, Siddiqui et al. (2012) су истакли да се густина насељености становништва и степен запослености по саобраћајним зонама могу сматрати сурогат мерама за изложеност пешака и бициклиста. Ову чињеницу аутори су доказали применом Поасоновог логнормалног модела, где су ове две променљиве статистички значајне и имају позитиван ефекат на фреквенцију саобраћајних незгода. Поред тога, Lee et al., (2015) су спровели истраживање на подручју Флориде и утврдили однос између две мере изложености. Они су утврдили да величина популације и проток возила могу представљати мере изложености, међутим када се логаритмују ове две променљиве долази до мултиколинearности па је потребно једну меру искључити из даљег процеса моделовања. Код моделовања саобраћајних незгода у којима су учествовала само моторна возила, мере изложености су усмерене на линеарни однос дужине саобраћајница и протока возила. Јединице ових мера су возило-километар и возило-миља, тако да оне имају највећу примену у моделовању незгода по саобраћајним зонама (Hadayeghi et al., 2006; Abdel-Aty et al. 2013).

#### 4.2.1.2. Демографске и социо-економске карактеристике

У оквиру маркоскопских студија до сада су разматране различите демографске и социо-економске карактеристике. Ове карактеристике углавном се добијају анкетом становништва где се подаци агрегирају на различите просторне нивое. Анализом безбедности саобраћаја на подручју саобраћајних зона најчешће се посматрају старосне групе, пол, приходи домаћинства као и густина становништва. Густина становништва често се користи као сурогат за меру изложености посебно у ситуацијама када се

анализира безбедност пешака на посматраном подручју.

У досадашњим истраживањима идентификоване су одређене демографске и социо-економске карактеристике које имају статистички значајан утицај на агрегиран број саобраћајних незгода. Испитивање ових фактора у оквиру саобраћајних зона зависи од посматраног подручја као и типа незгода које се посматрају.

[Rhee et al. \(2016\)](#) су применили класичне просторне моделе како би испитали утицај демографских, социо-економских, саобраћајних и других карактеристика на агрегиран број незгода по саобраћајним зонама. Зависне променљиве у овом раду обухватају укупан број незгода, незгоде са настрадалим лицима као и незгоде са материјалном штетом. У оквиру независних променљивих, демографске и социо-економске карактеристике садрже скуп фактора у оквиру саобраћајних зона, а они се односе на: величину популације, број домаћинстава, број запослених, проценат становништва млађег од 15 година, проценат становништва старијег од 64 године, проценат становништва испод линије сиромаштва, проценат мушког становништва, проценат кретања становништва у току једне године, као и просечна примања. Резултати овог истраживања представљени су посебно према посматраној зависној променљиви. Међутим, аутори су идентификовали исте факторе код свих посматраних променљивих. Негативан утицај показао је фактор који се односи на проценат становништва млађег од 15 година. Са друге стране, проценат кретања становништва у току једне године и просечан доходак по глави становника показали су позитиван утицај на агрегиран број саобраћајних незгода.

[Lee et al. \(2014\)](#) су посматрали саобраћајне зоне као просторне јединице моделовања саобраћајних незгода и креирали нови зонски систем како би испитали утицај фактора на агрегиран број саобраћајних незгода на подручју Флориде. У склопу овог истраживања посматран је укупан број саобраћајних незгода и саобраћајне незгоде са погинулима и тешко повређеним лицима. У оквиру демографских карактеристика аутори су разматрали густину становништва, проценат Афроамериканаца, проценат Латиноамериканаца, проценат становништва старости 15-24 године и проценат становништва изнад 65 година. Када су у питању социо-економске карактеристике, аутори су разматрали проценат домаћинства без аутомобила и број хотела, мотела и соба за издавање. Резултати овог истраживања су показали да густина становништва и проценат Латиноамериканаца у оквиру саобраћајних зона има позитиван утицај на посматране зависне променљиве.

[Siddiqui et al. \(2012\)](#) су разматрали утицај демографских и социо-економских карактеристика на саобраћајне незгоде са пешацима и бициклистима у градовима Хилспору и Пинеласу на подручју Флориде. У оквиру овог истраживања, посматране карактеристике су анализирани кроз следеће атрибуте: густина становништва, просечан доходак домаћинства, фреквенцију објеката различитих намена, присуство едукативних установа као и проценат домаћинства која поседују путничко возило. Када су у питању незгоде са пешацима, аутори су утврдили да просечан приход у домаћинствима, број стамбених јединица у оквиру зоне, величина популације, проценат домаћинства без аутомобила, проценат домаћинства са једним аутомобилом и укупан број запослених имају директан утицај на зависну променљиву. Поред тога, идентификован је и утицај посматраних карактеристика на незгоде са бициклистима. Фактори који имају утицај су: просечан приход домаћинства, број стамбених јединица, величина популације, проценат домаћинства без аутомобила, проценат домаћинства са аутомобилом, као и укупан број запослених.

Када су у питању саобраћајне незгоде у којима су учествовали пешаци, [Wang et al. \(2016\)](#) су развили предиктивне моделе где су посматрали 263 саобраћајне зоне на урбаном подручју Шангаја. У оквиру ове студије, аутори су истакли значај овог

истраживања на посматраном подручју уз чињенице да око 35,1 % становништва пешачи са просечном дужином пешачења од 0,9 km у урбаним срединама. Циљ реализације студије односи се на испитивање утицаја одређених карактеристика на незгоде са пешацима. Међу испитаним карактеристикама обухваћене су демографске карактеристике које се односе на површину саобраћајне зоне и величину популације у оквиру саобраћајне зоне. Резултати су показали да укупан број становништва по зони има позитиван утицај на саобраћајне незгоде. Поред тога, укупан број становништва посматран је као мера изложености у моделу па је доказано да ако се број становника у једној зони повећа за 1.000, број незгода са пешацима повећава се за 1,4 %.

#### 4.2.1.3. Саобраћајне карактеристике

Макроскопски параметри узимају у обзир различите параметре саобраћајног тока како би испитале утицај саобраћајних карактеристика на фреквенцију саобраћајних незгода. Ови параметри обично се анализирају са различитих зонских нивоа у зависности од доступности података. Улога саобраћајних зона у зонском систему јесте да се прикупи највећи сет података који моделује саобраћај и транспорт ([Systematics and Consult, 2007](#)). Компарацијом модела на различитим просторним ентитетима, [Cai et al. \(2017\)](#) су утврдили да за различите типове саобраћајних незгода у оквиру саобраћајних зона је истакнуто више статистички значајних фактора који су део саобраћајних карактеристика у односу на пописне округе.

У оквиру саобраћајних карактеристика често се разматрају фактори који се односе на мобилност становништва као и карактеристике саобраћајне инфраструктуре. У оквиру досадашњих истраживања, саобраћајне карактеристике често представљају мере изложености у процесу развијања модела ([Abdel-Aty et al. 2013](#); [Cai et al., 2016](#); [Wang et al., 2019](#)). Поред мера изложености, саобраћајне карактеристике обухватају број путовања унутар или између зоне, начин и сврху путовања, структуру возног парка, ограничења брзине као и присуство саобраћајних објеката. У односу на демографске карактеристике, саобраћајне карактеристике су мање доступне за истраживаче па се оне разматрају у различитим облицима.

[Cai et al. \(2016\)](#) су разматрали неколико предиктивних модела како би утврдили испитивање утицаја саобраћајних карактеристика на фреквенцију саобраћајних незгода са пешацима и бициклистима. У оквиру овог истраживања посматрано је 8.518 саобраћајних зона у оквиру 594 саобраћајна дистрикта на подручју Флориде. Аутори су истакли да саобраћајне карактеристике које позитивно утичу на страдање пешака су: фреквенција возила по миљи, проценат локалних путева, дужина тротоара, проценат путника у јавном превозу као и проценат пешака. Негативан утицај на саобраћајне незгоде је идентификован код густине раскрсница, што је доказано у претходним студијама које су истакле да повећан број сигналисаних раскрсница повећава свест код возача и пешака ([Zajac and Ivan, 2003](#), [Eluru et al., 2008](#)). Када су у питању саобраћајне незгоде са бициклистима, резултати су слични као и код незгода са пешацима. Поред тога, евидентиране су и одређене разлике, а оне су: број путника у јавном превозу нема утицај на незгоде са бициклистима јер јавни превоз и бициклисти нису толико повезани. Тумачењем резултата, аутори су истакли да одређени фактори имају исти утицај на саобраћајне незгоде са пешацима и саобраћајне незгоде са бициклистима на посматраном подручју. Ово се може оправдати чињеницом да су у истраживању коришћене урбане и руралне средине што често доводи до неконзистентности резултата.

[Abdel-Aty et al. \(2013\)](#) су посматрали одређене типове саобраћајних незгода на различитим просторним нивоима на подручју Флориде. У оквиру овог истраживања

развијено је девет модела који су разматрали демографске, социо-економске и саобраћајне карактеристике. Саобраћајне карактеристике разматране у овом истраживању су: однос возила и дужине пута (возило-миља), дужина путева са ограничењем 25, 35, 45, 55 и 65 миља по часу, број запослених који путују у интервалу од 0 – 4 минута, број запослених који путују у интервалу од 5 – 9 минута, број запослених који путују у интервалу од 15 – 19 минута, број запослених који путују више од 30 минута, број запослених који путују јавним превозом и број запослених који пешачи на посао. Када је у питању укупан број саобраћајних незгода по саобраћајним зонама међу значајним факторима су се истакли: производ возило и дужине саобраћајница (возило-миља), дужина путева на којима је ограничење 35, 55 и 65 миља по часу и путовање популације пешачењем између зона.

Фактори који утичу на саобраћајне незгоде са тежим телесним последицама су слични као и код укупног броја незгода. Додатни фактори који су показали утицај на овај тип незгода су: путовање запослених у периоду 5-9 минута, где је истакнут њихов негативан утицај и путовања запослених у временском интервалу преко 30 минута, који позитивно доприносе настанку незгода ([Abdel-Aty et al., 2013](#)).

Слични резултати забележени су и код саобраћајних незгода са пешацима. За разлику од претходних модела истакнут је утицај фактора који се односи на путовање запослених јавним превозом као и број запослених који пешаче на посао. Ово се може оправдати чињеницом да путници јавног превоза често пешаче до аутобуског стајалишта ([Dawkins et al., 2005](#)).

[Lee et al. \(2014\)](#) су разматрали два скупа саобраћајних зона које обухватају планирање саобраћаја са једне стране и безбедност саобраћаја са друге стране. У оквиру оба скупа, аутори су испитали утицај саобраћајних карактеристика на агрегиран број незгода. Фактори који су посматрани у овом истраживању су: проценат дужине саобраћајница са малим ограничењем брзине (20 миља/часу или мањом), проценат дужине саобраћајница са великим ограничењем брзине (55 миља/часу или већом), дужина саобраћајница које су оштећене и возила-миља која представља меру изложености у моделима предикције. Фактор возила-миља је статистички значајан на оба зонска система. Разматрајући остале факторе, резултати су показали да проценат дужине саобраћајница са великим ограничењем брзине (55 миља/часу или већом) има значајан утицај код саобраћајних зона које обухватају анализу безбедности саобраћаја. Остали фактори нису показали значајност на зависне варијабле што зависи од примењених модела као и посматраног подручја.

#### **4.2.1.4. Карактеристике пута**

Карактеристике пута често су у корелацији са карактеристикама саобраћаја, међутим ове карактеристике имају све већу употребу код моделовања незгода у оквиру саобраћајних зона. У оквиру карактеристика пута обично се разматрају фактори који репрезентују саобраћајну инфраструктуру која је обухваћена на површини саобраћајних зона. Међу тим факторима обухваћени су: број раскрсница у зависности од типа и начина регулисања, присуство стајалишта јавног превоза путника, дужина уличне мреже, дужина бицикличких трака/стаза, дужина тротоара, број пешачких прелаза, број паркинг места као и број осталих саобраћајних објеката који се посматрају са микролокација. У зависности од подручја истраживања као и доступности одређених фактора, многи аутори су укључили карактеристике пута како би развили предиктивне моделе ([Siddiqui et al., 2012](#); [Wang et al., 2016](#); [Cai et al., 2017](#)).

[Cai et al. \(2017\)](#) су агрегирали укупан број саобраћајних незгода, саобраћајне незгоде



са тежим последицама и саобраћајне незгоде са немоторизованим учесницима у саобраћају, на различитим просторним ентитетима како би утврдили најповољнији ентитет за моделовање саобраћајних незгода. Како бих доказали полазне хипотезе, аутори су разматрали и карактеристике пута на различитим просторним нивоима који су обухватили саобраћајне зоне (8.519), саобраћајне дистрикте (594) и пописне округе (4.245) на подручју Флориде. Разматране карактеристике пута густина путева, дужина путева по функционалној класификацији, густина сигналисаних раскрсница, дужина бициклических трака и дужина тротоара. Резултати су приказани по различитом типу саобраћајних незгода где су анализирани саобраћајне зоне. На укупан број саобраћајних незгода позитиван утицај имала је дужина тротоара. Када су у питању саобраћајне незгоде са тешким последицама, идентификовани су утицајни фактори који се односе на: дужину тротоара, гуштину саобраћајница, проценат дужине главних саобраћајница и дужину бициклических трака. Фактори који утичу на саобраћајне незгоде са немоторизованим учесницима у саобраћају односе се на дужину локалних путева и дужину тротоара, које су показале позитиван утицај на фреквенцију незгода.

Chen (2015) је утврдио утицај фактора на саобраћајне незгоде са бициклическим у Сијетлу. Прикупљени су подацио уличној мрежи, елементима коловоза, као и броја раскрсница по типу и начину регулисања. Резултати истраживања показали су да дужина бициклических трака поред коловоза, број саобраћајних знакова по хектару као и број саобраћајних знакова који су намењени за пружање информација о доступности паркинг места имају позитиван утицај на фреквенцију незгода са бициклическим. Са друге стране, негативан утицај је идентификован код фактора који представљају број трокраких раскрсница по зони и дужину бициклических стаза.

Wang et al. (2012) су спровели студију у циљу развоја макроскопских модела како би испитали везу између укупног броја незгода и различитих демографских карактеристика, карактеристика намене површина и карактеристика пута. У свом уводном делу, аутори су истакли да карактеристике пута и уличне мреже представљају једне од главних карактеристика у макроскопским студијама. Ово истраживање спроведено је у Централној Флориди где је посматрано 662 саобраћајне зоне. У оквиру саобраћајних зона посматрана је структура уличне мреже која садржи неколико сегмената и раскрсница које припадају тој зони. Разматрајући сегменте и раскрснице у оквиру зона, аутори су применили Мешеднесов коефицијент како би испитали утицај мреже на саобраћајне незгоде. Овај коефицијент се рачуна као:

$$M = \frac{K - N + 1}{2 * N - 5} \quad (4.1.)$$

где је:

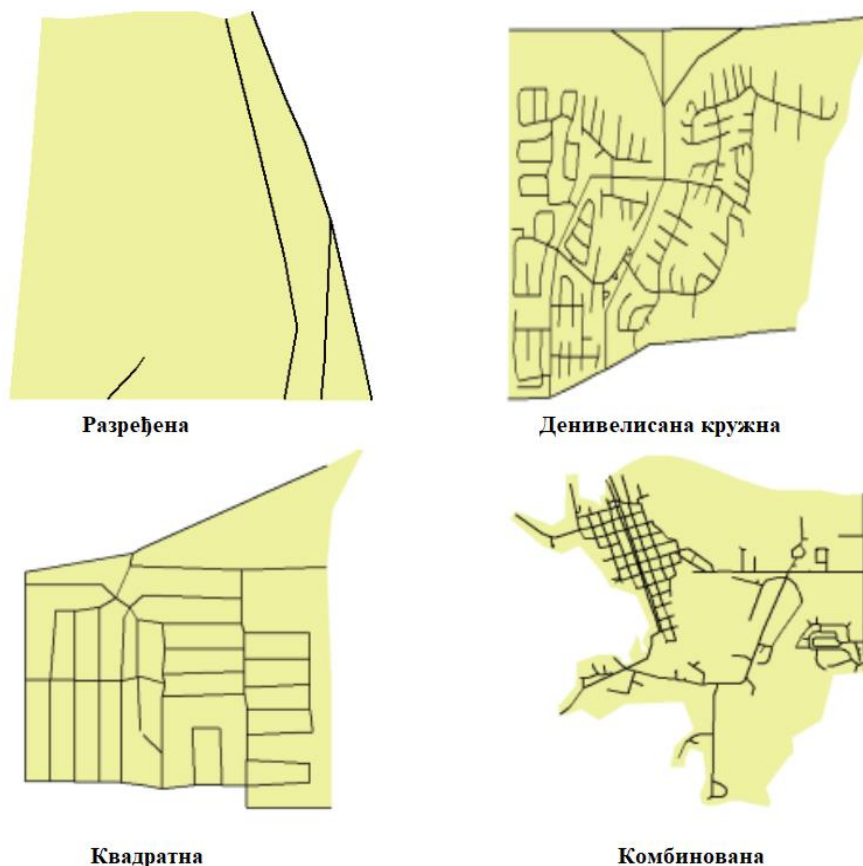
$K$  – број сегмената;

$N$  – број раскрсница.

Мешеднесов коефицијент може да варира од нула до један, што зависи од структуре мреже. У оквиру истраживања, израчунат је коефицијент за сваку зону и испитан је његов утицај на фреквенцију незгода. Резултати су показали да нема статистички значајног утицаја, али отвара могућности да се ова мера испита и на другим подручјима.

Поред тога, аутори су класификовали уличну мрежу на четири класе и испитали присуство класа у посматраним саобраћајним зонама. Класе на које је подељена улична мрежа су: разређена, денивелисана кружна, квадратна и комбинована мрежа (слика 4.2). Резултати су показали да разређена и денивелисана кружна мрежа имају негативан утицај на саобраћајне зоне у оквиру саобраћајних зона. Са друге стране, квадратна и

комбинована мрежа нису показале статистичку значајност на фреквенцију незгода. Препоруке које су аутори истакли за будућа истраживања односе се на дефинисање класа мреже и укључивање класа у предиктивне моделе.



Слика 4.2. Класификација мреже у оквиру саобраћајних зона.  
(Модификовано према Wang et al. (2012))

#### 4.2.1.5. Карактеристике намене површина

У последњих неколико година, карактеристике намене површина имају све већу улогу у макроскопским студијама. Почетак укључивања обележја намене површина огледа се у испитивању директног утицаја на фреквенцију саобраћајних незгода. Иза тога, развој технологије и методологије доводи до испитивања индиректне везе преко мера изложености. Карактеристике намене површина зависе од анализираних ентитета као и посматраног подручја. У макроскопским анализама, посматрајући саобраћајне зоне, карактеристике намене површина често се класификују на: простор за становање, комерцијални садржај, образовање, културни садржај, простор за рекреацију, зелене површине, здравствене установе, научне институције, инфраструктуру и присуство саобраћајних објеката (Pulugurtha et al., 2013).

У испитивању директне везе између обележја намене површина и фреквенције саобраћајних незгода, Levine et al., (1995) су утврдили повећану вреоватноћу да се саобраћајна незгода догоди на простору где је више присутан комерцијални садржај него што је то случај са стамбеним површинама на подручју Хонолула у Хавајима. Ово су потврдила и друга истраживања, која су разматрала обележја намене површина на другим подручјима (Kim et al., 2006; Hadayeghi et al., 2010; Rifaat and Tay, 2010).

Pulugurtha et al. (2013) су развили предиктивне моделе у циљу утврђивања функције

између карактеристике намена површина и фреквенције саобраћајних незгода. Ово истраживање је спроведено на макроскопском нивоу посматрајући 1.057 саобраћајних зона у Шарлоту. Као зависна променљива посматран је укупан број незгода, незгоде са настрадалима и незгоде са материјалном штетом, које су се догодиле током 2005 године. Карактеристике које су представљале обележја намене површина обухватала су површине на којима су се налазили:

1. Стамбени објекти;
2. Индустрија;
3. Пословни простори;
4. Стамбени и комерцијални објекти;
5. Објекти са колективним становањем;
6. Објекти са индивидуалним становањем;
7. Институционали објекти;
8. Комерцијални центри;
9. Иновативни центри;
10. Малопродажни објекти;
11. Урбана подручја;
12. Рурална подручја;
13. Истраживачка подручја;
14. Новонасељена подручја;
15. Микс површина.

Резултати истраживања представљени су према посматраној зависној променљиви. Идентификовани фактори намене површина, који утичу на укупан број незгода су: урбана подручја, пословни простори, објекти са колективним становањем, комерцијални објекти, институционали објекти као и истраживачка подручја. Сви ови фактори имају позитиван утицај на саобраћајне незгоде. Поред ових фактора, објекти са индивидуалним становањем показали су негативан утицај на саобраћајне незгоде. Када су у питању саобраћајне незгоде са настрадалим, резултати су слични као и код укупног броја незгода. У односу на укупан број незгода, повећано присуство индустрије у саобраћајним зонама негативно утиче на фреквенцију незгода са настрадалим. Код незгода са материјалном штетом идентификовани су исти утицајни фактори као у претходним моделима. Препоруке за будућа истраживања усмерене су ка разматрању што већег броја фактора као и анализе незгода у којима су учествовали рањиви учесници у саобраћају (Pulugurtha et al., 2013).

Поред испитивања појединачног обележја намене површина, поједини аутори су покушали да утврде утицај комбинованих фактора који утичу на фреквенцију саобраћајних незгода. Wang et al. (2019) су спровели истраживање како би испитали утицај четири типа карактеристика на фреквенцију саобраћајних незгода у саобраћајним зонама на подручју Шангаја. Међу испитаним карактеристикама налазе се и комбинована обележја намене површина која су испитана помоћу осам променљивих које су настале различитим комбинацијама. Обележја намена површина су прикупљена на два дистрикта у Шангају и то Пухи и Пудонг. Променљиве коришћене у овом истраживању приказане су у табели 4.2.

Резултати истраживања су показали да комбинована обележја немају статистички значајан утицај на фреквенцију саобраћајних незгода у 95 %, 90% или 75 % Бејзовог интервала поверења. Ови резултати могу се оправдати чињеницом да се на два посматрана дистрикта догодио различит број незгода.

**Табела 4.2.** Обележја намена површина која су разматрана у макроскопској студији у Шангају (Wang et al. 2019)

<i>Комбинована обележја намене површина</i>	<i>Процент</i>
1. Стамбени простор	22,4 %
2. Стамбени и комерцијални простор	28,9 %
3. Комерцијални, стамбени и пословни простор	11,0 %
4. Стамбени, културни, образовани и комерцијални простор	11,0 %
5. Изложбени, финансијски и туристички простор	7,6 %
6. Стамбени и индустријски простори	9,1 %
7. Стамбени и логистички простори	7,2 %
8. Стамбени и еколошки простори	2,7 %
<i>Интезитет намене површина</i>	
1. Мали интезитет	22,4 %
2. Средњи интезитет	27,4 %
3. Висок интезитет	50,2 %

Са друге стране, аутори истичу да се у дистрикту Пудонг имплементирало више мера које су усмерене на смањење незгода него што је то урађено у дистрикту Пуки. Сви ови разлози доводе до хетерогености утицајних фактора који нису обухваћени у овој студији. У наредним студијама потребно је разматрати хомогена подручја у погледу урбанистичких планова.

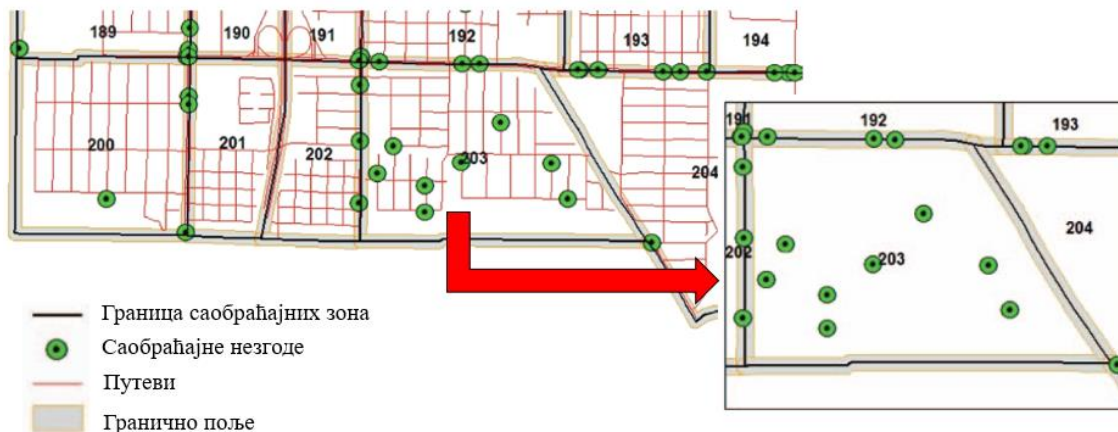
#### **4.2.1.6. Ограничења**

На основу прегледа досадашњих макроскопских студија, идентификован је утицај различитих карактеристика на агрегиран број саобраћајних незгода. Испитане карактеристике често су груписане у демографске, социо-економске, саобраћајне, к-ке пута и к-ке намене површина. Поједини истраживачи уложили су више напора за испитивање фактора који се односе на демографске, саобраћајне и карактеристике пута у односу на друге карактеристике (Rhee et al., 2016; Wang et al., 2016; Cai et al., 2017). Поред тога, Pulugurtha et al. (2013) су спровели истраживање које је већим делом фокусирано на карактеристике које обухватају обележја намена површина. Одабир посматраних карактеристика зависи од многих услова као и избора анализираних подручја.

У оквиру анализираних истраживања уочена су одређена ограничења у погледу одабира посматраних карактеристика. Једно од основних ограничења макроскопских студија јесте прикупљање података које је у зависности од извора података на посматраном подручју. Подаци се често добијају од саобраћајних и транспортних служби или геопозиционирањем одређених ентитета помоћу просторних алата (Wang et al., 2019). Недостатак података често се одражава на мере изложености које представљају основна обележја која су неопходна за предикцију саобраћајних незгода.

Поред прикупљања података, агрегирање саобраћајних незгода представља једно од кључних ограничења многих студија. Агрегација саобраћајних незгода се спроводи у циљу добијања фреквенције саобраћајних незгода на посматраном просторном ентитету. Када су у питању саобраћајне зоне, граница саобраћајних зона често је постављена дужином главних градских саобраћајница па то отежава истраживачима да доделе саобраћајне незгоде које се догоде на средини коловоза (слика 4.3.). Ово ограничење

често је сагледано кроз посебан развој модела за незгоде унутар зоне и незгоде које се налазе на граници зоне (Siddiqui and Abdel-Aty, 2012).



Слика 4.3. Издвајање саобраћајних незгода које су се догодиле на граници саобраћајних зона (Siddiqui and Abdel-Aty, 2012).

У многим досадашњим истраживањима истакнут је проблем анализе незгода на границама зона где се дефинише као гранични ефекат (Siddiqui and Abdel-Aty, 2012, Wang et al., 2012, Lee et al., 2014). На супрот томе, неки аутори су истакли да гранични ефекат саобраћајних зона има мали утицај на саобраћајне незгоде (Ladron de Guevara et al., 2004; Khondakar et al., 2010). Они су утврдили да је проценат незгода у близини граница износио око 5 %, што није значајно утицало на резултате њихових истраживања. Ово се може оправдати чињеницом да локалне власти користе различите критеријуме за креирање саобраћајних зона на разматраним подручјима.

Креирање саобраћајних зона често се заснива на хомогеним карактеристикама што може да доведе до просторне аутокорејације. Присуство просторне аутокорејације у посматраним карактеристикама може да утиче на претпоставку да су подаци случајно распоређени (LeSage and Pace, 2004). Пре процеса предикције саобраћајних незгода, потребно је тестирати присутност просторне аутокорејације у скупу података. Ако се детектује просторна аутокорејација, предиктивни модел треба да узме у обзир просторни ефекат (Lee, 2014).

#### 4.2.2. Модели за предикцију саобраћајних незгода у саобраћајним зонама

У последњих неколико година долази до еволуције методолошких алтернатива када је у питању проучавање модела намењених за предикцију саобраћајних незгода. Пошто су фреквенције саобраћајних незгода, ненегативни и пребројиви подаци, Поасонов регресиони приступ представља основу за почетне истраживачке напоре који су усмерени ка идентификовању утицајних фактора (Gustavsson and Svensson, 1976; Joshua and Garber, 1990). Како су истраживања напредовала, код Поасоновог модела уочена су одређена методолошка ограничења која су постала доминантна у развоју модела. Сагледавањем претходних ограничења, негативни биномни модел је постао широко коришћен у предикцији саобраћајних незгода зато што може да обради прекомерно дисперзивне податке што представља ограничење Поасоновог модела (Lord and Mannering, 2010). Поред ова два модела, током претходног периода сагледан је и низ других модела, који разматрају варијације пребројивих података, а они укључују Гама модел, Conway–Maxwell–Поасонов модел, негативни биномни–Линдли модел, итд

([Mannering and Bhat, 2014](#)).

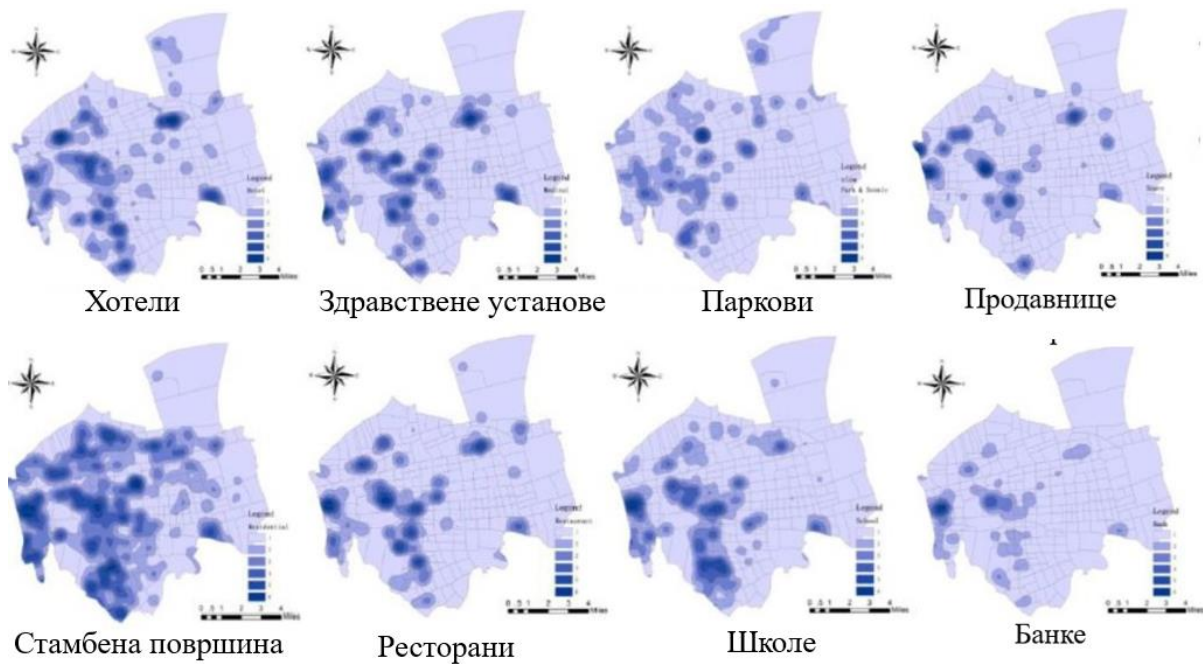
Други правац методолошког развоја односи се на сагледавање суптилнијих проблема који су односе на откривање одређених ефеката на посматраним просторним јединицама. Просторни ефекат често се односи на испитивање просторне аутокорељације између посматраних ентитета и њено укључивање у развој предиктивног модела. Просторна аутокорељација се јавља у случају да обележја једног ентитета утичу на зависну променљиву другог ентитета ([Anselin, 2013](#)). Овај процес често је евидентиран у предикцији саобраћајних незгода када се посматрају саобраћајне зоне ([Noland et al. 2013](#); [Rhee et al. 2016](#); [Wang et al., 2019](#)).

Код моделовања саобраћајних незгода у саобраћајним зонама просторни ефекат се исказује Морановим индексом којег чине просторни односи посматраних зона. Просторни односи се представљају просторним матрицама које манифестују релације између сваког пара зона ([Odland, 1988](#)). Досадашња истраживања која су разматрала просторне ефекте у оквиру саобраћајних зона усмерена су на развој:

- просторних ефеката ([Jia et al., 2018](#); [Ouni and Belloumi, 2019](#));
- просторних матрица ([Dong et al., 2014](#), [Dong et al., 2015](#); [Wang et al., 2016](#));
- предиктивних модела ([Siddiqui et al. 2012](#); [Chen, 2015](#); [Gomes et al. 2017](#); [Xu et al. 2017](#); [Hezaveh et al., 2019](#));
- просторних ентитета повезаних са саобраћајним зонама ([Lee et al., 2014](#); [Cai et al., 2017](#));

Идентификација просторних ефеката често се спроводи у првој фази моделовања саобраћајних незгода. [Ouni and Belloumi \(2019\)](#) су испитали перформансе две просторне аутокорељационе мере кроз поређење резултата за три региона и три временска периода у Тунису. Аутокорељационе мере примењене у овом истраживању односе се на глобалне и локалне мере засноване на томе да ли методе користе просторни тест аутокорељације на глобалном или локалном нивоу унутар области истраживања. На основу резултата, аутори су истакли да резултати идентификованих просторних ефеката могу да варирају у зависности од посматраног подручја као и посматраног временског оквира.

[Jia et al. \(2018\)](#) су применом Кернелове функције густине и испитивањем просторне аутокорељације покушали да утврде просторне ефекте на подручју Суцоуа у Кини. У оквиру овог истраживања анализирани су саобраћајне зоне где је утврђен ефекат између зависне и независне променљиве које се односе на карактеристике намене површина. Независне променљиве укључене су у Кернелову функцију како би се идентификовале саобраћајне зоне са највећим ризиком од саобраћајних незгода. У циљу одређивања класа које варирају од најмањег до највећег ризика, аутори су хронолошки израчунали суме квадрата девијације између класа, затим суму квадрата одступања од средње класе, затим разлику претходних сума на основу које се дефинишу потребне класе. Резултати су показали да Кернелова функција са дефинисаним класама има боље предиктивне способности него што је случај са класичном мером просторне аутокорељације. Поред тога, различити просторни модели доказују претходну претпоставку да су подаци о незгодама просторно корелисани па аутори препоручују примену просторног модела који сагледава стандарну грешку међу резидуалима. На слици 4.4. приказана је густина независних променљива које су укључене у модел како би се размотрала Кернелова функција у даљем поступку моделовања саобраћајних незгода.



Слика 4.4. Идентификација густине посматраних независних променљива Кернеловом функцијом (Jia et al., 2018).

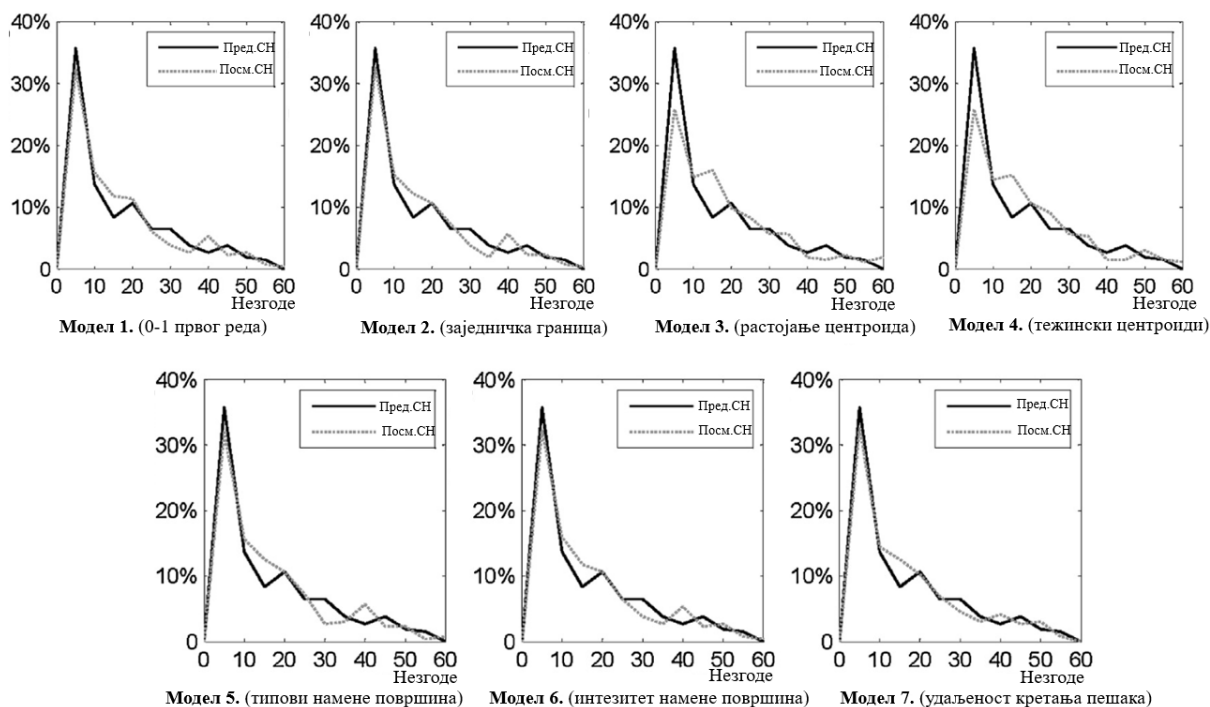
Разматрање просторних ефеката спроводи се дефинисањем и креирањем просторних матрица. Одабир типа просторних матрица зависи од доступности податка, просторних алата који се користе као и посматраног подручја. Wang et al. (2016) су развили седам условних ауторегресионих модела где су посматрали различите просторне матрице у циљу испитивања просторне корелације између саобраћајних зона. Аутори су истакли да се просторна корелација не може игнорисати приликом моделовања саобраћајних незгода на макро нивоу. За рачунање просторне корелације користе се различити типови матрица, које садрже у себи просторне ефекте.

Претходне студије су разматрале матрице 0-1 првог реда као и просторне матрице удаљености (Lee et al., 2015a, Lee et al., 2015b), затим матрице засноване на геометријском центроидном растојању и удаљености незгода са центроидом зоне (Dong et al., 2014).

Wang et al. (2016) су испитали која је најбоља просторна матрица која узима у обзир условни ауторегресиони модел у циљу моделовања саобраћајних незгода на макро нивоу. Просторне матрице које су коришћене у овом раду су:

1. Матрица 0-1 првог реда. Уколико се зоне граниче онда је 1 у супротном вредност је 0 (Wang et al., 2016);
2. Матрица која садржи дужину заједничких граница између зона (Dong et al., 2014, Dong et al., 2015);
3. Матрица заснована на растојању између геометријских центроида (Dong et al., 2014, Dong et al., 2015);
4. Матрица заснована на растојању између тежинских центроида незгода (Dong et al., 2014, Dong et al., 2015);
5. Матрица која садржи интеракцију зона са различитим типовима намене површина (Wang et al., 2016);
6. Матрица која узима у обзир интеракцију интензитета намене површина између суседних зона (Wang et al., 2016);
7. Матрица са геометријским карактеристикама просторног утицаја, која узима у обзир просечну удаљеност кретања пешака (Wang et al., 2016).

Резултати истраживања су показали да модел, који узима у обзир матрицу са геометријским карактеристикама просторног утицаја, има најбоље перформансе за предикцију саобраћајних незгода са пешацима у Шангају. Утврђивање просторне корелације спроведено је помоћу Морановог коефицијента који се креће у границама од -1 до 1. Резултати су показали да је присутна просторна корелација пошто је Z-вредност у границама испод -1,96 и већа од 1,96, што указује да је просторна аутокорелација значајна у 95 % интервала поверења. На слици 4.5. приказане су посматране и предвиђене вредности фреквенције саобраћајних незгода у саобраћајним зонама, посматрајући све анализирани просторне матрице.



Слика 4.5. Предвиђен и посматран број незгода у односу на одабир просторне матрице (Wang et al., 2016).

Поред просторних матрица, многи аутори су усмерили своја истраживања на развој и одабир оптималног предиктивног модела који показује најбоље перформансе за моделовање саобраћајних незгода. Rhee et al. (2016) су применили класичне просторне моделе како би анализирали сет података који моделује саобраћајне зоне на подручју Сеула. У анализи су коришћена два приступа примене просторне регресије. Први приступ обухвата класични регресиони модел, који обухвата просторну матрицу као обележје просторне зависности, просторни лаг модел и просторни модел грешака. Други приступ се односи на просторну пондерисану регресију која користи Гаусову форму кернела са фиксним опсегом, који посматра исти број тачака узорка. За испитивање просторног ефекта коришћена је просторна тежинска матрица креирана на основу топ метода. Анализом информационих критеријума најбоље перформансе је показао просторни модел грешака, где је идентификована стандардна грешка у резидуалима зависне променљиве.

Siddiqui et al. (2012) су испитали методе и моделе који су посматрани кроз Бејзов оквир, где је извршена компарација између Бејзових модела и традиционалног негативно-биномног предиктивног модела. У овом истраживању доказана је просторна корелација која је спроведена на основу експланаторне анализе коришћењем глобалне и



локалне Моранове статистике. Аутори су истакли да је локална Моранова статистика осетљива на одабрани број пермутација које у овом случају одређује аналитичар. Различит број пермутација може да доведе до различитих резултата, у овом случају за анализу саобраћајних незгода генерисано је 99, 199, 499 и 999 пермутација. Резултати су показали присуство просторне корелације као и њен утицај кроз предиктивне моделе. У раду, зависну променљиву чини агрегиран број незгода са пешацима и агрегиран број незгода са бициклистима, док независне променљиве чине обележја која описују појединачне зоне. Резултати су показали да варајације којима доприноси просторна корелација се значајно разликују код незгода са пешацима (36%) и незгода са бициклистима (79%). Из овог сета података може се закључити да је потребно рачунати просторну корелацију када се анализирају незгоде са пешацима и бициклистима у оквиру саобраћајних зона. Поред тога, аутори су закључили да Бејзови модели са просторном корелацијом имају боље перформансе од модела који не разматрају просторну корелацију.

Cai et al. (2016) су развили моделе који разматрају вишак нула у зависној променљивој, моделе који разматрају просторни ефекат и традиционалне предиктивне моделе. Аутори су истакли два економетријска приступа за решавање вишка нула. Први приступ се односи на предиктивне моделе са вишком нула, а други приступ на модел са препрекама (eng. Hurdle model) који се ретко користи у литератури. Одговарајући приступ и одабир модела за анализу зависи од доступне базе података. На макро нивоу је могуће визуализовати двоструко стање (eng. dual-state) података на просторним јединицама где се посматрају различити типови незгода. Ако генерисање података подржава двоструке моделе, игнорисање модела са вишком нула и процена традиционалних НБ модела ће резултовати пристрасним оценама.

Поред тога, аутори су истакли да саобраћајне незгоде које се догоде у оквиру саобраћајних зона могу бити проузроковане факторима из суседних зона. На основу тога су предложени просторни модели који уважавају присуство просторног ефекта који се разматра на основу два приступа: (1) као ефекте просторне корелације који имају просторну грешку и (2) као ефекте просторног преливања. У овом раду, како би се прилагодили просторни ефекти, предлаже се разматрање егзогених варијабли из суседних зона ради рачунања просторне зависности. На основу овог приступа развија се модел просторних преливања који може бити лако имплементиран код аналитичара како би квантификовали утицај суседних јединица на фреквенцију незгода. Поред модела који уважавају просторно преливање података, у раду је примењено шест модела, и то: негативни биномни модел (са и без просторног ефекта), негативни биномни модел са вишком нула (са и без просторног ефекта) и попречни негативни биномни модел (са и без просторног ефекта). Резултати су показали да је утицај просторног ефекта значајан и упоредив са другим егзогеним варијаблама, па је потребно уважити овај ефекат код моделовања незгода.

У циљу ублажавања ефеката просторне аутокорелације, Бејзов условни аутокорелациони модел је често примењен јер може ефикасно да се прилагоди просторним корелацијама анализираних јединица (MacNab, 2004; Quddus, 2008; Huang et al., 2010). Huang et al. (2010) су развили Бејзов просторни модел са условном регресионом вероватноћом која има способност да уважи просторне ефекте на посматраном подручју. У даљем развоју метода и модела за предикцију саобраћајних незгода, Wang et al. (2019) су применили Бејзов метод који је развијен коришћењем Марковљевих Ланаца и Монте Карло симулацијама (eng. Markov Chain Monte Carlo (MCMC)), које се покрећу помоћу истоименог алгорита. За развој симулације, аутори су применили програмске платформе отвореног кода како бих укључили просторни ефекат у процес моделовања.

Cai et al. (2017) су разматрали предиктивне моделе који уважавају просторни ефекат између фактора и класичних модела без просторног ефекта. Аутори су развили 18 модела, од којих су две групе са и без просторног ефекта (Поасонов логнормални модел и Поасонов логнормални условни ауторегресиони модел), затим су разматране три просторна ентитета (пописни окрузи, саобраћајне зоне и саобраћајни дистрикти) која сагледавају три типа незгода (укупан број незгода, незгоде са тешким последицама и незгоде са немоторизованим учесницима). Поред тога, аутори уводе мрежу која је једнаких дужина и облика на целом простору истраживања у циљу тестирања поређења модела на различитим просторним ентитетима уз примену мера веродостојности које су засноване на зонском систему једнаког броја опсервација. Модели у раду су развијени за различите зонске системе који ће бити тестирани на истим структурама мреже. У оквиру истраживања, ауторима није предмет величина мреже, па се разматра величина мреже од 1 до 1.000 квадратних миља. На основу броја посматраних ентитета и просечног броја незгода, може се закључити да су пописни окрузи упоредиви са мрежом величине  $4 \times 4$ , саобраћајне зоне са мрежом величине  $3 \times 3$  и саобраћајни дистрикти са мрежом величине  $10 \times 10$ . На слици 4.6. је приказан метод креирања мреже и процес доделе података одређеним ћелијама мреже.



Слика 4.6. Приказ креиране мреже у циљу поређења просторних ентитета на подручју Флориде (Cai et al., 2017)

На слици 4.6, црвени квадрат је једна ћелија мреже (ћелија А) која сече четири саобраћајне зоне. Четири одговарајућа пресечена ентитета представљају регионе 1, 2, 3 и 4. Незгоде које су се догодиле у ћелији А требало би да буду једнаке збиру незгода у четири пресечена региона. На основу тога је израчунат предвиђен број незгода за сваку ћелију и након тога се спроводи компарација просторних ентитета помоћу мера веродостојности. Резултати су показали да мере веродостојности (MAE и RMSE) се повећавају са величином мреже, потврђујући полазну хипотезу да на мере поређења просторних ентитета може утицати број опсервација и посматраних вредности. Уважавајући полазне резултате, аутори су истакли да модели који разматрају веће димензије ћелија имају најбоље перформансе са и без уважавања просторног ефекта. За

сваки зонски систем модели који уважавају просторну корелацију значајно побољшавају перформансе моделовања, па је пожељна њихова примена у наредним истраживањима.

### 4.3. ПРЕДИКЦИЈА САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА НА РАСКРСНИЦАМА

Анализирајући све просторне јединице на микро нивоу, раскрснице су окарактерисане као локације са највећим ризиком страдања због укрштања саобраћајних токова. Ову чињеницу потврђују многа истраживања спроведена широм света. [Lord et al., \(2005\)](#) су истакли да се 43 % саобраћајних незгода догодило на раскрсницама или у њиховој близини на подручју САД. Поред тога, у Норвешкој се догоди око 40 % саобраћајних незгода на раскрсницама ([Elvik and Vaa, 2004](#)). На подручју Сингапура спроведено је истраживање које је обухватило период 1992-2002., где је утврђено да више од једне трећине саобраћајних незгода (34,31 %) се догоди на раскрсницама ([Tay and Rifaat, 2007](#)). У Канади више од 30 % незгода са смртним исходом и око 40 % незгода са тешким последицама догоди се на раскрсницама ([Barua et al., 2010](#)). Када су у питању урбане средине, [Karsch et al., \(2012\)](#) су приказали да се у државама Европске Уније 70 % незгода са смртним случајем догоди у урбаним срединама, а у САД чак 76 % незгода се догоди у урбаним срединама. Раскрснице у урбаном подручју представљају сложени део путне мреже на којима се могу појавити различите интеракције између рањивих учесника у саобраћају и моторних возила. Према томе, безбедност на раскрсницама у урбаном подручју, када се посматрају сви видови путовања, представља озбиљно питање.

У циљу унапређења безбедности саобраћаја на раскрсницама потребно је усмерити пажњу на идентификацију утицајних фактора на саобраћајне незгоде, као и на развој методологије у погледу статистичких модела како би се на основу претходно посматраног временског периода донели благовремени закључци. Разматрање безбедности на раскрсницама може се посматрати на основу подручја у којима се налазе. Многи аутори су спровели истраживања где су посматране раскрснице у руралним срединама ([Stokes et al., 2000](#); [Alexander et al., 2007](#); [Bhagavathula et al., 2000](#)), док са друге стране, поједини аутори су истраживали раскрснице у урбаним срединама ([Roozmond, 2001](#); [Weng et al., 2006](#); [Wang et al., 2008](#); [Ahmane et al., 2013](#)).

[Tay, \(2015\)](#) је спровео истраживање на подручју Канадске провинције Алберта у циљу утврђивања разлике између руралних и урбаних раскрсница које имају различите саобраћајне карактеристике, карактеристике пута и карактеристике окружења. Резултати истраживања указују да саобраћајне незгоде, које се догоде на раскрсницама у урбаним срединама, су повезане са понашањем рањивих категорија у ситуацијама када прелазе коловоз, повећаним протоком возила, појавом влажног коловоза, већим бројем саобраћајних трака, углом укрштања, као временском периоду у току дана. Са друге стране, незгоде на раскрсницама у руралним срединама, често су повезане са повећањем смртних случајева као и брзином кретања возила, посебним путним карактеристикама, приступним путевима, као и временским условима. Ове резултате треба узети у обзир при одабиру потребног узорка. Пре процеса предикције саобраћајних незгода потребно је раздвојити раскрснице на оне у урбаним и руралним срединама. Раскрснице у урбаним срединама су једноставније за процес развоја предиктивних модела због доступности података, као једно од основних ограничења свих истраживања. У наставку поглавља представљени су фактори који утичу на раскрснице у урбаним срединама, као и избор модела који је развијен у циљу одређивања оптималног модела.

### 4.3.1. Фактори који утичу на саобраћајне незгоде на раскрсницама

Анализа саобраћајних незгода на раскрсницама може се разматрати преко различитих детерминанти садржаних у четири кључна фактора: човек, возило, пут и окружење. У односу на посматрану саобраћајну ситуацију, фактори се могу поделити на субјективне и објективне као што је то случај и на другим просторним нивоима. Субјективни фактори се односе на особине личности које карактерише људски фактор. Са друге стране, објективни фактори представљају узајамну повезаност између људског фактора и карактеристика возила, пута и окружења што је разматрано у даљем раду.

Многи истраживачи су до сада применом предиктивних модела испитали утицај фактора на саобраћајне незгоде на раскрсницама (Brüde and Larsson 1993; Lee and Abdel-Aty 2005; Pulugurtha et al., 2011., Gomes, 2013; Lee et al., 2017). На основу досадашњих истраживања, верује се да постоји јака, али недовољно утврђена веза, између саобраћајних незгода и специфичних карактеристика пута и његовог окружења (Harwood et al., 2008). Поред тога, често се доводи у питање да ли одређене карактеристике утичу на мобилност становништва или на ризик страдања (Miranda-Moreno et al., 2011). У појединим истраживањима, фактори који су статистички значајни у предиктивним моделима односе се на демографске и социо-економске карактеристике појединца или одређеног подручја (Pulugurtha and Repaka, 2008; Mitra and Wachinton, 2012), саобраћајне карактеристике (Lee et al., 2017; Wang et al., 2017), геометријске карактеристике пута са околином (Poch and Mannering, 1996; Strauss et al., 2014; Xie et al., 2014), карактеристике и обележја намена површина (Dissanayake et al., 2010; Torbic et al., 2010) и временске карактеристике (Blazquez et al., 2010).



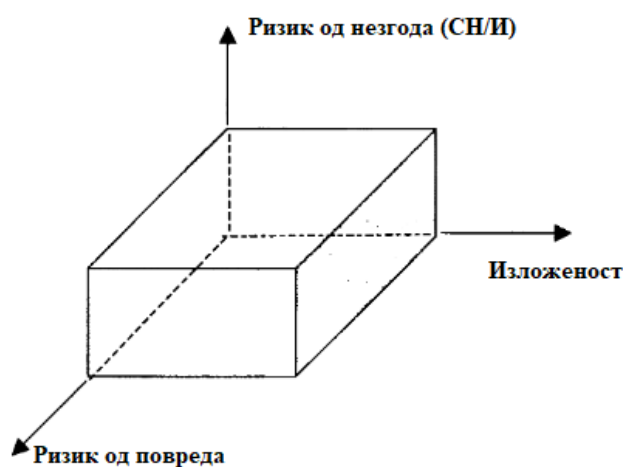
Слика 4.7. Систематизација фактора који утичу на саобраћајне незгоде на раскрсницама

У циљу систематизације анализираних фактора, посматрани фактори који утичу на

саобраћајне незгоде на раскрсницама могу се сагледати на различите начине. У зависности од примене одређене методологије за анализу незгода, фактори се могу укључити у предиктивне моделе као мере изложености и експлораторне независне променљиве. Мере изложености представљају број могућности да дође до саобраћајне незгоде у датом простору и времену. Експлораторне независне променљиве код анализе саобраћајних незгода на раскрсницама могу се поделити у пет група, а оне су: демографске и социо-економске карактеристике, саобраћајне карактеристике, геометријске карактеристике пута и околине, карактеристике намене површина и карактеристике времена када су се саобраћајне незгоде догодиле (слика 4.7).

#### 4.3.1.1. Мере изложености

Мере изложености у саобраћају су генерално дефинисане као нека врста количине путовања, било моторним возилом, бициклом или пешице. Када је фреквенција путовања позната по одређеним активностима или учесницима у саобраћају, а такође је познат и број саобраћајних незгода које су повезане са тим активностима или популацијом тада се на основу ова два параметара може утврдити ризик. Процена ризика игра велику улогу у побољшању безбедности свих учесника у саобраћају. На основу тога, различити начини мерења фреквенције путовања се колективно посматрају као мере изложености, све то из разлога што мере изложеност ризика саобраћајних незгода. Rumar (1999) је представио изложеност као једну од три основне варијабле или димензије у простору које указују на проблем безбедности саобраћаја (слика 4.8).



Слика 4.8. Проблем безбедности саобраћаја приказан у тродимензионалном простору (Rumar, 1999)

Ове димензије описују проблем безбедности саобраћаја као однос изложености, ризика од незгоде и ризика од последица кроз функцију (4.2):

$$ПовСН = И \times \Pi \left| \frac{СН}{И} \right| \times \Pi \left| \frac{Пов}{СН} \right| \quad (4.2)$$

где је:

ПовСН – Број повређених у саобраћајним незгодама;

И – Изложеност

$\Pi \left| \frac{CH}{I} \right|$  – Вероватноћа да се догоди саобраћајна незгода (Ризик)

$\Pi \left| \frac{Пов}{CH} \right|$  – Вероватноћа повреда у саобраћајној незгоди (Ризик од повреде)

Анализе безбедности саобраћаја најчешће укључују мере изложености учесника у саобраћају у циљу идентификације фактора, који утичу на њихову безбедност у саобраћају. Концепт изложености може се дефинисати као број догађаја који могу да доведу до настанка саобраћајне незгоде (Chapman, 1973). Мере изложености се могу посматрати са просторног и временског аспекта. Када су у питању мере изложености на раскрсницама, оне се могу посматрати на макро, мезо и микро ниву кроз саобраћајне и демографске карактеристике. Мере изложености на макро нивоу у некој области могу се евидентирати на два начина. Први начин се односи на изложеност појединачних фреквенција путовања учесника у саобраћају, а други на изложеност одређених врста саобраћајних незгода на одређеним локацијама и у одређеном времену (Smeed, 1955; Greene-Roesel et al., 2007; Brüde et al., 1993).

Smeed (1955) је анализирао стопу саобраћајних незгода у односу на милион пређених миља и закључио да је овај однос мањи на путевима ван насеља него што је то случај у насељу. Поред тога, представио је и мере изложености у којима су узете у обзир различите старосне структуре, као и временски периоди у току дана за време управљања моторним возилом.

Greene-Roesel et al., (2007) су представили у свом извештају различите мере изложености као што су: подаци о популацији, подаци о протоку возила, фреквенција реализованих путовања, дужина пута пешачења и време пешачења. Аутори су детаљно анализирали представљене мере изложености, што укључује одговарајућу употребу сваке мере, поступке прикупљања података, као и предности и недостатке мера. Подаци о популацији представљају меру процене фреквенције становништва на датом простору или фреквенцију становништва према различитим старосним групама, која се добијају на макро нивоу.

Када су у питању рањиви учесници у саобраћају, Brüde et al. (1993) су спровели анализу саобраћајних незгода са пешацима и мера изложености применом предиктивних модела. У раду су анализирани подаци прикупљени у оквиру 30 општина, величине од 25.000 или више становника у Шведској, и подаци о саобраћајним незгодама посматрани у периоду 1983-1988. године. У истраживању је анализирано 377 раскрсница. Резултати су показали да једноставни модели у којима су укључени проток возила и незгоде са пешацима могу дати добре предиктивне способности код анализе страдања пешака. Ови резултати су добијени упркос чињеници да коефицијенти корелације између посматраних и фитованих вредности могу бити изузетно мали. Прорачунима се могу добити максималне вредности коефицијента корелације у предиктивном моделу. Максимална вредност овог коефицијента зависи од средње вредности и варијансе за посматране раскрснице. На основу тога, ризик страдања пешака повећава се у случају повећања протока возила, а смањује се када се проток пешака смањи.

Карактеристике које представљају мере изложености на раскрсницама са мезо и микро нивоа захтевају прикупљање података са малих локација и у краћем временском периоду, где омогућавају лакши приступ података. Досадашња истраживања су показала да мере изложености прикупљене са микро нивоа представљају значајну улогу у анализи саобраћајних незгода. (McDonald, 1953; Chapman, 1973; Routledge et al., 1974; Cameron, 1982). Ове мере се такође могу представити кроз саобраћајне и демографске карактеристике.

McDonald (1953) је испитао повезаност између мера изложености, које су посматране као саобраћајне карактеристике, и фреквенције саобраћајних незгода на раскрсницама, које се налазе дуж путева намењени искључиво за кретање моторних возила. У оквиру саобраћајних карактеристика посматран је проток возила на главном и споредном прилазу раскрснице. За потребе истраживања посматрана је 171 раскрсница. При анализи утицаја протока возила на главном и споредном прилазу, аутор је дошао до закључка да је стопа незгода више осетљивија на промене уколико се јављају варијације у протоку возила на споредном прилазу него што је то случај на главном прилазу раскрснице. Поред тога, утврђено је да не постоји директна веза између стопе незгода на раскрсницама и суме два улазна тока. Овај однос је успостављен када се посматра број саобраћајних незгода на милион становника. При малом протоку возила са споредног прилаза, аутор је истакао појаву веће стопе саобраћајних незгода. Ови резултати могу се оправдати чињеницом да већи проток возила доводи до стварања застоја саобраћаја на споредном току па возачи имају довољно времена да анализирају саобраћајни ток на главном прилазу.

Chapman (1973) је развио концепт изложености саобраћајних незгода на раскрсницама на два начина. Први начин дефинише функцију саобраћајних токова и саобраћајних незгода, где се пореде незгоде са добијеном мером изложености. Други начин пореди емпиријску фреквенцију незгода и токове за многе локације, под претпоставком да је ризик на свакој локацији исти, у циљу примене модела који најбоље пореди саобраћајне токове и посматране незгоде. Ова два начина представљају четири мере изложености које су предложене за анализу саобраћајних незгода на раскрсницама:

1. Укупан саобраћај који пролази кроз раскрсницу (збир свих улазних токова);
2. Производ токова у конфликтним тачкама;
3. Квадратни корен производа укрштајућих токова;
4. Посматрани број конфликта на локацији.

Routledge et al. (1974) су анализирали степен изложености деце у саобраћају. У оквиру истраживања представљена је процена ризика деце приликом преласка преко коловоза, где су разматране различите старосне структуре деце и њихов пол. За мерење ризика узета је просечна вероватноћа пешака одређене старости и пола који су учествовали у саобраћајним незгодама када су прелазили коловоз. Прикупљање података за ово истраживање извршено је путем интервјуа који су реализовани у школама. Деца су интервјуисана сваког дана у циљу да објасне своје активности и њихово кретање у току предходног дана. Поред тога, на одређеним локацијама су мапиране саобраћајне незгоде са циљем представљања њихове густине по просторним јединицама. Резултати истраживања су показали да број преласка деце преко коловоза ван обележеног пешачког прелаза се повећава са годинама детета. Ово оправдава чињеницу да родитељи често прате у школу децу млађег узраста. На основу тога, може се закључити да мере изложености деце играју велику улогу када је у питању прелазак деце преко коловоза.

Cameron (1982) је представио модел који пореди податке о изложености и податке о саобраћајним незгодама са пешацима на подручју Аустралије. Аутор је истакао да се модел који обухвата мере изложености разликује на два приступа који анализирају првенство пролаза пешака на обележеном пешачком прелазу. Први приступ се односи на првенство пролаза пешака на обележеном пешачком прелазу, а други се односи на првенство пролаза возила у односу на пешаке, ван обележеног пешачког прелаза. Ове ситуације омогућавају дефинисање потенцијалних незгода као догађаја у којем пешаци и моторна возила користе исти део коловоза у малом временском интервалу између њих. Број потенцијалних незгода је приближно пропорционалан производу броја пешака и возила који се крећу делом коловоза током временског интервала у којем су стопе

доласка константне. Поред тога, аутор је истакао да код укрштања приоритетних и неприоритетних токова најважнији параметар је минимални интервал слеђења. Минимални интервал слеђења код пешака и код возила представља највећим делом ризик од саобраћајне незгоде. Према томе, потребно је узети у обзир производ броја пешака и возила, који ће дефинисати изложеност пешака.

Многи аутори до сада су користили разне методе за прикупљање мера изложености за развој модела који разматрају саобраћајне незгоде у којима су укључени рањиви учесници у саобраћају (Hocherman et al., 1988; Cove et al., 1988). Методе које се користе за прикупљање података су: механичка бројања, математички модели и мануелна бројања. Поред тога, треба напоменути да механичка бројања захтевају велика финансијска средства са једне стране и поузданост бројања са друге стране као што су кварови инсталације. Најчешће коришћена метода за добијање протока пешака јесу мануелна бројања. Ова процедура захтева напоран рад и велике инвестиције.

Hocherman et al., (1988) су представили процену годишњег дневног протока пешака на основу краћих бројања. Прво, аутори су посматрали кратак временски интервал за бројање пешака како би проценили проток пешака у оквиру једног сата. Процена часовног тока постиже се множењем протока пешака у периоду посматрања са одговарајућим факторима. Затим, процена сата укључује одговарајуће факторе како би се проценио дневни проток пешака. Да би се утврдили одговарајући фактори неопходно је знати расподелу пешака који прелазе коловоз у току једног дана. Аутори су истакли да ако постоје сезонске варијације потребно их је уважити.

$$Q_{peš} = H_{god} \cdot K \cdot H_{čas} \cdot S \quad (4.3)$$

$Q_{peš}$  – процена протока пешака;

$H_{god}$  – вредности бројања у одређеном времену у току годишњег доба;

$K$  – часовни однос: 60/мин бројања;

$H_{čas}$  – дневни фактори за час и

$S$  – сезонски корелациони фактор за годишње доба.

У истраживању су представљени резултати бројања саобраћаја на локацијама у централном пословном окружењу и стамбеним насељима у градском подручју Израела (Hocherman et al., 1988). Анализа дневног протока пешака доводи до бројних закључака у вези са практичним применама и побољшањем кретања пешака. То се може користити у пројектовању пешачких објеката и за проучавање ризика страдања пешака. Проток пешака у току дана може се проценити током дневних часова од 07:00 до 22:00. Укупни 24-часовни проток може се проценити на основу 15-часовног протока који се множи са 1,03 за стамбене локације и 1,07 за централна пословна окружења. Одговарајуће дневне дистрибуције имају сличне дистрибуције са разликама које одражавају различите начине живота. Стандардна девијација часовне процене у насељу је углавном од 2 до 3,5% укупног дневног протока. Варијације у часовном протоку су углавном мање у централним пословним локацијама и крећу се између 1,0 и 3,5% дневног протока пешака.

Cove et al. (1988) су представили моделе за процену протока пешака у универзитетским кампусима у југоисточној Америци. Модели процене су одређени на основу бројања пешака у краћим временским интервалима. Ово истраживање имало је за циљ да спроведе:

1. Идентификацију одређених локација и прикупљање података на терену кроз бројање пешака у временском интервалу од 5 минута;



2. Анализу проширених података користећи постојеће моделе засноване на пребројивом интервалу и жељеним нивоом тачности;
3. Статистичку анализу стварних података и проширених података како би се проверила поузданост модела;
4. Развију моделе који прецизно предвиђају проток пешака из краткотрајног бројања.

Подаци за ову анализу прикупљени су петком током марта и априла 1991. Бројање је вршено у 5-минутном интервалу за 12 часова (7h-19h). Резултати истраживања су представљени кроз регресиону анализу. Анализа се састоји из 16 модела, који су предвидели 1h, 2h, 3h и 4h за сваки временски интервал бројања од 5, 10, 15 и 30 минута. Прихватљиви модели за процену протока су изабрани на основу коефицијента детерминације и стандардне грешке око средње вредности. Резултати модела су показали да:

1. Бројање пешака у краткорочним интервалима може бити обећавајућа алтернатива за проширене моделе. Постојећи проширени модели нису били валидни за предикцију протока пешака у кампусима;
2. Интервал бројања код употребе модела треба да буде 10 минута пре почетка наставе;
3. Модели предикције представљају релевантније процене параметара, ако се бројање повећа са 1h на 2h, 3h или 4h;
4. Тачност предиктивних модела такође расте, ако се повећа временски опсег мерења протока пешака.

Генерално, мере изложености представљају један од кључних параметара које је потребно уважити када су у питању анализе које се односе на испитивање везе између одређених карактеристика и саобраћајних незгода. Предност укључивања мера изложености у анализу саобраћајних незгода огледа се у томе да се добију што прецизнији и поузданији резултати у циљу сагледавања проблема безбедности саобраћаја. Поред тога, кроз преглед литературе у претходном делу уочени су и одређени недостаци који се односе на поступак прикупљања података ([Pulugurtha and Repaka, 2008](#)). Мере изложености захтевају одређене поступке и методе које у великој мери зависе од прецизности података.

#### ***4.3.1.2. Демографске и социо-економске карактеристике***

Учесници у саобраћају често формирају мешовиту групу људи у односу на пол, старост, социо-економски статус, и друге демографске и социо-економске карактеристике. Број погинулих и повређених лица у саобраћајним незгодама варира пре свега од посматране просторне јединице, како са макро нивоа, па све до најмањих посматраних локација. Раскрснице представљају једне од најопаснијих локација које се посматрају са микро нивоа. На основу тога, потребно је указати на неопходност анализирања и разумевања демографских и социо-економских фактора који утичу на саобраћајне незгоде на раскрсницама.

У досадашњим истраживањима анализа утицаја демографских и социо-економских фактора на раскрсницама сагледава се са макро и микро нивоа. Код анализа безбедности на макро нивоу, ове карактеристике су често анализиране у оквиру пописних блокова или саобраћајних зона ([Harruff et al., 1998](#); [LaScala et al., 2000](#); [LaScala et al., 2001](#); [Wier et al., 2009](#)). Са друге стране, анализа фактора који се односе на демографске и социо-економске карактеристике често су испитани и на микро нивоу ([Preusser et al., 1982](#); [Lee](#)

and Abdel-Aty, 2005; Pulugurtha and Sambhara, 2011; Miranda-Moreno et al., 2011; Mitra and Washington, 2012; Wang et al., 2017).

Preusser et al. (1982) су испитали утицај демографских карактеристика на саобраћајне незгоде на раскрсницама. У овом истраживању је спроведена анализа саобраћајних незгода које су се догодиле приликом скретања моторних возила за време условног десног сигнала на сигналисаним раскрсницама. Анализирана подручја у овом истраживању су Њу Орлеанс и Лос Анђелос, где је забележено око 4 % саобраћајних незгода са рањивим учесницима у односу на укупан број саобраћајних незгода. Резултати истраживања указују да су у незгодама најчешће укључени мушки возачи, старости око 30 година. Када су у питању пешаци, у незгодама најчешће учествују особе женског пола у поподневним часовима, где су забележене озбиљне повреде.

Pulugurtha and Sambhara (2011) су утврдили нелинеарну везу између саобраћајних незгода на сигналисаним раскрсницама и предикторских променљивих као што су демографске карактеристике (карактеристике становништва и број домаћинства) и социо-економске карактеристике (просечан доходак по домаћинству и степен запослености). У оквиру истраживања обухваћено је 176 сигналисаних раскрсница у Шарлоту, где су анализирани саобраћајне незгоде у 4-годишњем периоду (2004-2007.). На основу спроведене анализе, аутори су закључили да повећање популације становништва у зони раскрснице утиче на повећање броја саобраћајних незгода. Остале варијабле које се односе на демографске и социоекономске карактеристике нису биле значајне.

Wang et al. (2017) су имали за циљ да испитају ефекат микроскопских фактора на могућност настанка саобраћајних незгода у односу на различите видове путовања. У истраживању разматране су саобраћајне незгоде које су се догодиле у зони раскрсница у 5-годишњем периоду (2005-2009.). Независне променљиве које су коришћене у анализи су: густина становника у зони раскрснице, старосне групе становништва (0-15 година и 16-64 година), проценат становништва који користи јавни превоз у зони раскрснице, проценат становништва који пешачи у зони раскрснице и просечан доходак домаћинства. Резултати су показали да густина становништва у зони раскрснице има највећи утацај на саобраћајне незгоде. Поред тога, проценат старосне групе становништва (19-64 године) у близини раскрснице има негативан ефекат на саобраћајне незгоде. Када се узме у обзир изложеност пешака, кроз путовање становништва на посао пешице, аутори су дошли до закључка да проценат радника који пешачи у близини раскрснице има позитиван утицај на саобраћајне незгоде са пешацима.

У анализи фактора који утичу на саобраћајне незгоде на раскрсницама, из предходног прегледа литературе може се закључити да демографске и социо-економске карактеристике имају значајну улогу. Демографски фактори који имају значајан утицај на саобраћајне незгоде на раскрсницама су старосна структура становништва, пол пешака, образовање као и начин путовања. Ови фактори се тумаче тако да се учесници у саобраћају могу поделити у више старосних група, где свака група има посебне рањиве способности. Пол се може оправдати да мушкарци учесталије праве саобраћајне прекршаје него што је то случај код жена (Clifton and Livi, 2005). Када је у питању степен образовања становништва у зони раскрснице, резултати су показали негативан утицај на саобраћајне незгоде, што је и очекивано из разлога што становништво са високим степеном образовања ретко прави саобраћајне прекршаје (LaScala et al., 2000). Избор путовања до жељеног циља такође има утицај на саобраћајне незгоде, ово се оправдава чињеницом да уколико се становништво определи за одређен вид путовања до свог циља то омогућава и више могућности да учествује у саобраћајној незгоди као пешак, путник или возач.

#### 4.3.1.3. Саобраћајне карактеристике

Као и у макроскопским студијама, саобраћајне карактеристике имају значајну улогу код предикције саобраћајних незгода на раскрсницама. Поред тога, саобраћајне карактеристике имају велику примену у анализама које посматрају утицај пута на настанак саобраћајних незгода. Ове карактеристике се често користе као мере изложености где се помоћу њих долази до могућности настанка саобраћајних незгода.

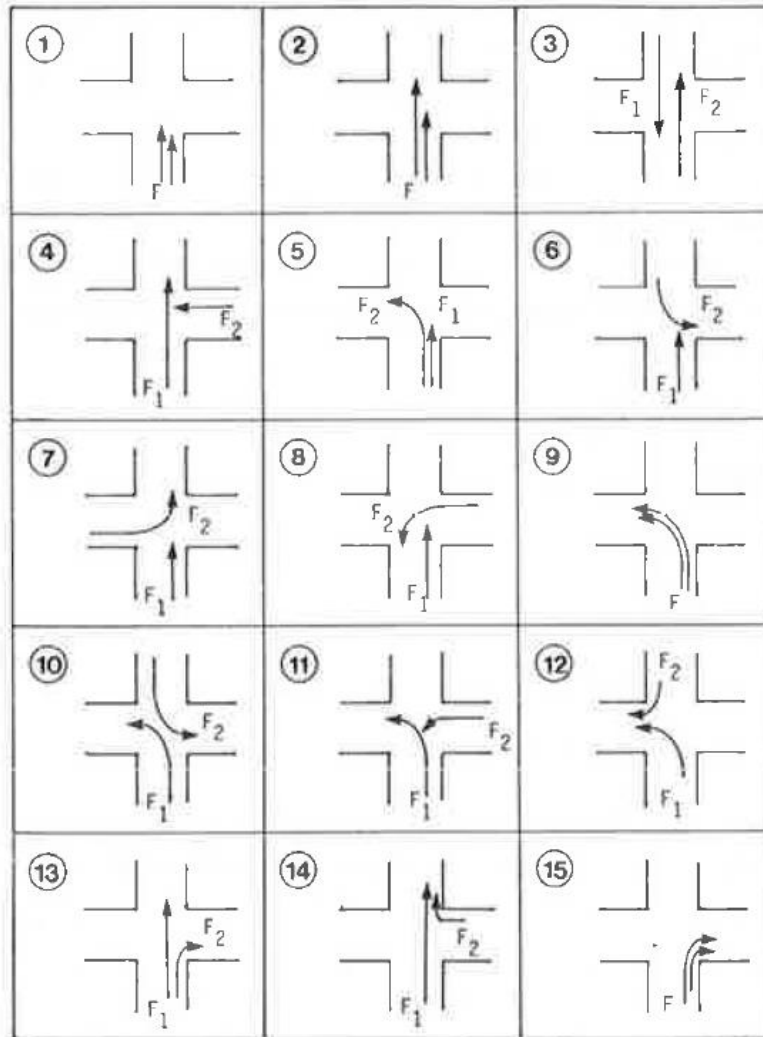
У анализама безбедности саобраћаја на раскрсницама, саобраћајне карактеристике обично обухватају основне параметре саобраћајног тока као и начин регулисања раскрсница. На основу ове чињенице, саобраћајне карактеристике могу имати своју примену кроз: просечан годишњи дневни саобраћај (ПГДС), просечан дневни саобраћај (ПДС), фреквенцију кретања раањивих категорија у зони раскрснице, просечну брзину возила у зони раскрснице, ограничење брзине у зони раскрснице, начин регулисања раскрснице, дужину циклуса сигнализације раскрснице, дужину фазе за возаче, дужину фазе за пешаке, број фаза, итд. (Sayed and Rodriguez, 1999; Chin and Quddus, 2003; Torbic et al., 2010; Mitra and Washington, 2012; Wang et al., 2017)

Просечан годишњи дневни саобраћај (ПГДС) се обично користи као мера изложености. Према Chapman (1973), изложеност на раскрсницама помоћу ПГДС је дефинисана као укупан ПГДС који пролази кроз раскрсницу или као квадратни корен производа укрштајућих токова. Други аутори су користили ПГДС као експлораторну променљиву у предиктивним моделима где су посматрали проток возила посебно на главном и споредном прилазу на раскрсници, као и ПГДС по смеру кретања возила поред других карактеристика (Hauer et al., 1988; Lyon and Persaud, 2002; Torbic et al., 2010; Pulugurtha and Sambhara, 2011; Mitra and Washington, 2012;)

Hauer et al. (1988) су развили предиктивни модел за процену очекиваног броја саобраћајних незгода где су посматрали проток возила као саобраћајну карактеристику на сигнализаним раскрсницама. За потребе истраживања преузети су подаци са 145 четворокраких сигнализаних раскрсница у Торонту. Подаци о протоку возила анализирани су по смеру кретања возила на раскрсници и прикупљени су у току једног радног дана у дневним условима и то, у току јутарњег вршног периода, поподневног вршног часа и у периоду ван вршног часа. Подаци о саобраћајним незгодама прикупљени су из дневних полицијских извештаја у трогодишњем периоду (1982-1984.). У анализу су укључене саобраћајне незгоде у периодима 7:00-9:00 h (јутарњи вршни час), 16:00-18:00 h (поподневни вршни час) и 10:00-15:00 h (ван вршни период). Подаци о незгодама подељени су према врсти саобраћајних незгода на: незгоде са пешацима, незгоде у којима је учествовало једно возило, незгоде у којима су учествовала два возила и незгоде у којима су учествовала два или више возила. У анализу су узете само саобраћајне незгоде у којима су учествовала два возила, из разлога што се ове незгоде најчешће јављају на сигнализаним раскрсницама (81 %).

Аутори су представили 15 различитих ситуација у којима су учествовала два возила у незгоди на сигнализаној раскрсници (слика 4.9.). Незгоде за сваку ситуацију су дефинисане на основу манерва који возачи изводе на раскрсници. Неке од специфичних ситуација које су истакли аутори јесте када се возила крећу у истом смеру, као на пример, у првој ситуацији узете су у обзир незгоде које су се догодиле пре зауставне линије и када се возила крећу право кроз раскрсницу. Друга ситуација је слична првој, али обухватају незгоде када се возила налазе после зауставне линије у смеру кретања и 13 ситуација у којој једно возило продужава право кроз раскрсницу, а друго скреће у десну страну. Аутори су описали сваку ситуацију и истакли њихово дефинисање на основу дневних полицијских извештаја, затим су представили број незгода према свакој

ситуацији. Највећи број саобраћајних незгода забележен је у 6. ситуацији, а најмањи број незгода је евидентиран у 10. и 11. ситуацији (Hauer et al. 1988).



Слика 4.9. Ситуације у којима се догађају саобраћајне незгоде између два возила на раскрсници (Hauer et al., 1988);

Како би одредили зависност између незгода и одговарајућих ситуација на раскрсници аутори су представили однос саобраћајних незгода (ситуација 6. на слици 4.9) и ПГДС-а. За добијање очекиваног број незгода на раскрсници (ситуација 6. на слици 4.9) аутори су узели у обзир број возила који се креће право кроз раскрсницу и број возила из супротног смера који скреће лево. Генерално, све зависности између токова могу се исказати преко:

$$E\{m\} = b_0 \times F_1^{b_1} \times F_2^{b_2} \quad (4.4)$$

где је:

$E\{m\}$  - Очекивани број саобраћајних незгода;

$b_0$   $b_1$   $b_2$  - Регресиони коефицијенти;

$F_1$  - Проток возила на главном прилазу;

$F_2$  - Проток возила на споредном прилазу;

У истраживању за процену коефицијената коришћен је метод максималне веродостојности и дозвољава коришћење специфичне грешке структуре (error structure) код анализираних података. У овом случају аутори су се определили за негативну биномну грешку структуре где су кроз тумачење резултата закључили да:

1. При анализи саобраћајних незгода потребно је узети у обзир проток возила према смеру кретања у којима је дошло до незгоде. Веза између фреквенције саобраћајних незгода и укупног саобраћаја (када се сумирају сви токови на раскрсници) показала се као незадовољавајућа.
2. Фреквенција незгода између возила која се крећу у истом смеру је пропорционална саобраћајним току који се креће у том смеру.

Sayed and Rodriguez (1999) су применом предиктивних модела анализирали ниво безбедности саобраћаја на несигналисаним раскрсницама у урбаним срединама као функције саобраћајног протока на главном и споредном прилазу. У анализи је обухваћено 419 несигналисаних раскрсница (186 трокраких и 233 четворокраких), подаци су прикупљени у 6 градова Северне Америке. Подаци о саобраћајним незгодама прикупљени су у трогодишњем периоду (1993-1995.). Све раскрснице су контролисане саобраћајним знаковима за обавезно заустављање на једном прилазу код трокраких и на два прилаза код четворокраких раскрсница. Резултати истраживања су показали да проток на главном и споредном прилазу раскрснице има статистички значајан утицај на саобраћајне незгоде. Уз помоћ ових резултата аутори су представили четири апликације које могу бити од изузетне важности када је у питању безбедност на раскрсницама:

1. Идентификација локације које су погодне за незгоде;
2. Развој критичне криве за фреквенцију незгода;
3. Идентификација и рангирање локација које су погодне за незгоде;
4. Вредновање пре-после студије.

Када су у питању саобраћајне незгоде са рањивим учесницима у саобраћају, Torbic et al. (2010) су испитали утицај саобраћајних карактеристика на фреквенцију саобраћајних незгода са пешацима на градским и ванградским раскрсницама. У раду су коришћени подаци који су преузети за два града, а то су Торонто и Шарлот. Подаци из Торонта обухватају узорак од 1.800 сигналисаних раскрсница. Подаци о протоку возила и пешака су прикупљени за већи део ових раскрсница. За анализу података примењени су предиктивни модели за сигнализоване раскрснице, где су посебно посматране трокраке, а посебно четворокраке раскрснице. Варијабле које утичу на незгоде у којима су учествовали пешаци у оквиру основног модела су:

- Укупан саобраћајни проток као број возила по дану (сума протока на главном и на споредном прилазу);
- Однос протока на главном и на споредном прилазу;
- Проток пешака по дану.

Wier et al. (2009) су спровели истраживање како би испитали утицај фактора на број саобраћајних незгода са пешацима на подручју Сан Франциска. Посматране јединице у овој анализи су просторне пописне јединице (Census tracts). Према претходном прегледу литературе, аутори су истакли да ПГДС није једина варијабла која утиче на број саобраћајних незгода са пешацима. У истраживању поред ПГДС обухваћене су и карактеристике окружења, карактеристике становништва и карактеристике путовања у циљу да се испита утицај других варијабли на број саобраћајних незгода. Резултати

истраживања су показали да ПГДС представља највећи предиктор у анализи фактора (+0,753). Коначан модел објашњава приближно 72% варијације у незгодама у којима су учествовали пешаци.

Када се узме у обзир анализа саобраћајних карактеристика, [Salifu \(2004\)](#) је у свом истраживању испитао факторе који утичу на број саобраћајних незгода које су се догодиле у зони раскрснице у Гани. У истраживању коришћен је негативни-биномни регресиони модел, где је број саобраћајних незгода представљен као зависна варијабла, а независне варијабле обухватају саобраћајне карактеристике на раскрсници. За потребе истраживања обухваћена је 91 раскрсница, од којих је 57 трокраких и 34 четворокраких несигналисаних раскрсница. Период истраживања је обухватио трогодишњи период (1996-1998.), када се догодило 354 саобраћајне незгоде на трокраким и 238 саобраћајних незгода на четворокраким раскрсницама. Подаци о саобраћајним токовима и начину регулисања прикупљени су за сваку раскрсницу. Подаци о саобраћајним токовима су садржали ПГДС, број преласка пешака на целој раскрсници и брзину кретања возила на главном прилазу раскрснице. Возила су подељена у три категорије и то на путничке аутомобиле, мини аутобусе и тешка теретна возила и аутобусе. Прикупљање података о броју возила извршено је бројањем у току јутарњег и вечерњег вршног часа, након тога подаци су конвертовани у ПГДС уз апроксимацију одговарајућих фактора. Величина пешачког саобраћаја је прикупљена у истом временском периоду као и интензитет возила, међутим код ових података нису укључени одговарајући фактори. Брзина возила мерена је помоћу ручног радара, где је узет случајни узорак од 40 возила на сваком краку раскрснице. Поред ових променљивих, у анализи су обухваћене и променљиве које се односе на начин регулисања раскрсница, улично осветљење, као и присуство пешачких објеката.

У истраживању коришћен је општи модел предикције који је представљен као ([Salifu, 2003](#)):

$$E(\mu_i) = \beta_0 \times PGDS_{Sporedni}^{\beta_1} \times PGDS_{Glavni}^{\beta_2} \times e^{\sum \beta_j \times x_{ij}} \quad (4.5)$$

$E(\mu_i)$  - Очекиван број незгода у  $i$ -тој раскрсници;

$PGDS_{Sporedni}$  и  $PGDS_{Glavni}$  - Саобраћајни проток на споредном и главном прилазу;

$\beta_0$  - Одсечак који је потребно проценити;

$\beta_1$  - Коефицијент који показује утицај саобраћајног тока на споредном прилазу, у очекиваном броју незгода.

$\beta_2$  - Коефицијент који показује утицај саобраћајног тока на главном прилазу, у очекиваном броју незгода;

$x_{ij}$  - Вектор експланаторних променљивих;

$\beta_j$  - регресиони коефицијенти који представљају утицај експланаторних променљивих.

У складу са општим линеарним моделом, овај модел се трансформише у предиктивни модел коришћењем природног логаритма. Коначан модел који је коришћен у даљој анализи је ([Salifu, 2003](#)):

$$\ln(\mu_i) = \ln(\beta_0) + \beta_1 \ln PGDS_{sporedni} + \beta_2 \ln PGDS_{glavni} + \sum \beta_j \times x_{ij} \quad (4.6)$$

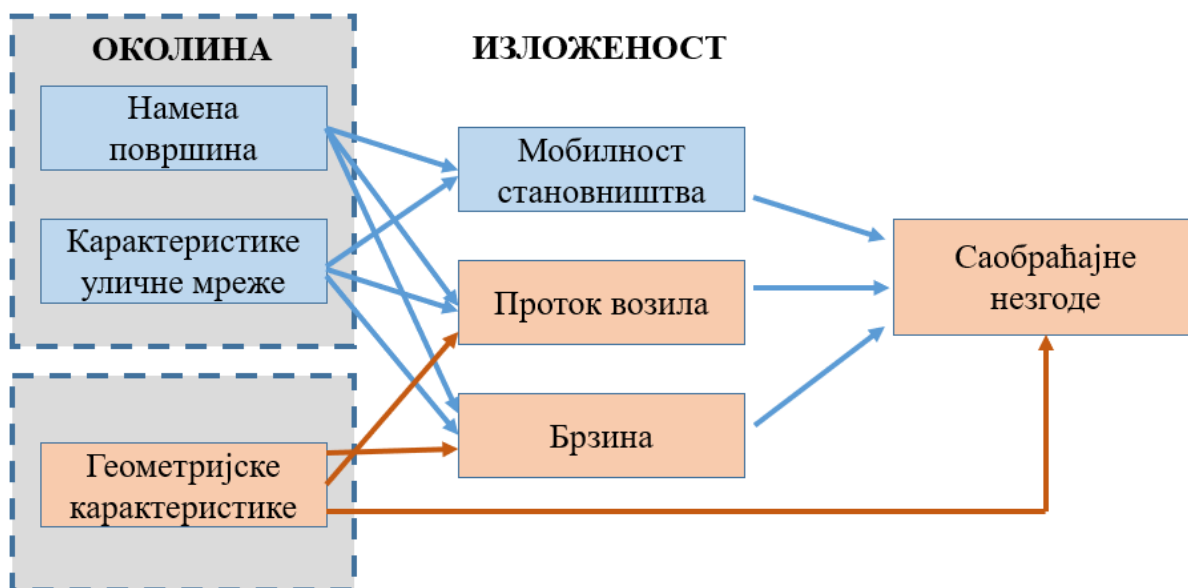
Моделу су примењени посебно за трокраке и за четворокраке раскрснице. Адекватност модела оцењена је Freeman-Tukey тестом. Код четворокраких раскрсница вредност Freeman-Tukey је 0,91, што значи да варијабле у моделу објашњавају 91 % варијабилности саобраћајних незгода. Када су у питању трокраке раскрснице вредност Freeman-Tukey теста је 0,50, што значи да варијабле у моделу објашњавају 50 % варијабилности саобраћајних незгода. Поред тога, резултати модела за четворокраке раскрснице показали су позитивну корелацију између броја саобраћајних незгода и независних варијабли као што су: ПГДС на главном и споредном прилазу, проценат тешких теретних возила у укупном току саобраћаја и стандардна девијација брзине на главном прилазу. Када су у питању трокраке раскрснице резултати су показали да ПГДС на главном, ПГДС на споредном прилазу и стандардна девијација просечне брзине тока на главном прилазу имају позитиван утицај на број саобраћајних незгода. Нагативан утицај на саобраћајне незгоде у овом случају показале су променљиве које се односе на начин регулисања раскрсница.

Анализирана истраживања показују да саобраћајне карактеристике имају велики утицај на настанак саобраћајних незгода на раскрсницама. Најзначајнији параметар саобраћајног тока је проток возила, који је у предходним истраживањима посматран као просечан годишњи дневни саобраћај (ПГДС) или као просечан дневни саобраћај (ПДС). Када су у питању раскрснице, ПГДС и ПДС се посматра на главном или споредном прилазу, а у појединим истраживањима и према смеру кретања возила (Hauer et al., 1988). Ове саобраћајне димензије често се карактеришу као мера изложености. Анализе фактора који утичу на саобраћајне незгоде на раскрсницама, поред ПГДС узимају у обзир и друге саобраћајне карактеристике као што су мобилност становништва, брзина возила, начин регулисања, и друге. Поред тога, саобраћајне карактеристике обухватају само један део утицајних фактора, а у наредном делу биће представљене друге карактеристике које су у вези са саобраћајним факторима.

#### **4.3.1.4. Геометријске карактеристике пута**

У структури фактора који доприносе саобраћајним незгодама, геометријске карактеристике пута и околине заузимају значајно место. Када је у питању анализа безбедности на раскрсницама, геометријске карактеристике се могу посматрати као присуство или број одређених елемената попречног профила пута, бициклических објеката, пешачких објеката.

Геометријске карактеристике пута и околине могу бити у индиректној вези са страдањем свих учесника у саобраћају. У досадашњем прегледу литературе, многа истраживања су доказала ову чињеницу, где су истакнуте значајне карактеристике. Код анализе саобраћајних незгода на раскрсницама, фактори геометријских елемената пута утичу на мере изложености, што представља могућност настанка саобраћајне незгоде (Miranda-Moreno et al., 2011). Miranda-Moreno et al. (2011) су испитали утицај окружења и геометријских карактеристика на мобилност становништва и саобраћајних незгода. Поред тога, аутори су представили концептуални оквир утицаја изграђеног окружења и геометријских карактеристика на ризик изложености који делује на настанак саобраћајних незгода (слика 4.10).



Слика 4.10. Концептуални оквир утицаја геометријских карактеристика и околине пута на мере изложености и саобраћајне незгоде (Miranda-Moreno et al., 2011)

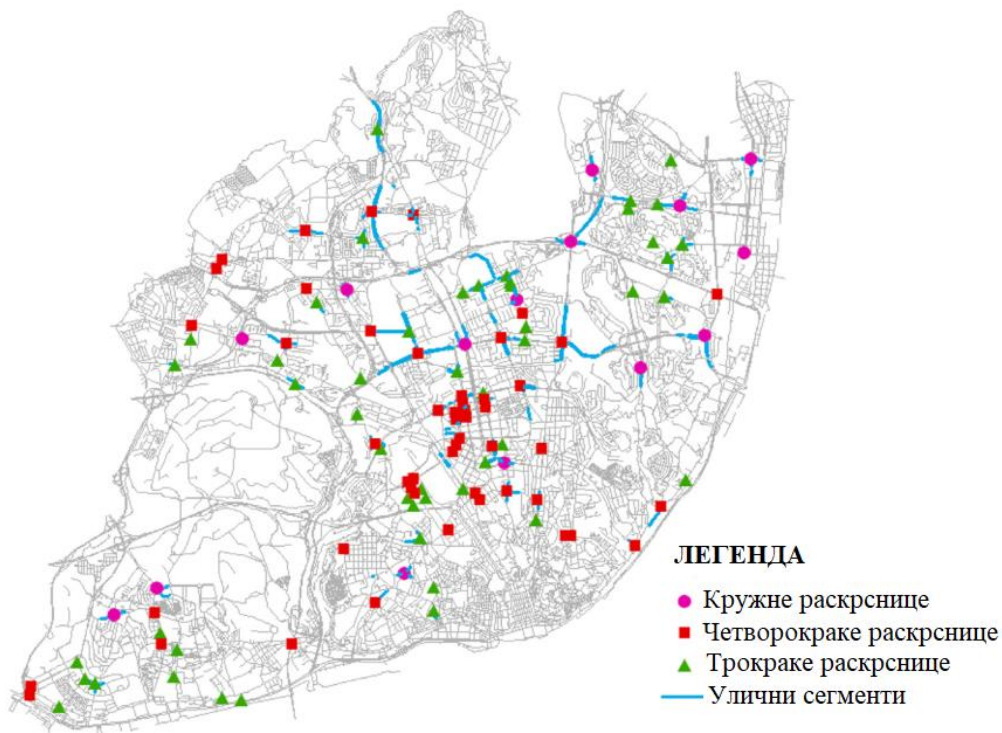
У циљу утврђивања утицаја геометријских карактеристика на мере изложености на раскрсницама, Miranda-Moreno et al. (2011) су анализирали прикупљене податке са 519 сигналисаних раскрсница у централном делу Монтереала. Резултати истраживања у погледу геометријских карактеристика су показали да статистички значајан утицај на мобилност пешака представљају: присуство метро станица у близини раскрснице, присуство и број аутобуских стајалишта у зони раскрснице као и проценат главних саобраћајница. Поред тога у анализи је обухваћен и тип раскрснице. У овом случају аутори су посматрали трокраке и четворокраке раскрснице, где су установили да се на четворокраким раскрсницама јавља већи ризик страдања. Поред тога, резултати су показали да се ризик страдања смањује, ако се број становника повећа, што представља нелинеарну везу.

Када је у питању директан утицај геометријских карактеристика раскрсница на саобраћајне незгоде, Mitra et al. (2002) су успоставили статистичку везу која повезује фреквенцију саобраћајних незгода са геометријским факторима и карактеристикама које се односе на регулисање токова у раскрсницама. У овом истраживању посматране су 52 сигнализоване раскрснице у Сингапуру у осмогодишњем периоду (1992-1999.). Анализа података је спроведена применом предиктивних модела, тачније, примена Поасоновог модела, негативног-биномног модела, Поасоновог модела са вишком нула и негативним биномним моделом са вишком нула. Предиктивни модели су примењени на основу експлораторних променљивих које се односе на ширину коловоза на прилазу, присуство нерегулисане траке за лева скретања, присуство траке за лева скретања, присуство траке за убрзавање, присуство траке за десна скретања, удаљеност аутобуског стајалишта, ширина и присуство разделног острва, тип контроле саобраћаја на раскрсници, временско трајање циклуса и број фаза по циклусу. Резултати су показали да присуство трака за лева скретања значајно утиче на повећање саобраћајних незгода на раскрсницама, ово се може оправдати чињеницом да увођење левих скретања на раскрсници доводи до повећања конфликтних тачака. Поред тога, ширина разделног острва која је већа од 2 метра показала је статистичку значајност када је у питању повећање незгода (ово је карактеристично у урбаним срединама где се јавља хетерогена структура учесника). Повећан број фаза повезан је са повећањем саобраћајних незгода, што оправдава чињеница да се већина незгода догађа током промене фазе. Прегледност



раскрснице у растојању до 400 метара повезана је са високом стопом незгода. Поред тога, издвојено аутобуско стајалиште смањује вероватноћу да дође до настанка саобраћајних незгода на раскрсницама. Аутобуска стајалишта смањују ширину приступног пута што доводи до већег броја конфликта, посебно и у случају када се аутобуси укључују у саобраћај. Међутим, уколико на раскрсницама постоји посебна проширења коловоза где се аутобуси заустављају забележено је смањење незгода. Генерално, у овом истраживању посматрани су кључни параметри када су у питању геометријске карактеристике раскрснице, са друге стране ограничење овог истраживања може се односити на мали узорак посматрања.

Међутим, када су у питању саобраћајне незгоде са пешацима, геометријске карактеристике пута у зони раскрсница немају значајну улогу у појединим истраживањима (Sandra Vieira Gomes, 2013). Sandra Vieira Gomes (2013) је у свом истраживању испитала утицај елемената инфраструктуре на саобраћајне незгоде са пешацима у урбаним срединама. За потребе истраживања извршено је геопозиционирање саобраћајних незгода у ГИС програмском пакету. Након тога, прикупљени су и обједињени подаци о саобраћајним незгодама, карактеристикама пута и карактеристикама саобраћаја. Подаци коришћени у истраживању прикупљени су у четворогодишњем периоду (2004-2007.) у Лисабону. Јединице посматрања су: четворокраке раскрснице, трокраке раскрснице, кружне раскрснице и улични сегменти између две раскрснице (слика 4.11).



Слика 4.11. Одабране јединице посматрања у Лисабону (Sandra Vieira Gomes, 2013)

У циљу идентификације геометријских фактора који утичу на безбедност пешака на раскрсницама, Sandra Vieira Gomes (2013) је анализирао следеће факторе: укупан број саобраћајних трака, ширину саобраћајних и коловозних трака, број трака на главном и споредном прилазу, број кружних трака код кружне раскрснице, број прилазних трака код кружне раскрснице, број кракова на раскрсници, дужина и присуство пешачких прелаза, ширина паркинг простора у близини раскрсница, број средишњих линија, попречни нагиб коловоза у зони раскрснице, присуство и ширина разделног острва на

главном и споредном прилазу, присуство посебних трака за лева и десна скретања на главном и споредном прилазу, начин регулисања раскрснице, број једносмерних прилаза. Након спроведене анализе, резултати су показали да одређен број геометријских фактора утиче на укупан број саобраћајних незгода код свих типова раскрсница. Међутим, када су у питању саобраћајне незгоде са пешацима, у овом истраживању посматрани геометријски елементи пута нису били статистички значајни.

Насупрот претходном истраживању, [Torbic et al. \(2010\)](#) су спровели истраживање где су идентификовали одређен број геометријских фактора који утичу на саобраћајне незгоде. Истраживање је спроведено у Торонту и Шарлоту, где су посматране трокраке и четворокраке раскрснице у седмогодишњем периоду (1999-2005.). Подаци који су прикупљени за ову анализу, а односе се на геометријске карактеристике коловоза су: тип раскрснице, угао укрштања, присуство и тип фазе за лева скретања, присуство уличног осветљења, присуство и број аутобуских стајалишта, присуство пешачких прелаза, присуство разделних острва, укупан број саобраћајних трака на свим прилазима, број саобраћајних трака које су намењене за право, број саобраћајних трака које су намењене за скретање лево, број саобраћајних трака за скретање десно, присуство тротоара и присуство паркинг простора у зони раскрснице. Анализа података спроведена је применом негативног-биномног модела, где су уз помоћ модела идентификовани фактори који имају позитиван утицај на саобраћајне незгоде на раскрсницама. Фактори који имају позитиван утицај су присуство аутобуских стајалишта у зони раскрснице и укупан број саобраћајних трака на свим прилазима.

На основу досадашњих истраживања, може се закључити да геометријске карактеристике имају значајно већи утицај на укупан број саобраћајних незгода него што је то случај са незгодама у којима су учествовали рањиви учесници. Ово се може истаћи на основу малог броја истраживања која су спроведена у различитим градовима. Геометријске карактеристике раскрсница обухватају шири скуп фактора који обухватају присуство и димензије подужног и попречног профила пута. У будућим истраживањима потребно је уважити ове карактеристике у циљу идентификације одређеног броја фактора који се односе на геометрију раскрснице. Поред тога, друга просторна подручја могу идентификовати различите геометријске факторе који утичу на саобраћајне незгоде. Анализа ових фактора може указати управљачу пута на одређене недостатке у циљу примене мера, како би се број саобраћајних незгода свео на минимум.

#### **4.3.1.5. Карактеристике намене површина**

У анализама безбедности саобраћаја на одређеном подручју, карактеристике намена површина могу бити један од најважнијих фактора који утичу на саобраћајне незгоде ([Graham and Glaister, 2003](#); [Wedagama et al., 2006](#); [Loukaitou-Sideris et al., 2007](#); [Dissanayake et al., 2009](#)). У предходних неколико година поједини истраживачи су започели испитивање директног утицаја карактеристика намене површина на безбедност саобраћаја. [Levine et al. \(1995\)](#) су спровели истраживање на основу којег су закључили да се саобраћајне незгоде учесталије догађају на подручјима која су намењена првенствено за рад становништва него на подручјима која су намењена за становање у Хонхолу. Са друге стране, [Petch and Henson \(2000\)](#) су испитали ризик страдања деце у саобраћајним незгодама у којима су деца учествовала као пешаци. Ризик страдања је посматран у насељу и ван насеља, при чему је уочен много већи ризик у насељу. На основу ових резултата, аутори су још истакли да је анализа окружења од суштинског значаја за разумевање расподеле саобраћајних незгода. Поред тога, када су у питању незгоде у којима су учествовала возила, [Kim and Yamashita \(2002\)](#) су истакли

да је највећи број саобраћајних незгода уочен у зонама становања, а затим у комерцијалним зонама. Међутим, ако се узме у обзир стопа саобраћајних незгода на већој просторној јединици (по једном хектару), онда незгоде у комерцијалним зонама су четири пута веће него у стамбеним зонама. Када се анализира мешовита употреба намене површина за становање и комерцијалну намену, Wang and Kockelman (2013) су установили да су баш такве површине повезане са незгодама у којима учествују рањиви учесници у саобраћају. Ови резултати су потврђени и од стране Elias and Shiftan (2014) који су истакли две најризичније зоне: мешовита зона са наменом површина која је намењена за становање и у комерцијалне сврхе и подручја која су карактеристична по високим густинама становништва и малим друштвено-економским статусом.

Када су у питању фактори који су повезани са карактеристикама намене површина, Ng et al. (2002) су анализирали 27 променљивих које представљају намену површина и њихову везу са саобраћајним ризиком у Хонг Конгу. Поред тога, Yang and Loo (2016) су представили методолошки приступ у циљу идентификације ризичних локација на путевима као и њихов однос са различитим наменама површина у Хонг Конгу. Аутори су развили два методолошка приступа који се односе на идентификацију локација на којима се јавља повећан број саобраћајних незгода и идентификацију зона на којима се јавља повећан број саобраћајних незгода. Оба приступа се изводе помоћу фреквенције саобраћајних незгода које се процењују на основу емпиријског Бајесовог метода. Емпиријски Бајесова метода анализира карактеристике намене површина у близини путне мреже и сврстава их у одређене референтне групе. Резултати истраживања потврђују одређен утицај појединих фактора на безбедност пута.

Dissanayake et al. (2009) су утврдили утицај намене површина на саобраћајне незгоде у којима су учествовала деца на подручју Њукасла у шестогодишњем периоду (2000-2005.). Аутори су истакли да се варијабилност код карактеристика намене површина користи за утврђивање везе између намене површина и активности деце, што директно доводи до повећане изложености деце у ризичним ситуацијама. Подаци за ову анализу прикупљени су помоћу ГИС технологије, где су генерисани сви релевантни излази за анализу. Поред тога, подаци о саобраћајним незгодама прикупљени су за све врсте незгода према последицама. Припрема података за анализу утицаја карактеристика намене површина на саобраћајне незгоде представљена је на слици 4.12.



Слика 4.12. Интеграција података у циљу испитивања везе између намене површина и саобраћајних незгода у Њукаслу (Dissanayake et al., 2009)

У процесу припреме података, Dissanayake et al. (2009) су искључили одређен број карактеристика намене површина из анализе. Коначно, у анализи је обухваћено присуство два подручја, од којих се једно односи на образоване институције, а друго на

подручје становања. Поред тога, на посматраним областима сагледана је дужина путева као и густина раскрсница. Анализа података спроведена је путем Поасоновог и негативног биномног модела. Резултати показују да су области, на којима се налазе стамбене површине, повезане са свим типовима саобраћајних незгода. Поред тога, области са образовним установама и области са малопродајним објектима повезане су саобраћајним незгодама у којима су учествовала деца у различитим временским периодима дана или седмице.

Поред истраживања која су спроведена на већим просторним јединицама, поједини истраживачи су испитали утицај намене површина на саобраћајне незгоде које су се догодиле на раскрсницама (Torbic et al., 2010; Miranda Moreno et al., 2011; Pulugurtha et al., 2011; Mitra and Wachinton, 2012; Strauss et al., 2014; Lee et al., 2018).

Torbic et al. (2010) су испитали утицај карактеристика намена површина на саобраћајне незгоде у Торонту и Шарлоту. У анализи су посматране трокраке и четворокраке раскрснице. Карактеристике намена површина за анализу, а прикупљене у зони раскрсница су: присуство и број комерцијалних објеката, присуство и број комерцијалних парцела, присуство и број паркова, број објеката за продају алкохола и број објеката који се налазе у пречнику од 800 метара од центра раскрснице. Резултати истраживања су показали да број и присуство комерцијалних објеката позитивно утиче на саобраћајне незгоде, тачније у близини раскрсница где се налази велики број комерцијалних објеката јавља се и повећан број саобраћајних незгода. Поред тога, број објеката за продају алкохола има такође значајан позитиван утицај на фреквенцију саобраћајних незгода у зонама раскрсницама. Негативан утицај на саобраћајне незгоде имала је променљива која се односи на присуство паркова у близини раскрсница. Резултати су идентични за оба посматрана подручја, као и за исти тип раскрснице.

Miranda Moreno et al. (2011) су поред испитивања геометријских карактеристика, које је поменуто у претходном делу, испитали утицај карактеристика намене површина на мобилност становништва и саобраћајне незгоде у зони раскрснице. Фактори који су разматрани односе се на: комерцијална подручја, стамбена подручја, индустријска подручја, подручја намењена за рекреацију, подручја са парковима и подручја са водећим институцијама. Резултати истраживања су показали да подручја која су намењена у комерцијалне сврхе у зони раскрсница су позитивно повезана са кретањем становништва и саобраћајним незгодама. Ограничења овог истраживања могу се приписати броју посматраних фактора који су узети у анализу. У циљу детаљније и поузданије анализе потребно је узети у обзир већи број карактеристика намене површина.

Када су у питању саобраћајне незгоде у којима су учествовали рањиви корисници пута, Pulugurtha and Sambhara (2011) су испитали утицај нелинеарне везе између саобраћајних незгода у којима су учествовали пешаци на сигналисаним раскрсницама и предикторских променљивих које се односе на карактеристике намене површина у Шарлоту. У овом истраживању посматрано је 176 раскрсница, где је прикупљање података засновано на ГИС методологији, на основу сагледавања и анализе околних површина у зони раскрсница. Карактеристике намене површина анализирани су на удаљености од 0,5 миља од центра раскрснице. У анализи карактеристика намене површина су обухваћене следеће области: стамбено-комерцијане области; области са породичним становањем; главне културне, образовне, здравствене, владине и верске области; области са помешаном наменом површина; области на којима се налазе шопинг центри преко 70.000 квадратних метара; области на којима се налазе мобилне јединице становања; области са малопродајним објектима робе; области које су предвиђене за производњу; области на којима се налазе складишта и veleпродаја робе и области са новим типом намене површина. Резултати истраживања спроведени су помоћу

негативног биномног модела, где су утврђени фактори који доприносе настанку саобраћајних незгода са пешацима. Области које позитивно утичу на незгоде у моделу су области са малопродајним објектима и главне културне, образовне, здравствене, владине и верске области. Негативан утицај на незгоде са пешацима су области са породичним становањем и области на којима се налазе шопинг центри преко 70.000 квадратних метара. Генерално, у овом истраживању, направљен је методолошки искорак у погледу прикупљања података у погледу околине пута у зони раскрснице. Ограничења истраживања односе се на детаљнији приступ података по једној просторној јединици коју карактерише једна намена површина.



Слика 4.13. Поступак анализе утицаја намене површина на саобраћајне незгоде

На основу анализе досадашњих истраживања може се закључити да процес испитивања карактеристика намена површина уважава два начина. Први начин се односи на испитивање утицаја карактеристика околине пута на мобилност становништва, што доводи до повећања изложености на посматраним подручјима. Са друге стране, утицај намене површина може бити директан и на саобраћајне незгоде (слика 4.13)

#### 4.3.1.6. Ограничења

У оквиру микроскопских студија често се посматрају мале просторне јединице на којима се моделује велики број фактора. Због улоге у саобраћајној инфрасруктури, раскрснице представљају просторне јединице које се најчешће користе за предикцију саобраћајних незгода. Предиктивни модел често се развија разматрањем одређених карактеристика које су доступне за истраживача. До сада, најчешће разматране карактеристике односе се на обележја саобраћаја, пута и намене површина (Miranda Moreno et al. 2011; Gomes, 2013). Поред ових карактеристика, одређен број аутора је разматрао мароскопска обележја како би их интегрисао на микро ниво. Најчешћа макроскопска обележја односе се на демографска и социо-економска обележја (Pulugurtha et al., 2011; Mitra and Wachinton, 2012; Lee et al., 2017; Wang et al., 2017).

Претходни преглед досадашњих истраживања истакао је одређена ограничења у погледу идентификације утицајних фактора. Истакнута ограничења често се односе на величину посматраног узорка како би се адекватно развио предиктивни модел као и недоступни сетови података који су неопходни у циљу повећања варијабилности зависне променљиве. Када је у питању величина посматраног узорка, тачније број раскрсница на којима се врши предикција саобраћајних незгода, многи аутори су истакли да мали

узорак утиче на поузданост и перформансе модела (Poch and Mannering, 1996; Chin and Quddus 2003; Gomes, 2013).

Poch and Mannering, (1996) су испитали утицај саобраћајних и геометријских карактеристика на фреквенцију саобраћајних незгода које су се догодиле на раскрсницама у Вашингтону. Аутори су разматрали 66 четворокраких раскрсница где су посебно посматрали раскрснице као просторне јединице као и сваки појединачни прилаз. Chin and Quddus (2003) су анализирали 52 четворокраке раскрснице у Сингапуру где су посматрали укупан број незгода. Аутори су истакли да доступност ширег спектра података зависи и од величине посматраног узорка. Gomes (2013) је спровела истраживање у Лисабону где је посматрала три типа раскрсница. Број раскрсница који је обухваћен у овом истраживању је 66 трокраких, 68 четворокраких и 15 кружних раскрсница. Једно од ограничења ове студије је посматрани узорак, међутим величина узорка зависи од доступности података као и величине посматраног подручја.

Са друге стране, доступност података је често окарактерисано као ограничење претходних истраживања, посматрано са аспекта недовољне варијабилности зависне променљиве (Miranda Moreno et al. 2011; Pulugurtha et al., 2011; Strauss et al., 2014; Xie et al., 2014; Lee et al., 2017; Wang et al., 2017). Miranda Moreno et al. (2011) су анализирали 519 сигналисаних раскрсница у Монтреалу. Аутори су истакли да у процесу развоја предиктивног модела нису укључене геометријске карактеристике које се односе на ширину коловоза, број трака као и присуство разделног острва. Ове карактеристике су повезане са саобраћајним незгодама (Gomes, 2013), па их треба уважити у будућим истраживањима. Поред тога, Torbic et al., (2010) су спровели истраживање у Торонту и Шарлоту, где су посматрали трокраке и четворокраке сигнасане раскрснице. Међутим, једно од главних ограничења овог истраживања односи се на разматрање кључних карактеристика које се односе на демографске карактеристике становништва, одређена обележја намене површина као и обележја мобилности становништва.

У будућим истраживањима потребно је размотрити адекватан посматрани узорак како би омогућио примену савремених предиктивних модела. Са друге стране, посматрање одређених карактеристика зависи од посматраног подручја као и транспортних служби које су усмерене на прикупљање података. Шири спектар података омогућава прецизнију предикцију саобраћајних незгода што уједно омогућава и тачније одлуке у циљу усмеравања одређених мера.

#### 4.3.2. МОДЕЛИ ЗА ПРЕДИКЦИЈУ САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА НА РАСКРСНИЦАМА

У циљу предикције саобраћајних незгода на микро нивоу развијен је широк спектар математичких и статистичких модела. Lord and Mannering (2010) и Mannering and Bhat (2014) су представили сажетак статистичких модела који разматрају фреквенцију саобраћајних незгода. У истраживањима истакнут је преглед досадашњих истраживања која су обухватала статистичке моделе који разматрају пребројиве и ненегативне податке. Међу разматраним моделима истакнути су: Поасонов модел, негативни-биномни модел, Поасонов лог-нормални модел, модели који разматрају случајне, просторне и временске ефекте, као и модели који уважавају вишак нула у зависној променљиви.

Када је у питању предикција саобраћајних незгода на раскрсницама до сада су идентификовани многи приступи који су усмерени на разматрање утицајних фактора. Ови приступи се односе на примену регресијских техника, од којих су укључене: вишеструка логистичка регресија, вишеструка линеарна регресија, Поасонова регресија,

регресија која разматра негативну-биномну расподелу, регресија са случајним ефектима као и технике кластера и стабала. Ове регресионе технике омогућавају истраживачима да сагледају однос између посматраног и предвиђеног броја незгода што указује на бољу процену безбедносних перформанси (Harwood et al., 2000).

Модел вишеструке логистичке регресије моделује повезаности између бинарног исхода и скупа експланаторних променљивих (Agresti, 2002). Yan et al. (2005) су применом логистичког модела покушали да идентификују утицајне факторе који доприносе саобраћајним незгодама на сигналисаним раскрсницама. Бинарна логистичка регресија разматра зависну променљиву чији су подаци бинарног типа, па на основу тога у овом истраживању посматран је  $Y = 1$  за незгоде када једно возило налеће на друго возило са задње стране и  $Y = 0$  за остале незгоде. Аутори су применом логистичке регресије утврдили су интеракцију између утицајних фактора код незгода које су се догодиле у раскрсници што је и научни допринос ове студије.

Поред вишеструке логистичке регресије, вишеструка линеарна регресија такође има широку примену у предикцији саобраћајних незгода на раскрсницама. Вишеструка линеарна регресија представља статистички модел који објашњава однос између континуалног исхода зависне променљиве и скупа експланаторних променљивих (Kutner et al. 2005). Bauer and Harwood (2002) су развили предиктивне моделе за раскрснице у урбаним срединама на подручју Калифорније. У истраживању посматране су три врсте раскрсница у урбаним срединама и то: четворокраке семафоризоване, четворокраке сигнализоване и трокраке сигнализоване раскрснице. Аутори су применили вишеструку линеарну регресију где су разматрали укупан број незгода на раскрсницама као зависну променљиву. Резултати истраживања истичу да вишеструка регресиона анализа може да идентификује факторе, посебно оне који се односе на саобраћајне и геометријске карактеристике.

Arndt and Troutbeck (1998) су применили вишеструку линеарну регресијску анализу како би утврдили одређене варијације у броју саобраћајних незгода у случају променљивих геометријских карактеристика раскрсница у урбаним срединама на подручју Квинсленда. У истраживању разматрано је 492 саобраћајне незгоде које су се догодиле на 100 кружних раскрсница. Подаци о геометријским карактеристикама и саобраћајним незгодама прикупљени су за петогодишњи период (1986-1990). У процесу развоја модела анализирани су саобраћајне незгоде које разматрају једно возило, саобраћајне незгоде у којима једно возило налеће на друго возило као и саобраћајне незгоде које се догоде под углом у односу на правац кретања (при уласку у кружни ток). Резултати су показали да проценат варијација у зависној променљиви је прилично мали па се из тог разлога препоручује примена ширек спектра модела.

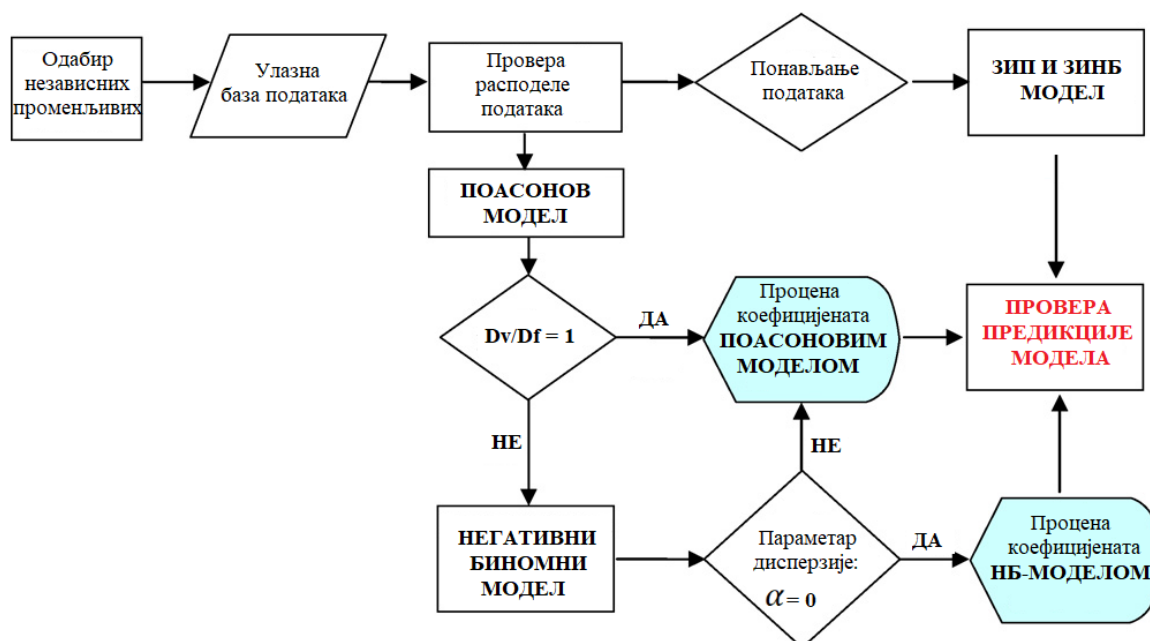
У претходним студијама које су примениле вишеструку регресију могу се уочити одређени недостаци. Евидентирани недостаци су уочени посматрањем зависне променљиве коју чине цели и позитивни бројеви. Са друге стране, предвиђа се да зависна променљива често има нормалну расподелу иако је то редак случај када су у питању саобраћајне незгоде. Ови недостаци указују да предикција саобраћајних незгода вишеструким моделом није компетентна јер неадекватно разматрање дискретних догађаја може да доведе до погрешних резултата (Chin and Quddus, 2003). На основу тога, потребно је користити технике које у довољној мери могу да сагледају одређене специфичности зависне променљиве. Такве технике укључују Поасонову регресију, негативну биномну регресију и друге напредне моделе.

Пошто су саобраћајне незгоде дискретни и случајни догађаји, примена ширег дијапазона Поасонове регресије је погоднија него што је то случај са линеарним регресијским моделима. Међутим, Поасонове модели имају и одређена ограничења која се односе на то да средња вредност и варијанса зависне променљиве морају бити

једнаки. Уколико ова претпоставка није тачна, јавља се над-дисперзија па се при процени стандардне грешке могу јавити пристрасне оцене. Цео овај поступак може да резултира погрешном проценом вероватноће да се догоди саобраћајна незгода (Chin and Quddus, 2003).

Guo et al. (2010) су спровели истраживање на подручју Флориде где су разматрали укупан број саобраћајних незгода на 170 сигналисаних раскрсница. У оквиру истраживања, аутори су покушали да пронађу везу између саобраћајних и геметријских карактеристика и фреквенције саобраћајних незгода применом Поасоновог модела. Резултати истраживања су показала да је Поасонов модел репрезентативан за моделовање фреквенције незгода и у овом случају није потврђена претпоставка о наддисперзији у посматраној зависној варијабли.

У наредним истраживањима, да би се решио проблем над-дисперзије уместо Поасонове регресије често се користи негативни биномни регресиони модел како би прецизније предвидео фреквенцију саобраћајних незгода (Torbic et al., 2010; Lee et al., 2017; Wang et al., 2017). Да би се успоставио негативни-биномни модел уводи се параметар над-дисперзије саобраћајних незгода, што омогућава боље предиктивне способности (Poch and Mannering, 1996). Harnen et al. (2003) су развили предиктивне моделе код фреквенције саобраћајних незгода у којима су учествовали мотоциклисти на несигналисаним раскрсницама у урбаном подручју Малезије. У истраживању коришћени су Поасонов и Негативни биномни регресиони модели, како би се испитала веза између саобраћајних незгода у којима су учествовали мотоциклисти и других независних варијабли. Резултати показују да Негативни биномни модел има боље предиктивне перформансе од Поасоновог модела. Ово указује да је потребно спроводити компарацију предиктивних способности модела у будућим истраживањима. На основу тога, Dissanayake et al., (2009) су представили алгоритам на основу кога се доносе одлуке у процесу одабира предиктивног модела (слика 4.14). Основни параметри који се сагледавају у овом процесу везани су за посматрану зависну променљиву.



Слика 4.14. Процес примене одабраних модела у истраживању (прилагођено према Dissanayake et al., 2009)

Поред бројних предности негативног биномног модела, може се додати и претпоставка да број посматраних ентитета мора да буде независан. Разматрање ове



претпоставке указује да је потребно укључити у процес развоја модела случајне, просторне или временске ефекте који повећавају предиктивне способности. Ови ефекти су доказани у претходним истраживањима која су развијала предиктивне моделе саобраћајних незгода у раскрсницама (Kim et al., 2007; Xie et al., 2014; Lee et al., 2017).

Kim et al., (2007) су развили логистички биномни модел који разматра случајне ефекте саобраћајних незгода на раскрсницама у Џорџији. У истраживању уложени су напори како би се идентификовале променљиве које утичу на вероватноћу посматраног броја незгода на раскрсницама. Поред тога, разматрани су различити типови незгода када су у питању раскрснице. Резултати су показали да сви анализирани типови незгода су показали нижи ниво хијерархијске структуре података, међутим, када се посматрају раскрснице као просторне јединице онда се јавља виши хијерархијски ниво структуре или кластера. Ово је доказано тако што су идентификовани случајни ефекти у зависној променљиви.

Chin and Quddus (2003) су разматрали случајне ефекте код развоја негативног биномног модела како би испитали утицај геометријских и саобраћајних карактеристика на саобраћајним незгодама на подручју Сингапура. У овом истраживању разматране су 52 сигнализоване четворокраке раскрснице. Резултати истраживања указују да индекс веродостојности има непожељне перформансе јер се повећава када се год нове променљиве додају у модел. Овај индекс често представља одређену границу преко које је непотребно додавати више променљивих (Kutner et al., 2005). Поред тога, истакнуто је да уважавање случајних ефеката у развоју предиктивних модела повећава предиктивне перформансе.

Huang et al. (2008) су развили хијерархијски биномни логистички модел у циљу идентификовања значајних променљивих које утичу на саобраћајне незгоде на раскрсницама у урбаним срединама. Процена коефицијената значајних променљивих спроведена је Бејзовим симулацијама који разматрају фиксне ефекте значајних параметара. Аутори су истакли да примењени модел се сматра прикладним када предвиђене вероватноће не одступају пуно од нормалности зависне варијабле, када је варијанса фиксна, када су резидуали приближни нули и када је испуњена претпоставка о независности посматраних ентитета. Све ове претпоставке потребно је уважити у будућим истраживањима.

#### 4.4. ДИСКУСИЈА

Анализом досадашњих истраживања може се закључити да резултати истраживања у великој мери зависе од одабраног просторног нивоа. Када се сагледају просторни ентитети са макро нива, саобраћајне зоне представљају једну од најфреквентнијих ентитета који се користе при предикцији саобраћајних незгода у урбаним срединама. Са друге стране, микроскопске анализе у највећем делу разматрају безбедност саобраћаја на раскрсницама. Анализом ових просторних ентитета до сада су анализирани различити типови саобраћајних незгода у циљу идентификације статистички значајних фактора који утичу на саобраћајне незгоде као и развој предиктивних модела.

Посматрајућу саобраћајне зоне као просторне јединице за предикцију саобраћајних незгода, до сада су идентификовани фактори који су груписани у: демографске карактеристике, социо-економске карактеристике, саобраћајне карактеристике, карактеристике пута и карактеристике намене површина. Демографске и социо-економске карактеристике се прикупљају у циљу испитивања утицаја старосних група, пола, прихода домаћинства као и густине становништва на агрегиран број незгода у зонама. Поред тога, саобраћајне карактеристике често су моделоване анализом фактора

који представљају мобилност становништва и обележја инфраструктуре. Детаљније карактеристике инфраструктуре као и присуство саобраћајних објеката груписано је у карактеристике пута. Карактеристике намене површина обухватале су простор за становање, комерцијални садржај, образовање, културни садржај, простор за рекреацију, зелене површине, здравствене установе, научне институције, инфраструктуру и присуство саобраћајних објеката. Сви фактори, који су груписани око поменутих карактеристике, су показали различите степене утицаја на различите типове саобраћајних незгода. Ово је често оправдано због примене различитих модела на различитим посматраним подручјима.

Саобраћајне зоне представљају линеарну јединицу која се разматра као површина у процесу развијања предиктивних модела. До сада су примењени многи предиктивни модели, међутим утврђено је и присуство просторних ефеката. Просторни ефекат се јавља уколико једна просторна јединица одређених обележја утиче на другу просторну јединицу у њеној близини. На различитим посматраним подручјима евидентиран је просторни ефекат што изискује потребу да се укључи у процес предикције незгода како не би довело до пристрасних резултата.

Предикција саобраћајних незгода на раскрсницама такође је усмерена на два приступа. Први приступ се односи на утврђивање фактора, а други на одабир модела са најбољим перформансама. Утврђивање фактора који утичу на незгоде на раскрсницама могу се сагледати на различите начине. У зависности од врсте предиктивних модела, фактори се могу укључити у предиктивне моделе као мере изложености и независне променљиве. Мере изложености и независне променљиве слично су груписане као и на макро нивоу. Разлика разматрања ових фактора, у односу на макро ниво, представљена је са аспекта детаља одређених података који се могу прикупити на микро локацији.

Модели предикције саобраћајних незгода на раскрсницама могу се разматрати са различитих математичких и статистичких приступа и циљу добијања што бољих перформанси. Ови приступи се односе на примену регресијских техника, од којих су укључене: вишестука логистичка регресија, вишеструка линеарна регресија, Поасонова регресија, регресија која разматра негативну-биномну расподелу, регресија са случајним ефектима као и технике кластера и стабала. Сви ови модели имају одређене предности и недостатке које је потребно анализирати како би се ефекат модела подигао на највиши ниво.

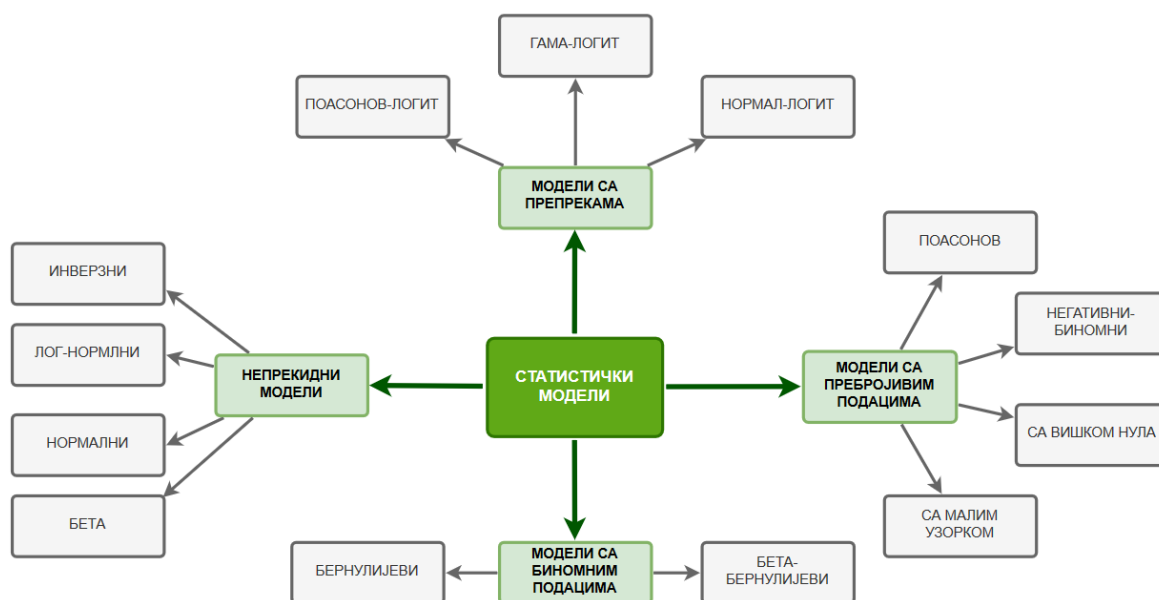
## **5. СТАТИСТИЧКИ МОДЕЛИ ЗА ПРЕДИКЦИЈУ САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА**

## 5. СТАТИСТИЧКИ МОДЕЛИ ЗА ПРЕДИКЦИЈУ САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА

### 5.1. УВОД

Предиктивно моделовање представља скуп математичких техника које имају заједнички циљ у проналажењу математичког односа између циља, одговора или зависне променљиве и различитих предикторских фактора. Спровођење овог математичког односа служи за предвиђање будућих вредности посматране променљиве. Комбинација математичких односа и вероватноће често апроксимира у статистичке моделе који се могу поделити у параметарске и непараметарске моделе (McCullagh, 2002). Параметарски модели су изведени из расподела података које садрже параметре које је потребно предвидети у развоју статистичког модела. Са друге стране, непараметарски модели заснивају се на емпиријским дистрибуцијама које прате природни и емпиријски облик података. У оквиру дисертације развијени су параметарски модели који су у последње време широко примењени у анализама безбедности саобраћаја.

Параметарски модели заснивају се на одређеној дистрибуцији вероватноће или на комбинованом приступу који разматра различите вероватноће. Ово се може односити на два различита приступа који се заснивају на фреквенцији догађаја или на условној бејзовој статистици. У зависности од садржаја зависне променљиве доносе се одлуке о избору модела који ће предвидети будуће догађаје. Анализом саобраћајних незгода, зависна променљива може да буде различитог типа што пружа примену ширег развоја параметарских модела. Подела параметарских модела често се заснива према врсти вероватноће на којој се заснива модел (слика 5.1) (Hilbe, 2009).

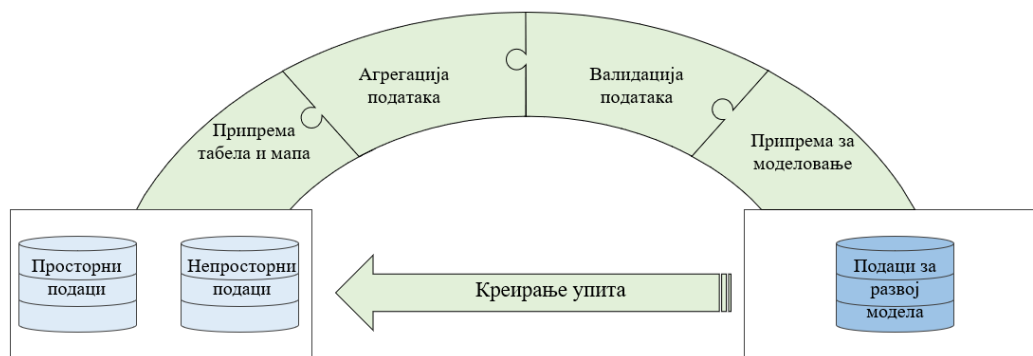


Слика 5.1. Подела статистичких регресионих модела.

У оквиру поглавља представљени су статистички регресиони модели који су примењени у циљу предикције саобраћајних незгода. Поступком предикције развијени су оптимални модели чија процењена дистрибуција одговара посматраној зависној променљиви. Поред тога, оптимизација модела се спроводи на основу дефинисаних критеријума који омогућавају извршавање минимизације утицаја одређених параметара.

## 5.2. РАЗВОЈ ПРЕДИКТИВНИХ МОДЕЛА САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА

Први корак у процесу развоја предиктивних модела односи се на прикупљање и систематизацију података који моделују саобраћајне незгоде као и њихове утицајне факторе. Генерално, подаци у безбедности саобраћаја могу се систематизовати према одређеним просторним и временским аспектима. Ово се може репрезентовати у зависности од посматраног просторног нивоа са једне стране као и посматраних временских јединица са друге стране. Када је реч о просторним нивоима, фреквенција саобраћајних незгода може се агрегирати на подручју једне државе, региона, дистрикта, саобраћајне зоне, раскрснице, итд. Поред тога, сви подаци имају одређена временска ограничења која се односе на идентичан временски интервал прикупљања. Ови периоди се односе на посматрање година, месеци, дана, итд. као временских јединица. Репрезентација просторних и временских података може се интерпретирати у циклус припреме података за модел. Овај циклус обухвата припрему упита, агрегацију података, валидацију података и коначно формирање базе података на основу које се спроводи моделовање саобраћајних незгода.



Слика 5.2. Припрема података као први корак развоја предиктивних модела саобраћајних незгода

Просторна база података садржи основне линеарне јединице које садрже обележја саобраћајних незгода и саобраћајне инфраструктуре. Овај скуп садржи податке о локацији саобраћајних незгода, карактеристикама путне мреже као и просторним ентитетима као јединице посматрања. Непросторни подаци често садрже одређене табеле и релације између њих. Ови подаци односе се на детаљне информације о саобраћајним незгодама као и карактеристике возила која су учествовала у незгодама.

Поред специфичности природе података као и одабраног просторног ентитета, прикупљање података може се спроводити са различитих просторних нивоа. Када су у питању макроскопске анализе, подаци су често усмерени на демографска и социоекономска обележја, док са друге стране у микроскопским анализама подаци се моделују из обележја појединих елемената пута. Са оба просторна нивоа креирају се потребне матрице података коју чине многи фактори који одређују поједине карактеристике. Директно закључивање о међузависности фактора је веома тешко јер у великој мери зависи од димензија матрице података. На основу овога, за квалитетну анализу података могу се спровести две методе:

1. Испитивање међусобне зависности између посматраних јединица;
2. Испитивање зависности између два фактора.

У односу на проблем истраживања и полазне хипотезе, истраживање ће разматрати метод зависности између два скупа променљивих. У овом случају, један скуп представља зависне променљиве, а други скуп независне променљиве. У матрици независних променљивих, налази се велики број фактора које карактеришу вишедимензионалне случајне променљиве. Основни параметри посматраних фактора у матрици су средња вредност, варијанса и коваријанса. Ови параметри представљају основ вишеструке регресијске анализе која се може приказати у матричном облику зависних и независних променљивих (Greene, 2000):

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1m} \\ 1 & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n2} & x_{n3} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (5.2)$$

где је:

$y$  – вектор зависне променљиве;

$X$  – матрица независних променљивих

$\beta$  – вектор регресионих коефицијената;

$\varepsilon$  – вектор непознате компоненте грешке која има нормалну дистрибуцију  $(0, \sigma^2)$

Вишеструка регресија представља могућност да уз помоћ више независних променљивих ( $X$ ) предвиди вредност једног непрекидног зависног обележја ( $y$ ). Разне врсте вишеструке регресије служе за поређење предиктивних могућности одређених независних променљивих и проналажење најбољег скупа променљивих за предикцију једне зависне променљиве (Greene, 2000). У овом истраживању фреквенција саобраћајних незгода на различитим просторним ентитетима представља зависну променљиву. Поред тога, саобраћајне незгоде представљају не-негативне вредности и целобројне вредности које се могу посматрати као случајни догађаји. Према овим карактеристикама, досадашња истраживања су показала да нормална расподела  $(\mu, \sigma^2)$ , која прати класичну вишеструку регресију, обухвата негативне вредности што утиче на предикцију модела код анализе саобраћајних незгода (Lord & Mannering, 2010).

Процедуре за моделовање саобраћајних незгода су:

1. Дефинисање циља;
2. Одабир променљивих;
3. Процена параметара модела;
4. Тестирање модела;
5. Имплементација и употреба модела.

### 5.3. МОДЕЛИ ЗА ЦЕЛОБРОЈНЕ ПОДАТКЕ

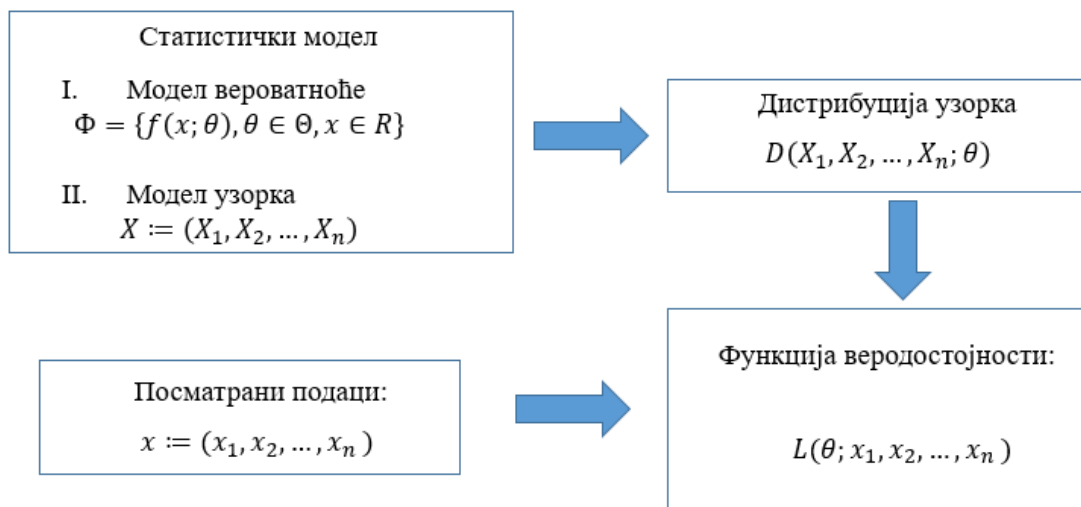
Када подаци укључују целобројне вредности, често их прате Поасонова и негативна биномна расподела које се морају адекватно применити како би се добили поуздани резултати. Поступак анализе у истраживању детаљно је приказан на слици 4.14. У складу са расподелом случајних догађаја, основни модели за предикцију саобраћајних незгода односе се на:

1. Поасонов регресиони модел;
2. Негативни-биномни регресиони модел;
3. Хијерархијски Бејзови модели;

### 5.3.1. Процена регресионих коефицијената

#### 5.3.1.1. Метод максималне веродостојности

Метод максималне веродостојности представља приступ статистичком закључивању који захтева статистички модел  $S := (\Phi X)$  у циљу описивања стохастичког процеса за посматране податке  $X := (x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Статистички модел представља однос између модела вероватноће и посматраног узорка који се као априористичке информације користе у енкапсулацији са расподелом посматраног узорка  $X := (X_1, X_2, \dots, X_n): D(X_1, X_2, \dots, X_n; \theta)$ . На слици 5.3. приказан је процес креирања функције веродостојности на основу утврђене расподеле и посматраних података.



Слика 5.3. Класичан приступ за статистичко закључивање

Метода веродостојности узима у обзир посматране податке  $X$  као репрезентован узорак који је дефинисан као функција вероватноће која је пропорционална расподели узорка и интерпретира се као  $\theta$  у функцији (Spanos, 1999):

$$L(\theta; x_1, x_2, \dots, x_n) \propto D(X_1, X_2, \dots, X_n; \theta) \quad (5.3)$$

Функција веродостојности процењује вероватноћу повезану са различитим вредностима  $\theta$ , а представљају параметре стохастичког механизма који разматрају одређени узорак  $x$ . У овој функцији је присутна пропорционалност представљена кроз математички процес због интерпретације функције  $L(\theta; x_1, x_2, \dots, x_n)$  која је интерпретирана као функција  $\theta$ , док функција  $D(X_1, X_2, \dots, X_n; \theta)$  је приказана као  $X$  која је различитих димензија. Овај еквивалентан начин дефинише функцију веродостојности као (Spanos, 1999):

$$L(\theta; x_1, x_2, \dots, x_n) := k(x) \cdot D(X_1, X_2, \dots, X_n; \theta) \quad (5.4)$$

где  $k(x)$  зависи од посматраног узорка. На основу тога, функција веродостојности се дефинише као:

$$L(.; x): \theta \rightarrow [0, \infty] \quad (5.5)$$

На основу ове функције дефинише се вероватноћа која се односи на параметар функције  $\theta$ .

### 5.3.1.2. Бејзова анализа

Бејзова анализа одговара на истраживачка питања непознатих параметара статистичких модела користећи унапред дефинисане вероватноће. Бејзова анализа почива на претпоставци да су сви параметри модела случајне величине. Ова претпоставка је у супротности са класичним статистичким закључивањем где се сви параметри сматрају непознатим или са непромењеним вредностима. Поред тога, ова анализа разматра правила вероватноће која пружају комбиновање информација о подацима које су већ доказана (Carlin et al., 2001).

Бејзови модели односе се на доношење закључка на основу скупа параметара  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_d)$ , који садрже број димензија  $d$ , а укључују фиксне и случајне ефекте, хијерархијске параметре као и непосматране показатеље променљивих (Gelman and Rubin, 1996). Претходно знање о параметрима модела представља априорну функцију густине  $p(\theta)$ , чија је вероватноћа  $p(y|\theta)$  додата постериорној функције густине  $p(\theta|y)$ . Из овог услова следи Бејзова теорема која се може изразити као:

$$p(\theta|y) = p(y|\theta)p(\theta)/p(y) \quad (5.6)$$

где је  $p(y)$  условна вероватноћа. Други део функције  $p(\theta|y)$  представља интегрални део свих вредности  $\theta$  параметара који се односе на  $p(y|\theta)p(\theta)$  и сматра се константом нормализације у циљу добијања функције. Ово значење може се написати у следећем облику:

$$p(\theta|y) \propto p(y|\theta) p(\theta) \quad (5.7)$$

Бејзово закључивање постало је уско повезано са методама процене које се заснивају на узорковању. Ове методе се фокусирају на целокупну густину параметара или функцију параметара. На основу тога, Монте Карло методе укључују понављање узорковања које тежи узорковању из постериорне дистрибуције. Ово узорковање указује на процену густине параметара или вероватноће које се односе на параметре (Smith and Gelfand, 1992). Поред тога, Монте Карло постериорне вероватноће укључују средњу вредност и варијансу параметара које се могу изразити као (Zellner, 1985):

$$E(\theta_k|y) = \int \theta_k p(\theta|y) d\theta \quad (5.8)$$

$$Var(\theta_k|y) = \int \theta_k^2 p(\theta|y) d\theta - [E(\theta_k|y)]^2 \quad (5.9)$$



Конвергацијом ланца Маркова и Монте Карло метода може се проценити постериорна густина на 95 % интервала поверења, користећи границе поверења од 0,025 и 0,975. У статистици, метода МСМС (енг. Markov Chain Monte Carlo (МСМС)) садржи класу алгоритама за узорковање из дистрибуције вероватноћа.

### 5.3.2. Поасонов регресијски модел

Поасонова регресија је веома слична класичној вишеструкој регресији, осим што је зависна варијабла посматрана са аспекта пребројивих и случајних догађаја које прати Поасонова расподела. Поасонов регресиони модел заснива се на претпоставци да број саобраћајних незгода који се догодио на посматраној просторној јединици у току одређеног временског периода, има Поасонову расподелу коју карактерише средња вредност ( $\mu$ ). Овај модел дефинише вероватноћу саобраћајних незгода у константној јединици простора и времена. Основна функција Поасонове вероватноће може се представити као (Cameron and Trivedi, 2013):

$$p(Y_i = y_i) = p(y_i) = \frac{\mu_i^{y_i} e^{-\mu_i}}{y_i!}; \quad (5.10)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n$

$$\mu = E(X) = \begin{bmatrix} E(X_1) \\ E(X_2) \\ \vdots \\ E(X_p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_p \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

где је:

$Y_i$  – Случајна променљива која представља фреквенцију саобраћајних незгода на посматраним просторним јединицама  $i$  у току посматраног временског периода;

$\mu_i$  – Поасонов параметар који је једнак очекиваном броју саобраћајних незгода на посматраним локацијама током одређеног времена;

$P(Y_i = y_i)$  – Представља вероватноћу да ће се  $y_i$  саобраћајних незгода догодити на посматраном ентитету  $i$  током посматраног временског периода;

$e \approx 2,72$  – основа природног логаритма.

Основна претпоставка Поасоновог модела је да се логаритам очекиване вредности може исказати линеарном комбинацијом непознатих параметара. Ако је  $y \in R^n$  онда се зависност може представити као вектор независних варијабли у облику:

$$\log(E(Y_i = y_i)) = \alpha + \beta'X$$

$\alpha \in R$

$\beta \in R^n$

(5.12)

$$\mu_i = E(Y_i = y_i) = e^{\beta X_i} \quad (5.13)$$

где је:

$X_i$  - Матрица независних фактора које се разматрају у анализи;

$\beta$  – Вектор регресионих коефицијената који се процењују методом максималне веродостојности.

Процена параметара у Поасоновом моделу заснива се на Поасоновој дистрибуцији која се односи на случајне догађаје. Функција максималне веродостојности за Поасонову дистрибуцију може се исказати као (Cameron and Trivedi, 2013):

$$\mathcal{L} = \prod_{i=1}^n \frac{e^{-\mu_i} \mu_i^{y_i}}{y_i!} = \prod_{i=1}^n \frac{e^{-e^{\beta x_i}} (e^{\beta x_i})^{y_i}}{y_i!} \quad (5.14)$$

Предности Поасоновог модела односе се на једноставно израчунавање, због кључне особине овог модела да су математичко очекивање и варијанса једнаки  $E(Y_i) = Var(Y_i) = \mu_i$ . Ово може представити проблем уколико се код стварних података разликује математичко очекивање и варијанса. Уколико је  $E(Y_i) > Var(Y_i)$ , онда је присутна под-дисперзија података, у супротном уколико је  $E(Y_i) < Var(Y_i)$ , онда је присутна над-дисперзија или прераспршеност података што често може да буде проблем код моделовања саобраћајних незгода (Lord & Mannering, 2010).

### 5.3.3. Негативни биномни регресијски модел

Поасонова случајна променљива, која се разматра у истраживању, представља број саобраћајних незгода у посматраном временском периоду, уколико се догађају незвисно од времена када се догодила последња незгода. Негативна биномна расподела је уопштен случај Поасонове расподеле, у ком стопа интезитета није више константна, већ претпоставља да прати Гама расподелу. Овај закључак указује на то да очекивање није константно током посматраног временског периода. За разлику од Пасоновог модела, негативни биномни модел има додатни параметар који дозвољава да дисперзија буде већа од очекивања, где се јавља над-дисперзија (Greene, 2000).

$$E(Y) = \mu;$$

$$\mu = E(X) = \begin{bmatrix} E(X_1) \\ E(X_2) \\ \vdots \\ E(X_p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_p \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Варијанса зависне променљиве у нагативном биномном моделу се добија као:

$$Var(Y) = \mu + \alpha \mu^2 \quad (5.16)$$

Поред зависне променљиве, варијанса независних променљивих може се добити помоћу израза:

$$Cov(X) = [\sigma_{jk}] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1p} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \dots & \sigma_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{p1} & \sigma_{p2} & \dots & \sigma_{pp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Var(X_1) & Cov(X_1, X_2) & \dots & Cov(X_1, X_p) \\ Cov(X_1, X_2) & Var(X_2) & \dots & Cov(X_1, X_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Cov(X_1, X_p) & Cov(X_1, X_p) & \dots & Var(X_p) \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Параметар  $\alpha$  је позитиван и представља параметар дисперзије података. Када се параметар  $\alpha$  више удаљава од нуле, расподела се више разликује од Поасонове. На основу тога, основна функција негативне биномне расподеле може се представити као (Cameron and Trivedi, 2013):

$$p(Y_i = y_i) = \frac{\Gamma(\theta + y_i)}{\Gamma(\theta)y_i!} \left(\frac{\theta}{\theta + \mu_i}\right)^\theta \left(\frac{\mu_i}{\theta + \mu_i}\right)^{y_i};$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$
(5.18)

где  $\theta$  представља параметар обрнуто пропорционалан дисперзионом параметру  $\alpha$  ( $\theta=1/\alpha$ ) и  $\Gamma(\cdot)$  представља вредности Гама расподеле. Уместо претпоставке да средња вредност представља исту вредност за све јединице посматрања у овом моделу се узима у обзир и случајна грешка што је представљено у следећој функцији:

$$\mu_i = E(Y_i) = e^{\beta X_i + \varepsilon}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$
(5.19)

где  $\beta$  представља вектор непознатих параметара које треба проценити,  $X_i$  су вектори који представљају скуп независних променљивих;  $\varepsilon$  је случајна грешка, при чему  $\exp(\varepsilon)$  прати Гама расподелу са аритметичком средином 1 и варијансом  $\alpha$ .

### 5.3.4. Хијерархијски Бејзови модели

Примена МСМС метода код модела са зависном променљивом целобројног типа, доводи до интегрисања постериорне вероватноће у регресиони коефицијенат  $\beta$ . На основу ове интеграције Поасонов хијерархијски регресиони модел може се изразити као:

$$\lambda(x) = x^T \beta$$

$$\mu(x) = e^{\lambda(x)}$$

$$y \sim \text{Poisson}(\mu(x))$$
(5.20)

где  $\lambda(x)$  представља лог-функцију средње вредности, а  $\mu(x)$  је основна функција средње вредности.

Увођењем Гаусове априорне вероватноће у коефицијенат  $\beta$  може се добити  $\beta \sim N(0, \Sigma_p)$ . Постериорна вероватноћа  $\beta$  може се израчунати посматрајући податке зависне и независних променљивих  $\{y, X\}$ , што је исказано као:

$$p(\beta|X, y) = \frac{p(y|X, \beta)p(\beta)}{\int p(y|X, \beta)p(\beta) d\beta}$$
(5.21)

У односу на Поасонову регресију, негативна биномна регресија уважава наддисперзију  $\alpha$  која се може исказати као:

$$\mu(x) = \exp(x^T \beta)$$

$$y \sim \text{NegBin}(\mu(x), \alpha)$$
(5.22)

Ови хијерархијски Бејзови модели су флексибилнији од традиционалних дводимензионалних модела који посматрају зависну променљиву са пребројивим подацима (Carlin and Louis, 2000; Rao, 2003). Поред ове карактеристике, Бејзови модели имају одређене предности и недостатке. Предности се односе на доношење закључака засновано на једном правилу вероватноће које се примењује за све параметарске моделе. Овај начин чини Бејзов приступ универзалним где олакшава његову примену и тумачење. Поред тога, у Бејзовим анализама могу се користити претходне информације, било вероватноће или докази, у циљу постизања оптималних резултата за одређени проблем. На основу резултата дефинишу се Бејзови закључци који су свеобухватнији и флексибилнији од закључака добијених класичном статистиком.

Бејзови регресиони модели разматрају да је узорак информација која је у потпуности представљена функцијом вероватноће (Berger and Wolpert, 1988). Овај поступак захтева да ако је вероватноћа функције једног модела пропорционална функцији вероватноће другог модела, тада закључци оба модела треба да дају исте резултате. Ово може да утиче на прецизност процене која није ограничена посматраним узорком и доводи до произвољног степена прецизности применом Бејзових симулација. Поред овог недостатка истиче се и кршење претпоставке о субјективности у навођењу априорних вероватноћа. Поједини истраживачи могу одредити различите априорне вероватноће.

#### 5.4. ПРОСТОРНИ АУТОРЕГРЕСИОНИ МОДЕЛИ

Просторна аутокорељациона анализа може бити употребљена да се процени обим у којем вредност варијабле у датој локацији утиче на вредности других варијабли у суседним локацијама. Процена укључује анализирање степена у којем су вредности за сваку локацију повезане са вредностима те варијабле на суседним или оближњим локацијама. Ако је ниво варијације виши од очекиваног, ово имплицира да суседне локације имају сличне вредности и представљају позитивну аутокорељацију. Ако је посматрани ниво варијације у значајној мери негативан, ово имплицира да су веће вредности варијабле граничне са ниским вредностима те варијабле, што указује на негативну аутокорељацију. Недостатак позитивне или негативне варијације имплицира одсуство просторне аутокорељације. Методе процењивања просторне аутокорељације су постојале неколико деценија, увођењем просторних матрица (Moran, 1948; Cliff and Ord, 1973).

Постојање аутокорељације значи да је нарушена једна од претпоставки класичног линеарног регресионог модела по којој су случајне грешке некорелисане, тако да је њихова варијанса једнака нули (Anselin, 1988). Аутокорељација се најчешће јавља приликом оцењивања зависности у бази података која је повезана у простору, па се може десити да ефекат случајне грешке из једне јединице посматрања, нпр.  $i = 1$ , прикаже у следећој просторној јединици,  $i = 2$ . Присуство аутокорељације се најједноставније моделира уз помоћ аутрегресионог модела.

У поступку моделовања са ауторегресионим моделима појављују се два проблема која се односе на податке у узорку и који су везани за одређену просторну јединицу. Ови проблеми су просторна зависност између посматраних опсервација и просторна хетерогеност у посматраним подацима који се моделују.

Просторна зависност представља везу између вредности посматраних променљивих и локације на којима су променљиве посматране. Просторна зависност се мери као постојање статистичке зависности у посматраним случајним параметрима, од којих је свака повезана са другим географским положајем. Ово се може написати у виду математичке формуле као:

$$y_i = f(y_j), \quad i = 1, \dots, n \quad j \neq i \quad (5.23)$$

У најопштијем случају посматране јединице се очекују у простору што представља другачији однос од линеарног. Појам просторне хетерогености, у супротности са просторним фиксим локацијама, односи се на варијабилност (нестабилност) посматраног параметра на просторним јединицама. Да би се објаснила хетерогеност (варијабилност), користи се метода просторне пондерисане регресије преко које се процењује вредност параметра. Појам односа између најближих суседа се одређује на оптималан начин методом унакрсне валидације.

#### 5.4.1. Просторна матрица

Најзначајнији параметар у ауторегресионим моделима представља матрица са растојањима између више посматраних јединица. Матрица представља један од начина приказа просторних релација посматраних јединица у облику броја. Просторна тежинска матрица садржи све ненегативне матрице  $W = (w_{ij} : i, j = 1, \dots, n)$  које представљају везу између  $n$  посматраних просторних јединица. Чланови просторне матрице  $w_{ij}$ , представљају просторни утицај јединице  $j$  на јединицу  $i$ .

$$W = \begin{bmatrix} 0 & w_{ij} & w_{ik} \\ w_{ji} & 0 & w_{jk} \\ w_{ki} & w_{kj} & 0 \end{bmatrix}; \quad (5.24)$$

$$w_{ij} = \frac{1}{w_{max}} > 0$$

Матрице које се заснивају на дељењу заједничке границе играју велику улогу у испитивању просторног утицаја. Показатељ ове матрице огледа се у њеним члановима који показују просторну интеграцију и да ли посматрана просторна јединица дели границу ( $l_{ij}$ ) са другом посматраном јединицом. У овом раду за креирање потребних просторних матрица ( $W$ ) коришћен је топ метод, дат од стране [Anselin and Griffith \(1988\)](#). На основу топ метода, просторна матрица је дефинисана као:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & l_{ij} > 0 \\ 0, & l_{ij} = 0 \end{cases} \quad (5.25)$$

Уважавање просторне матрице у просторне регресионе моделе доводи до отклањања просторног ефекта као једног од главних одграничења предиктивних модела. Просторни ауторегресиони модели примењени у оквиру овог истраживања су:

1. Просторни ауторегресиони модел првог реда;
2. Мешовити ауторегресиони модел;
3. Модел просторних грешака.

#### 5.4.2. Просторни ауторегресиони модел првог реда

У овом случају свих просторних ауторегресионих модела, модел првог реда представља један од најосновнијих. Модел испитује везе између зависне променљиве и зависне

променљиве са просторним ефектом. Функција овог модела окарактерисана је општим линеарним моделом у који је укључен просторни ефекат:

$$\begin{aligned} y &= \rho W y + \varepsilon \\ \varepsilon &\sim N(0, \sigma^2 I_n) \end{aligned} \quad (5.26)$$

где је :

$W$  – стандардизована матрица која представља удаљеност између две посматране локације,

$y$  – вектор посматране променљиве која се испитује у моделу,

$\varepsilon$  – случајна грешка која има нормалну расподелу,

$\rho$  – ауторегресиони параметар.

Процена ауторегресионог параметра се изводи методом максималне веродостојности, која се може изразити као:

$$L(y|\rho, \sigma^2) = \frac{1}{2\pi\sigma^{2\left(\frac{n}{2}\right)}} |I_n - \rho W| \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} (y - \rho W y)'(y - \rho W y)\right\} \quad (5.27)$$

### 5.4.3. Мешовити ауторегресиони модел

Овај модел представља проширени просторни ауторегресиони модел првог реда и укључује матрицу у којој се налазе независне променљиве, на сличан начин као и код вишеструке регресије. У овире овог модела, [Anselin \(1988\)](#) истиче метод максималне веродостојности за процену параметара овог модела. Основна функција овог модела може се изразити као:

$$\begin{aligned} y &= \rho W y + X\beta + \varepsilon \\ \varepsilon &\sim N(0, \sigma^2 I_n) \end{aligned} \quad (5.28)$$

Процена параметара се врши помоћу неколико регресијских функција које се могу спровести кроз неколико корака ([Anselin, 1988](#)):

1.  $y = X\beta_0 + \varepsilon_0$
2.  $W y = X\beta_L + \varepsilon_L$
- 3- Рузидуали  $e_0 = y - X\hat{\beta}_0$  и  $e_L = y - X\hat{\beta}_L$
4. Процена параметара:

$$L_c = C - \left(\frac{n}{2}\right) \ln\left(\frac{1}{n}\right) (e_0 - \rho e_L)'(e_0 - \rho e_L) + \ln|I - \rho W| \quad (5.29)$$

### 5.4.4. Модел просторних грешака

Модел просторних грешака, у односу на предходне просторне моделе, усмерен је ка просторној зависности код посматраних обележја. [Anselin \(1988\)](#) је представио метод максималне веродостојности, који даје поуздану процену параметара за овај модел. Функција овог модела је представљена као:

$$\begin{aligned} y &= X\beta + u \\ u &= \lambda Wu + \varepsilon \\ \varepsilon &\sim N(0, \sigma^2 I_n) \end{aligned} \quad (5.30)$$

где је:

- $y$  – случајан вектор зависне променљиве;
- $X$  – матрица независних променљивих;
- $u$  - вектор независних и идентично распоређених случајних грешака;
- $\beta$  – параметар ауторегресионих коефицијената;
- $\lambda$  – коефицијенат просторне корелације.

Моранов I индекс аутокорелације представља глобални индикатор и једну од основних мера просторне аутокорелације у дводимензионалном и тродимензионалном простору (Moran, 1948). Овај индекс има сличне карактеристике као и Пирсонов коефицијент корелације, с тим да узима у обзир просторну матрицу удаљености. Овај индекс може се изразити преко формуле:

$$I = \frac{n}{\sum \sum_{ij} W_{ij}} \cdot \frac{\sum \sum_{ij} W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.31)$$

где је:

- $x_i$  = вредност променљиве  $x$  на посматраној јединици  $i$ ,
- $\bar{x}$  = средња вредност променљиве  $x$ ,
- $n$  = број посматраних јединица,
- $W_{ij}$  = матрица удаљености, која указује на то да ли је просторна јединица  $i$  повезана са просторном јединицом  $j$  ( на пример 1), или није (на пример вредност 0). Сумирање оператора за  $i = 1, 2, \dots, n$  и  $j = 1, 2, \dots, n$  у свим случајевима.

Очекивана вредност и варијанса, под претпоставком да су подаци нормално дистрибуирани, код индекса аутокорелације може се исказати преко формуле:

$$\begin{aligned} E(I) &= \frac{-1}{n-1} \\ Var(I) &= \frac{n^2 S_1 - S_2 + 3(\sum \sum_{ij} W_{ij})^2}{(\sum \sum_{ij} W_{ij})^2 (n^2 - 1)} \end{aligned}$$

Где је:

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{1}{2} \left( \sum \sum_{ij} W_{ij} + W_{ji} \right)^2 \\ S_2 &= \sum_j \left( \sum_i W_{ij} + \sum_j W_{ij} \right)^2 \end{aligned} \quad (5.32)$$

Моранов индекс просторне аутокорелације је широко примењена метода која служи за тестирање просторних односа између различитих посматраних обележја  $x_i$  која се појављују на простору. Вредност Морановог индекса креће се у границама од -1 до 1 и

указује на повезаност просторних ентитета, у супротном негативна вредност индекса указује на различите вредности на локацијама.

## 5.5. ПОРЕЂЕЊЕ ПРЕДИКТИВНИХ МОДЕЛА

У циљу оцењивања поузданости модела потребно је спровести поређење различитих предиктивних модела у циљу сагледавања њихових перформанси. Приликом поређења предиктивних модела користе се статистички индекси подесности засновани на информационим критеријумима, где сваки критеријум описује модел појединачно. Основни задаци поређења модела односе се на избор најједноставнијег модела који може представити податке. Највећу употребу у поређењу модела имају Акаиков информациони критеријум (AIC) и Бејзов информациони критеријум (BIC). Акаиков информациони критеријум може се изразити помоћу функције ([Akaike, 1974](#)):

$$AIC = -2\ln L + 2k \quad (5.33)$$

где је:

$\ln L$  – логаритам функције веродостојности,

$k$  – број непознатих параметара у моделу тј. број параметара које је потребно оценити.

Бајесов информациони критеријум (BIC) може се изразити као ([Schwarz, 1978](#)):

$$BIC = -2 \ln L + k \ln n \quad (5.34)$$

где је:

$\ln L$  – логаритам функције веродостојности,

$k$  – број непознатих параметара у моделу тј. број параметара које је потребно оценити,

$n$  – величина узорка.

Метод за коришћење AIC и BIC је избор модела који има најмању вредност. Да би се могле упоредити вриједности AIC и BIC критеријума, анализе морају бити засноване на истом скупу података.

Поменути информациони критеријуми се користе код класичних статистичких регресионих модела, међутим када су у питању Бејзови регресиони модели поређење модела се спроводи помоћу девијантног информационог критеријума (DIC). DIC критеријум је хијерархијско моделовање генерализације AIC критеријума, који се примењује код постериорне дистрибуције која је добијена MCMC симулацијама. DIC критеријум се може изразити као:

$$DIC = -2 \log(p(y|\theta)) + C \quad (5.35)$$

где  $y$  представља улазне податке,  $\theta$  су непознати параметри у моделу,  $p(y|\theta)$  представља функцију вероватноће и  $C$  као константа која се додаје за поређење модела.

Поред ових информационих критеријума, поређење модела може се спровести и помоћу Вуонговог теста ([Vuong, 1989](#)). Вуонгов тест може се изразити као:



$$V = \frac{\sqrt{n(\bar{L})}}{S_L} \quad (5.36)$$

где је:

$$\bar{L} = (1/n) \sum_{i=1}^n L_i,$$

$S_L$  – стандардно одступање од  $L_i$ ,

$n$  – величина узорка,

$L_i = \ln[P_1(Y_1)/P_2(Y_2)]$  и рачуна се за сваку просторну јединицу,

$P_1(Y_1)$  и  $P_2(Y_2)$  су маргиналне вероватноће за Поасонов односно за НБ модел.

У статистици, Вуонг-ов тест заснован је на коефицијенту вероватноће за избор модела коришћењем Кулбак-Лајблер информационог критеријума. Полазна хипотеза овог теста односи се на то да су два модела подједнако приближна стварном процесу генерисања података, на супрот алтернативној претпоставци да је један модел на мањем растојању.

## **6. ИСТРАЖИВАЊЕ ПРЕДИКЦИЈЕ САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА У САОБРАЋАЈНИМ ЗОНАМА**

## 6. ИСТРАЖИВАЊЕ ПРЕДИКЦИЈЕ САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА У САОБРАЋАЈНИМ ЗОНАМА

### 6.1. УВОД

У последњих неколико година, многи истраживачи су спровели макроскопске анализе саобраћајних незгода на различитим просторним ентитетима (Levine et al., 1995; Quddus, 2008; Siddiqui et al., 2012; Abdel-Aty et al., 2013; Lee et al., 2014a; Cai et al., 2017; Saha et al., 2018; Wang et al., 2019). Макроскопске анализе у безбедности саобраћаја имају за циљ да пронађу везу између фреквенције саобраћајних незгода на одређеној просторној јединици и осталих карактеристика те просторне јединице (Levine et al., 1995). На основу изнетих чињеница, макроскопска истраживања нису усмерена на анализу појединих незгода већ на анализу агрегираних саобраћајних незгода на просторним јединицама (Lee et al., 2014b).

Саобраћајне зоне представљају просторне јединице које се најчешће користе за анализу безбедности саобраћаја на макро нивоу. Поред тога, у истраживању Lee et al. (2014b), утврђено је да саобраћајне зоне представљају најпогодније просторне јединице у циљу постизања оптималних резултата на макро нивоу, у односу на друге просторне јединице. Основна карактеристика саобраћајних зона је да обухватају широк спектар просторних података који имају значајну улогу у просторним моделима (Lee et al., 2014a). Претходно поменуте студије до сада су користиле географски информациони систем (ГИС) за прикупљање и визуелизацију просторних података који представљају одређене карактеристике саобраћајних зона. Ове карактеристике могу варирати од места до места, што даје значајан потенцијал за примену детаљне студије случаја.

У досадашњим студијама, многи аутори су се фокусирали на идентификацију специфичних фактора који моделују одређене карактеристике саобраћајних зона на различитим просторним подручјима. Анализа одабраних карактеристика зависи од база података које су доступне за истраживаче, а осим тога, одређене карактеристике имају јасну тенденцију у различитим истраживањима која су спроведена у различитим регионима (Abdel-Aty et al. 2013; Chen, 2015; Rhee et al., 2016; Jia et al., 2018; Wang et al., 2019, Pljakić et al., 2019a). Према анализи досадашњих истраживања, до сада најчешће разматране карактеристике саобраћајних зона су: демографске карактеристике, саобраћајне карактеристике, карактеристике пута и карактеристике окружења.

#### 6.1.1. Демографске карактеристике

Демографске карактеристике имају значајну улогу код примене макроскопских анализа, а фактори који се најчешће издвајају су укупан број становника, старосне групе, пол и површина посматраних просторних јединица. У многим студијама густина популације и величина популације представљају меру изложености које имају позитиван утицај на фреквенцију саобраћајних незгода (Yao et al. 2015; Lee et al., 2014a; Dong et al., 2014; Xu et al., 2014; Xu and Huang, 2015).

Процент популације према полу често је разматран у истраживањима, међутим поједини аутори нису идентификовали значајан утицај на агрегиран број незгода у саобраћајним зонама (Rhee et al., 2016; Saha et al., 2018). Са друге стране, истраживање које је спроведено на подручју Вашингтона, сугерише да мушкарци показују већи ниво

агресивног понашања током вожње од жена ([AAA Foundation for Traffic Safety, 2016](#)), па се указује потреба за тестирањем утицаја полне структуре на другим подручјима како би се планирале превентивне активности које се односе на ризичну полну структуру.

На основу претходних студија указала се потреба за испитивањем утицаја различитих старосних група међу којима се истиче популација старија од 65 година ([Wier et al. 2009](#); [Cai et al., 2017a](#); [Xie et al., 2019](#)), популација млађа од 15 година ([Abdel-Aty et al. 2013](#); [Huang et al. 2016](#); [Rhee et al., 2016](#)) и друге старосне групе ([Lee et al., 2014a](#); [Saha et al., 2018](#)) анализирани на различитим просторним подручјима. Резултати студија указују на различит утицај старосних група на безбедност саобраћаја, што једним делом зависи од посматраног подручја па их је потребно испитати и на другим регионима. На другим анализираним подручјима посматран је и утицај површине саобраћајних зона ([Chen, 2015](#); [Wang et al., 2016](#)), чији су резултати били корисни за потребе креирања и анализе новог зонског система.

### 6.1.2. Саобраћајне карактеристике и карактеристике пута

Претходне студије разматрале су различите саобраћајне карактеристике код моделовања агрегираног броја незгода. Просечан годишњи дневни саобраћај ([Wier et al. 2009](#)) и возило-миља ([Aguero-Valverde and Jovanis, 2006](#); [Quddus, 2008](#); [Xu et al., 2015](#); [Huang et al. 2016](#); [Cai et al., 2017](#)) представљају мере изложености и позитивно утичу на агрегиран број незгода на макро нивоу. Поред тога, многи аутори су испитали утицај фреквенције аутобуских стајалишта ([Strauss et al., 2013](#); [Wei and Lovegrove, 2013](#); [Chen, 2015](#); [Xie et al. 2019](#)) и величину паркинг простора ([Siddiqui and Abdel-Aty, 2012](#); [Chen, 2015](#)) на различите типове незгоде, међутим, нису потврђене зависности иако постоји претпоставка да се на овим путним објектима често јавља повећана мобилност рањивих учесника. Испитивањем ових карактеристика могу се планирати одређене активности у погледу организације јавног превоза као и ефикаснијег упављања паркинг сервисом.

Поред саобраћајних карактеристика, многи аутори су идентификовали факторе путне инфраструктуре који утичу на различите типове незгода. Карактеристике инфраструктуре су често идентификоване као: густина уличне мреже ([Siddiqui and Abdel-Aty, 2012](#); [Wang et al., 2016](#); [Huang et al. 2016](#); [Guo et al., 2017](#)), дужина тротоара ([Cai et al., 2016](#); [Cai et al., 2017a](#)), дужина бициклистичких стаза ([Chen, 2015](#); [Saha et al., 2018](#)), као и раскрснице које се посматрају по броју кракова ([Rhee et al., 2016](#); [Wang et al., 2016](#)) и начину регулисања ([Lee et al., 2015](#)). Ове карактеристике имају различит утицај на агрегиран број незгода у зависности од посматраног подручја, као и типа незгода, што изискује потребу да се поменути фактори анализирају на подручјима где до сада нису спроводене макроскопске анализе.

### 6.1.3. Карактеристике окружења

Поједини аутори су до сада разматрали утицај карактеристика окружења на агрегиран број незгода у саобраћајним зонама. [Pulugurtha et al. \(2013\)](#) су утврдили да карактеристике намене површина као што су присуство стамбених површина, мешовита намена површина, индивидуално и колективно становање и пословни простори имају позитиван утицај на агрегиран број незгода. Поред тога, [Levine et al. \(1995\)](#) су утврдили да се већи број незгода догоди у близини комерцијалних зона него у стамбеним површинама. Када се посматрају друга подручја, фреквенција стамбених јединица на саобраћајним зонама није имала статистички утицај на агрегиран број незгода ([Rhee et](#)

al., 2016; Saha et al., 2018). Изузев стамбене јединице, број школа је показао позитиван утицај на број незгода (Rhee et al., 2016), на основу чега се оцењује ниво посвећености надлежних служби у имплементирању одређених активности у зоне школа и безбедно кретање деце.

#### 6.1.4. Развој предиктивних модела

У досадашњим студијама, многи аутори су користили традиционалне предиктивне моделе како би идентификовали утицај одређених карактеристика на агрегиран број саобраћајних незгода. За потребе ове идентификације коришћени су разни предиктивни модели где је зависна променљива посматрана као укупан број незгода (Abdel-Aty et al., 2013; Cai et al., 2017; Zhai et al., 2018; Wang et al., 2019), незгоде са бициклистима (Siddiqui and Abdel-Aty, 2012; Lee et al., 2015; Chen, 2015; Saha et al., 2018), незгоде са пешацима (Wier et al., 2009; Wang et al., 2016) као и незгоде према последицама (Xu and Huang, 2015; Rhee et al., 2016; Guo et al., 2017; Xie et al., 2019). Предиктивни модели који се најчешће користе у моделовању саобраћајних незгода су Поасонов модел (Miaou and Lum, 1993) негативни биномни модел (Poch and Mannering, 1996; Karlaftis and Tarko, 1998; Agüero-Valverde and Jovanis, 2006; Hadayeghi et al., 2006; Cai et al., 2017b) и Поасонов-логнормални модел (Lord and Miranda-Moreno, 2008; Cai et al., 2017a).

Када је у питању моделовање незгода на макро нивоу, јављају се два проблема: (1) присуство просторне зависности између просторних јединица и (2) присуство просторне хетерогености (LeSage, 1999). Традиционални предиктивни модели се најчешће користе на микро нивоу, међутим, то није добар приступ за моделовање незгода на макро нивоу јер се између просторних јединица јавља просторна аутокорејација која утиче на претпоставку о назовисности између посматраних зона. Dale and Fortin (2002) су истакли да се просторна аутокорејација јавља када посматрања у суседним областима имају сличне вредности података. На основу поменутих ограничења потребно је развити регресионе моделе који користе просторне тежинске матрице и процену коефицијената методом максималне веродостојности. До сада су развијени различити модели, али класични просторни регресиони модели (OLS) су окарактерисани као практични јер могу користити агенцијама за планирање и безбедност саобраћаја (Rhee et al., 2016).

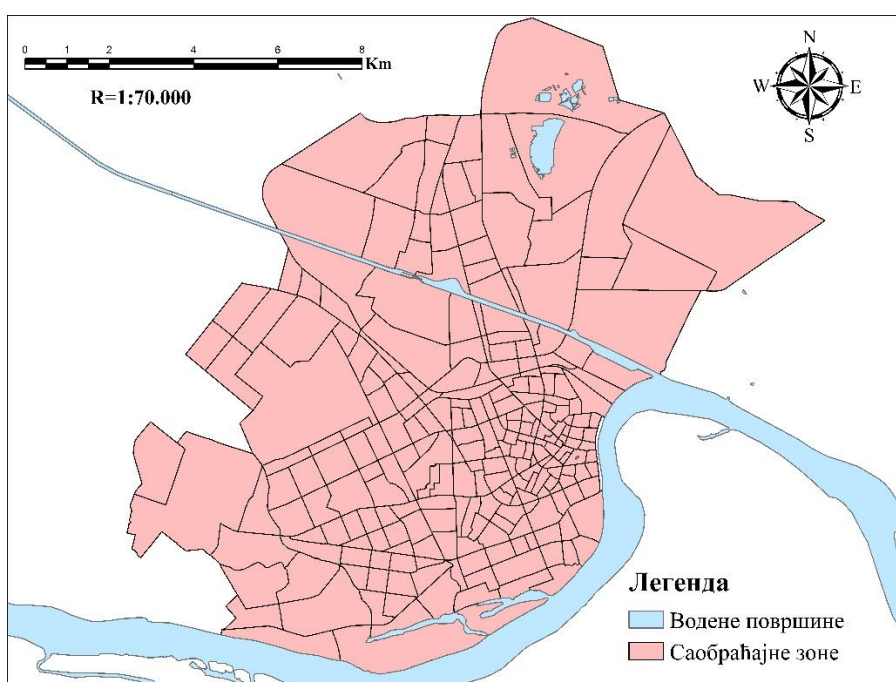
Уважавајући чињеницу да постоје напредни предиктивни модели за просторно моделовање незгода, у оквиру дисертације су развијени стандардни просторни предиктивни модели у циљу анализе нових доступних просторних података у оквиру саобраћајних зона у Новом Саду. На основу анализираних литературе, установљено је да су на посматраним подручјима идентификовани различити утицајни фактори који не могу бити репрезентативни за сва подручја. Тачније, ако је агрегиран број незгода исти на два подручја, њихов потенцијални ризик може се разликовати и зависити од посматраног окружења.

## 6.2. ПРИПРЕМА ПОДАТАКА

Подаци коришћени у овом истраживању прикупљени су на подручју града Новог Сада. Нови Сад је главни град Аутономне Покрајине Војводине и административни центар јужно бачког округа. Према попису из 2011. године, у Новом Саду живи 277.522 становника, што га сврстава у други град по величини у Републици Србији. Просторно, административна површина града Новог Сада је око  $702 \text{ km}^2$  од чега се урбано подручје

простире на  $129 \text{ km}^2$ . У оквиру истраживања обухваћено је 248 саобраћајних зона које се простиру на  $132 \text{ km}^2$ . (слика 6.1). Подела анализираниог подручја на саобраћајне зоне спроведено је према раније дефинисаним критеријумима који су примењени широм света у процесу зонирања саобраћајних површина (Baass, 1981). Зонирање саобраћајних површина спроведено је у просторном алату ArcGIS, а саобраћајне зоне су креиране према следећим критеријумима:

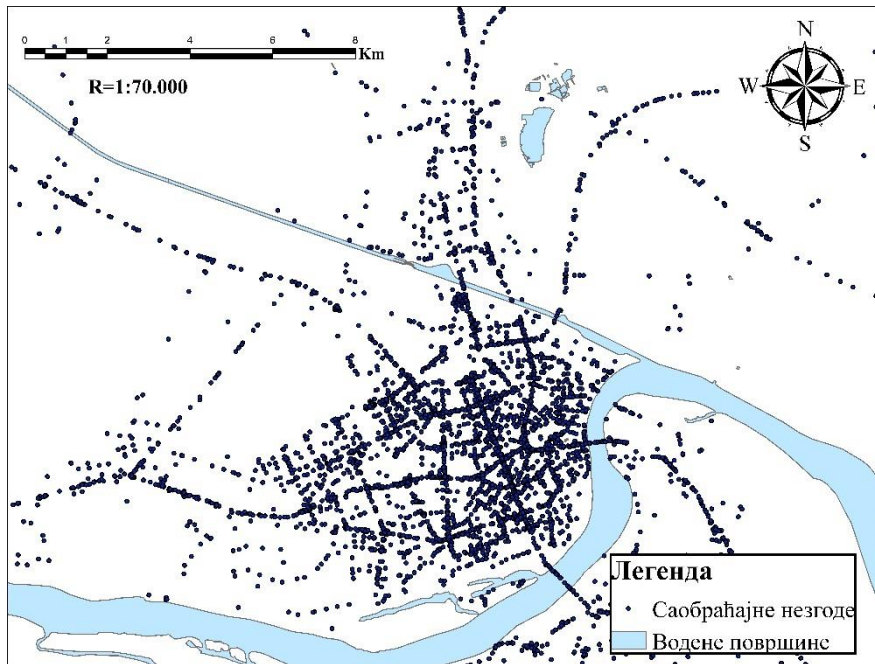
- хомогеност карактеристика за сваку зону;
- уважавање природних, физичких и историјских граница;
- креирање зонског система у којем су становништво и број домаћинства готово једнаки;
- смањење броја унутар зонских путовања;
- уважавање граница пописних зона;
- генерисање повезаних зона;
- избегавање зона које су у потпуности садржане унутар друге зоне.



Слика 6.1. Анализирание саобраћајне зоне на подручју града Новог Сада

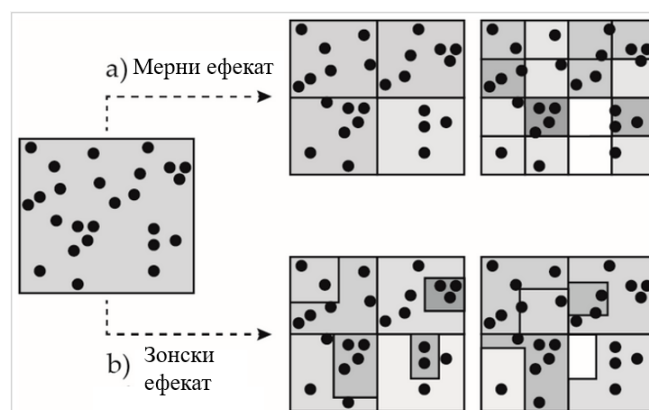
### 6.2.1. Подаци о саобраћајним незгодама

Подаци о саобраћајним незгодама представљају зависну променљиву на основу које се испитује просторна аутокорејација и добијају предиктивне вредности. У циљу спровођења истраживања посматран је трогодишњи временски период (2015-2017.) где је посматран различит тип саобраћајних незгода са сваку саобраћајну зону. Подаци о саобраћајним незгодама преузети су из базе података којом управља Агенција за безбедност саобраћаја Републике Србије (АБС). Саобраћајне незгоде приказане су као тачке у простору што омогућава спровођење процеса агрегације у оквиру саобраћајних зона (слика 6.2). Предикција саобраћајних незгода спроведена је за укупан број незгода, за саобраћајне незгоде у којима су учествовала моторна возила као и саобраћајне незгоде у којима су учествовали рањиви учесници у саобраћају.



Слика 6.2. Анализирани број саобраћајних незгода на подручју Новог Сада у току трогодишњег периода (2015-2017.)

Процес агрегације спроводен је помоћу просторних алата, где је посебно анализирана просторна хетерогеност и зонски ефекат. У истраживању, подаци указују на просторну хетерогеност која карактеристише неравномерна расподела фреквенције саобраћајних незгода унутар саобраћајних зона. Поред просторне хетерогености сагледан је и зонски ефекат саобраћајних незгода који је укључен у предикцију саобраћајних незгода. Поступак укључивања ефеката односи се на сваку зону, где је свакој саобраћајној зони додељена одређена фреквенција саобраћајних незгода. Loidl et al. (2016) су представили шему сагледавања ефеката код агрегације саобраћајних незгода и истакли да је потребно узети у обзир и ефекат скале који се примењује на незгоде које се налазе између две саобраћајне зоне. На слици 6.3. приказана је шема утицаја мерног и зонског ефекта код агрегације саобраћајних незгода, која је такође разматрана и за потребе овог истраживања.

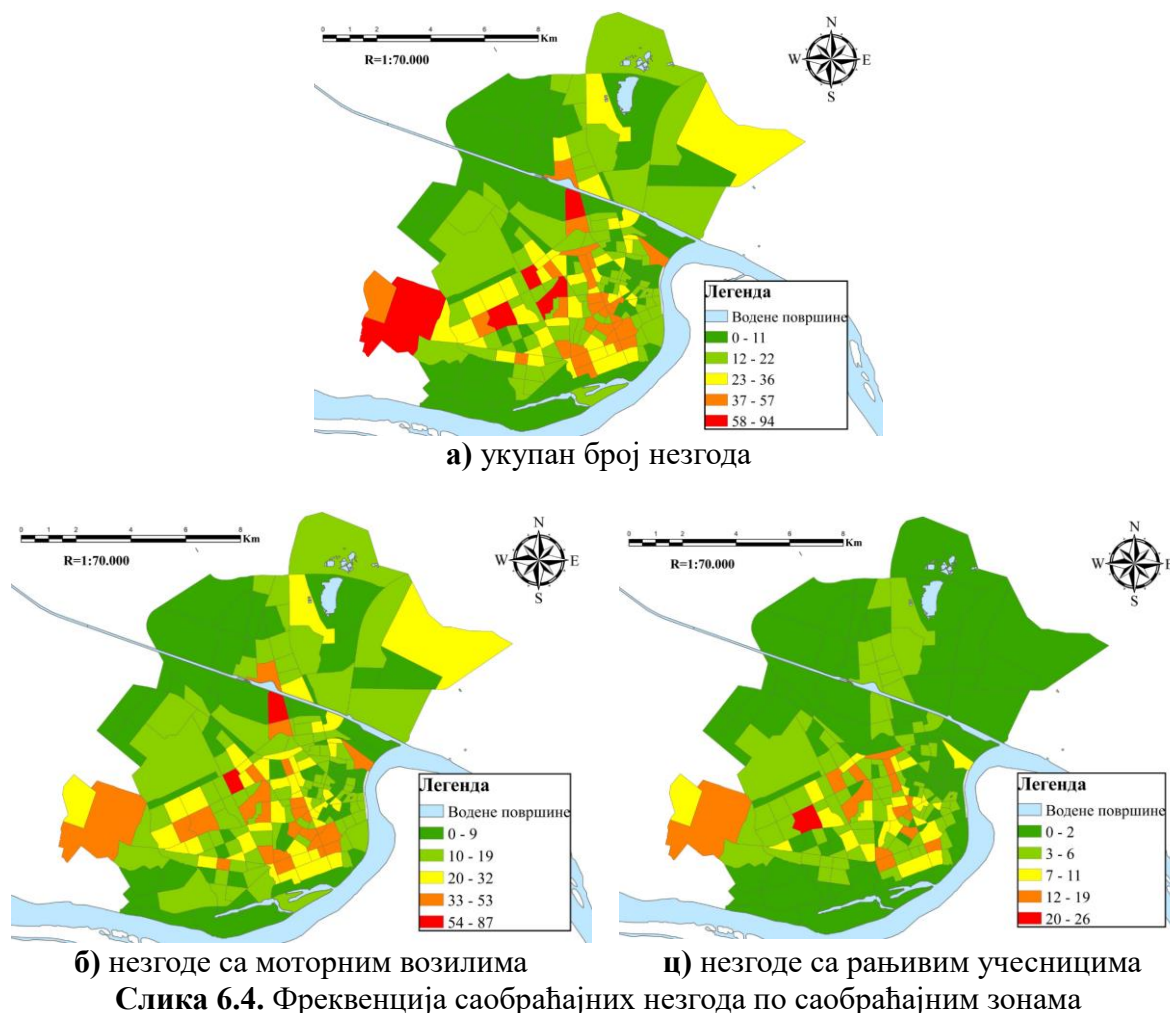


Слика 6.3. Мерни и зонски ефекат у процесу агрегације саобраћајних незгода (Loidl et al. 2016)

Агрегирањем саобраћајних незгода које се налазе између две саобраћајне зоне долазидо појаве граничног ефекта који је евидентиран и у другим студијама (Rhee et al.,

2016). Анализиран сет података базиран је на ГИС платформи, тако да све саобраћајне незгоде имају довољне прецизне координате локација, како би се одредио смер путовања на главним саобраћајницама. Са друге стране, граница саобраћајних зона геопозиционирана је на средини разделног острва или разделне линије коловоза, што олакшава сагледавање граничних ефеката код агрегирања саобраћајних незгода. Идентичан поступак агрегирања незгода примењен је и у Сеулу, где незгоде у једном правцу припадају једној саобраћајној зони, а незгоде у другом правцу припадају другој саобраћајној зони (Rhee et al., 2016).

Последњи корак припреме зависних варијабли за процес моделовања односи се на коначни приказ фреквенције саобраћајних незгода по саобраћајним зонама као посматраним јединицама. У процесу анализе разматране су три различите зависне променљиве. На слици 6.4. су приказане посматране зависне променљиве разматране у оквиру дисертације, а односе се на укупан број незгода, незгоде у којима су учествовала само моторна возила као и незгоде у којима су учествовали рањиви учесници у саобраћају.



### 6.2.2. Подаци о потенцијалним утицајним факторима

У циљу развијања предиктивних модела у оквиру саобраћајних зона, разматрани су атрибути који садрже обележја демографских карактеристика, саобраћајних карактеристика, карактеристика пута као и карактеристика окружења и намене



површина. Демографске карактеристике односе се на: површину саобраћајних зона у арима, проценат популације млађи од 15 година, проценат популације старији од 65 година, проценат мушког становништва, проценат женског становништва и густина насељености становништва.

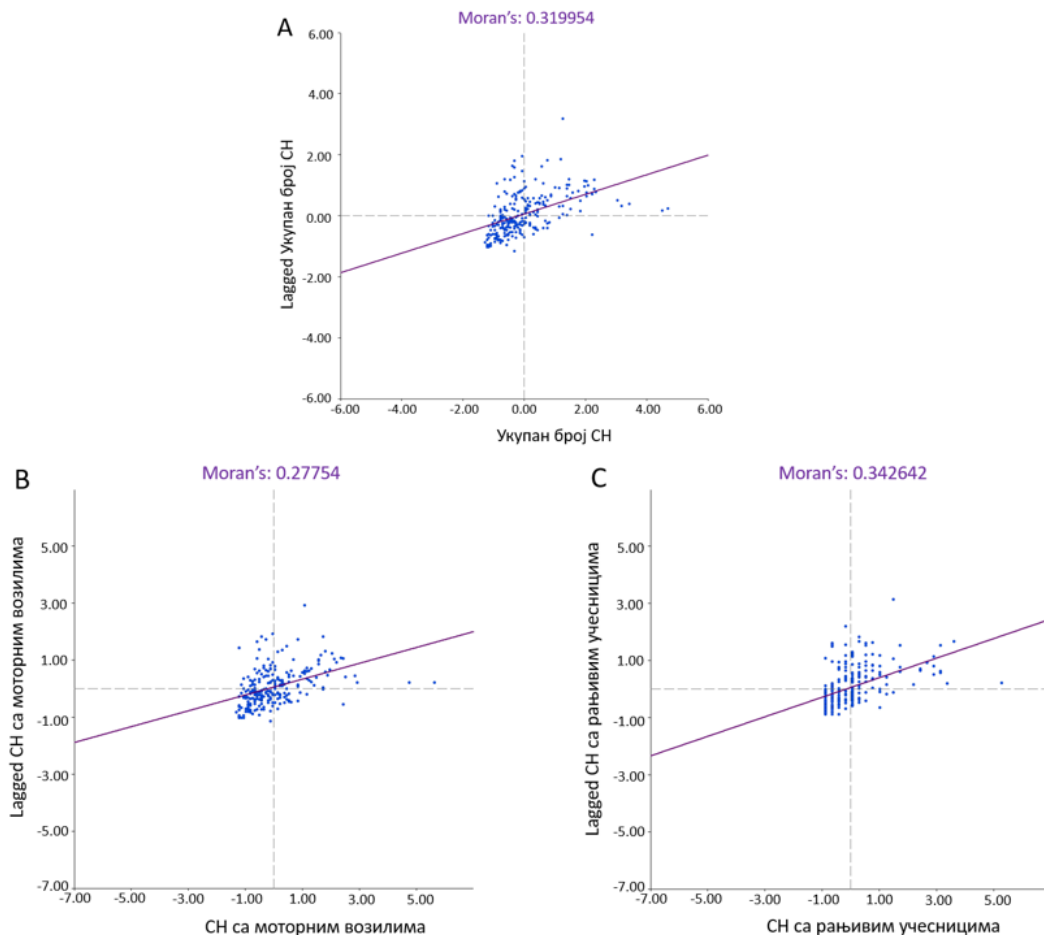
Саобраћајне карактеристике представљене су кроз следеће факторе: возило-километар путовања, број аутобуских стајалишта, број паркинг места на који се спроводи наплата у ограниченом временском интервалу од 2h и број паркинг места на којима се спроводи наплата без временског ограничења. Карактеристике пута односе се на обележја уличне мреже саобраћајница, а њих чине променљиве: дужина уличне мреже, дужина тротоара, дужина бициклических стаза, број раскрсница (трокраких, четворокраких, петокраких) и број раскрсница по начину регулације. Променљиве које су коришћене у истраживању прикупљене су на основу доступних сетова података као и геопозиционирањем ентитета у софтверском пакету ArcGIS. У табели 6.1 приказана је дескриптивна статистика променљивих које су укључене у анализу на подручју града Новог Сада.

**Табела 6.1.** Дескриптивна статистика независних променљивих

Променљиве	Средња вредност	Стандардна девијација	Мин.	Мак.
<i>Демографске карактеристике</i>				
Површина (ари)	5334.8	9921.4	255.9	75523.9
Популација испод 15 година старости (%)	12.565	5.905	0	44.44
Популација изнад 65 година старости (%)	15.137	7.547	0	42.86
Популација коју чине мушкарци (%)	44.339	15.563	0	100
Популација коју чине жене (%)	47.597	16.388	0	100
Густина становништва (становника/m <sup>2</sup> )	0.005	0.005	0	0.020
<i>Саобраћајне карактеристике</i>				
Возило-километар путовања	2175.794	1595.176	43.870	8071.235
Број аутобуских стајалишта	0.839	1.083	0	6
Број паркинг места са наплатом и ограничењем од 2h	3.887	14.187	0	96
Број паркинг места са наплатом	21.060	56.151	0	383
<i>Карактеристике пута</i>				
Дужина уличне мреже (m)	4356.4	5187.4	134.8	46553.4
Дужина тротоара (m)	1509.3	3566.1	0	49236.7
Дужина бициклических стаза (m)	268.2	471.2	0	2724.03
Број 3-краких раскрсница	5.056	4.885	0	49
Број 4-краких раскрсница	3.298	2.726	0	19
Број 5-краких раскрсница	0.032	0.199	0	2
Број сигналисаних раскрсница	1.137	1.179	0	5
<i>Карактеристике окружења</i>				
Број стамбених јединица	548.149	674.231	0	4774
Густина објеката (објеката по ару)	0.031	0.024	0	0.117
Број школа	0.371	0.685	0	3
Зона се налази у централном делу града (1 - ДА)	0.859	0.349	0	1

### 6.3. АНАЛИЗА ПРОСТОРНЕ АУТОКОРЕЛАЦИЈЕ

Развојем предиктивних модела по саобраћајним зонама долази се до присуства просторне зависности између саобраћајних зона као и присуства просторне хетерогености. Ова два просторна проблема представљају главна ограничења у регресионим анализама. Када је у питању предикција саобраћајних незгода, многе студије су потврдиле просторну аутокорејацију и закључиле да модели који уважавају просторну зависност имају боље перформансе од модела који не разматрају просторну зависност (Aguero-Valverde and Jovanis, 2006, Siddiqui et al., 2012, Zeng and Huang, 2014; Wang et al., 2016, Cai et al., 2016, 2017, Pljakić et al., 2018a). У складу са тим, у процесу развоја предиктивних модела испитан је коефицијент просторне аутокорејације коришћењем Морановог теста. Апсолутна вредност Морановог индекса се креће у границама од 0 до 1, где већа вредност указује на степен повезаности између посматраних ентитета, а са друге стране ентитети су посматрани као случајна просторна обележја. На слици 6.5. приказани су резултати Морановог теста за зависне променљиве у истраживању.



Слика 6.5. Моранов коефицијент за посматране зависне варијабле (А, В, С)

Као што је приказано на слици 6.5, код свих зависних варијабли идентификована је статистички значајна просторна аутокорејација ( $p$ -вредност  $< 0.05$ ). Коефицијент просторне аутокорејације је различит код свих зависних променљивих, најмања вредност је приказана код незгода у којима су учествовала само моторна возила (Moran's  $I = 0,27754$ ), укупног броја незгода (Moran's  $I = 0,319954$ ), а највећа вредност код незгода са рањивим учесницима у саобраћају (Moran's  $I = 0,342642$ ). Резултати

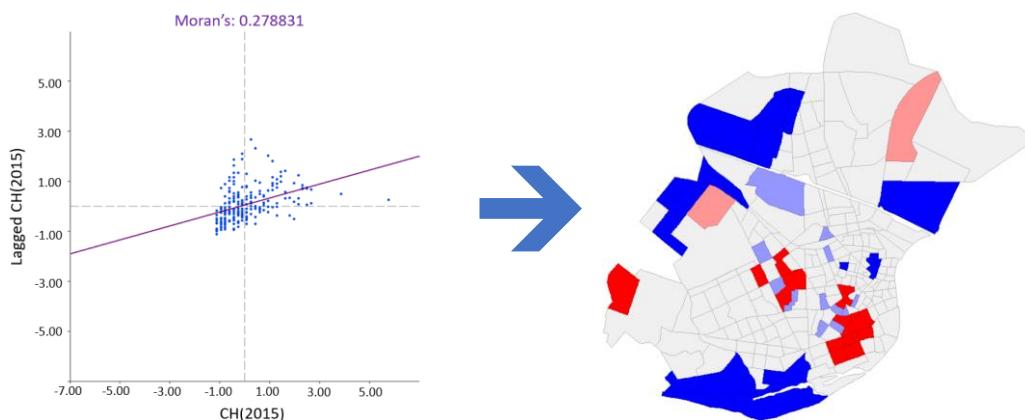
потврђује полазну хипотезу да су саобраћајне незгоде на саобраћајним зонама просторно аутокорелисане, тако да је потребно укључити просторну аутокорељацију у процес предикције саобраћајних незгода.

Поред испитивања просторне аутокорељације, идентификована је и просторно-временска аутокорељација које се односи на фреквенцију незгода на саобраћајним зонама у различитим временским периодима. Временски периоди односе се на сваку годину појединачно. Дескриптивна статистика незгода по годинама као временским јединицама приказана је у табели 6.2.

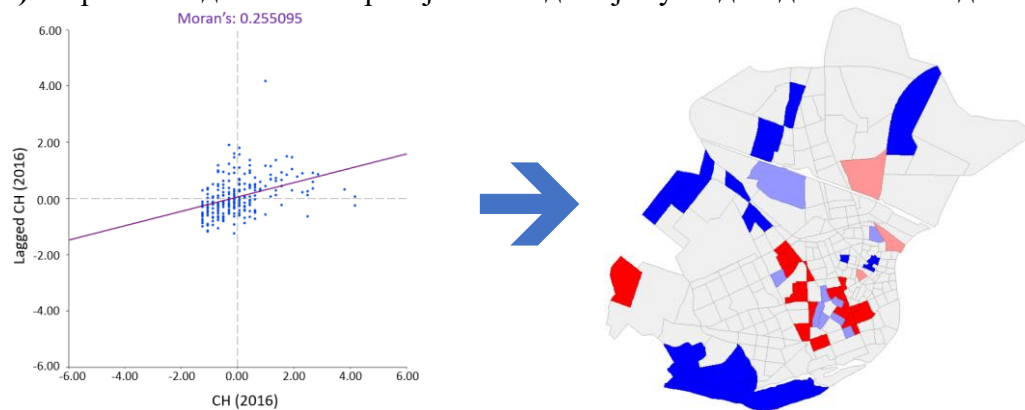
**Табела 6.2.** Дескриптивна статистика саобраћајних незгода по годинама

	Средња вредност	Стандардна девијација	Минимум	Максимум	Сума
Саобраћајне незгоде (2015)	6.5	5.802	0	40	1617
Саобраћајне незгоде (2016)	6.7	5.351	0	29	1653
Саобраћајне незгоде (2017)	7.0	5.986	0	33	1724

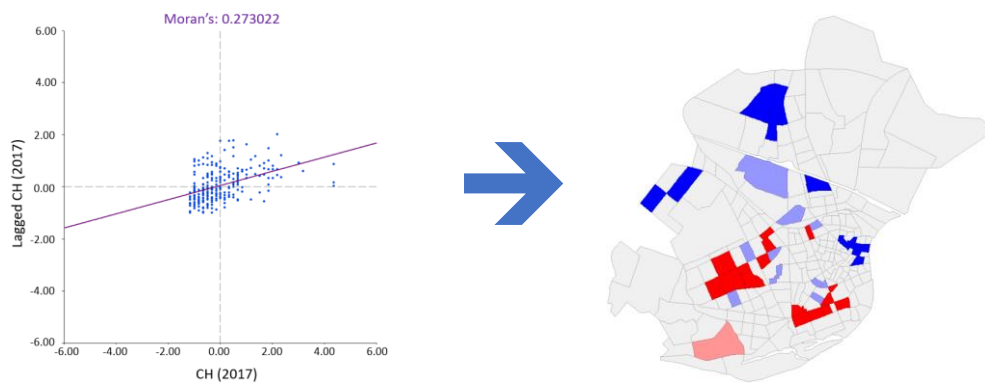
Из табеле се може уочити линеарни пораст саобраћајних незгода у трогодишњем временском периоду. Најмањи број незгода је евидентиран 2015. године (1.617 незгода) а највећи 2017. године (1.724). Локалне методе просторне аутокорељације примењене су како би се утврдило присуство груписања саобраћајних зона са високим бројем саобраћајних незгода у посматраним годинама. Тестирање присуства просторне аутокорељације је спроведено помоћу пермутација, где је изабрано 999 пермутација што је довољно да се постигне стабилан резултат. Резултати су показали присуство груписања са 0,05 нивоом значајности на подручју града Новог Сада (слика 6.6).



**а) Моранов индекс за саобраћајне незгоде које су се догодиле 2015. године**



**б) Моранов индекс за саобраћајне незгоде које су се догодиле 2016. године**



**в)** Моранов индекс за саобраћајне незгоде које су се догодиле 2017. године  
**Слика 6.6.** Кофицијент просторне аутокорејације саобраћајних незгода за посматрани временски период (а, б, в)

Са слике 6.6 евидентиран је различити кофицијент просторне корелације за различите временске јединице. Иако фреквенција саобраћајних незгода има линеарни тренд пораста, кофицијент просторне аутокорејације зависи од фреквенције незгода у суседним зонама, када се посматра свака појединачна зона. Највећи кофицијент аутокорејације уочен је 2015. године (Moran's  $I = 0,278831$ ), док најмањи износи 2016. (Moran's  $I = 0,255095$ ). Ови различити кофицијенти указују на различито груписање саобраћајних зона које је евидентно на мапама које се налазе у оквиру слике 6.6.

Сви резултати просторне аутокорејације указују да је потребно уважити кофицијент у процесу предикције саобраћајних незгода. Овим је прекршена главна претпоставка регресионих анализа да су посматране јединице независне, па је потребно развити предиктивне моделе који разматрају просторну аутокорејацију у циљу постизања оптималних резултата.

#### 6.4. АНАЛИЗА МУЛТИКОЛИНЕАРНОСТИ

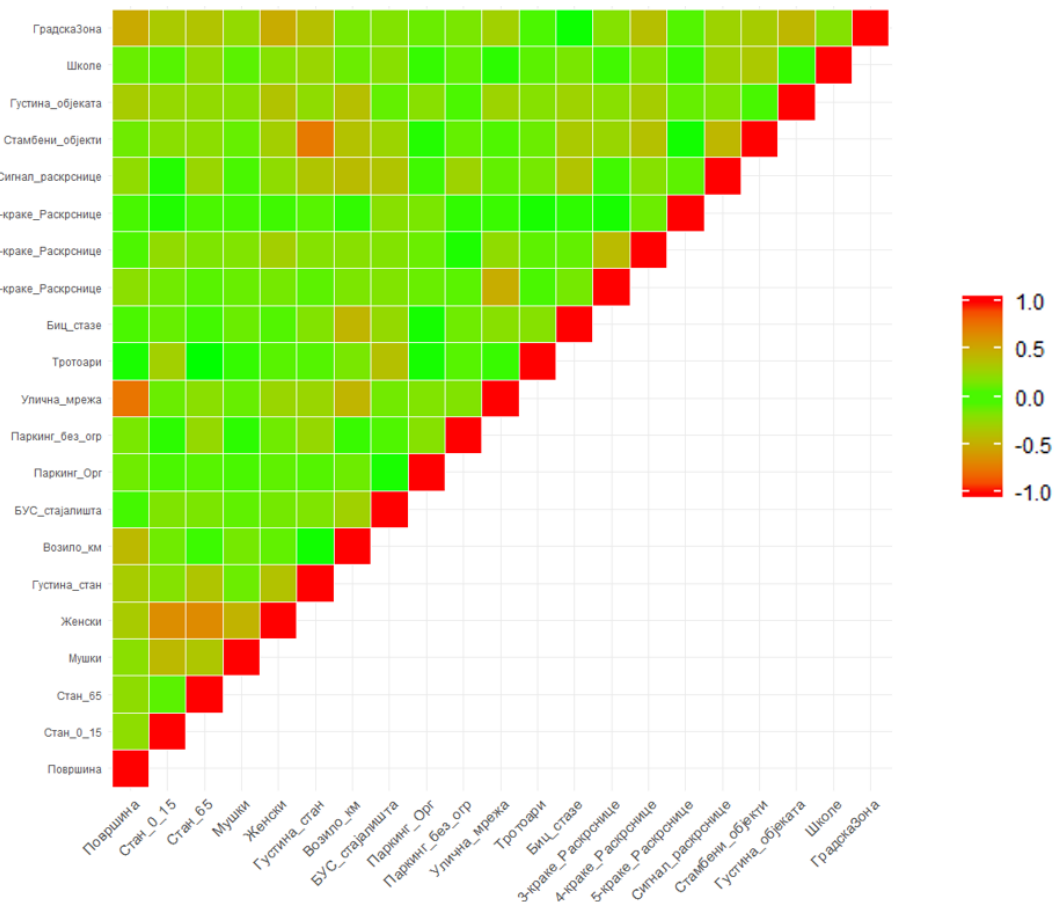
Сет независних променљивих, које су укључене у предиктивне моделе, одабран је разматрајући два услова. Ови услови се односе на разматрање изостављене пристрасности променљивих и мултиколинеарности. Први услов прати претпоставку да изостављене променљиве утичу на зависну променљиву, а други да изостављене променљиве су у корелацији са другим укљученим независним променљивим (Goldberger, 1991).

Мултиколинеарност је испитана помоћу Пирсоновог кофицијента корелације где су укључене све независне променљиве. Пирсонов кофицијент корелације показује јачину линеарне повезаности између две варијабле у моделима, а креће се у опсегу између -1 до 1. Ако је Пирсонов кофицијент корелације већи од 0,5 или мањи од -0,5, то указује на мултиколинеарност у посматраним променљивима. У овом случају потребно је искључити једну променљиву из даљег процеса предикције саобраћајних незгода (Cohen, 1992).

У корелациону анализу су укључене све варијабле где су дискутоване само оне које имају висок кофицијент корелације и које су искључене из даље анализе. Када су у питању демографске карактеристике, висок кофицијент корелације идентификован је између варијабли које се односе на проценат популације млађе од 15 година и проценат страновништва женског пола. Испитивање повезаности ове две варијабле са фреквенцијом саобраћајних незгода утврђено је да проценат популације млађе од 15 година није повезан са посматраним зависним променљивим, па је ова варијабла

искључена из даљег разматрања. Анализом саобраћајних карактеристика утврђена је корелација између броја аутобуских стајалишта и дужине тротоара. Ово се може оправдати чињеницом да у саобраћајним зонама где се налази изграђена инфраструктура за кретање пешака налази се и велики број инсталираних аутобуских стајалишта како би се омогућила што боља мобилност пешака. Поводом тога, испитан је утицај ове две променљиве на посматране зависне променљиве и утврђена је веза фреквенције аутобуских стајалишта са незгодама у којима су учествовали рањиви учесници у саобраћају. Са друге стране, дужина објеката за кретање пешака није у корелацији са зависним варијаблама па је због тога и искључена из даље анализе.

Анализом променљивих, које моделују карактеристике пута утврђена је мултиколинараност између броја трокраких раскрсница и дужине уличне мреже. У анализираним саобраћајним зонама где је присутна велика густина путне мреже налази се и повећан број трокраких раскрсница. Анализом ове две променљиве, број трокраких раскрсница није у корелацији са посматраним зависним променљивима, па је искључена из даљег поступка анализе. Поред тога, код карактеристика окружења уочена је мултиколинеарност између густине објеката, променљиве која указује да ли се посматрана саобраћајне зона налази у централном делу града и површине саобраћајне зоне. Променљиве које представљају густину објеката и присуство саобраћајних зона у централним деловима града нису показале утицај на саобраћајне незгоде тако да су искључене из даље анализе. На слици 6.7 приказани су резултати мултиколинеарности за све парове независних варијабли које су посматране у оквиру саобраћајних зона.



Слика 6.7. Пирсонов кефицијент корелације између независних варијабли

Након искључивања мултиколинеарних варијабли, одабир варијабли у модел је спроведен одређеним корацима који разматрају променљиве једну по једну. У моделима

су задржане променљиве чији су параметри значајни, што је пракса и у другим истраживањима (Guo et al., 2018). Након одабира дефинисаног сета променљивих које су укључене у моделе, израчунат је мултиколинеарни условни број ( $k_n$ ), који је једнак квадратном корену, а у релације са максималним ( $\lambda_{\max}$ ) и минималним ( $\lambda_{\min}$ ) својственим вредностима. Ова мера се примењује код развијања просторних регресионих модела (Anselin et al., 2006), где мултиколинеарни број који је већи од 30 указује на мултиколинеарност, што није случај у наредним развијеним моделима.

## 6.5. РАЗВОЈ ПРЕДИКТИВНИХ ФУНКЦИЈА

У циљу добијања оптималних резултата, у оквиру анализе развијени су предиктивни модели који уважавају присуство просторне аутокорељације између посматраних просторних јединица. Применом традиционалних предиктивних модела у анализи незгода по саобраћајним зонама уочени су недостаци који се односе на просторну хетерогеност и просторне ефекте који су присутни у посматраном сету података. На основу наведене методологије и доступних података, у овом истраживању су калибрирана три типа просторних предиктивних модела који моделују укупан број саобраћајних незгода, незгоде са моторним возилима и незгоде са рањивим учесницима на подручју Новог Сада (табела 6.3). У раду су посматране демографске карактеристике, саобраћајне карактеристике, карактеристике пута и карактеристике окружења као независне променљиве. Саобраћајне незгоде представљају зависну променљиву у моделима и у наставку су приказани резултати за сваку зависну променљиву појединачно.

Табела 6.3. Основни параметри зависних променљива

Зависне поменљиве	Средња вредност	Стандардна девијација	Минимум	Максимум
Укупан број СН	20.121	15.711	0	94
СН са моторним возилима	16.387	12.542	0	87
СН са рањивим учесницима	3.734	4.216	0	26

### 6.5.1. Предикција укупног броја саобраћајних незгода

Развој предиктивних модела за укупан број незгода укључује линеарне моделе који уважавају просторну аутокорељацију. У оквиру овог дела приказани су општи линеарни модел, просторни модел који разматра просторно заостале вредности које настају присуством аутокорељације у стохастичким процесима и просторни модел који разматра присуство грешке у резидуалима предиктивне променљиве. Сви ови модели су показали одређени сет утицајних фактора на фреквенцију укупног броја незгода на анализираном подручју. На основу Акаиковог и Бејзовог информационог критеријума, као и на основу пропорције варијансе зависне променљиве, утврђено је да просторни модел са заосталим вредностима има најбоље предиктивне способности у односу на друга два просторна модела.

Резултати модела са просторно заосталим подацима показали су да је у моделу укупно статистички значајно девет променљивих. Значајне променљиве односе се на различита обележја посматраних карактеристика. Када су у питању мере изложености, променљива која садржи возило-километар путовања показала је позитиван ефекат на укупан број саобраћајних незгода ( $\beta = 0,004$ ;  $p < 0,01$ ), што је и очекивано. У табели 6.4 приказани су

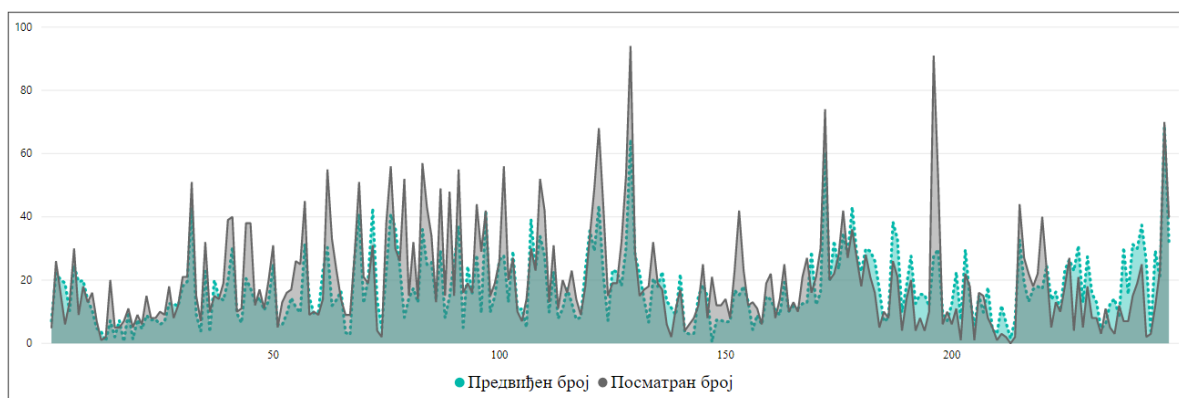
резултати фактора који утичу на укупан број саобраћајних незгода.

**Табела 6.4.** Резултати предикције укупног броја саобраћајних незгода;

	ОЛР		СЛМ		СЕМ	
	Коеф.	СЕ	Коеф.	СЕ	Коеф	СЕ
<i>Демографске карактеристике</i>						
Површина зоне (ари)	-0.000003***	0.000001	<b>-0.000003***</b>	<b>0.000001</b>	-0.000003**	0.000001
Мушка популација (%)	0.162***	0.042	<b>0.159***</b>	<b>0.041</b>	0.141***	0.040
<i>Саобраћајне карактеристике</i>						
Возило-километар путовања	0.004***	0.001	<b>0.004***</b>	<b>0.001</b>	0.004***	0.001
Паркинг места са наплатом 2 h	0.141**	0.046	<b>0.139**</b>	<b>0.044</b>	0.131**	0.049
<i>Карактеристике пута</i>						
Дужина уличне мреже	0.001**	0.0002	<b>0.0006***</b>	<b>0.0002</b>	0.0006**	0.0002
Дужина бициклистичких стаза	0.003*	0.002				
Број 5-краких раскрсница			<b>4.778*</b>	<b>3.128</b>		
Број сигналисаних раскрсница	2.901***	0.709	<b>2.71***</b>	<b>0.685</b>	2.959***	0.725
<i>Карактеристике окружења</i>						
Број стамбених објеката	0.006***	0.002	<b>0.005***</b>	<b>0.0011</b>	0.056***	0.0012
Број школа	-3.2928**	1.001	<b>-3.213***</b>	<b>0.959</b>	-2.878**	0.949
Константа	-3.625	2.276	<b>-6.267</b>	<b>2.366</b>	-2.654	3.107
СЛМ коефицијенат			<b>0.179</b>	<b>0.062</b>		
СЕМ коефицијенат					0.263	0.085
R-squared	0.61		<b>0.63</b>		0.62	
AIC	1856.84		<b>1850.58</b>		1854.28	
BIC	1895.49		<b>1892.74</b>		1892.93	
Лог-вероватноћа	-917.42		<b>-913.29</b>		-916.14	

**Ознаке:** Променљиве су значајне у 99% (\*\*\*), 95% (\*\*) и 90% (\*) нивоа поузданости

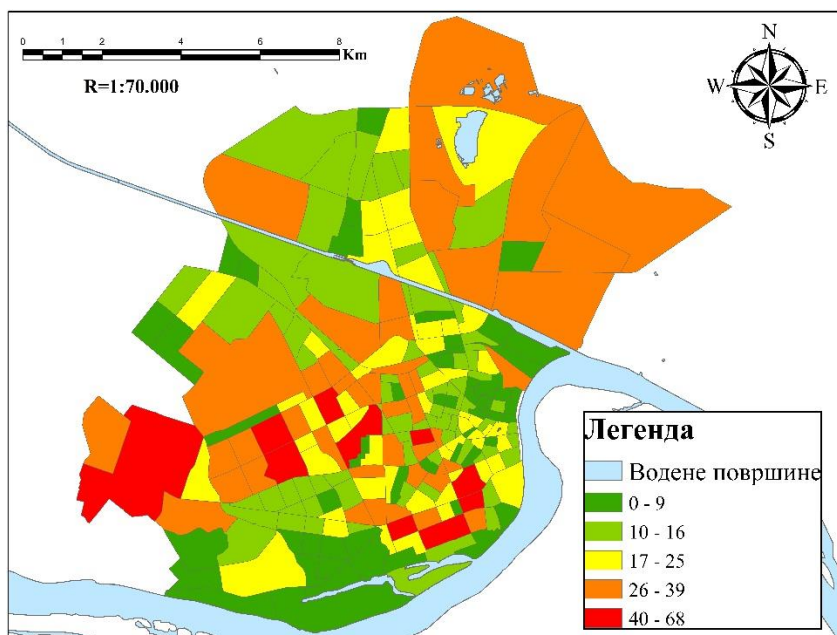
Поред ове променљиве, позитиван утицај потврђен је и код следећих променљивих: број паркинг места на којима се спроводи наплата уз временско ограничење од 2 часа ( $\beta = 0,139$ ;  $p < 0,05$ ), проценат мушке популације ( $\beta = 0,159$ ;  $p < 0,01$ ), дужина уличне мреже ( $\beta = 0,0006$ ;  $p < 0,01$ ), број петокраких раскрсница ( $\beta = 4,778$ ;  $p < 0,1$ ), број сигналисаних раскрсница ( $\beta = 2,71$ ;  $p < 0,01$ ) и број стамбених јединица по саобраћајној зони ( $\beta = 0,005$ ;  $p < 0,01$ ). Негативан утицај на укупан број незгода утврђен је код променљивих које се односе на: површину саобраћајних зона ( $\beta = -0,000003$ ;  $p < 0,01$ ) и број школа по саобраћајној зони ( $\beta = -3,213$ ;  $p < 0,01$ ).



**Слика 6.8.** Предвиђен и посматран укупан број саобраћајних незгода по саобраћајним зонама

У поређењу са другим моделима, фактор који се односи на дужину бициклистичких стаза није показао статистички значајан утицај на зависну варијаблу. Поред тога, модел је искључио променљиве које немају директан или индиректан утицај на зависну променљиву. Те променљиве се односе на: проценат становништва старији од 65 година,

процент женског пола у структури становништва, густина насељености, број аутобуских стајалишта, број паркинг места са плаћањем и без временског ограничења и број четворокраких раскрсница. На основу значајних променљивих представљених у моделу, процент варијансе зависне променљиве износи 63% ( $R\text{-squared} = 0,63$ ) (слика 6.8). На слици 6.9 приказана је мапа са фреквенцијом предвиђеног броја саобраћајних незгода у саобраћајним зонама. Са слике 6.9 може се видети да саобраћајне зоне, са високом густином предвиђеног броја незгода, су у близини главних градских саобраћајница, као и на подручјима где се јавља повећан степен мера изложености.



Слика 6.9. Густина предвиђеног укупног броја незгода по саобраћајним зонама.

Предиктивна функција за посматран број незгода може се добити разматрањем регресионих коефицијената претходно значајних фактора. Утврђена предиктивна функција може се изразити као:

$$PUNS = -6.267 - 0.000003 * P + 0.159 * MP + 0.004 * VKP + 0.139 * PNO + 0.0006 * L + 4.778 * PKR + 2.71 * SR + 0.005 * SO - 3.213 * \check{S} \quad (6.1)$$

где је:

- $PUNS$  –предвиђен укупан број незгода на посматраном подручју;
- $P$  – површина саобраћајне зоне;
- $MP$  – процент мушког пола;
- $VKP$  – возило-километар путовања;
- $PNO$  – број паркинг места са ограниченом наплатом путовања од 2 часа;
- $L$  – укупна дужина уличне мреже;
- $PKR$  –број петокраких раскрсница;
- $SR$  – број сигналисаних раскрсница;
- $SO$  – број стамбених објеката;
- $\check{S}$  – број школа унутар саобраћајних зона;



### 6.5.2. Предикција саобраћајних незгода у којима су учествовала моторна возила

Предикција саобраћајних незгода у којима су учествовала моторна возила спроведена је помоћу модела који су примењени и код развоја предиктивне функције укупног броја незгода. Укупно су развијена три модела где је сваки појединачно показао различите предиктивне способности. На основу информационих критеријума, као и процента варијансе зависне променљиве, утврђено је да просторни модел са заосталим вредностима има најбоље предиктивне перформансе у односу на друге развијене просторне моделе. Ови резултати су слични као и код укупног броја саобраћајних незгода, међутим разлика се истиче у статистички значајним факторима који утичу на фреквенцију саобраћајних незгода.

Резултати модела, који уважавају просторно заостале податке, показали су да је у развијеном моделу статистички значајно 10 променљивих. Значајне променљиве односе се на факторе груписане око различитих карактеристика. Мету изложености у овом моделу представља возило-километар путовања која је садржана као саобраћајна карактеристика. Резултати утицаја ове варијабле указују на позитиван утицај на фреквенцију незгода са моторним возилима ( $\beta = 0,003$ ;  $p < 0,01$ ), што је идентично као и код укупног броја незгода. Поред мере изложености, остале променљиве које имају позитиван и негативан утицај на саобраћајне незгоде са моторним возилима приказане су у наредној табели (табела 6.5).

**Табела 6.5.** Резултати предикције саобраћајних незгода у којима су учествовала моторна возила

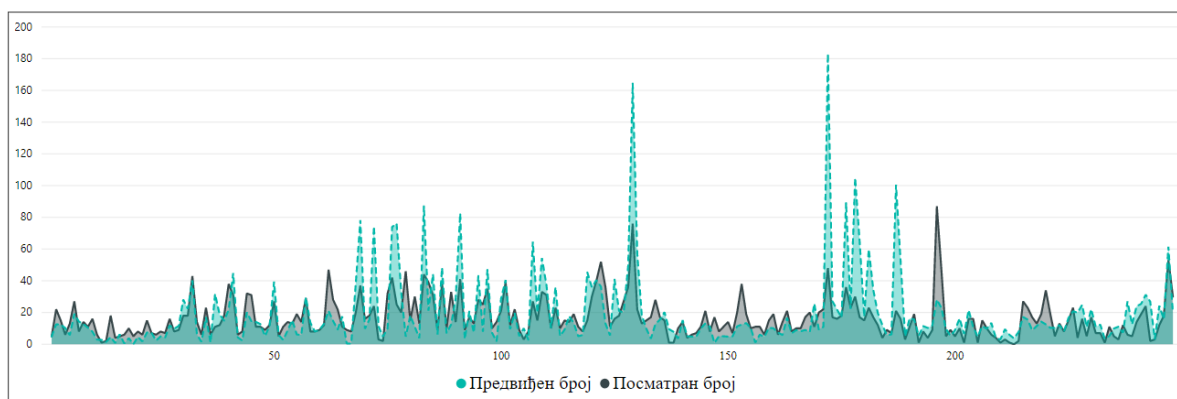
	ОЛР		СЛМ		СЕМ	
	Коеф.	СЕ	Коеф.	СЕ	Коеф	СЕ
<b>Демографске карактеристике</b>						
Површина зоне (ари)	-0.000003**	0.000001	<b>-0.000003***</b>	<b>0.000001</b>	-0.000003**	0.000001
Становници преко 65 год.(%)			<b>-0.008*</b>	<b>0.005</b>	-0.0085*	0.005
Мушка популација (%)	0.1668***	0.039	<b>0.167***</b>	<b>0.038</b>	0.156***	0.038
Женска популација (%)	-0.070*	0.005	<b>-0.075**</b>	<b>0.047</b>	-0.076**	0.048
<b>Саобраћајне карактеристике</b>						
Возило-километар путовања	0.003***	0.001	<b>0.003***</b>	<b>0.001</b>	0.003***	0.0001
Паркинг места са наплатом 2 h	0.116**	0.039	<b>0.115**</b>	<b>0.037</b>	0.108**	0.041
<b>Карактеристике пута</b>						
Дужина уличне мреже	0.0005**	0.0002	<b>0.0005***</b>	<b>0.0002</b>	0.0005**	0.0001
Број сигналисаних раскрсница	2.604***	0.606	<b>2.443***</b>	<b>0.587</b>	2.635***	0.621
<b>Карактеристике окружења</b>						
Број стамбених објеката	0.0045***	0.001	<b>0.004***</b>	<b>0.00098</b>	0.0043***	0.0001
Број школа	-2.841***	0.863	<b>-2.782***</b>	<b>0.829</b>	-2.558***	0.819
Константа	-3.298	2.265	<b>-2.424</b>	<b>2.316</b>	-1.957	2.609
СЛМ коефицијент			<b>0.176</b>	<b>0.065</b>		
СЕМ коефицијент					0.251	0.086
R-squared	0.55		<b>0.57</b>		0.56	
AIC	1778.66		<b>1772.70</b>		1776.32	
BIC	1817.31		<b>1814.86</b>		1814.97	
Лог-вероватноћа	-878.33		<b>-874.35</b>		-877.16	

**Ознаке:** Променљиве су значајне у 99% (\*\*\*) , 95% (\*\*) и 90% (\*) нивоа поузданости

У зависности од посматране зависне варијабле, независне варијабле имају позитиван и негативан утицај. Позитиван утицај на фреквенцију саобраћајних незгода са моторним возилима имају променљиве које су представљене као: проценат мушке популације ( $\beta = 0,167$ ;  $p < 0,01$ ), број паркинг места са наплатом у ограниченом временском интервалу од 2 часа ( $\beta = 0,115$ ;  $p < 0,01$ ), дужина уличне мреже ( $\beta = 0,0005$ ;  $p < 0,01$ ), број сигналисаних раскрсница ( $\beta = 2,443$ ;  $p < 0,01$ ) као и број стамбених објеката

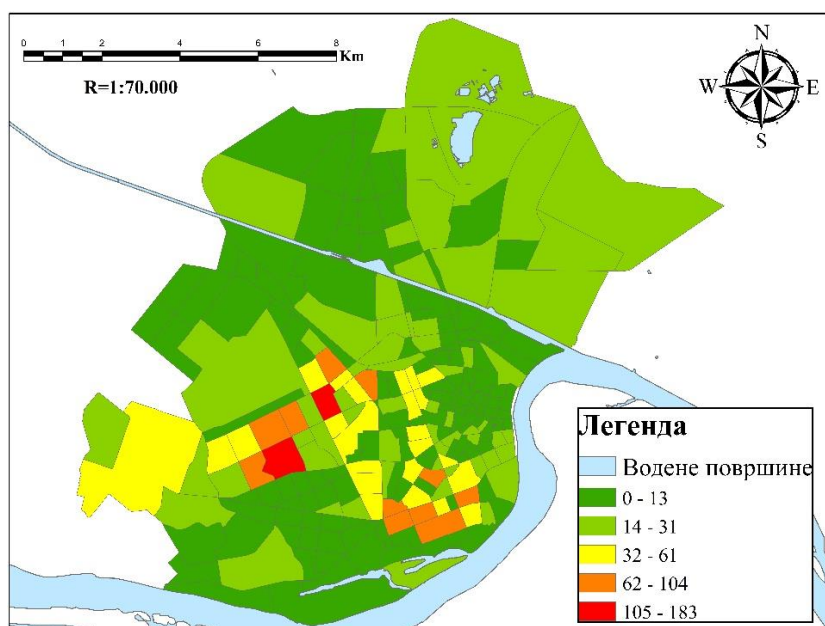
( $\beta = 0,004$ ;  $p < 0,01$ ). Негативан утицај на зависну променљиву у оквиру овог модела имају променљиве које се односе на: површину саобраћајних зона ( $\beta = -0,000003$ ;  $p < 0,01$ ), проценат становника старији од 65 година ( $\beta = -0,008$ ;  $p < 0,10$ ), проценат популације коју чине жене на подручју саобраћајних зона ( $\beta = -0,075$ ;  $p < 0,05$ ) као и број школа ( $\beta = -2782$ ;  $p < 0,01$ ).

Променљиве које немају статистички значајан утицај на фреквенцију незгода са моторним возилима односе се на густину насељености, број аутобуских стајалишта, број паркинг места са наплатом и без временског ограничења, дужина бициклических стаза, број 4-краких и 5-краких раскрсница. У оквиру развијеног модела, значајне променљиве процењују објашњену варијансу зависне променљиве која износи око 57 % ( $R\text{-squared} = 0,57$ ) (слика 6.10).



**Слика 6.10.** Посматран и предвиђен број саобраћајних незгода у којима су учествовала моторна возила по саобраћајним зонама

На слици 6.11 приказане су предиктивне вредности саобраћајних незгода у којима су учествовала моторна возила. На мапама се може видети да предвиђени број незгода најчешће се јавља у саобраћајним зонама где је изражен већи број путовања моторним возилом. Ови резултати на мапи се разликују од укупног предвиђеног броја незгода.



**Слика 6.11.** Густина предвиђеног броја саобраћајних незгода у којима су учествовала моторна возила по саобраћајним зонама.

Предиктивна функција саобраћајних незгода у којима су учествовала моторна возила може се изразити као:

$$PMVSN = -2.424 - 0.000003 * P - 0.008 * ST + 0.167 * MP - 0.075 * ZP + 0.003 * VKP + 0.115 * PNO + 0.0005 * L + 2.443 * SR + 0.004 * SO - 2.782 * \check{S} \quad (6.2)$$

где је:

*PMVSN* – предвиђен број незгода са моторним возилима;

*P* – површина саобраћајне зоне;

*ST* – проценат становништва изнад 65 година;

*MP* – проценат мушког пола;

*ZP* – проценат женског пола;

*VKP* – возило-километар путовања;

*PNO* – број паркинг места са ограниченом наплатом путовања од 2 часа;

*L* – укупна дужина уличне мреже;

*SR* – број сигналисаних раскрсница;

*SO* – број стамбених објеката;

*\check{S}* – број школа унутар саобраћајних зона;

### 6.5.3. Предикција саобраћајних незгода са рањивим учесницима

Развој предиктивних модела у којима су учествовали рањиви учесници у саобраћају спроводи се на исти начин као и код претходних предиктивних модела. У оквиру ове зависне променљиве развијена су три просторна предиктивна модела где су идентификоване значајне разлике у односу на претходно развијене моделе. Анализом информационих критеријума као и параметара модела, просторни регресиони модел који сагледава грешке у резидуалима зависне променљиве, има најбоље предиктивне перформансе у односу на прва два модела. Ово није случај са укупним бројем незгода и са незгодама у којима су учествовала моторна возила.

Након развоја предиктивне функције саобраћајних незгода, идентификоване су статистички значајне променљиве које утичу на фреквенцију саобраћајних незгода. Од испитаног сета података, на незгоде са рањивим учесницима утиче 9 независних променљивих које садрже различита обележја посматраних карактеристика. У табели 6.6 представљени су статистички значајни фактори који утичу на фреквенцију незгода у којима су учествовали рањиве групе учесника у саобраћају.

Када су у питању рањиви учесници у саобраћају, мере изложености често укључују возило-километар путовања која има позитиван утицај ( $\beta = 0,0007$ ;  $p < 0,01$ ), и једну променљиву која представља сурогат кретања пешака и бициклиста. У оквиру овог истраживања сурогат променљива која представља изложеност рањивих учесника је густина становништва која има негативан утицај на број саобраћајних незгода ( $\beta = -119,98$ ;  $p < 0,05$ ) и тим потврђује резултате претходних студија (Jacobsen, 2015). Поред мера изложености, остале независне варијабле које имају утицај на фреквенцију незгода приказане су у табели 6.6.

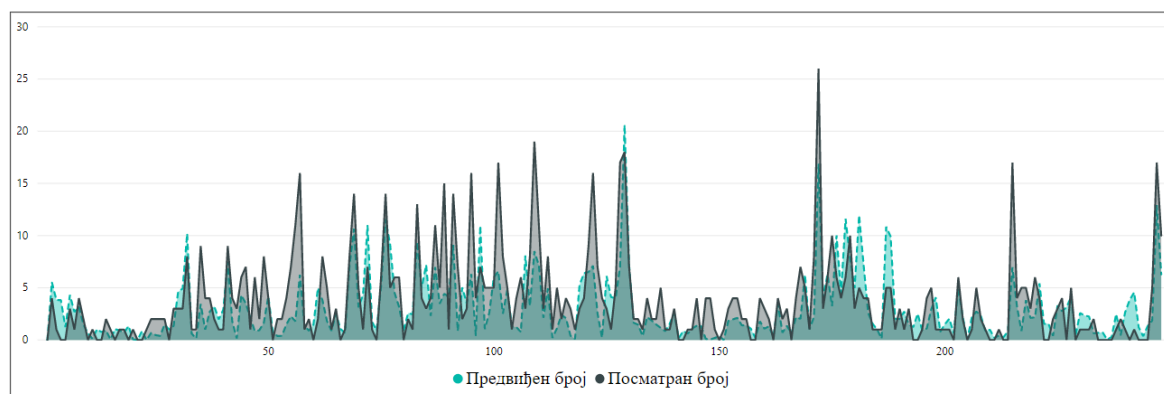
Позитиван утицај на фреквенцију саобраћајних незгода у којима су учествовале рањиве категорије имају променљиве које су представљене као: број аутобуских стајалишта ( $\beta = 0,313$ ;  $p < 0,10$ ), број паркинг места на којима се спроводи наплата са временским ограничењем од 2 часа ( $\beta = 0,031$ ;  $p < 0,05$ ), дужина бициклистичких стаза

( $\beta = 0,0012$ ;  $p < 0,05$ ), број 5-краких раскрсница ( $\beta = 1,852$ ;  $p < 0,05$ ), број сигналисаних раскрсница ( $\beta = 0,555$ ;  $p < 0,05$ ) као и број стамбених објеката ( $\beta = 0,003$ ;  $p < 0,01$ ) у оквиру саобраћајних зона. Анализом целокупног сета независних променљивих, променљиве са негативним утицајем идентификоване су само код густине становништва ( $\beta = -119,98$ ;  $p < 0,05$ ).

**Табела 6.6.** Резултати предикције саобраћајних незгода са рањивим учесницима.

	ОЛР		СЛМ		СЕМ	
	Коеф.	СЕ	Коеф.	СЕ	Коеф	СЕ
<i>Демографске карактеристике</i>						
Површина зоне (ари)	-0.000001*	0.000000				
Густина становништва			-95.43*	57.676	<b>-119.98**</b>	<b>62.10</b>
<i>Саобраћајне карактеристике</i>						
Возило-километар путовања	0.0008***	0.0002	0.0007***	0.0001	<b>0.0007***</b>	<b>0.0002</b>
Број аутобуских стајалишта	0.353*	0.194	0.317*	0.185	<b>0.313*</b>	<b>0.186</b>
Паркинг места са наплатом 2 h	0.0345**	0.013	0.032**	0.013	<b>0.031**</b>	<b>0.014</b>
<i>Карактеристике пута</i>						
Дужина бициклистичких стаза	0.0011**	0.0005	0.0010**	0.0004	<b>0.0012**</b>	<b>0.0005</b>
Број 5-краких раскрсница	2.272**	0.989	2.249***	0.943	<b>1.852**</b>	<b>0.968</b>
Број сигналисаних раскрсница	0.481**	0.214	0.448**	0.204	<b>0.555**</b>	<b>0.218</b>
<i>Карактеристике окружења</i>						
Број стамбених објеката	0.0023***	0.0005	0.0022***	0.0004	<b>0.003***</b>	<b>0.0005</b>
Константа	-1.829	0.935	-0.821	0.413	<b>-1.066</b>	<b>0.929</b>
СЛМ коефицијент			0.219	0.068		
СЕМ коефицијент					<b>0.345</b>	<b>0.081</b>
R-squared	0.52		0.55		<b>0.57</b>	
AIC	1252.85		1243.96		<b>1238.8</b>	
BIC	1287.97		1282.61		<b>1273.91</b>	
Лог-вероватноћа	-616.42		-610.98		<b>-609.39</b>	

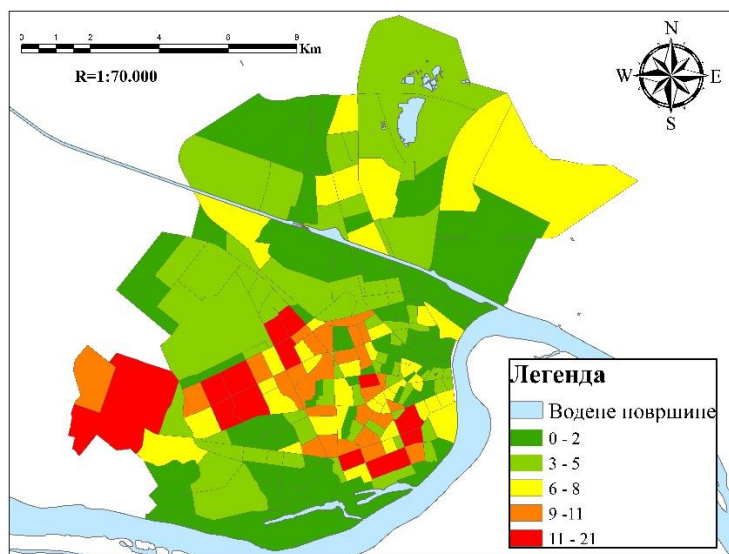
Променљиве које нису имале статистички значајан утицај на фреквенцију незгода биле су искључене из процеса развоја предиктивне функције. Искључене променљиве су: проценат становништва старијег од 65 година, проценат мушког становништва, проценат женског становништва, дужина уличне мреже, број 4-краких раскрсница, број паркинг места са наплатом и без временског ограничења као и број школа по саобраћајним зонама. Развијањем просторног предиктивног модела, значајне променљиве процењују објашњену варијансу зависне променљиве која износи око 57 % ( $R\text{-squared} = 0,57$ ) (слика 6.12).



**Слика 6.12.** Посматран и предвиђен број саобраћајних незгода са рањивим учесницима по саобраћајним зонама

Висока густина посматраног број незгода са рањивим учесницима евидентирана је у централним деловима града где је и изражена већа мобилност пешака и бициклиста.

Када је у питању предвиђен број незгода, највећа густина је евидентирана у зонама главних саобраћајница као и на локацијама где се налази колективно становање. На слици 6.13. може се видети густина предвиђеног броја незгода са рањивим учесницима.



Слика 6.13. Густина предвиђеног броја саобраћајних незгода са рањивим учесницима по саобраћајним зонама

Функција предиктивних вредности саобраћајних незгода у којима су учествовали рањиви учесници у саобраћају може се изразити као:

$$PRUSN = -1.066 - 119.98 * GS + 0.0007 * VKP + 0.313 * BUS + 0.031 * PNO + 0.0012 * BS + 1.852 * PKR + 0.555 * SR + 0.003 * SO \quad (6.3)$$

где је:

- $PRUSN$  – предвиђен број незгода са рањивим учесницима у саобраћају;
- $GS$  – густина становника
- $VKP$  – возило-километар путовања;
- $BUS$  – број аутобуских стајалишта;
- $PNO$  – број паркинг места са ограниченом наплатом путовања од 2 часа;
- $BS$  – дужина бициклистичких стаза;
- $PKR$  – број 5-краких раскрсница;
- $SR$  – број сигналисаних раскрсница;
- $SO$  – број стамбених објеката.

## 6.6. ДИСКУСИЈА ПРЕДИКЦИЈЕ НЕЗГОДА У САОБРАЋАЈНИМ ЗОНАМА

У оквиру овог поглавља развијени су предиктивни модели који утврђују утицај фактора на фреквенцију саобраћајних незгода у саобраћајним зонама. Поред утврђивања утицајних фактора спроведен је одабир модела са најбољим предиктивним перформансама. На основу расположивог сета података посматране су три зависне променљиве и 21 независна променљива. Разматрање припремљеног сета података уочена су и доказана одређена ограничења регресионих модела, где су одабрани модели

који уважавају одређене просторне ефекте. Развијени модели су: класични просторни регресиони модел, просторни модел који разматра просторно заостале вредности, као и просторни модел који уважава просторну грешку у резидуалима предвиђене зависне променљиве. Сви поменути модели развијени су код посматраних зависних променљивих, где је иза тога одабран модел са најбољим предиктивним перформансама.

Зависне променљиве које су разматране у оквиру овог истраживања односе се на укупан број саобраћајних незгода, саобраћајне незгоде у којима су учествовала моторна возила, као и саобраћајне незгоде са рањивим учесницима у саобраћају. Резултати предикције су показали да просторни предиктивни модел који разматра просторне заостале вредности има најбоље предиктивне способности код укупаног броја незгода и незгода са моторним возилима. Када су у питању незгоде са рањивим учесницима, најбоље предиктивне перформансе је показао просторни модел који уважава просторну грешку резидуала. Ови резултати указују на специфичне разлике између различитих типова саобраћајних незгода, што указује на потребу да се развију и просторни модели који су показали добре перформансе на другим подручјима (Siddiqui et al., 2012; Abdel-Aty et al., 2013, Wang et al., 2019).

Поред зависних променљивих у развој предиктивних модела укључене су независне променљиве које садрже обележја различитих карактеристика. Скуп независних променљивих садржи: демографске карактеристике, саобраћајне карактеристике, карактеристике пута као и карактеристике окружења. Фактори који моделују одређена обележја у саобраћајним зонама имају и различит утицај на посматране типове саобраћајних незгода. Детаљнији резиме о резултатима и утицајним факторима на саобраћајне незгоде представљени су у посебном поглављу дискусије.

## **7. ИСТРАЖИВАЊЕ ПРЕДИКЦИЈЕ САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА НА РАСКРСНИЦАМА**

## 7. ИСТРАЖИВАЊЕ ПРЕДИКЦИЈЕ САОБРАЋАЈНИХ НЕЗГОДА НА РАСКРСНИЦАМА

### 7.1. УВОД

Анализа безбедности саобраћаја на одређеним деловима путне мреже може се посматрати у циљу утврђивања фактора који утичу на фреквенцију саобраћајних незгода. Предиктивни модели представљају математичку функцију која објашњава везу између фреквенције саобраћајних незгода и других предикторских променљивих. У анализи саобраћајних незгода све већу примену имају предиктивни модели који су засновани на регресионим анализама (Abdel-Aty and Radwan, 2000; Shankar et al., 1998; Hauer, 1986; Lord and Mannering, 2010, Pljakić et al., 2018c). Поред тога, многе студије анализирале су саобраћајне незгоде на раскрсницама применом регресионих анализа (Brüde and Larsson 1993; Lee and Abdel-Aty 2005; Harwood et al., 2007; Miranda-Moreno et al., 2011).

Регресионе анализе односе се на процену регресионих коефицијената у циљу утврђивања утицајних фактора на зависну променљиву (Fox, 1997). Фактори који утичу на фреквенцију саобраћајних незгода на раскрсницама могу се систематизовати на саобраћајне и геометријске карактеристике у зависности од посматраног типа незгода, као и доступности података. Подаци за анализу могу се прикупити на основу различитих географских просторних јединица у циљу оптимизације предиктивних модела на микро нивоу (Lee et al., 2017).

Процес моделовања саобраћајних незгода на раскрсницама често се спроводи традиционалним статистичким моделима, од којих највећу примену имају Поасонов модел (Guo et al., 2010) и негативни биномни модел (Torbic et al., 2010; Lee et al., 2017; Wang et al., 2017). Поједини аутори истичу предности негативног биномног модела који уважава наддисперзију података, што је уједно једна од карактеристика посматране фреквенције саобраћајних незгода (Lord and Mannering, 2010; Mannering and Bhat, 2014). Поред тога, уз бројне предности негативног биномног модела, може се додати и претпоставка да број посматраних ентитета мора да буде независан. Анализом ове претпоставке дошло је до потребе да се у процес развоја модела укључе случајни, просторни или временски ефекти. Ови ефекти су потврђени у истраживањима која су развијала предиктивне моделе за раскрснице (Kim et al., 2007; Xie et al., 2014; Lee et al., 2017). Укључивање ефеката у предиктивне моделе зависи од одабира посматраних раскрсница на анализираном подручју и све то у функцији карактеристика подручја.

#### 7.1.1. Саобраћајне карактеристике

У оквиру саобраћајних карактеристика често су систематизоване мере изложености које репрезентују мобилност становништа у циљу прецизнијег моделовања саобраћајних незгода. У досадашњим студијама, које су имале за циљ развој предиктивних модела на раскрсницама, посматране су различите мере изложености које се односе на проток возила на главном и споредном прилазу (Chin and Quddus, 2003; Miranda-Moreno et al., 2011; Lee et al., 2017). Kennedy (2008) је применом модела предикције утврдио да изложеност возила представља независну променљиву која има највећи утицај на фреквенцију саобраћајних незгода на сигналисаним раскрсницама.



Мере изложености често обухватају просечан годишњи дневни саобраћај на главном и споредном прилазу (Torbic et al., 2010; Strauss et al., 2014; Wang et al., 2017), просечан дневни саобраћај на главном и споредном прилазу (Poch and Mannering, 1996; Chin and Quddus, 2003), као и проток возила по смеровима кретања (Guo et al., 2010). Поред изложености, утврђен је и утицај нелинеарне везе укључујући карактеристике намене површина, карактеристике путне мреже и приступ јавног превоза путника (Pulugurtha and Sambhara, 2011; Miranda-Moreno et al., 2011). Поред тога, саобраћајне карактеристике често групишу обележја која се односе на брзину возила (Pulugurtha et al., 2011; Wang et al., 2017), начин регулисања раскрснице (Gomes et al., 2013; Lee et al., 2017) као и одвијање јавног превоза путника у близини раскрснице (Chin and Quddus, 2003; Torbic et al., 2010). Сва ова обележја потребно је испитати на другим подручјима, пошто анализирани фактори имају различити утицај у досадашњим студијама (Mannering and Bhat, 2014).

### 7.1.2. Геометријске карактеристике

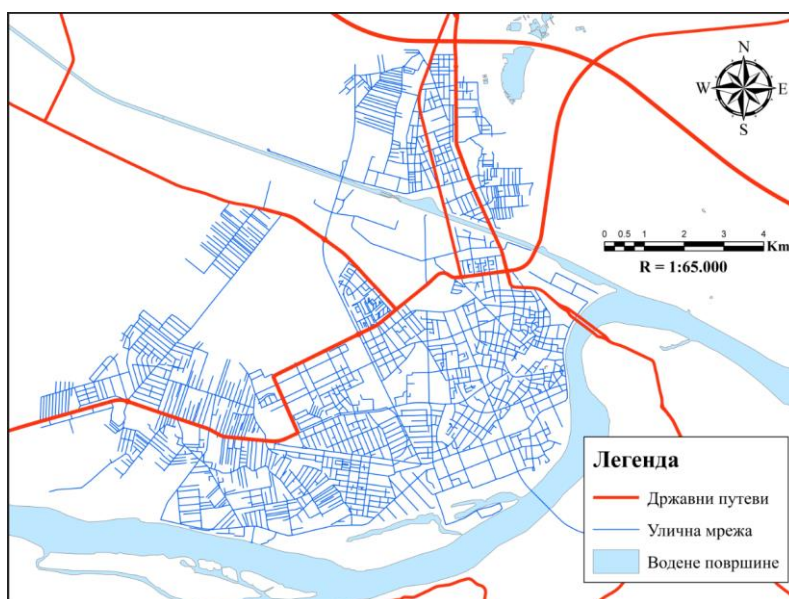
Поред саобраћајних карактеристика, многи истраживачи су анализирали геометријске карактеристике раскрсница у циљу развоја предиктивних модела (Torbic et al., 2010; Strauss et al., 2014; Xie et al., 2014). У оквиру геометријских карактеристика често се систематизују фактори према присуству изграђених објеката који служе за кретање и усмеравање свих учесника у саобраћају. У оквиру ових објеката често се издваја присуство пешачких прелаза, присуство разделних острва, број саобраћајних трака, угао укрштања као и тип раскрснице. Присуство пешачких прелаза често се моделује као укупна дужина прелаза или присуство пешачких прелаза. Strauss et al., (2014) су утврдили да дужина пешачког прелаза има позитиван утицај на број саобраћајних незгода са бициклистима. Поред тога, када је у питању присуство пешачког прелаза на главном и споредном прилазу, поједини аутори нису доказали статистички утицај на саобраћајне незгоде (Gomes et al., 2013; Torbic et al., 2010). Анализом присуства разделних острва доказан је негативан утицај на саобраћајне незгоде са бициклистима (Wang and Abdel-Aty, 2006; Strauss et al., 2014), међутим када се посматра укупан број незгода, разделно острво ширине преко 2 метра позитивно утиче на фреквенцију саобраћајних незгода (Chin and Quddus, 2003). Број саобраћајних трака посматра се као скуп свих трака на прилазима или појединачно према правцу кретања у раскрсници. У досадашњим истраживањима, укупан број саобраћајних трака на прилазима несигналисаних раскрсница има позитиван утицај на незгоде са бициклама (Strauss et al., 2014), као и незгоде са пешацима (Gomes et al., 2013; Torbic et al., 2010). Поред броја саобраћајних трака, често је анализиран угао укрштања као и тип раскрснице. Утицај променљиве која моделује угао укрштања на раскрсници није доказан у досадашњим истраживањима (Wang and Abdel-Aty, 2006). Поред тога, анализом типа раскрснице утврђен је позитиван утицај броја кракова на незгоде у којима су учествовала моторна возила, бициклисти као и пешаци (Pulugurtha et al., 2011; Lee et al., 2017; Wang et al., 2017).

Резултати анализираних истраживања указују да су на посматраним подручјима идентификовани различити утицајни фактори. Ови фактори су утврђени на раскрсницама у Флориди (Lee et al., 2017; Wang et al., 2017), Монтреалу (Miranda-Moreno et al., 2011; Strauss et al., 2014), Лисабону (Gomes et al., 2013), Торонту (Torbic et al., 2010), Шангају (Xie et al., 2014), Сингапуру (Chin and Quddus, 2003), и другим градовима (Poch and Mannering, 1996; Guo et al., 2010; Mitra and Washington, 2012). Ограничења анализираних истраживања често су усмерена на величину узорка, као и методологију

спровођења предикције (Pulugurtha et al., 2011; Gomes et al., 2013). Величина узорка у великој мери зависи од доступности података који су неопходни за процес развоја предиктивних функција. У овом делу су прикупљени подаци за моделовање раскрсница у урбаним срединама, где су истакнуте предиктивне функције за укупан број незгода, незгоде у којима су учествовала само моторна возила, као и незгоде са рањивим учесницима. Поред тога, у складу са досадашњим истраживањима, у оквиру поглавља уложени су напори да се применом предиктивних модела утврди веза између фреквенције саобраћајних незгода са саобраћајним и геометријским карактеристика на раскрсницама у Новом Саду.

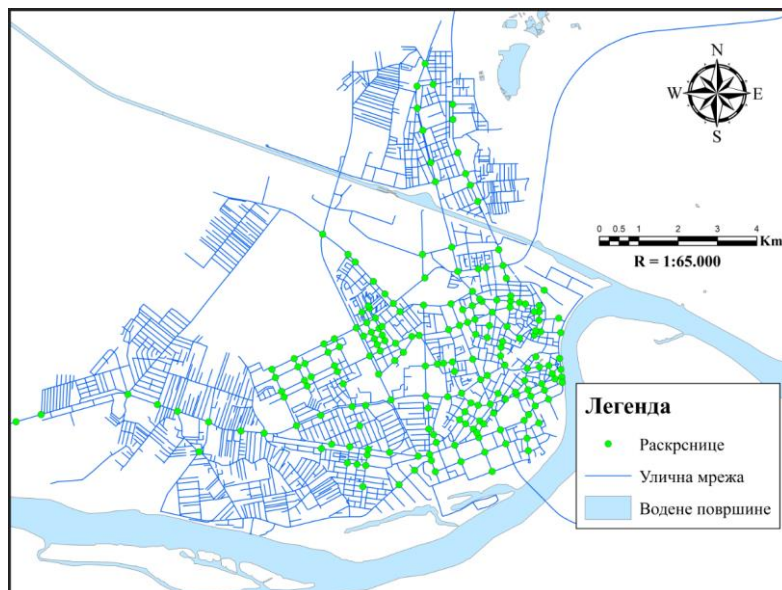
## 7.2. ПРИПРЕМА ПОДАТАКА

Припрема података за анализу безбедности саобраћаја на микролокацијама спроведена је на подручју града Новог Сада. Нови Сад се налази на југо-западном делу аутономне покрајне Војводине и представља везу значајних међународних и државних путева. Поред тога, Нови Сад чини 15 приградских насеља које тангира паневропски коридор 10, који повезује Србију са Мађарском, Бугарском, Македонијом и Грчком. У погледу саобраћајне инфраструктуре на нивоу општине, кроз Нови Сад пружају се државни путеви I и II реда, а поред њих путну мрежу чини око 880 регистрованих улица на подручју урбаног дела града (слика 7.1).



Слика 7.1. Улична мрежа на подручју града Новог Сада

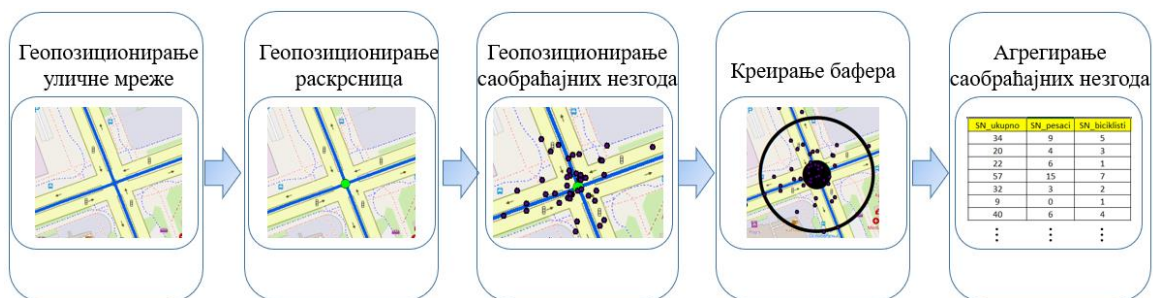
У оквиру анализираних уличних мрежа издвојене су раскрснице, као микроскопски делови уличне мреже, које представљају посматране просторне јединице за предикцију саобраћајних незгода. На анализираном урбаном подручју посматране су 202 раскрснице сумиране у односу на различит тип раскрснице, као и различит начин регулисања. Када је у питању различит тип раскрснице, посматране су трокраке, четворокраке, петокраке и кружне раскрснице. Са друге стране, у односу на начин регулисања одабране су светлосно сигнализисане раскрснице и раскрснице регулисане саобраћајним знацима. На подручју града укупно се налази 94 раскрснице регулисане светлосном сигнализацијом. Укупан узорак је формиран на основу доступних података који су неопходни у циљу развоја предиктивних модела на анализираном подручју (слика 7.2).



Слика 7.2. Одабране раскрснице за предикцију саобраћајних незгода на микро нивоу

### 7.2.1. Подаци о саобраћајним незгодама

У процесу развоја предиктивних модела, подаци о саобраћајним незгодама представљени су као фреквенција незгода у зони раскрснице. Подаци о незгодама анализирани су у трогодишњем периоду (2015-2017.), на подручју града Новог Сада. Први корак припреме података односи се на геопозиционирање уличне мреже и раскрсница са прецизним координатама у центру раскрснице. Други корак се односи на припрему и просторну селекцију саобраћајних незгода, а трећи и завршни корак на агрегацију саобраћајних незгода. На слици 7.3. приказан је поступак припреме података о саобраћајним незгодама, који у процесу предикције представљају зависну варијаблу.



Слика 7.3. Поступак припреме података саобраћајних незгода за развој модела.

Процес агрегирања саобраћајних незгода спроводи се креирањем бафера који је пречника 50 метара од центра раскрснице. Затим, применом просторних алата анализирају се просторни ентитети и агрегирају се у посебне ћелије које представљају једну јединицу посматрања. У овом делу посматран је укупан број саобраћајних незгода, незгоде у којима су учествовала моторна возила као и незгоде са пешацима и бициклистима. Детаљни подаци о саобраћајним незгодама преузети су из базе којом управља Агенција за безбедност саобраћаја. Свака незгода као догађај садржала је тачне координате, што је олакшало приступ агрегирању незгода. Процес припреме података спроведен је у софтверском пакету ArcGIS.

### 7.2.2. Подаци о независним променљивим

Независне променљиве у овом делу представљају обележја саобраћајних карактеристика и геометријских карактеристика раскрснице. Када су у питању саобраћајне карактеристике, обележја која су разматрана односе се на проток возила као и на начин регулисања раскрсница (табела 7.1). У истраживању обухваћен је просечан дневни саобраћај на главном (*Gp\_PDS*) и споредном прилазу (*Sp\_PDS*) раскрснице. Анализом саобраћајне сигнализације на раскрсници, прикупљени су следећи подаци:

- присуство сигнала за условно десно скретање на главном (*Gp\_Uslov*) и споредном (*Sp\_Uslov*) прилазу;
- присуство бројача за најаву промене пешачког сигнала на главном (*Gp\_brojaci*) и споредном (*Sp\_brojaci*) прилазу;
- присуство једносмерног саобраћаја на главном (*Gp\_Jednosm*) и споредном (*Sp\_Jednosm*) прилазу;
- присуство обележеног пешачког прелаза на главном (*Gp\_pesacki*) и споредном (*Sp\_pesacki*) прилазу;
- присуство обележеног бицикличког прелаза на главном (*Gp\_bicikli*) и споредном (*Sp\_bicikli*) прилазу.

Табела 7.1. Дескриптивна статистика независних променљивих

Променљива	Ознака у бази	Средња вредност	Стандардна девијација	Варијанса
<b>Саобраћајне карактеристике</b>				
x1	Gp_PDS	1278.87	801.24	641983.9
x2	Sp_PDS	510.38	559.47	313001.5
x3	Gp_Uslov	0.35	0.668	0.446
x4	Sp_Uslov	0.31	0.577	0.333
x5	Gp_brojaci	0.09	0.419	0.175
x6	Sp_brojaci	0.04	0.241	0.058
x7	Gp_Jednosm	0.07	0.323	0.105
x8	Sp_Jednosm	0.14	0.469	0.219
x9	Gp_pesacki	1.08	0.472	0.223
x10	Sp_pesacki	0.95	0.348	0.121
x11	Gp_bicikli	0.52	0.608	0.370
x12	Sp_bicikli	0.54	0.582	0.339
<b>Геометријске карактеристике</b>				
x13	Tip_raskrs	1.34	0.571	0.326
x14	Gp_BUS_sta	0.76	0.878	0.772
x15	Sp_BUS_sta	0.22	0.523	0.274
x16	Gp_ST_N	3.42	1.359	1.847
x17	Sp_ST_N	2.32	0.811	0.657
x18	St_levo	1.28	1.521	2.313
x19	St_desno	0.99	1.283	1.647
x20	St_pravo	1.83	2.086	4.353
x21	ST_BUS	0.31	0.758	0.574
x22	Gp_Raz_ost	0.50	0.575	0.331
x23	Sp_Raz_ost	0.26	0.484	0.234
x24	Gp_trotoar	1.00	0.366	0.134
x25	Sp_trotoar	0.96	0.403	0.162
x26	Gp_parking	0.68	0.792	0.627
x27	Sp_parking	0.61	0.753	0.568

У оквиру фактора који представљају обележја саобраћајне сигнализације на раскрсници

креиране су променљиве које су кодиране на следећи начин:

- **2** – означава присуство сигнала на једном прилазу;
- **1** – означава присуство сигнала на оба прилаза;
- **0** – указује да сигнализација није присутна.

У оквиру геометријских карактеристика моделовани су атрибути који прате обележја која се оnose на присуство изграђених објеката у зони раскрснице. Прва променљива у овој групи обележја односи се на тип раскрснице (*Tip\_raskrs*) која раздваја трокраке, четворокраке и кружне раскрснице. Затим, посматрана је фреквенција аутобуских стајалишта у зони раскрснице на главном (*Gp\_BUS\_sta*) и споредном (*Sp\_BUS\_sta*) прилазу. Број саобраћајних трака је посматран као укупан број трака пре зоне престојавања на главном (*Gp\_ST\_N*) и споредном (*Sp\_ST\_N*) прилазу. Поред тога, разматран је и укупан број саобраћајних трака на прилазу раскрснице. Ови фактори односе се на фреквенцију саобраћајних трака за лева скретања (*St\_levo*), саобраћајних трака за десна скретања (*St\_desno*), број саобраћајних трака за право (*St\_pravo*) као и број саобраћајних трака које су намењене за кретање јавног превоза у раскрсници (*Gp\_BUS\_tra*) и споредном (*Sp\_BUS\_tra*) прилазу.

Поред ових фактора посматрани су и геометријски елементи коловоза који су представљени као следеће променљиве:

- присуство разделног острва на главном (*Gp\_Raz\_ost*) и споредном (*Sp\_BUS\_sta*) прилазу;
- присуство тротоара на главном (*Gp\_trotoar*) и споредном прилазу (*Sp\_trotoar*);
- присуство паркинг простора у близини раскрснице на главном (*Gp\_parking*) и споредном (*Sp\_parking*) прилазу.

Геометријски елементи коловоза кодирани су у бази слично као и обележја светлосне сигнализације. Ови атрибути су приказани као:

- **2** – означава присуство посматраног геометријског елемента на једном прилазу;
- **1** – означава присуство геометријског елемента на оба главна прилаза или оба споредна прилаза;
- **0** – указује да геометријски елементи нису присутни.

### 7.3. РАЗВОЈ ПРЕДИКТИВНИХ ФУНКЦИЈА

У оквиру подпоглавља представљене су предиктивне функције саобраћајних незгода развијене разматрајући саобраћајне незгоде на раскрсницама. У оквиру предиктивних модела, зависне променљиве чине укупан број саобраћајних модела, саобраћајне незгоде у којима су учествовала моторна возила и саобраћајне незгоде са рањивим учесницима у саобраћају. У табели 7.2 приказана је дескриптивна статистика зависних променљивих које приказује основне параметре неопходне за даљи процес предикције.

Анализом структуре и природе података зависних променљивих, предикција саобраћајних незгода спроведена је помоћу пребројивих модела. Ови модели су специфични по томе јер посматрају целобројне вредности унутар зависне променљиве, што је и случај у овом истраживању. У циљу предикције саобраћајних незгода на раскрсницама коришћени су Поасонов и негативни биномни модел, који представљају традиционалне моделе у оквиру досадашњих истраживања (Miaou and Lum, 1993, Poch and Mannering, 1996; Karlaftis and Tarko, 1998, Pljakic et al., 2018c). Развој Поасоновог и негативно-биномног модела може се спровести на два начина. Први начин се односи на статистички приступ, где се параметри сматрају непознатим, и други приступ односи се на Бејзов приступ који унапред користи дефинисане вероватноће. У наредним

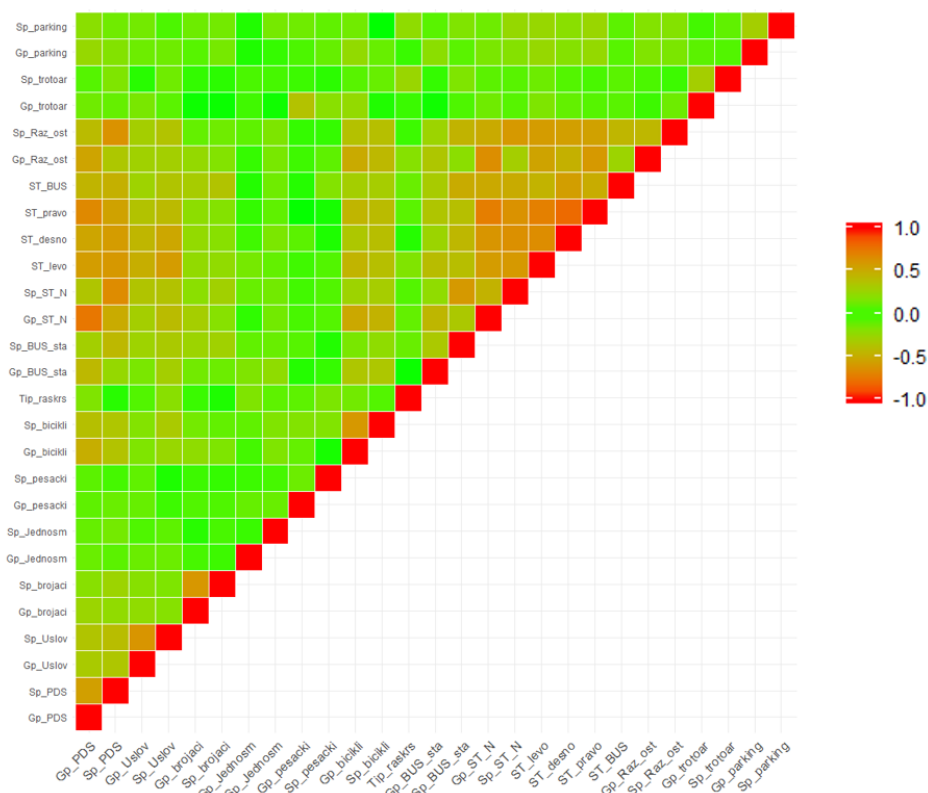
подпоглављима приказана су оба приступа у процесу предикције сообраћајних незгода за све посматране зависне променљиве.

**Табела 7.2.** Основни параметри зависних променљивих

Зависне поменљиве	Средња вредност	Стандардна девијација	Минимум	Максимум
Укупан број СН	8.69	8.521	0	57
СН са моторним возилима	6.76	6.527	0	35
СН са рањивим учесницима	1.94	2.748	0	22

### 7.3.1. Анализа мултиколинеарности

Анализа мултиколинеарности представља први корак у процесу предикције саобраћајних незгода посебна ако је реч о великом сету независних променљивих. У оквиру овог дела, посматрано је 27 променљивих, које су укључене у анализу. Циљ утврђивања мултиколинеарности јесте да се утврди претпоставка о изостављеним променљивим, које утичу на зависну променљиву, као и корелацији између утицајних фактора.



**Слика 7.4.** Визуелни приказ Пирсоновог коефицијента за независне променљиве

У оквиру анализе мултиколинеарности разматран је Пирсонов коефицијент који представља јачину везе између посматраних независних променљивих. Овај коефицијент се крећу у границама од -1 до 1, што указује да корелација преко 0,5 и мање од -0,5 представља мултиколинеарност између посматраног пара променљивих. У овом случају искључене су све променљиве како би резултати предикције били оптимални. На слици 7.4 приказан је графички приказ Пирсоновог коефицијента за сваки пар

променљивих, при чему се може видети однос између свих парова независних променљиви. На основу ових резултата из даљег процеса предикције искључене су независне променљиве које имају висок коефицијент мултиколинеарности. Искључене променљиве које моделују присуство бициклических објеката на главном прилазу, број саобраћајних трака намењених за лева скретања, број саобраћајних трака намењених за десна скретања, број саобраћајних трака за право, као и присуство разделног острва на споредном прилазу.

### 7.3.2. Предикција укупног броја незгода

Развој предиктивне функције укупног броја саобраћајних незгода спроведен је помоћу класичног статистичког приступа, као и применом симулација за тестирање параметара. У оба предиктивна процеса посматране су 22 независне променљиве, где су задржане променљиве које имају статистички значајан утицај на укупан број незгода. Утицај променљивих спроведен је помоћу Поасоновог и негативног биномног модела са класичним приступом процене параметара и применом Бејзових симулација.

#### 7.3.2.1. Процена параметара методом максималне веродостојности

У табели 7.3. приказана је комбинација саобраћајних и геометријских фактора који имају утицај на укупан број саобраћајних незгода. Према примењеним критеријумима за оцену модела утврђено је да негативни биномни модел има боље перформансе код овог сета података. Када су у питању утицајни фактори, модел је показао 10 фактора који доприносе укупном броју саобраћајних незгода.

Табела 7.3. Развој предиктивних модела класичним статистичким приступом

	Поасонов модел		НБ модел	
	Коеф.	СЕ	Коеф.	СЕ
<i>Саобраћајне карактеристике</i>				
Gp_PDS	0.0002***	0.00004	<b>0.0003***</b>	<b>0.00008</b>
Sp_PDS	0.0003***	0.00006	<b>0.0003**</b>	<b>0.00012</b>
Gp_Uslov	-0.1155**	0.04787		
Sp_Uslov	0.2327***	0.05147	<b>0.1937***</b>	<b>0.09516</b>
Gp_brojaci	0.1706***	0.04138		
Sp_Jednosm	-0.1553**	0.07108	<b>-0.1818*</b>	<b>0.10432</b>
Gp_pesacki	-0.1624**	0.07213		
Sp_pesacki	0.2758***	0.09334	<b>0.2975**</b>	<b>0.15057</b>
Sp_bicikli	-0.1206**	0.0591		
<i>Геометријске карактеристике</i>				
Sp_BUS_sta	0.1485***	0.04690	<b>0.1599*</b>	<b>0.09411</b>
Gp_Raz_ost	0.2588***	0.05742	<b>0.2559**</b>	<b>0.10127</b>
Sp_ST_N	0.2018***	0.03609	<b>0.1521*</b>	<b>0.08024</b>
Gp_trotoar	0.4243***	0.08198	<b>0.4083***</b>	<b>0.14455</b>
Gp_parking	-0.106***	0.03557	<b>-0.1345**</b>	<b>0.06075</b>
Sp_parking	0.0964***	0.03725		
<i>Константа</i>	0.5223***	0.15886	<b>0.4470***</b>	<b>0.27529</b>
<i>a</i>			<b>0.2254</b>	<b>0.1713</b>
<i>R-squared</i>	0.40		<b>0.1255</b>	
<i>AIC</i>	1302.6		<b>1162.7</b>	
<i>BIC</i>	1355.6		<b>1218.9</b>	
<i>Log-likelihood</i>	-635.298		<b>-564.325</b>	

Ознаке: Променљиве су значајне у 99% (\*\*\*) , 95% (\*\*) и 90% (\*) нивоа поузданости

Када су у питању мере изложености, проток возила на главном ( $\beta = 0,0003$ ;  $p < 0,01$ ) и споредном ( $\beta = 0,0003$ ;  $p < 0,05$ ) прилазу показао је позитиван утицај на укупан број саобраћајних незгода. Поред ових променљивих, позитиван утицај такође је утврђен код раскрсница код којих је присутан сигнал за условна десна скретања ( $\beta = 0,1937$ ;  $p < 0,01$ ) као и обележен пешачки прелаз ( $\beta = 0,2975$ ;  $p < 0,05$ ). Поред ових фактора, присуство једносмерног саобраћаја на споредним прилазима има негативан утицај на анализиран број незгода ( $\beta = -0,1818$ ;  $p < 0,1$ ). Када су у питању геометријске карактеристике, позитиван утицај на саобраћајне незгоде имају променљиве које се односе на број аутобуских стајалишта на споредним прилазима ( $\beta = 0,1599$ ;  $p < 0,1$ ), присуство разделног острва на главном прилазу ( $\beta = 0,2559$ ;  $p < 0,05$ ), број саобраћајних трака пре зоне престројавања у споредном прилазу ( $\beta = 0,1521$ ;  $p < 0,1$ ), као и присуство тротоара на главном прилазу ( $\beta = 0,4083$ ;  $p < 0,01$ ). Негативан утицај уочен је код присуства паркинга на главном прилазу ( $\beta = -0,1345$ ;  $p < 0,05$ ). У табели 7.3. приказани су фактори који имају позитиван и негативан утицај на укупан број саобраћајних незгода на раскрсницама на анализираном подручју.

На основу анализираних фактора креирана је предиктивна функција која указује на однос између зависне променљиве и статистички значајних независних променљиви. Предиктивна функција за укупан број саобраћајних незгода ( $PUSN$ ) може се изразити као:

$$PUSN = \exp(0.4083 + 0.0003 * G_{p_{PDS}} + 0.0003 * S_{p_{PDS}} + 0.1973 * S_{p_{uslov}} - 0.1818 * S_{p_{jednosm}} + 0.2975 * S_{p_{pesacki}} + 0.1599 * S_{p_{BUS}} + 0.2559 * G_{p_{raz\ ost}} + 0.1521 * S_{p_{st}} + 0.4083 * G_{p_{trotuar}} - 0.1345 * S_{p_{parking}}) \quad (7.1)$$



**Слика 7.5.** Посматран и предвиђен укупан број саобраћајних незгода на раскрсницама помоћу методе максималне веродостојности.

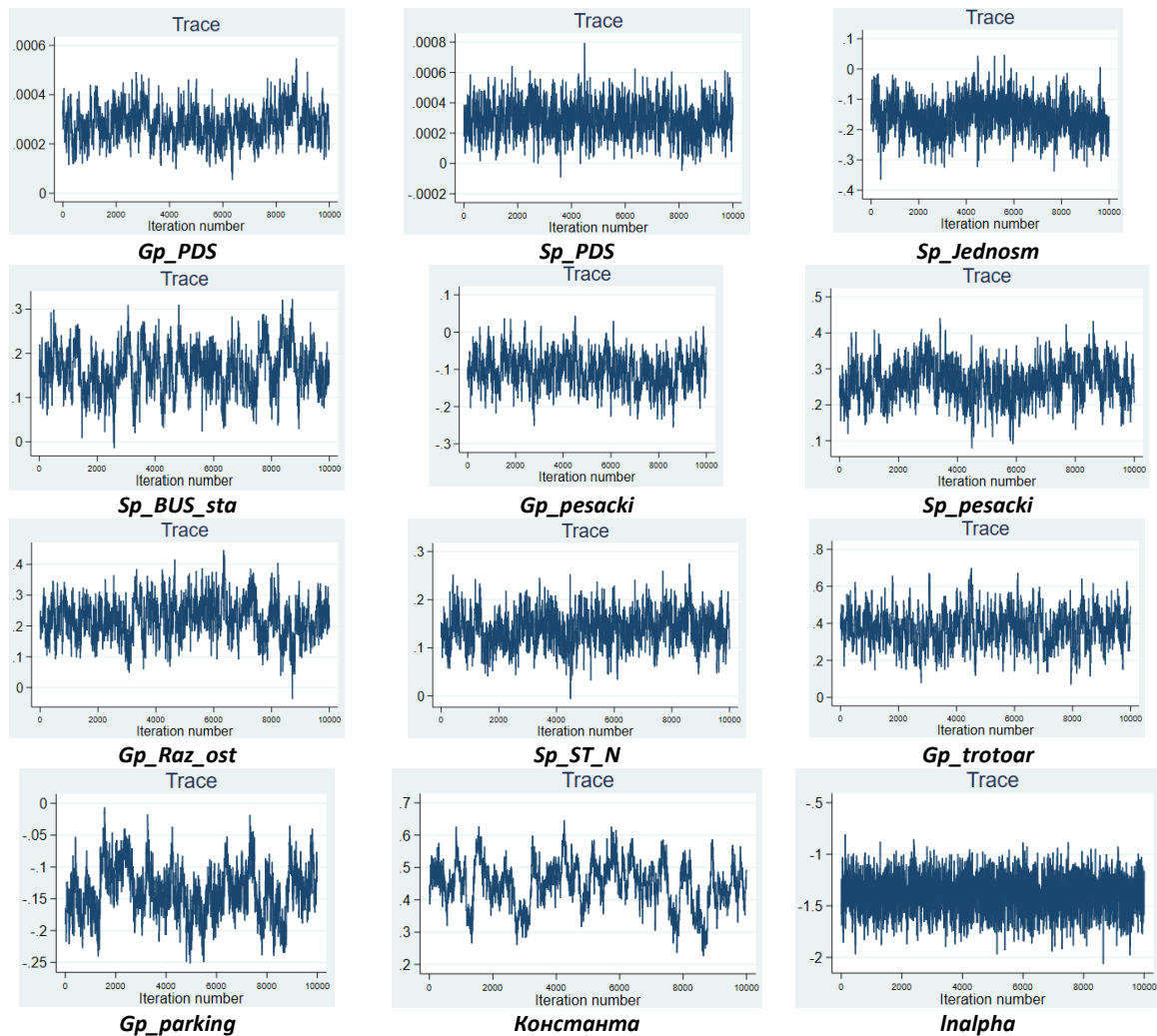
Применом дате функције добија се предвиђен број незгода на посматраним раскрсницама. На слици 7.5. може се видети однос између посматраног и предвиђеног укупног броја саобраћајних незгода. Односи ових вредности су приказани за сваку посматрану раскрсницу у зависности од агрегираног броја незгода на анализираном подручју.

### 7.3.2.2.Процена параметара Бејзовим симулацијама

Поред класичног статистичког приступа, укупан број саобраћајних незгода је предвиђен бејзовим симулацијама укључујући Поасонов и негативни-биномни вишестепени модел. У табели 7.4 представљени су резултати предикције саобраћајних незгода. У оквиру ових модела укључене су 22 независне променљиве, исто као и код



претходно развијених модела. Резултати модела су различити од претходних због коришћења унапред дефинисаних вероватноћа. Анализом девијантног информационог критеријума (DIC) који се користи за МСМС (енг. Markov Chain Monte-Carlo) симулације, негативни биномни вишестепени модел је показао боље предиктивне способности од Поасоновог вишестепеног модела. Процена коефицијената је спроведена генерисањем великог броја узорака из условне дистрибуције употребом МСМС алгоритама, који је обухватао 10.000 итерација за сваки регресиони параметар.



Слика 7.6. Симулациони приказ процене параметара

У оквиру развоја модела задржане су само статистички значајне променљиве које обухватају саобраћајне и геометријске карактеристике. Независне променљиве процењене су у 95 % интервала поверења. На слици 7.6 приказане су статистички значајне променљиве које су приказане кроз симулационе вредности параметара у односу на број итерација који је коришћен за њихову процену.

Позитиван утицај на укупан број саобраћајних незгода забележен је код мера изложености које представљају проток возила на главном ( $\mu = 0.0003$ ) и споредном прилазу ( $\mu = 0.0003$ ). Поред мера изложености, позитиван утицај је присутан код: присуства пешачког прелаза на споредном прилазу ( $\mu = 0.2363$ ), фреквенције саобраћајних трака намењених за кретање возила јавног превоза на споредном прилазу ( $\mu = 0.1586$ ), присуства разделног острва на главном прилазу ( $\mu = 0.2296$ ), фреквенције саобраћајних трака на споредном прилазу ( $\mu = 0.1464$ ) као и код присуства тротоара на

главном прилазу ( $\mu = 0.3787$ ).

Негативан утицај на укупан број саобраћајних незгода евидентиран је код присуства једносмерног саобраћаја у споредним прилазима ( $\mu = -0.1766$ ), присуства обележеног пешачког прелаза на главном прилазу ( $\mu = -0.0967$ ), као и присуство паркираних возила у близини главног прилаза ( $\mu = -0.1290$ ).

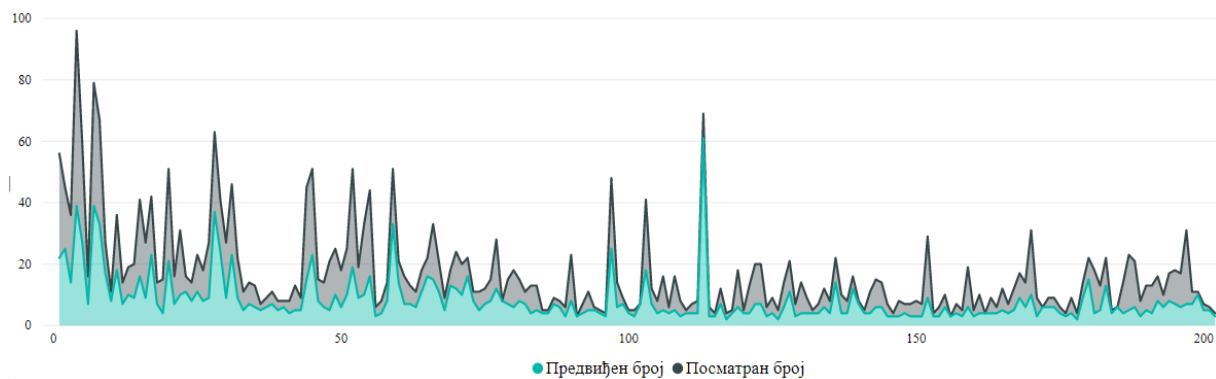
**Табела 7.4.** Предикција саобраћајних незгода помоћу Бејзових симулација

	Бејзов-Поасонов модел			Бејзов-НБ модел		
	Средња вредност	Интервал поверења (95%)		Средња вредност	Интервал поверења (95%)	
<i>Саобраћајне карактеристике</i>						
Gp_PDS	0.0002	0.0001	0.0003	<b>0.0003</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0004</b>
Sp_PDS	0.0002	0.0001	0.0003	<b>0.0003</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0005</b>
Gp_brojaci	0.1663	0.1158	0.2205			
Sp_Jednosm	-0.1499	-0.2659	-0.0504	<b>-0.1766</b>	<b>-0.2745</b>	<b>-0.0770</b>
Gp_pesacki	-0.1398	-0.1946	-0.0831	<b>-0.0967</b>	<b>-0.1692</b>	<b>-0.0301</b>
Sp_pesacki	0.2324	0.1197	0.3399	<b>0.2363</b>	<b>0.1226</b>	<b>0.3639</b>
<i>Геометријске карактеристике</i>						
Sp_BUS_sta	0.1833	0.1457	0.2275	<b>0.1586</b>	<b>0.0631</b>	<b>0.2458</b>
Gp_Raz_ost	0.2364	0.1907	0.2862	<b>0.2296</b>	<b>0.1372</b>	<b>0.3184</b>
Sp_ST_N	0.2003	0.1429	0.2528	<b>0.1464</b>	<b>0.0465</b>	<b>0.2459</b>
Gp_trotoar	0.3860	0.3237	0.4641	<b>0.3787</b>	<b>0.1318</b>	<b>0.6196</b>
Sp_trotoar	0.0818	0.0093	0.1445			
Gp_parking	-0.1239	-0.1795	-0.0686	<b>-0.1290</b>	<b>-0.2386</b>	<b>-0.0140</b>
Sp_parking	0.1078	0.0573	0.1593			
<i>Константа</i>	0.4874	0.3611	0.6276	<b>0.4589</b>	<b>0.2316</b>	<b>0.7061</b>
<i>lnalpha</i>				<b>-1.386</b>	<b>-1.7176</b>	<b>-1.0701</b>
<i>MCMC iterations</i>	12.500			<b>12.500</b>		
<i>MCMC sample size</i>	10.000			<b>10.000</b>		
<i>Acceptance rate</i>	0.166			<b>0.335</b>		
<i>DIC</i>	1304.96			<b>1150.75</b>		
<i>Log-likelihood</i>	-802.683			<b>-717.382</b>		

Анализом значајних параметара, предиктивна функција вишестепеног негативног биномног модела може се изразити као:

$$\begin{aligned}
 PUSN = \exp( & 0.4589 + 0.0003 * Gp_{PDS} + 0.0003 * Sp_{PDS} - 0.1766 * Sp_{jednosm} - 0.0967 \\
 & * Gp_{pesacki} + 0.2363 * Sp_{pesacki} + 0.1586 * Sp_{BUS} + 0.2296 * Gp_{raz_ost} \\
 & + 0.1464 * Sp_{st} + 0.3787 * Gp_{trotoar} - 0.1290 * Sp_{parking} )
 \end{aligned} \quad (7.2)$$

На слици 7.7. приказан је посматран број саобраћајних незгода на анализираном подручју као и предвиђен број незгода на основу Бејзових симулација. Посматран и предвиђен број саобраћајних незгода дат је за сваку анализирану раскрсницу. На основу резултата може се закључити да је потребно укључити додатне променљиве како би разлика између посматраног и предвиђеног броја била што мања.



Слика 7.7. Посматран и предвиђен укупан број саобраћајних незгода, применом Бејзових симулација

### 7.3.3. Предикција незгода у којима су учествовала моторна возила

Развој предиктивних модела за саобраћајне незгоде у којима су учествовала моторна возила спроведен је на исти начин као и код укупног броја незгода. У овом делу представљени су резултати процене параметара применом методе максималне веродостојности као и Бејзовим симулацијама.

#### 7.3.3.1. Процена параметара методом максималне веродостојности

Када је у питању основни статистички приступ, методом максималне веродостојности развијени су Поасонов и негативни биномни модел, где је негативни биномни модел показао боље предиктивне перформансе. У оквиру овог модела посматране су све независне променљиве, док коначан модел садржи комбинацију статистички значајних променљиви. Скуп значајних променљиви чини 8 фактора који моделују саобраћајне и геометријске карактеристике.

У табели 7.5 приказане су променљиве са позитивним и негативним утицајем на фреквенцију незгода у којима су учествовала моторна возила. Мере изложености представља проток возила на главном ( $\beta = 0,0002$ ;  $p < 0,1$ ) и споредном прилазу ( $\beta = 0,0003$ ;  $p < 0,05$ ) који имају позитиван утицај на анализиране незгоде, као и код укупног броја незгода. Поред мера изложености, позитиван утицај показале су и променљиве које моделују: присуство сигнала за условна десна скретања на споредном прилазу ( $\beta = 0,1675$ ;  $p < 0,05$ ), присуство обележеног пешачког прелаза на споредном прилазу ( $\beta = 0,2748$ ;  $p < 0,1$ ), број саобраћајних трака намењених за кретање возила јавног превоза ( $\beta = 0,2355$ ;  $p < 0,05$ ), присуство разделног острва на главном прилазу ( $\beta = 0,2087$ ;  $p < 0,05$ ), као и присуство тротоара на главном прилазу ( $\beta = 0,4270$ ;  $p < 0,01$ ). Негативан утицај на незгоде са моторним возилима приказао је фактор који се односи на присуство паркираних возила у близини раскрснице на главном прилазу ( $\beta = -0.1998$ ;  $p < 0,01$ ). У табели 7.5. приказани су статистички значајни фактори који утичу на незгоде у којима су учествовала само моторна возила.

Развој предиктивне функције укључује све статистички значајне факторе и може се представити преко следеће формуле:

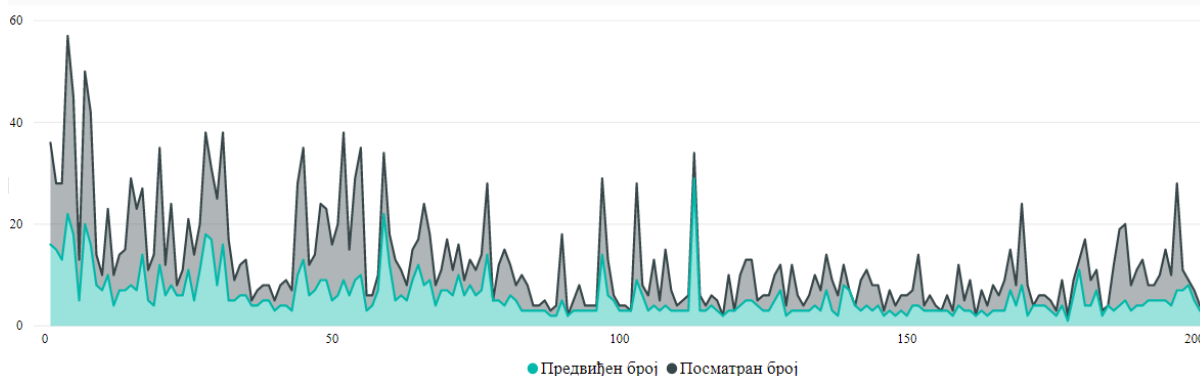
$$PMVSN = \exp(0.4069 + 0.0002 * G_{p_{PDS}} + 0.0003 * S_{p_{PDS}} + 0.1675 * S_{p_{uslov}} + 0.2748 * S_{p_{pesacki}} + 0.2355 * S_{p_{BUS}} + 0.2087 * G_{p_{raz\ ost}} + 0.4270 * G_{p_{trotoar}} - 0.1998 * G_{p_{parking}}) \quad (7.3)$$

Табела 7.5. Променљиве које имају утицај на незгоде са моторним возилима

	Поасонов модел		НБ модел	
	Коеф.	СЕ	Коеф.	СЕ
<i>Саобраћајне карактеристике</i>				
Gp_PDS	0.0001***	0.0001	<b>0.0002*</b>	<b>0.0001</b>
Sp_PDS	0.0002***	0.0001	<b>0.0003**</b>	<b>0.0001</b>
Sp_Uslov	0.1797***	0.0481	<b>0.1675**</b>	<b>0.0860</b>
Gp_brojaci	0.1431***	0.0475		
Gp_pesacki	-0.1788**	0.0793		
Sp_pesacki	0.2828***	0.1017	<b>0.2748*</b>	<b>0.1543</b>
<i>Геометријске карактеристике</i>				
Gp_BUS_sta	-0.0762**	0.0382		
Sp_BUS_sta	0.2048***	0.0561	<b>0.2355**</b>	<b>0.1053</b>
Gp_Raz_ost	0.2336***	0.0615	<b>0.2087**</b>	<b>0.1032</b>
Sp_ST_N	0.1571***	0.0407		
Gp_trotoar	0.4435***	0.0916	<b>0.4270***</b>	<b>0.1522</b>
Gp_parking	-0.1581***	0.0405	<b>-0.1998***</b>	<b>0.0658</b>
Sp_parking	0.0984**	0.0415		
<i>Константа</i>	0.4283**	0.1783	<b>0.4069*</b>	<b>0.2929</b>
<i>α</i>			<b>0.2448</b>	<b>0.0444</b>
<i>R-squared</i>	0.34		<b>0.115</b>	
<i>AIC</i>	1199.1		<b>1087.8</b>	
<i>BIC</i>	1245.4		<b>1137.4</b>	
<i>Log-likelihood</i>	-585.563		<b>-528.91</b>	

Ознаке: Променљиве су значајне у 99% (\*\*\*) , 95% (\*\*) и 90% (\*) нивоа поузданости

Применом дате функције са вредностима независних променљиви долази се до предвиђеног броја незгода у којима су учествовала моторна возила. На слици 7.8. приказан је однос између посматраног броја негода и предвиђеног броја незгода методом максималне веродостојности.

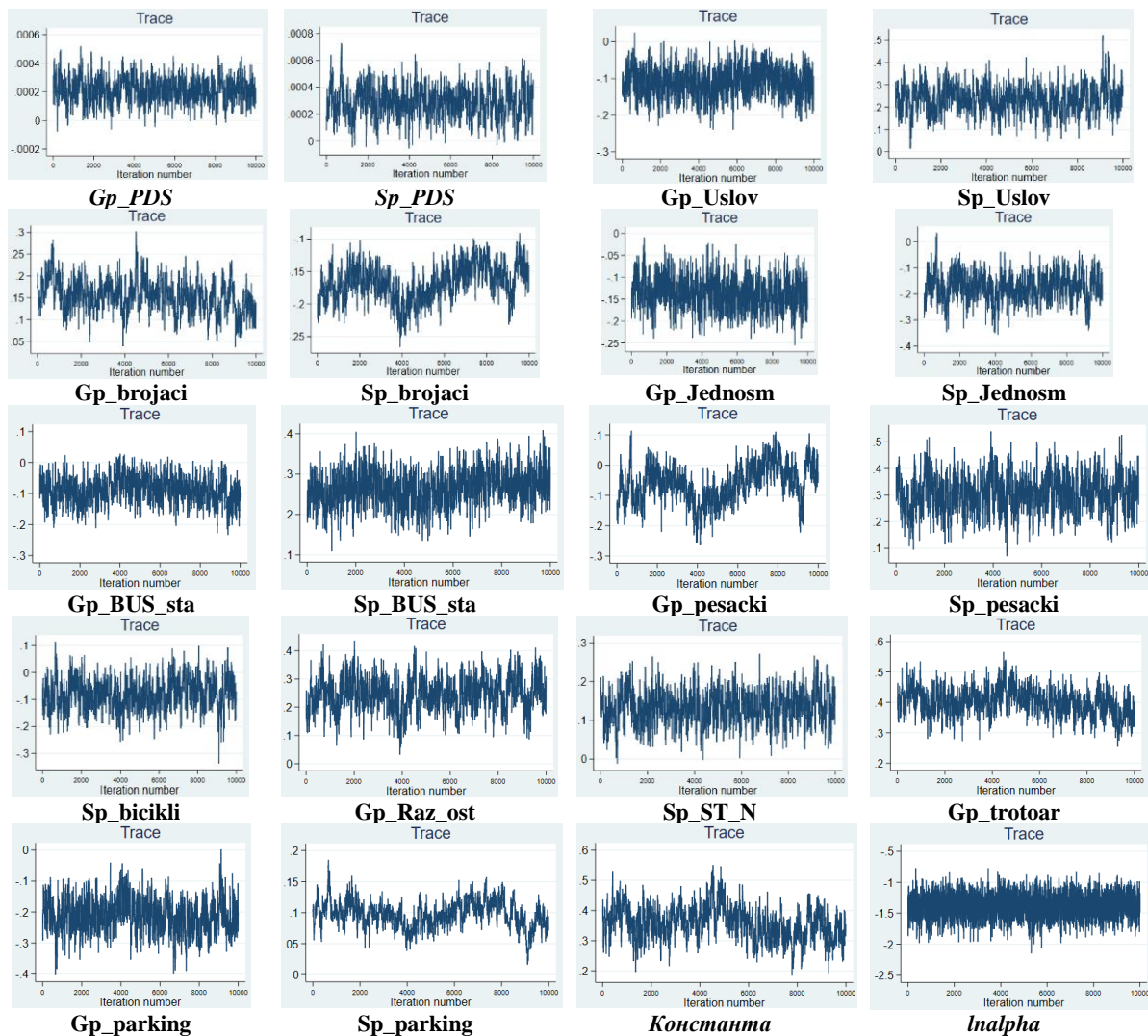


Слика 7.8. Посматран и предвиђен број саобраћајних незгода у којима су учествовала моторна возила

### 7.3.3.2.Процена параметара Бејзовим симулацијама

Поред основних традиционалних модела, за посматрану зависну променљиву развијени су и вишестепени Поасонов модел и вишестепени негативни-биномни модел применом Бејзових симулација. Процена коефицијената је спроведена генерисањем великог броја узорака из условне дистрибуције употребом МСМС алгоритама који је

обухватао 10.000 итерација за сваки регресиони параметар. На основу девијантног информационог критеријума (DIC), потврђено је да вишеструки негативно-биномни модел има најбоље предиктивне способности у односу на други модел. У оквиру овог модела утврђено је 16 статистички значајних променљиви, које утичу на фреквенцију незгода са моторним возилима. Независне променљиве процењене су у 95 % интервала поверења. На слици 7.9 приказане су статистички значајне променљиве приказане кроз симулационе вредности параметара у односу на број итерација, који је коришћен за њихову процену.



Слика 7.9. Симулациони приказ процене параметара

У оквиру утицајних променљиви, променљиве које имају позитиван утицај на фреквенцију незгода односе се на проток возила на главном прилазу ( $\mu = 0,0002$ ) и проток возила на споредном прилазу ( $\mu = 0,0003$ ), које уједно представљају мере изложености. Поред ових променљиви, позитиван утицај је процењен и код раскрсница на којима је уочено: присуство левих скретања на споредном прилазу ( $\mu = 0,2370$ ), присуство бројача за промену пешачке фазе ( $\mu = 0,1530$ ), присуство обележеног пешачког прелаза ( $\mu = 0,3037$ ), присуство аутобуских стајалишта на споредном прилазу ( $\mu = 0,2662$ ), присуство разделног острва на главном прилазу ( $\mu = 0,2456$ ), број трака на споредном прилазу ( $\mu = 0,1324$ ), присуство тротоара на главном прилазу ( $\mu = 0,4011$ ), као и присуство паркираних возила на споредном прилазу ( $\mu = 0,0967$ ).

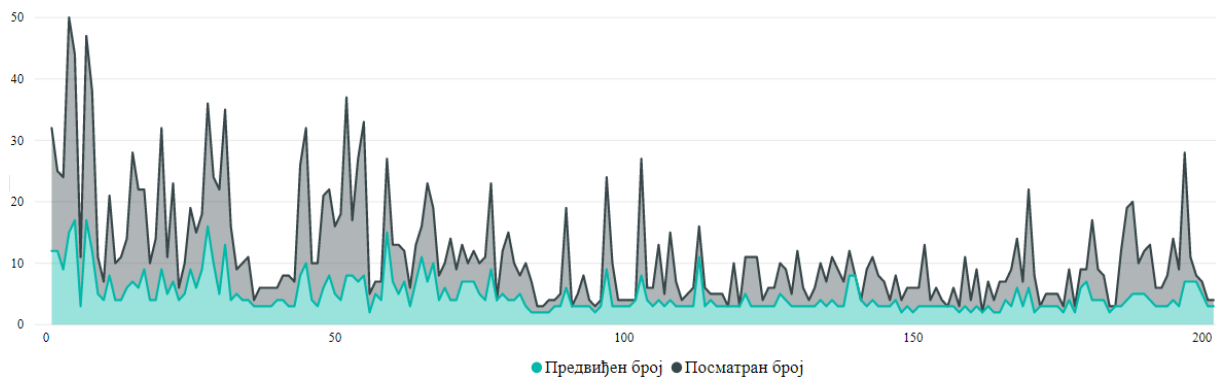
Негативан утицај на незгоде са моторним возилима процењен је код: присуства сигнала за условно десно скретање на главном прилазу ( $\mu = -0,1105$ ), присуство бројача за промену пешачке фазе на споредном прилазу ( $\mu = -0,1676$ ), присуство једносмерног саобраћаја на споредном прилазу ( $\mu = -0,1733$ ), присуство аутобуских стајалишта на главном прилазу ( $\mu = -0,0900$ ), као и код присуства паркинг простора у близини главног прилаза ( $\mu = -0,2097$ ). Сви процењени регресиони коефицијенти приказани су у табели 7.6.

**Табела 7.6.** Предикција незгода са моторним возилима помоћу Бејзових симулација

	Бејзов-Поасонов модел			Бејзов-НБ модел		
	Средња вредност	Интервал поверења (95%)		Средња вредност	Интервал поверења (95%)	
<i>Саобраћајне карактеристике</i>						
Gp_PDS	0.0002	0.0001	0.0002	<b>0.0002</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0004</b>
Sp_PDS	0.0002	0.0001	0.0003	<b>0.0003</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0005</b>
Gp_Uslov	-0.1138	-0.1704	-0.0563	<b>-0.1105</b>	<b>-0.1822</b>	<b>-0.0340</b>
Sp_Uslov	0.2548	0.2154	0.2966	<b>0.2370</b>	<b>0.1180</b>	<b>0.3548</b>
Gp_brojaci	0.2022	0.1498	0.2494	<b>0.1530</b>	<b>0.0819</b>	<b>0.2295</b>
Sp_brojaci	-0.1357	-0.1767	-0.0971	<b>-0.1676</b>	<b>-0.2228</b>	<b>-0.1190</b>
Gp_Jednosm	-0.1260	-0.1676	-0.0863	<b>-0.1358</b>	<b>-0.2064</b>	<b>-0.0664</b>
Sp_Jednosm	-0.1481	-0.1675	-0.1301	<b>-0.1733</b>	<b>-0.2847</b>	<b>-0.0758</b>
Gp_pesacki	-0.1925	-0.2350	-0.1481			
Sp_pesacki	0.3332	0.2682	0.4028	<b>0.3037</b>	<b>0.1748</b>	<b>0.4424</b>
Sp_bicikli	-0.0987	-0.1353	-0.0670			
<i>Геометријске карактеристике</i>						
Gp_BUS_sta	-0.0776	-0.0927	-0.0613	<b>-0.0900</b>	<b>-0.1690</b>	<b>-0.0095</b>
Sp_BUS_sta	0.2000	0.1630	0.2375	<b>0.2662</b>	<b>0.1857</b>	<b>0.3490</b>
Gp_Raz_ost	0.2440	0.1994	0.2916	<b>0.2456</b>	<b>0.1244</b>	<b>0.3575</b>
Sp_ST_N	0.1746	0.1577	0.1913	<b>0.1324</b>	<b>0.0517</b>	<b>0.2131</b>
Gp_trotoar	0.4618	0.4343	0.4939	<b>0.4011</b>	<b>0.3169</b>	<b>0.4887</b>
Gp_parking	-0.1714	-0.2092	-0.1348	<b>-0.2097</b>	<b>-0.3125</b>	<b>-0.1036</b>
Sp_parking	0.1020	0.0587	0.1459	<b>0.0967</b>	<b>0.0561</b>	<b>0.1376</b>
<i>Константа</i>	0.4035	0.3551	0.4485	<b>0.3573</b>	<b>0.2555</b>	<b>0.4755</b>
<i>lnalpha</i>				<b>-1.3793</b>	<b>-1.7426</b>	<b>-1.0335</b>
<i>MCMC iterations</i>	12.500			<b>12.500</b>		
<i>MCMC sample size</i>	10.000			<b>10.000</b>		
<i>Acceptance rate</i>	0.2691			<b>0.369</b>		
<i>DIC</i>	1170.96			<b>1069.56</b>		
<i>Log-likelihood</i>	-808.147			<b>-748.02</b>		

Узимајући у обзир предвиђене коефицијенте, функција пердикције саобраћајних незгода са моторним возилима може се изразити као:

$$\begin{aligned}
 PMVSN = & \exp(0.3573 + 0.0002 * Gp_{PDS} + 0.0003 * Sp_{PDS} - 0.1105 * \\
 & Gp_{Uslov} + 0.2370 * Sp_{Uslov} + 0.1530 * Gp_{brojaci} - 0.1676 * Sp_{brojaci} - 0.1358 * \\
 & Gp_{Jednosm} - 0.1733 * Sp_{Jednosm} + 0.3037 * Sp_{pesacki} - 0.09 * Gp_{BUS} + 0.2662 * \\
 & Sp_{BUS} + 0.2456 * Gp_{Raz_ost} + 0.1324 * Sp_{ST} + 0.4011 * Gp_{trotoar} - 0.2097 * \\
 & Gp_{parking} + 0.0967 * Sp_{parking}
 \end{aligned} \quad (7.4)$$



**Слика 7.10.** Посматран и предвиђен број незгода у којима су учествовала само моторна возила применом Бејзових симулација

На слици 7.10. може се видети посматран број незгода на анализираним раскрсницама као и предвиђен број незгода на основу процене коефицијената Бејзовим симулацијама. Предвиђен број незгода се добија на основу предиктивне функције и података о независним променљивима које су прикупљене за сваку раскрсницу посебно.

### 7.3.4. Предикција незгода са рањивим учесницима у саобраћају

Развој предиктивних функција за саобраћајне незгоде са рањивим учесницима, спроведен је на исти начин као и код претходних зависних променљиви. У наредним подпоглављима приказани су резултати процене регресионих коефицијената методом максималне веродостојности и Бејзовим симулацијама.

#### 7.3.4.1. Процена параметара методом максималне веродостојности

У овом делу приказани су резултати предикције незгода са рањивим учесницима, методом максималне веродостојности. У овом делу развијени су Поасонов и негативни биномни модел, где негативни биномни модел показује најбоље предиктивне перформансе. У оквиру овог модела, процењено је 7 независних варијабли које имају утицај на незгоде са рањивим учесницима на раскрсницама (табела 7.7).

У табели 7.7. приказани су статистички значајни фактори који доприносе настанку незгода са рањивим учесницима. У оквиру модела, све променљиве имају позитиван утицај на фреквенцију незгода. Мету изложености у овом делу представља проток возила на главном прилазу ( $\beta = 0,0005$ ;  $p < 0,01$ ) са позитивним утицајем на број незгода. Поред тога, саобраћајне карактеристике које имају позитиван утицај на број незгода односе се на присуство бројача за промену пешачке фазе на споредном прилазу ( $\beta = 0,4525$ ;  $p < 0,05$ ) као и присуство једносмерног саобраћаја на главном прилазу ( $\beta = 0,3719$ ;  $p < 0,05$ ). Када су у питању геометријске карактеристике, позитиван утицај на фреквенцију незгода имају променљиве које се односе на: присуство аутобуских стајалишта на главном прилазу ( $\beta = 0,2089$ ;  $p < 0,05$ ), присуство разделног острва на главном прилазу ( $\beta = 0,2640$ ;  $p < 0,1$ ), број саобраћајних трака на споредном прилазу ( $\beta = 0,2874$ ;  $p < 0,01$ ) као и присуство тротоара на споредном прилазу ( $\beta = 0,4127$ ;  $p < 0,05$ ). У односу на Поасонов модел, променљиве које немају статистичку значајност за овај тип незгода, односе се на проток возила на споредном прилазу, присуство аутобуских стајалишта на споредном прилазу као и присуство паркинга на главном прилазу.

Табела 7.7. Променљиве које имају утицај на незгоде са рањивим учесницима у саобраћају

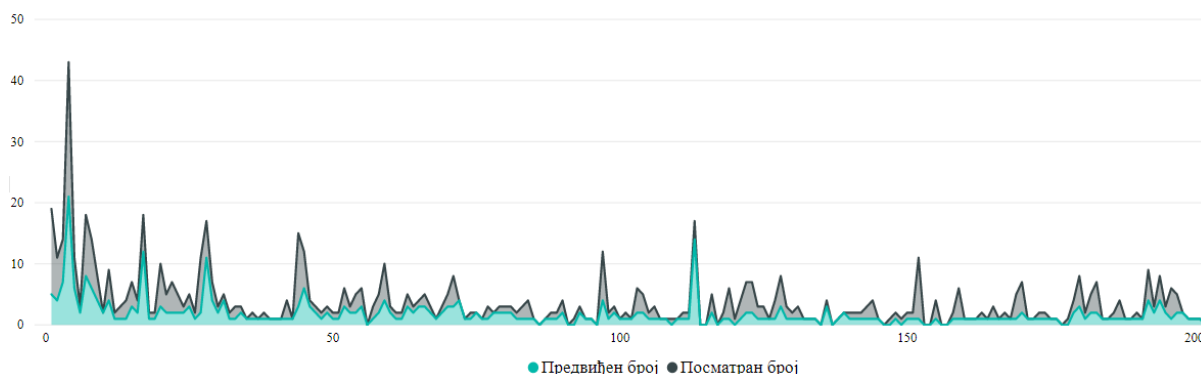
	Поасонов модел		НБ модел	
	Коеф.	СЕ	Коеф.	СЕ
<b>Саобраћајне карактеристике</b>				
Gp_PDS	0.0003***	0.0001	<b>0.0005***</b>	<b>0.0001</b>
Sp_PDS	0.0002*	0.0001		
Sp_brojaci	0.5197***	0.1188	<b>0.4525**</b>	<b>0.2067</b>
Gp_Jednosm	0.4356***	0.1482	<b>0.3719**</b>	<b>0.1863</b>
<b>Геометријске карактеристике</b>				
Gp_BUS_sta	0.2237***	0.0686	<b>0.2089**</b>	<b>0.0863</b>
Gp_Raz_ost	0.2933**	0.1161	<b>0.2640*</b>	<b>0.1445</b>
Sp_ST_N	0.3273***	0.0626	<b>0.2874***</b>	<b>0.1029</b>
ST_BUS	-0.1243*	0.0722		
Sp_trotoar	0.4445***	0.1476	<b>0.4127**</b>	<b>0.1880</b>
Gp_parking	0.1399*	0.0731		
<b>Константа</b>	<b>-1.7767***</b>	<b>0.2531</b>	<b>-1.8412***</b>	<b>0.3367</b>
<b><math>\alpha</math></b>			<b>0.2497</b>	<b>0.0815</b>
<b>R-squared</b>	0.31		<b>0.16</b>	
<b>AIC</b>	681.34		<b>663.16</b>	
<b>BIC</b>	717.73		<b>702.86</b>	
<b>Log-likelihood</b>	-329.671		<b>-319.58</b>	

Ознаке: Променљиве су значајне у 99% (\*\*\*), 95% (\*\*) и 90% (\*) нивоа поузданости

Развој предиктивне функције (*PRUSN*) укључује све статистички значајне факторе и може се представити преко следеће формуле:

$$PRUSN = \exp(-1.8412 + 0.0005 * Gp_{PDS} + 0.4525 * Sp_{brojaci} + 0.3719 * Gp_{jednosm} + 0.2089 * Gp_{bus} + 0.2640 * Gp_{raz_ost} + 0.2874 * Sp_{st} + 0.4127 * Sp_{trotoar}) \quad (7.5)$$

Применом предиктивне функције добија се предвиђен број незгода за све раскрснице појединачно. Вредности из развијене функције представљају обележја значајних променљиви у моделу.



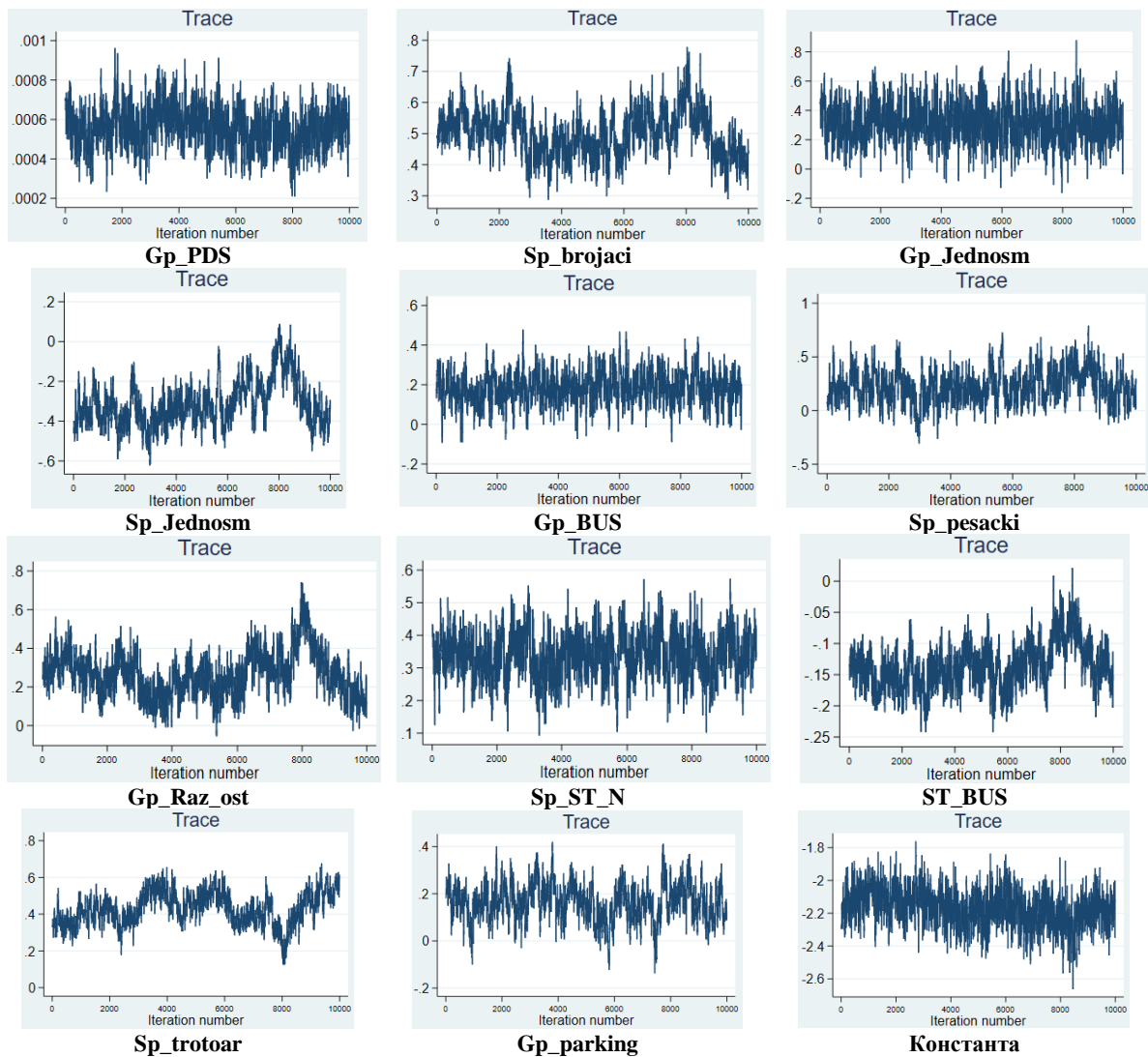
Слика 7.11. Посматран и предвиђен број саобраћајних незгода са рањивим учесницима на раскрсницама

На слици 7.11. приказан је посматран и предвиђен број незгода који је развијен методом максималне веродостојности. Са слике се може видети колико одабране независне променљиве описују варијабилност посматране зависне променљиве.



### 7.3.4.2.Процена параметара Бејзовим симулацијама

Поред методе максималне веродостојности, за посматрану зависну променљиву развијени су и вишестепени Поасонов модел и вишестепени негативни-биномни модел применом Бејзових симулација. За потребе процене коефицијената спроведено је генерисање великог узорка из условне дистрибуције за сваки параметар. Оценом медела помоћу девијантног информационог критеријума (DIC), закључено је да вишеструки негативни биномни модел има најбоље предиктивне перформансе као и код осталих зависних променљиви. Анализом независних променљивих, негативни биномни модел је развијен обухватајући 10 статистички значајних променљиви. На слици 7.12 приказан је процес симулације и процена параметра за сваку значајну променљиву у 95 % интервала поверења.



Слика 7.12. Визуелизација симулације и процене статистички значајних параметара

Утицајни фактори на саобраћајне незгоде са рањивим учесницима се разликују у односу на претходне типове незгода. Променљива, која обухвата меру изложености, односи се на променљиву која моделује проток возила са позитивним утицајем на незгоде са рањивим учесницима ( $\mu = 0,0006$ ). Поред мере изложености, позитиван утицај

на посматране незгоде имају променљиве које се односе на: присуство бројача за промену пешачке фазе ( $\mu = 0,4996$ ), присуство једносмерног саобраћаја на главном прилазу ( $\mu = 0,3156$ ), присуство аутобуских стајалишта на главном прилазу ( $\mu = 0,1845$ ), присуство разделног острва на главном прилазу ( $\mu = 0,2678$ ), број саобраћајних трака на споредном прилазу ( $\mu = 0,3392$ ), присуство тротоара на споредном прилазу ( $\mu = 0,4292$ ), као и присуство паркинг простора у близини главног прилаза ( $\mu = 0,1636$ ). Поред ових променљивих, негативни утицај на незгоде са рањивим учесницима имају: присуство једносмерног саобраћаја на споредним прилазу ( $\mu = -0,3117$ ), као и присуство аутобуских стајалишта на споредном прилазу ( $\mu = -0,1364$ ).

Однос између утицајних променљиви и зависне променљиве може се моделовати у предиктивну функцију која представља репрезентован број незгода са рањивим учесницима у 95 % интервала поверења (*PRUSN*).

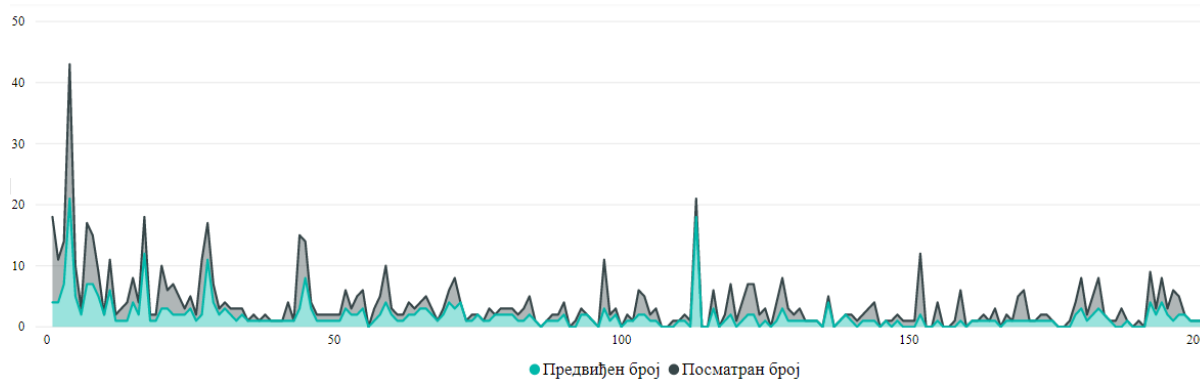
**Табела 7.8.** Променљиве које имају утицај на незгоде са рањивим учесницима у саобраћају проценом Бејзових симулација.

	Бејзов-Поасонов модел			Бејзов-НБ модел		
	Средња вредност	Интервал поверења (95%)		Средња вредност	Интервал поверења (95%)	
<i>Саобраћајне карактеристике</i>						
Gp_PDS	0.0004	0.0003	0.0005	<b>0.0006</b>	<b>0.0004</b>	<b>0.0008</b>
Sp_brojaci	0.5756	0.4027	0.7473	<b>0.4996</b>	<b>0.3603</b>	<b>0.6556</b>
Gp_Jednosm	0.3461	0.1922	0.5042	<b>0.3156</b>	<b>0.0571</b>	<b>0.5903</b>
Sp_Jednosm	-0.3338	-0.5350	-0.1512	<b>-0.3117</b>	<b>-0.4984</b>	<b>-0.0449</b>
Sp_pesacki	0.1459	0.0020	0.2768			
<i>Геометријске карактеристике</i>						
Gp_BUS_sta	0.2000	0.0849	0.3258	<b>0.1845</b>	<b>0.0224</b>	<b>0.3448</b>
Gp_Raz_ost	0.2625	0.0845	0.4186	<b>0.2678</b>	<b>0.0640</b>	<b>0.5164</b>
Sp_ST_N	0.3753	0.2775	0.4761	<b>0.3392</b>	<b>0.2037</b>	<b>0.4737</b>
ST_BUS	-0.1691	-0.2750	-0.0597	<b>-0.1364</b>	<b>-0.2018</b>	<b>-0.0567</b>
Sp_trotoar	0.4464	0.2624	0.6612	<b>0.4292</b>	<b>0.2605</b>	<b>0.5944</b>
Gp_parking	0.1745	0.1154	0.2372	<b>0.1636</b>	<b>0.0048</b>	<b>0.3223</b>
Константа	-2.0106	-2.2208	-1.8191	<b>-2.1699</b>	<b>-2.3875</b>	<b>-1.9572</b>
<i>lnalpha</i>				<b>-1.3445</b>	<b>-2.0409</b>	<b>-0.7565</b>
<i>MCMC iterations</i>	12.500			<b>12.500</b>		
<i>MCMC sample size</i>	10.000			<b>10.000</b>		
<i>Acceptance rate</i>	0.2139			<b>0.3725</b>		
<i>DIC</i>	670.52			<b>652.85</b>		
<i>Log-likelihood</i>	-439.53			<b>-428.61</b>		

На основу значајних фактора који су приказани у табели 7.8, предиктивна функција може се изразити као:

$$\begin{aligned}
 PRUSN = \exp(-2.1699 + 0.0006 * Gp_{PDS} + 0.4996 * Sp_{brojaci} + 0.3156 * Gp_{jednosm} \\
 - 0.3117 * Sp_{jednosm} + 0.1845 * Gp_{bus} + 0.2678 * Gp_{raz_ost} + 0.3392 * Sp_{st} \\
 - 0.1364 * St_{BUS} + 0.4292 * Sp_{trotoar} + 0.1636 * Gp_{parking}) \quad (7.6)
 \end{aligned}$$

Анализом предиктивне функције и заменом вредности независних променљиви за сваку посматрану раскрсницу добијен је предвиђен број незгода (слика 7.13.). На слици се могу видети посматран број незгода на свим раскрсницама, као и предвиђен број незгода методом Бејзових симулација за сваку посматрану јединицу.



Слика 7.13. Посматран и предвиђен број незгода методом Бејзових симулација

#### 7.4. ДИСКУСИЈА

У оквиру овог дела приказани су резултати предикције саобраћајних незгода на раскрсницама у урбаним срединама. У циљу добијања поузданих резултата предикције, у овом делу су тестиране две независне методе за процену регресионих коефицијената. Методе које су коришћене за процену регресионих коефицијената односе се на методе максималне веродостојности и на Бејзове симулације. Ове две методе примењене су за све посматране зависне, где су развијени Поасонов и негативни биномни модел. Развојем модела, на основу поменутих метода за процену коефицијената, утврђено је да негативни биномни модел има најбоље предиктивне способности код свих посматраних зависних променљиви.

Зависне променљиве у овом делу представљају саобраћајне незгоде које су се догодиле на раскрсницама у урбаном делу града Новог Сада током три године (2015-2017.). Фреквенција саобраћајних незгода подељена је на три посматране променљиве коју чине: укупан број незгода, незгоде у којима су учествовала само моторна возила и незгоде са рањивим учесницима у саобраћају. Поред зависних променљиви, у процесу развоја модела су укључене саобраћајне и геометријске карактеристике које представљају независне променљиве.

Развојем модела утврђени су фактори који доприносе настанку саобраћајних незгода. Укључивањем различитих зависних променљиви, утврђени су сетови значајних променљиви које утичу на фреквенцију посматраних незгода. У оквиру сета значајних променљиви, мере изложености се истичу у свим моделима са позитивним утицајем на фреквенцију незгода. Остале променљиве, које садрже обележја саобраћајних и геометријских карактеристика, имају различите утицаје на посматран тип незгода. Детаљана дискусија свих значајних променљиви приказана је у наредном поглављу.

## **8. ДИСКУСИЈА**

## 8. ДИСКУСИЈА

Праћење и анализа саобраћајних незгода често представља показатељ стања безбедности саобраћаја на одређеним просторним јединицама. Како би се јасно дефинисало стање безбедности саобраћаја потребно је сагледати улазне параметре који често доводе до саобраћајних незгода посматрајући различите просторне нивое. Просторни ентитети анализе саобраћајних незгода могу се поделити у три категорије: макро, мезо и микро ниво. Све ове категорије имају своје специфичности у анализи утицајних фактора као и у процесу предикције саобраћајних незгода, па их је потребно испитати у циљу дефинисања постојећег стања безбедности саобраћаја.

Последњих година, анализа саобраћајних незгода у урбаним срединама има све већи значај због утицаја великог броја фактора који карактеришу урбане средине. Разматрајући овај проблем, у оквиру дисертације идентификован је утицај фактора са различитих просторних нивоа у циљу предлога мера како би се број саобраћајних незгода свео на минимум. Утврђивањем утицајних фактора развијене су предиктивне функције које представљају везу са посматраном фреквенцијом саобраћајних незгода.

У циљу сагледавања ширег спектра проблема урбаних средина, развијене су предиктивне функције за саобраћајне зоне у урбаним срединама. У оквиру резултата идентификовани су статистички значајни фактори као и предиктивни модели са најбољим предиктивним перформансама. Поред макро нивоа, развијени су предиктивни модели на микро нивоу у циљу оцене нивоа безбедности саобраћаја са највишим степеном тачности и са више детаља у односу на макро ниво. Одабране микро јединице су раскрснице које се карактеришу као најсложенији део путне мреже у односу на остале просторне ентитете. Предикција саобраћајних незгода на макро и микро нивоу односи се на укупан број незгода, незгоде у којима су учествовала само моторна возила као и незгоде са рањивим учесницима. Дискусија значајних фактора који доприносе настанку незгода дата је у следећим подпоглављима.

### 8.1. ПРЕДИКЦИЈА НЕЗГОДА НА МАКРО НИВОУ

У циљу предикције саобраћајних незгода на макро нивоу анализиран је нови сет доступних података како би се испитао утицај демографских карактеристика, саобраћајних карактеристика, карактеристика пута и карактеристика окружења на фреквенцију саобраћајних незгода у оквиру саобраћајних зона. Нови сет података обухвата скуп независних фактора и три зависне променљиве које чине укупан број незгода, број незгода у којима су учествовала само моторна возила као и број незгода са рањивим учесницима у саобраћају. Сет података прикупљен је на подручју града Новог Сада, где су сва обележја агрегирана на посматране саобраћајне зоне.

Утицај независних фактора испитан је развијањем три модела који се односе на класичан просторни модел (OLS), просторни лаг модел (SLM) и просторни модел грешака (SEM), где су дискутоване променљиве које су значајне у моделу који показује најбоље перформансе за различит тип незгода. Код укупног броја незгода и незгода са учешћем моторних возила најбоље перформансе има SLM модел, док код незгода са рањивим учесницима истиче се SEM модел. Код свих типова незгода на посматраном подручју идентификована је просторна аутокорелација између саобраћајних зона, што је очекивано и у складу са досадашњим истраживањима која су спроведена на подручју градова Хилспору и Пинеласу (Siddiqui et al., 2012; Abdel-Aty et al., 2013), Шангају

(Wang et al., 2016; Wang et al., 2019), Хонг Конгу (Guo et al., 2017), Сеулу (Rhee et al., 2016), Сиетлу (Chen, 2015) и Суџоу (Jia et al., 2018).

Демографске карактеристике су укључиле 6 независних променљивих: густину популације, проценат мушког становништва, проценат женског становништва, проценат становништва млађег од 15 година, проценат становништва старијег од 65 година као и површину саобраћајне зоне. На посматраном подручју густина популације има статистички негативан утицај на незгоде са рањивим учесницима. То значи да у зонама где је велика густина становништва долази до мањег броја незгода у којима су учествовали рањиви учесници у саобраћају. Уз то, велика густина становника у зонама производи повећање мобилности становништва услед чега се јавља ефекат „безбедност у броју“ (Safety-In-Number) који је доказан у многим урбаним подручјима (Leden, 2002; Jacobsen, 2003; Elvik et al., 2013; Elvik and Bjørnskau, 2017; Tasic et al., 2017; Xie et al., 2018; Lee et al., 2019). Поред густине становништва, разматран је проценат становништва према полу и старосним групама. Резултати су открили да у зонама на којима је забележен већи проценат мушког становништва долази до повећања укупног броја незгода као и броја незгода са моторним возилима. Ово се може објаснити чињеницом да су мушкарци више изложени у саобраћају као возачи моторних возила од жена (Santamariña-Rubio et al., 2014). Поред тога, утицај мушког пола може оправдати чињеница да проценат женског пола у зонама има негативан утицај на број незгода са моторним возилима. Када су у питању старосне групе, проценат популације која је млађа од 15 година нема утицај на испитане зависне варијабле, овај резултат је у складу са претходним истраживањем које је спроведено у Хилспору и Пинеласу (Abdel-Aty et al., 2013). Међутим, проценат популације старије од 65 година по зонама је показао негативан утицај на број незгода у којима су учествовала само моторна возила. Ови резултати могу се повезати са чињеницом да становништво старије од 65 година мање узима учешће у незгодама које се карактеришу губитком контроле или незгодом услед прекорачења брзине, ризичног претицања или вожње под утицајем алкохола (Hakamies-Blomqvist et al., 1993). Уз то, старија популација је свеснија ризика који су у вези са прекорачењем брзине и вожњом под утицајем алкохола и вољнији су да избегну оваква ризична понашања, која често доводе до незгода са моторним возилима. Такође, старија популација због психо-физичких ограничења ређе учествује у саобраћају у својству возача (Koppel et al., 2019). Слични резултати су забележени и на подручју централне Флориде (Lee et al., 2015). Последње посматрано обележје демографских карактеристика је површина саобраћајне зоне, која је забележила негативан утицај на укупан број незгода и незгоде са моторним возилима. На основу резултата може се рећи да је површина зоне повезана са густином становништва, тако да се у централним деловима града налазе зоне мање површине, али и повећан број укупног броја незгода и број незгода са моторним возилима. Ово није случај када се посматра број незгода са рањивим учесницима, где површина нема статистички значајан утицај. На основу анализираних демографских карактеристика потребно је применити одговарајуће програме и активности који су усмерени на едукацији становништва посебно када се ради о мушкарцима на посматраном подручју.

Фактори који обухватају саобраћајне карактеристике су дневни проток возила по километру, број аутобуских стајалишта, број паркинг простора са наплатом и временским ограничењем и број паркинг места са наплатом без временског ограничења. Дневни проток возила по километру представља меру изложености, што резултира позитивну везу са све три групе незгода које су обухваћене у истраживању. У свим моделима идентификована је ова променљива као статистички значајна, што говори о томе да, ако се повећа проток возила на саобраћајницама у оквиру једне зоне долази до повећања броја незгода. Многа истраживања до сада су посматрала проток возила по

миљама путовања, где је такође забележен позитиван утицај на незгоде ([Abdel-Aty et al., 2013](#); [Wang and Kockelman, 2013](#); [Xie et al., 2019](#)). У наставку, број аутобуских стајалишта је показао позитиван утицај на незгоде са рањивим учесницима. Утицај овог фактора може се аргументовати чињеницом да присуство стајалишта производи већу мобилност становништва, посебно пешака, где често долази до незгода са пешацима. Поред аутобуских стајалишта у истраживању је анализиран и број паркинг простора за возила на којима се спроводи наплата у оквиру две зоне. Зоне су подељене на црвену зону, која обухвата број паркинг места са наплатом и временским ограничењем од 2 часа, као и плаву зону која обухвата број паркинг места са наплатом без временских ограничења. Број паркинг места са наплатом и без временских ограничења није статистички значајан за посматране незгоде, међутим број паркинг места са наплатом и временским ограничењем од 2 часа је показао статистичку значајност код свих зависних варијабли. Број паркинг места са наплатом и временским ограничењем од 2 часа има позитиван утицај на све посматране зависне променљиве. Овај резултат може се оправдати на два различита начина, први се односи на чињеницу да на паркинг местима са ограниченим временом коришћења често долази до промене возила што производи изненадне ситуације како за возаче моторних возила тако и за рањиве категорије учесника у саобраћају. Други приступ се огледа у томе да су паркинг зоне са ограниченим временом паркирања често дистрибуиране у централним деловима града где се налазе центри атракције па често долази до сложених саобраћајних услова. Ови резултати су веома корисни за саобраћајне службе на подручју града Новог Сада у циљу планирања и креирања ефикаснијих инфраструктурних објеката намењених за јавни превоз путника и паркинг сервис.

Карактеристике пута обухватају 7 променљивих које се односе на дужину уличне мреже, дужину објеката за кретање пешака и бициклиста као и број раскрсница. Укупна дужина саобраћајница на посматраном подручју има позитиван утицај на укупан број незгода као и број незгода са моторним возилима. Поред тога, ова променљива може се посматрати као мера изложености пошто је у директној вези са фреквенцијом незгода. Приказани резултати су конзистентни са претходним истраживањем где је идентификован утицај дужине саобраћајница на незгоде у оквиру саобраћајних зона ([Cai et al., 2017a](#)). Поред укупне дужине саобраћајница, дужина бициклистичких објеката такође има позитиван утицај на број незгода са рањивим учесницима, што је конзистентно са другим истраживањима ([Lusk et al., 2013](#), [Wei and Lovegrove, 2012](#)). Ово се може оправдати чињеницом да бициклистичке стазе поред коловоза повећавају број потенцијалних конфликта што за узврат доводи до повећања вероватноће за настанак незгода са бициклистима. Поред тога, позитиван утицај на број незгода са рањивим учесницима у саобраћају показале су раскрснице, тачније број сигналисаних раскрсница и број петокраких раскрсница. Број сигналисаних раскрсница има статистички значајан утицај код свих зависних варијабли што потврђује чињеницу појаве касних одлука возача због дилема зоне што проузрокује већи број незгода ([Wu, 2014](#)). Поред тога, број петокраких раскрсница значајно отежава кретање рањивих корисника пута, посебно када је у питању прелазак коловоза што захтева много веће напоре него када су у питању трокраке и четворокраке раскрснице. Међутим, у овом истраживању број трокраких и четворокраких раскрсница нема статистички значајан утицај на незгоде на посматраном подручју.

У оквиру карактеристика окружења, у раду су анализирани стамбене јединице. густина објеката као и број образовних установа. Број стамбених јединица на саобраћајним зонама има позитиван утицај на све зависне променљиве које су посматране у истраживању. Ово се може објаснити чињеницом да је на посматраном подручју густина стамбених јединица већа у централним деловима него на периферији

што је уобичајно и за фреквенцију саобраћајних незгода. У централним деловима јавља се већа мобилност становништва, што указује да су све категорије учесника у саобраћају изложене саобраћајним незгодама. На појединим подручјима није доказан утицај стамбених јединица на укупан број саобраћајних незгода (Abdel-Aty et al., 2013; Rhee et al., 2016), међутим када су у питању рањиви учесници у саобраћају, поједина истраживања су потврдила утицај стамбених јединица на фреквенцију незгода са пешацима (Siddiqui et al., 2012) и бициклистима (Siddiqui et al., 2012; Chen, 2015). Поред тога, густина објеката и положај саобраћајне зоне у односу на гравитационо подручје града нису статистички значајни што је у складу са претходним студијама (Siddiqui et al., 2012; Pulugurtha et al., 2013; Cai et al., 2016). Објекти који су намењени за предшколско, основно и средње образовање становништва показали су негативан утицај на укупан број незгода, као и број незгода са моторним возилима. Ово сугерише на чињеницу да су у већини зона школа постављене адекватне мере за смањење брзине возила где возачи имају тенденцију да прилагоде брзину кретања. Поред тога, на деоницама у близини школских капија често се налазе родитељи са ученицима што возаче чине опрезнијим. Слични резултати су забележени у граду Суцоу у Кини (Jia et al., 2018). Овај фактор није показао статистички значајан утицај на број незгода са рањивим учесницима на анализираном подручју, што указује на даље правце истраживања.

## 8.2. ПРЕДИКЦИЈА НЕЗГОДА НА МИКРО НИВОУ

Предикција саобраћајних незгода на микро нивоу омогућава прецизну идентификацију потенцијалних опасности, које могу да проузрокују саобраћајне незгоде. У циљу утврђивања утицајних фактора као и развој предиктивних функција са микро нивоа, посматране су раскрснице као најсложенији делови уличне мреже. У истраживању посматране су раскрснице на урбаном подручју града Новог Сада. За потребе овог истраживања посматране су саобраћајне незгоде које су се догодиле на раскрсницама у трогодишњем периоду (2015-2017.). Саобраћајне незгоде су агрегиране и подељене на укупан број саобраћајних незгода, број незгода у којима су учествовала само моторна возила као и број незгода са рањивим учесницима у саобраћају.

Процес развоја предиктивних функција на раскрсницама разматра фреквенцију саобраћајних незгода као зависну променљиву и утицајне факторе који су груписани око саобраћајних и геометријских фактора као независних променљиви. Саобраћајне карактеристике на раскрсницама представљају проток возила као начин регулисања раскрснице. Поред тога, геометријске карактеристике односе се на присуство објеката намењених за кретања свих учесника у саобраћају. Прикупљене саобраћајне и геометријске карактеристике су агрегиране за сваку посматрану раскрсницу на основу чега су развијене предиктивне функције.

Досадашњи развој предиктивних функција за раскрснице спроведен је помоћу Поасоновог модела (Guo et al., 2010; Pulugurtha et al., 2011) и негативног биномног модела (Chin and Quddus, 2003; Lee et al., 2017; Wang et al., 2017). У оквиру истраживања такође су примењена ова два модела где је процена коефицијената спроведена помоћу две независне методе. Методе које су примењене односе се на методу максималне веродостојности и Бејзових симулација, на основу којих су процењени утицајни фактори и креирана предиктивна функција. Према посматраном сету података као и информационам критеријумима, негативни биномни модел има најбоље предиктивне перформансе код свих зависних променљиви. Независне променљиве које имају статистички значајан утицај у негативном биномном моделу дискутоване су у наредном



делу.

Саобраћајне карактеристике садрже мере изложености које моделују проток возила као и присуство хоризонталне и вертикалне сигнализације. Када је у питању проток возила на главном прилазу, ова променљива представља меру изложености у свим моделима и има позитиван утицај на све посматране променљиве. Ови резултати су у складу са претходним истраживањима (Lee et al., 2017). Када је у питању проток возила на споредним прилазима, ова променљива има позитиван утицај на укупан број незгода и на незгоде са моторним возилима, међутим, када су у питању незгоде са рањивим учесницима ова променљива нема значајног утицаја. Слични резултати су забележени на подручју Флориде (Wang et al., 2017), где је истакнуто ограничење које се односи на неопходне податке које репрезентује кретање пешака и бициклиста. Поред мера изложености, присуство сигнала за десна скретања на главном и споредном прилазу има утицај на незгоде у којима су учествовала само мотрона возила. Променљива која моделује присуство сигнала на главном прилазу има негативан утицај на број незгода, што је у складу са истраживањем које је спроведено на раскрсницама у Вашингтону (Poch and Mannering, 1996). Када је у питању присуство сигнала на споредном прилазу доказан је позитиван утицај на фреквенцију незгода што оправдава чињеницу да возачи често занемаре кретање других учесника у саобраћају при кретању кроз раскрсницу. Поред сигнала за десна скретања, у истраживању је посматрано присуство бројача за промену пешачке фазе на главном и споредном прилазу. Резултати су показали да бројачи на главном прилазу имају позитиван утицај на незгоде са моторним возилима, међутим бројачи на споредном прилазу имају позитиван утицај на незгоде са рањивим учесницима. Ови резултати се могу оправдати чињеницом да моторна возила често мењају брзину кретања у близини пешачких прелаза у циљу уступања првенства пролаза пешака што доводи до незгода са моторним возилима. Присуство једносмерног саобраћаја на главном прилазу има негативан утицај на незгоде са моторним возила, док на незгоде са рањивим учесницима овај утицај је позитиван. Ови резултати су у складу са претходним истраживањима (Gomes et al., 2013), које може оправдати чињеница да код једносмерних прилаза има мање конфликтних тачака што се одражава и на смањење саобраћајних незгода. Присуство пешачког прелаза на споредним прилазима има позитиван утицај на укупан број незгода као и на незгоде са моторним возилима. Ову појаву карактеришу скретања са главног прилаза раскрснице, где се возачи заустављају да пропусте пешаке, међутим други возачи који се крећу у колони то не уче на време. Овај фактор је испитан и на другим подручјима, међутим није утврђен статистички утицај на број незгода (Torbic et al., 2010). Присуство бициклистичких прелаза нема значајног утицаја на саобраћајне незгоде на анализираним раскрсницама.

Поред саобраћајних карактеристика у оквиру овог истраживања посматране су геометријске карактеристике које садрже обележја типа раскрснице, присуства аутобуских стајалишта, број саобраћајних трака, присуство разделних острва, присуство изграђених тротоара као и присуство паркинг места у близини раскрснице. У досадашњим истраживањима тип раскрснице има позитиван утицај на број незгода на раскрсницама (Wang et al., 2017), међутим у овом истраживању нема статистички значајног утицаја. Присуство аутобуских стајалишта на главном прилазу раскрснице има позитиван утицај на незгоде са рањивим учесницима што је доказано и у другим студијама (Miranda Moreno et al., 2011; Pulugurtha et al., 2011). Ово оправдава чињеницу да на се аутобуским стајалиштима често јавља повећана мобилност рањивих учесника у саобраћају. Међутим, када је у питању присуство аутобуских стајалишта на споредним прилазима истакнут је позитиван утицај на укупан број незгода као у претходним истраживањима (Torbic et al., 2010). Број саобраћајних трака на споредном прилазу има позитиван утицај на укупан број незгода као и на незгоде са рањивим учесницима. Овај

фактор директно је повезан са дужином пешачких прелаза што има ефекта на време преласка коловоза (Poch and Mannering, 1996). Присуство разделних острва има позитиван утицај на све зависне променљиве. Ови резултати нису конзистентни са истраживањим која су посматрана на другим просторима (Strauss et al., 2014; Xie et al., 2014). Присуство изграђених тротоара указује на укрштање пешачких токова са моторним саобраћајем. Уколико се у близини раскрсница налазе изграђени тротоари долази до повећања укупног броја незгода, негода са моторним возилима као и незгода са рањивим учесницима. Ови резултати се могу оправдати чињеницом да у близини раскрсница, где постоје изграђени тротоари, долази до повећања мобилности пешака што често доводи до саобраћајних незгода. Када је у питању присуство паркинг места у близини раскрснице, ова променљива има негативан утицај на укупан број саобраћајних незгода, као и на незгоде са моторним возилима. Ови резултати могу се тумачити да уколико се паркинг места налазе близу раскрснице долази до смањења брзине возила што указује да су возачи пажљивији приликом својих маневара у раскрсници. Досадашње студије нису утврдиле овај утицај, иако су разматрале ову променљиву (Torbic et al., 2010).

Сагледавањем свих утицајних фактора за креирање предиктивних функција, може се закључити да утицај различитих обележја раскрсница на саобраћајне незгоде зависи од посматраног подручја. Карактеристике посматраног подручја се разликују у великој мери према одређеним стандардима и условима живота. Методологија која је примењена у овом делу обухвата два приступа процене коефицијената који истичу сличне сетове статистичких значајних коефицијената.

## **9. ЗАКЉУЧАК**

## 9. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

### 9.1. УВОДНЕ НАПОМЕНЕ

Урбане средине карактерише специфична веза различитих обележја која се може довести у однос са саобраћајним незгодама. У оквиру дисертације развијени су предиктивни модели у циљу препознавања утицајних обележја урбане средине на саобраћајне незгоде, као и одабир математичког модела који апроксимира најбољу предиктивну функцију између обележја урбаних средина и саобраћајних незгода. Прикупљање обележја и карактеристика урбаних средина може се спровести са различитих просторних нивоа. У оквиру истраживања разматрани су макро и микро ниво. Примена макроскопског приступа односи се на шири спектар приказа утицајних карактеристика на основу којих се могу предложити дугорочне мере које се односе на спровођење политике безбедности саобраћаја, организацију контроле и регулисања саобраћаја, доношењу правних норми, као и спровођење одређених образовних и инжењерских мера. Са друге стране, микроскопски приступ односи се на одређене објекте на путевима у циљу оцене нивоа безбедности саобраћаја са највишим степеном тачности.

### 9.2. КЉУЧНИ РЕЗУЛТАТИ

У циљу спровођења предикције саобраћајних незгода на макро нивоу посматране су саобраћајне зоне на подручју Новог Сада. Поред макро нивоа, процес предикције саобраћајних незгода спроведен је и на микро нивоу где су посматране раскрснице као просторни ентитети. За потребе реализације истраживања прикупљени су подаци о карактеристикама саобраћајних зона и раскрсница у просторним алатима који омогућавају синхронизацију примарних и секундарних извора података. Након анализе прикупљених података потврђене су полазне хипотезе где су истакнути кључни резултати:

- Предикција саобраћајних незгода спроведена је за укупан број незгода, број незгода у којима су учествовала само моторна возила и број незгода са рањивим учесницима.
- Предиктивни модели се могу применити за предикцију саобраћајних незгода у зависности од посматраних просторних ентитета. Посматрајући саобраћајне зоне, предиктивни модели који уважавају просторну аутокорељацију имају боље предиктивне перформансе у поређењу са класичним предиктивним моделима.
- Предикција саобраћајних незгода на раскрсницама може се спровести помоћу модела који уважавају целобројне вредности у зависној променљиви.
- Фактори који утичу на саобраћајне незгоде у саобраћајним зонама односе се на демографске карактеристике, саобраћајне карактеристике, карактеристике пута и карактеристике окружење.
  - Демографске карактеристике које имају утицај на незгоде у саобраћајним зонама су: густина становништва, површина саобраћајне зоне, проценат мушке популације као и проценат становништва преко 65 година.
  - Карактеристике саобраћаја које утичу на агрегиран број саобраћајних

- незгода су: возило-километар путовања, присуство паркинг простора са ограниченим временом задржавања као и присуство аутобуских стајалишта.
- Карактеристике пута које су повезане са фреквенцијом незгода су: дужина уличне мреже, дужина бицикличких стаза, број 5-краких раскрсница као број сигналисаних раскрсница.
  - Карактеристике околине садрже следеће утицајне факторе: број стамбених објеката и број школа.
  - Фактори који утичу на саобраћајне незгоде које су се догодиле на раскрсницама груписани су у саобраћајне и геометријске карактеристике.
    - Саобраћајне карактеристике које имају утицај на саобраћајне незгоде на раскрсницама су: просечан дневни саобраћај, присуство светлосног сигнала за условна скретања, присуство бројача за пешаке, присуство једносмерних прилаза као и присуство пешачких и бицикличких прелаза. Сви наведени фактори показали су значајан утицај на главном и споредном прилазу.
    - Геометријске карактеристике које утичу на незгоде су: тип раскрснице, број саобраћајних трака по прилазу, присуство разделног острва, присуство тротоара као и присуство паркинг простора у близини раскрснице.

Резултати истраживања помажу субјектима који се баве саобраћајним инжењерством, планирањем простора и доношењем одлука везаних за припрему одређених активности неопходних за побољшање безбедности саобраћаја на анализираном подручју. Предлог мера које је потребно имплементирати односи се на едукацију свих категорија учесника у саобраћају, као и на рехабилитацију и реконструкцију путне инфраструктуре и путних објеката. Са друге стране, инжењерске мере треба усмерити на побољшање инфраструктуре, где први приступ треба да буде усмерен на изградњу изолованих пешачких и бицикличких објеката, а други приступ на опремање и заштиту саобраћајних објеката који су намењени за јавни превоз и регулисање паркинг сервиса. Поред тога, резултати истраживања могу се искористити за примену одређених метода за одабир најопаснијих зона и раскрсница на анализираном подручју.

### 9.3. БУДУЋИ ПРАВЦИ ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру истраживања представљен је преглед досадашњих истраживања са критичким освртом на резултате на другим подручјима. Поред тога, приказана су истраживања која су спроведена на подручју Новог Сада у циљу развоја предиктивних модела. На основу претходних истраживања као и на основу резултата дисертације, будућа истраживања треба усмерити на:

- примену софистициранијих предиктивних модела који пружају боље предиктивне перформансе;
- разматрање других просторних јединица са макро и микро нивоа као и њихову компарацију;
- уважавање других фактора који доприносе настанку саобраћајних незгода.

## **10. ЛИТЕРАТУРА**

## 10. ЛИТЕРАТУРА

- AAA Foundation for Traffic Safety, (2016). Prevalence of Self-Reported Aggressive Driving Behavior: United States, 2014. AAA Foundation for Traffic Safety.
- AASHTO. (2014). Highway Safety Manual (HSM) with supplement.
- Abdel-Aty, M. A., & Radwan, A. E. (2000). Modeling traffic accident occurrence and involvement. *Accident Analysis & Prevention*, 32(5), 633-642.
- Abdel-Aty, M. A., Lee, J., Eluru, N., Cai, Q., Al Amili, S., & Alarifi, S. (2016). Enhancing and generalizing the two-level screening approach incorporating the Highway Safety Manual (HSM) methods, phase 2.
- Abdel-Aty, M., Lee, J., Siddiqui, C., & Choi, K. (2013). Geographical unit based analysis in the context of transportation safety planning. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 49, 62-75.
- Abdel-Aty, M., Siddiqui, C., Huang, H., 2011. Integrating trip and roadway characteristics in managing safety at traffic analysis zones. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2213, 20-28.
- Adminaite, D., Allsop, R., & Jost, G. (2019). Ranking EU progress on road safety: 13th road safety performance index report.
- Agencija za bezbednost saobraćaja, ABS, <http://www.abs.gov.rs/%D1%81%D1%80/analize-i-istrazivanje/baza-podataka> (pristupio: 15.08.2019. godine)
- Agresti, A., (2002) *Categorical Data Analysis*, Wiley Series in Probability and Statistics. 2nd ed. New York, John Wiley & Sons.
- Aguero-Valverde, J., & Jovanis, P. P. (2006). Spatial analysis of fatal and injury crashes in Pennsylvania. *Accident Analysis & Prevention*, 38(3), 618-625.
- Ahmane, M., Abbas-Turki, A., Perronnet, F., Wu, J., El Moudni, A., Buisson, J., & Zeo, R. (2013). Modeling and controlling an isolated urban intersection based on cooperative vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 28, 44-62.
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, 19(6), 716-723.
- Alexander, L., Cheng, P., Donath, M., Gorjestani, A., Menon, A., Newstrom, B., ... & Starr, R. (2007, January). Lag acceptance analysis for a rural unsignalized intersection. In *Proceedings of the 86th Annual Meeting of the TRB*, Washington, DC, USA (pp. 21-25).
- Aljamal, M. A., Rakha, H. A., Du, J., & El-Shawarby, I. (2018, November). Comparison of Microscopic and Mesoscopic Traffic Modeling Tools for Evacuation Analysis. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (pp. 2321-2326). IEEE.
- Amoros, E., Martin, J. L., & Laumon, B. (2003). Comparison of road crashes incidence and severity between some French counties. *Accident Analysis & Prevention*, 35(4), 537-547.
- Anastasopoulos, P. C., & Mannering, F. L. (2009). A note on modeling vehicle accident frequencies with random-parameters count models. *Accident Analysis & Prevention*, 41(1), 153-159.
- Anselin, L. (2013). *Spatial econometrics: methods and models* (Vol. 4). Springer Science & Business Media.
- Anselin, L. 1988. *Spatial Econometrics: Methods and Models*, (Dord-drecht: Kluwer Academic Publishers).
- Anselin, L., & Griffith, D. A. (1988). Do spatial effects really matter in regression analysis?.

- Papers in Regional Science, 65(1), 11-34.
- Arndt, O., & Troutbeck, R. J. (1998). Relationship between roundabout geometry and accident rates. *Transportation research circular*, (E-C003), 28-1.
- Baass, K. G. (1981). Design of zonal systems for aggregate transportation planning models. *Transportation Research Record*, (807).
- Barua, U., Azad, A. K., & Tay, R. (2010). Fatality risk of intersection crashes on rural undivided highways in Alberta, Canada. *Transportation Research Record*, 2148(1), 107-115.
- Bauer, K. M., & Harwood, D. W. (2000). *Statistical Models of At-Grade Intersection Accidents. Addendum* (No. PUBLICATION NO. FHWA-RD-99-094). United States. Federal Highway Administration.
- Berger, J. O., & Wolpert, R. L. (1988). The likelihood principle: A review, generalizations, and statistical implications. *Lecture Notes—Monograph Series*, 6.
- Bhagavathula, R., Gibbons, R. B., & Edwards, C. J. (2015). Relationship between roadway illuminance level and nighttime rural intersection safety. *Transportation research record*, 2485(1), 8-15.
- Black, W. R., & Thomas, I. (1998). Accidents on Belgium's motorways: a network autocorrelation analysis. *Journal of Transport Geography*, 6(1), 23-31.
- Blatt, J., & Furman, S. M. (1998). Residence location of drivers involved in fatal crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 30(6), 705-711.
- Blazquez, C. A., & Celis, M. S. (2013). A spatial and temporal analysis of child pedestrian crashes in Santiago, Chile. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 304-311.
- Boroujerdian, A. M., Saffarzadeh, M., Yousefi, H., & Ghassemian, H. (2014). A model to identify high crash road segments with the dynamic segmentation method. *Accident Analysis & Prevention*, 73, 274-287.
- Brüde, U., & Larsson, J. (1993). Models for predicting accidents at junctions where pedestrians and cyclists are involved. How well do they fit?. *Accident Analysis & Prevention*, 25(5), 499-509.
- Cai, Q. (2017). Integrating the macroscopic and microscopic traffic safety analysis using hierarchical models.
- Cai, Q., Abdel-Aty, M., & Lee, J. (2017b). Macro-level vulnerable road users crash analysis: a Bayesian joint modeling approach of frequency and proportion. *Accident Analysis & Prevention*, 107, 11-19.
- Cai, Q., Abdel-Aty, M., Lee, J., & Eluru, N. (2017). Comparative analysis of zonal systems for macro-level crash modeling. *Journal of safety research*, 61, 157-166.
- Cai, Q., Lee, J., Eluru, N., & Abdel-Aty, M. (2016). Macro-level pedestrian and bicycle crash analysis: Incorporating spatial spillover effects in dual state count models. *Accident Analysis & Prevention*, 93, 14-22.
- Carlin, B. P., & Louis, T. A. (2000). Empirical Bayes: Past, present and future. *Journal of the American Statistical Association*, 95(452), 1286-1289.
- Carlin, J., Wolfe, R., Hendricks Brown, C. and Gelman, A. (2001) A case study on the choice, interpretation and checking of multilevel models for longitudinal binary outcomes. *Biostatistics*, 2, 397–416.
- Chapman, R. (1973). The concept of exposure. *Accident Analysis & Prevention*, 5(2), 95-110.
- Chen, E., & Tarko, A. P. (2014). Modeling safety of highway work zones with random parameters and random effects models. *Analytic methods in accident research*, 1, 86-95.
- Chen, P. (2015). Built environment factors in explaining the automobile-involved bicycle crash frequencies: A spatial statistic approach. *Safety science*, 79, 336-343.
- Chen, P., Zeng, W., & Yu, G. (2019). Assessing right-turning vehicle-pedestrian conflicts at intersections using an integrated microscopic simulation model. *Accident Analysis &*



- Prevention, 129, 211-224.
- Chin, H. C., & Quddus, M. A. (2003). Applying the random effect negative binomial model to examine traffic accident occurrence at signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 35(2), 253-259.
- Clifton, K., Livi, A.,(2005) Gender differences in walking behavior, attitudes about walking, and perceptions of the environment in three Maryland communities. In: Transportation Research Board, ed. *Research on women's issues in transportation: conference proceedings 35*, Washington, D.C., Transportation Research Board: 79–88.
- Cohen, J. (1992). Statistical power analysis. *Current directions in psychological science*, 1(3), 98-101.
- Cove, L. L., & Edwin Clark, J. (1993). Modeling pedestrian volumes on college campuses. *Transportation Research Record*, 1405, 43.
- Dale, M. R., & Fortin, M. J. (2002). Spatial autocorrelation and statistical tests in ecology. *Ecoscience*, 9(2), 162-167.
- Dawkins, C. J., Shen, Q., & Sanchez, T. W. (2005). Race, space, and unemployment duration. *Journal of Urban Economics*, 58(1), 91-113.
- Dissanayake, D., Aryaija, J., & Wedagama, D. P. (2009). Modelling the effects of land use and temporal factors on child pedestrian casualties. *Accident Analysis & Prevention*, 41(5), 1016-1024.
- Dong, N., Huang, H., & Zheng, L. (2015). Support vector machine in crash prediction at the level of traffic analysis zones: assessing the spatial proximity effects. *Accident Analysis & Prevention*, 82, 192-198.
- Dong, N., Huang, H., Lee, J., Gao, M., & Abdel-Aty, M. (2016). Macroscopic hotspots identification: a Bayesian spatio-temporal interaction approach. *Accident Analysis & Prevention*, 92, 256-264
- Dong, N., Huang, H., Xu, P., Ding, Z., & Wang, D. (2014). Evaluating spatial-proximity structures in crash prediction models at the level of traffic analysis zones. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2432), 46-52.
- Elias, W., & Shiftan, Y. (2014). Analyzing and modeling risk exposure of pedestrian children to involvement in car crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 62, 397-405.
- Eluru, N., Bagheri, M., Miranda-Moreno, L. F., & Fu, L. (2012). A latent class modeling approach for identifying vehicle driver injury severity factors at highway-railway crossings. *Accident Analysis & Prevention*, 47, 119-127.
- Eluru, N., Bhat, C. R., & Hensher, D. A. (2008). A mixed generalized ordered response model for examining pedestrian and bicyclist injury severity level in traffic crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 40(3), 1033-1054.
- Elvik, R. (2013). International transferability of accident modification functions for horizontal curves. *Accident Analysis & Prevention*, 59, 487-496.
- Elvik, R., & Bjørnskau, T. (2017). Safety-in-numbers: a systematic review and meta-analysis of evidence. *Safety science*, 92, 274-282.
- Elvik, R., Høye, A., Vaa, T., & Sørensen, M. (2009). *Vehicle Design and Protective Devices', The Handbook of Road Safety Measures* (pp. 543-731). Emerald Group Publishing Limited.
- Elvik, R., Sagberg, F., & Langeland, P. A. (2019). An analysis of factors influencing accidents on road bridges in Norway. *Accident Analysis & Prevention*, 129, 1-6.
- Elvik, R., Sørensen, M. W., & Nævestad, T. O. (2013). Factors influencing safety in a sample of marked pedestrian crossings selected for safety inspections in the city of Oslo. *Accident Analysis & Prevention*, 59, 64-70.

- EU road traffic safety database CARE,  
[http://ec.europa.eu/transport/road\\_safety/specialist/statistics/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/statistics/index_en.htm)  
(приступило: 15.08.2019. године)
- Facts, T. S. B. (2016). Main Figures. European Road Safety Observatory. Available online:  
[https://ec.europa.eu/transport/road\\_safety/sites/roadsafety/files/pdf/statistics/dacota/bfs2016\\_main\\_figures.pdf](https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/statistics/dacota/bfs2016_main_figures.pdf) (приступ: 20.08 2019).
- Fox, J. (1997). Applied regression analysis, linear models, and related methods. Sage Publications, Inc.
- Gelman, A. and Rubin, D. (1996) Markov chain Monte Carlo methods in biostatistics. *Statistical Methods in Medical Research*, 5, 339–355
- Glennon, J. C. (1987). Effect of alignment on highway safety. relationship between safety and key highway features, 64-77.
- Goldberger, A. S., & Goldberger, A. S. G. (1991). A course in econometrics. Harvard University Press.
- Gomes, M. J. T. L., Cunto, F., & da Silva, A. R. (2017). Geographically weighted negative binomial regression applied to zonal level safety performance models. *Accident Analysis & Prevention*, 106, 254-261.
- Gomes, S. V. (2013). The influence of the infrastructure characteristics in urban road accidents occurrence. *Accident Analysis & Prevention*, 60, 289-297.
- Gomes, S. V., Geedipally, S. R., & Lord, D. (2012). Estimating the safety performance of urban intersections in Lisbon, Portugal. *Safety science*, 50(9), 1732-1739.
- Graham, D. J., & Glaister, S. (2003). Spatial variation in road pedestrian casualties: the role of urban scale, density and land-use mix. *Urban Studies*, 40(8), 1591-1607.
- Greene, W. H. (2000). *Econometric analysis* (International edition)
- Greene-Roesel, R., Diogenes, M. C., & Ragland, D. R. (2007). Estimating pedestrian accident exposure: protocol report.
- Guo, F., Wang, X., Abdel-Aty, M.A., 2010. Modeling signalized intersection safety with corridor-level spatial correlations. *Accid. Anal. Prevent.* 42 (1), 84–92
- Guo, Q., Xu, P., Pei, X., Wong, S. C., & Yao, D. (2017). The effect of road network patterns on pedestrian safety: A zone-based Bayesian spatial modeling approach. *Accident Analysis & Prevention*, 99, 114-124.
- Gustavsson, J., & Svensson, Å. (1976). A Poisson regression model applied to classes of road accidents with small frequencies. *Scandinavian Journal of Statistics*, 49-60.
- Hadayeghi, A., Shalaby, A. S., & Persaud, B. (2003). Macrolevel accident prediction models for evaluating safety of urban transportation systems. *Transportation research record*, 1840(1), 87-95.
- Hadayeghi, A., Shalaby, A. S., & Persaud, B. N. (2010). Development of planning level transportation safety tools using Geographically Weighted Poisson Regression. *Accident Analysis & Prevention*, 42(2), 676-688.
- Hadayeghi, A., Shalaby, A. S., Persaud, B. N., & Cheung, C. (2006). Temporal transferability and updating of zonal level accident prediction models. *Accident Analysis & Prevention*, 38(3), 579-589.
- Hakamies-Blomqvist, L. (1993). Fatal accidents of older drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 25(1), pp. 19-27.
- Harruff, R. C., Avery, A., & Alter-Pandya, A. S. (1998). Analysis of circumstances and injuries in 217 pedestrian traffic fatalities. *Accident Analysis & Prevention*, 30(1), 11-20.
- Harwood, D. W., Bauer, K. M., Richard, K. R., Gilmore, D. K., Graham, J. L., Potts, I. B., ... & Hauer, E. (2007). Methodology to predict the safety performance of urban and suburban arterials (No. NCHRP Project 17-26).
- Hauer, E. (1986). On the estimation of the expected number of accidents. *Accident Analysis &*

- Prevention, 18(1), 1-12.
- Hauer, E. (1995). On exposure and accident rate. *Traffic engineering & control*, 36(3).
- Hauer, E., Ng, J. C., & Lovell, J. (1988). Estimation of safety at signalized intersections (with discussion and closure) (No. 1185).
- Hezaveh, A. M., Arvin, R., & Cherry, C. R. (2019). A geographically weighted regression to estimate the comprehensive cost of traffic crashes at a zonal level. *Accident Analysis & Prevention*, 131, 15-24.
- Hilbe, J. M. (2009). *Logistic regression models*. Chapman and hall/CRC.
- Hocherman, I., Hakkert, A. S., & Bar-Ziv, J. (1988). Estimating the daily volume of crossing pedestrians from short-counts. *Transportation Research Record*, 1168, 31-38.
- Hou, Q., Tarko, A. P., & Meng, X. (2018). Analyzing crash frequency in freeway tunnels: A correlated random parameters approach. *Accident Analysis & Prevention*, 111, 94-100.
- Houston, R. W., 1998. The transportation Equity Act for the 21st century. Institute of Transportation Engineers. *ITE Journal* 68(7), 45.
- Huang, H., Abdel-Aty, M. A., & Darwiche, A. L. (2010). County-level crash risk analysis in Florida: Bayesian spatial modeling. *Transportation Research Record*, 2148(1), 27-37.
- Huang, H., Chin, H. C., & Haque, M. M. (2008). Severity of driver injury and vehicle damage in traffic crashes at intersections: a Bayesian hierarchical analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 40(1), 45-54.
- Huang, H., Song, B., Xu, P., Zeng, Q., Lee, J., & Abdel-Aty, M. (2016). Macro and micro models for zonal crash prediction with application in hot zones identification. *Journal of transport geography*, 54, 248-256.
- Huang, H., Xu, P., & Abdel-Aty, M. (2013). *Transportation Safety Planning: A Spatial Analysis Approach* 4. *Transportation*, 2, 3.
- Hummer, J. E., Rasdorf, W., Findley, D. J., Zegeer, C. V., & Sundstrom, C. A. (2010). Curve collisions: road and collision characteristics and countermeasures. *Journal of Transportation Safety & Security*, 2(3), 203-220.
- Iranitalab, A., Kang, Y., & Khattak, A. (2018). Modeling the Probability of Hazardous Materials Release in Crashes at Highway–Rail Grade Crossings. *Transportation research record*, 2672(10), 28-37.
- Jacobsen, P. L. (2015). Safety in numbers: more walkers and bicyclists, safer walking and bicycling. *Injury prevention*, 21(4), 271-275.
- Jia, R., Khadka, A., & Kim, I. (2018). Traffic crash analysis with point-of-interest spatial clustering. *Accident Analysis & Prevention*, 121, 223-230.
- Joshua, S. C., & Garber, N. J. (1990). Estimating truck accident rate and involvements using linear and Poisson regression models. *Transportation planning and Technology*, 15(1), 41-58.
- Juergens, W. R. (1962). Construction zone, detour and temporary connection accidents (No. 1263-38103).
- Karlaftis, M. G., & Tarko, A. P. (1998). Heterogeneity considerations in accident modeling. *Accident Analysis & Prevention*, 30(4), 425-433.
- Karsch, H. M., Hedlund, J. H., Tison, J., Leaf, W. A., & Preusser Research Group. (2012). *Review of Studies on Pedestrian and Bicyclist Safety, 1991-2007* (No. DOT HS 811 614). United States. National Highway Traffic Safety Administration.
- Kennedy, J.F., 2008. *Estimating Pedestrian Volumes and Crashes at Urban Signalized Intersections*. Available at: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-12192008-163243/unrestricted/ThesisKennedyJan72009.pdf>
- Khattak, A. J., Khattak, A. J., & Council, F. M. (2002). Effects of work zone presence on injury and non-injury crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 34(1), 19-29.

- Khondakar, B., Sayed, T., & Lovegrove, G. (2010). Transferability of community-based collision prediction models for use in road safety planning applications. *Journal of Transportation Engineering*, 136(10), 871-880.
- Kim, D. G., Lee, Y., Washington, S., & Choi, K. (2007). Modeling crash outcome probabilities at rural intersections: Application of hierarchical binomial logistic models. *Accident Analysis & Prevention*, 39(1), 125-134.
- Kim, K., & Yamashita, E. (2002). Motor vehicle crashes and land use: empirical analysis from Hawaii. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1784), 73-79.
- Kim, K., Brunner, I. M., & Yamashita, E. Y. (2006). Influence of land use, population, employment, and economic activity on accidents. *Transportation research record*, 1953(1), 56-64.
- Knuiman, M. W., Council, F. M., & Reinfurt, D. W. (1993). Association of median width and highway accident rates (with discussion and closure). *Transportation Research Record*, 1401, 70-82.
- Kononov, J., & Allery, B. (2003). Level of service of safety: conceptual blueprint and analytical framework. *Transportation research record*, 1840(1), 57-66.
- Koppel, S., Stephens, A. N., Bedard, M., Charlton, J. L., Darzins, P., Di Stefano, M., ... & Manson-Hing, M. (2019). Self-reported violations, errors and lapses for older drivers: measuring the change in frequency of aberrant driving behaviours across five time-points. *Accident Analysis & Prevention*, 123, 132-139.
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied linear statistical models* (Vol. 5). Boston: McGraw-Hill Irwin.
- Ladron de Guevara, F., Washington, S. P., & Oh, J. (2004). Forecasting crashes at the planning level: simultaneous negative binomial crash model applied in Tucson, Arizona. *Transportation Research Record*, 1897(1), 191-199.
- LaScala, E. A., Gerber, D., & Gruenewald, P. J. (2000). Demographic and environmental correlates of pedestrian injury collisions: a spatial analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 32(5), 651-658.
- LaScala, E. A., Johnson, F. W., & Gruenewald, P. J. (2001). Neighborhood characteristics of alcohol-related pedestrian injury collisions: a geostatistical analysis. *Prevention Science*, 2(2), 123-134.
- Leden, L. (2002). Pedestrian risk decrease with pedestrian flow. A case study based on data from signalized intersections in Hamilton, Ontario. *Accident Analysis & Prevention*, 34(4), 457-464.
- Lee, C., & Abdel-Aty, M. (2005). Comprehensive analysis of vehicle-pedestrian crashes at intersections in Florida. *Accident Analysis & Prevention*, 37(4), 775-786.
- Lee, J. (2014). Development of Traffic Safety Zones and Integrating Macroscopic and Microscopic Safety Data Analytics for Novel Hot Zone Identification.
- Lee, J., Abdel-Aty, M., & Cai, Q. (2017). Intersection crash prediction modeling with macro-level data from various geographic units. *Accident Analysis & Prevention*, 102, 213-226.
- Lee, J., Abdel-Aty, M., & Choi, K. (2014b). Analysis of residence characteristics of at-fault drivers in traffic crashes. *Safety science*, 68, 6-13.
- Lee, J., Abdel-Aty, M., & Jiang, X. (2014). Development of zone system for macro-level traffic safety analysis. *Journal of transport geography*, 38, 13-21.
- Lee, J., Abdel-Aty, M., & Jiang, X. (2015). Multivariate crash modeling for motor vehicle and non-motorized modes at the macroscopic level. *Accident Analysis & Prevention*, 78, 146-154.
- Lee, J., Abdel-Aty, M., & Shah, I. (2018). Evaluation of surrogate measures for pedestrian trips

- at intersections and crash modeling. *Accident Analysis & Prevention*.
- Lee, J., Abdel-Aty, M., Choi, K., & Huang, H. (2015a). Multi-level hot zone identification for pedestrian safety. *Accident Analysis & Prevention*, 76, 64-73.
- Lee, J., Abdel-Aty, M., Choi, K., & Siddiqui, C. (2013). Analysis of residence characteristics of drivers, pedestrians, and bicyclists involved in traffic crashes (No. 13-2228).
- Lee, J., Abdel-Aty, M., Xu, P., & Gong, Y. (2019). Is the safety-in-numbers effect still observed in areas with low pedestrian activities? A case study of a suburban area in the United States. *Accident Analysis & Prevention*, 125, 116-123.
- Lemke, K. (2000). Road safety in tunnels. *Transportation Research Record*, 1740(1), 170-174.
- Lerner, E. B., Jehle, D. V., Billittier IV, A. J., Moscati, R. M., Connery, C. M., & Stiller, G. (2001). The influence of demographic factors on seatbelt use by adults injured in motor vehicle crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 33(5), 659-662.
- LeSage, J. P. (1999). *Spatial econometrics*. Morgantown, WV.: Regional Research Institute, West Virginia University.
- LeSage, J. P., & Pace, R. K. (2004). Models for spatially dependent missing data. *The Journal of Real Estate Finance and Economics*, 29(2), 233-254.
- LeSage, J. P., & Pace, R. K. (2010). Spatial econometric models. In *Handbook of applied spatial analysis* (pp. 355-376). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Levine, N., Kim, K. E., & Nitz, L. H. (1995). Spatial analysis of Honolulu motor vehicle crashes: II. Zonal generators. *Accident Analysis & Prevention*, 27(5), 675-685.
- Levine, N., Kim, K. E., & Nitz, L. H. (1995). Spatial analysis of Honolulu motor vehicle crashes: I. Spatial patterns. *Accident Analysis & Prevention*, 27(5), 663-674.
- Li, J., & Wang, X. (2017). Safety analysis of urban arterials at the meso level. *Accident Analysis & Prevention*, 108, 100-111.
- Liang, C., Ghazel, M., & Cazier, O. (2018). Using Bayesian Networks for the Purpose of Risk Analysis at Railway Level Crossings. *IFAC-PapersOnLine*, 51(9), 142-149.
- Liang, C., Ghazel, M., Cazier, O., & El-Koursi, E. M. (2017). A new insight on the risky behavior of motorists at railway level crossings: An observational field study. *Accident Analysis & Prevention*, 108, 181-188.
- Loidl, M., Wallentin, G., Wendel, R., & Zagel, B. (2016). Mapping bicycle crash risk patterns on the local scale. *Safety*, 2(3), 17.
- Lord, D. (2006). Modeling motor vehicle crashes using Poisson-gamma models: Examining the effects of low sample mean values and small sample size on the estimation of the fixed dispersion parameter. *Accident Analysis & Prevention*, 38(4), 751-766.
- Lord, D., & Mannering, F. (2010). The statistical analysis of crash-frequency data: a review and assessment of methodological alternatives. *Transportation research part A: policy and practice*, 44(5), 291-305.
- 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 accidents: a Bayesian perspective. *Safety Science*, 46(5), 751-770.
- Lord, D., van Schalkwyk, I., Chrysler, S., & Staplin, L. (2007). A strategy to reduce older driver injuries at intersections using more accommodating roundabout design practices. *Accident Analysis & Prevention*, 39(3), 427-432.
- Loukaitou-Sideris, A., Liggett, R., & Sung, H. G. (2007). Death on the crosswalk: A study of pedestrian-automobile collisions in Los Angeles. *Journal of Planning Education and Research*, 26(3), 338-351.
- Lusk, A. C., Furth, P. G., Morency, P., Miranda-Moreno, L. F., Willett, W. C., & Dennerlein, J. T. (2011). Risk of injury for bicycling on cycle tracks versus in the street. *Injury prevention*, 17(2), 131-135.

- Lyon, C., & Persaud, B. (2002). Pedestrian collision prediction models for urban intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1818), 102-107.
- MacNab, Y. C. (2004). Bayesian spatial and ecological models for small-area accident and injury analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 36(6), 1019-1028.
- Mannering, F. L., & Bhat, C. R. (2014). Analytic methods in accident research: Methodological frontier and future directions. *Analytic methods in accident research*, 1, 1-22.
- Mannering, F. L., Shankar, V., & Bhat, C. R. (2016). Unobserved heterogeneity and the statistical analysis of highway accident data. *Analytic methods in accident research*, 11, 1-16.
- Mauga, T., & Kaseko, M. (2010). Modeling and evaluating safety impacts of access management features in the Las Vegas, Nevada, Valley. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2171), 57-65.
- McCullagh, P. (2002). What is a statistical model?. *Annals of statistics*, 1225-1267.
- McDonald, J. W. (1953). Relation between number of accidents and traffic volume at divided-highway intersections. *Highway Research Board Bulletin*, 74, 7-17.
- Medina, J. C., Shen, S., & Benekohal, R. F. (2016). Micro and macro level safety analysis at railroad grade crossings.
- Miaou, S. P., & Lum, H. (1993). Modeling vehicle accidents and highway geometric design relationships. *Accident Analysis & Prevention*, 25(6), 689-709.
- Milton, J., & Mannering, F. (1998). The relationship among highway geometrics, traffic-related elements and motor-vehicle accident frequencies. *Transportation*, 25(4), 395-413.
- Miranda-Moreno, L. F., Morency, P., & El-Geneidy, A. M. (2011). The link between built environment, pedestrian activity and pedestrian-vehicle collision occurrence at signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 43(5), 1624-1634.
- Mitra, S., & Washington, S. (2012). On the significance of omitted variables in intersection crash modeling. *Accident Analysis & Prevention*, 49, 439-448.
- Moran, P. (1948) The interpretation of statistical maps. *Journal of the Royal Statistical Society* 10b. 243-251.
- Naderan, A., & Shahi, J. (2010). Aggregate crash prediction models: Introducing crash generation concept. *Accident Analysis & Prevention*, 42(1), 339-346.
- National Highway Traffic Safety Administration. (2017). NCSA data resource Website, Fatality Analysis Reporting System (FARS) Encyclopedia. National Center for Statistics and Analysis (NCSA) Motor Vehicle Traffic Crash Data. US Department of Transportation. Retrieved on November, 20, 2017.
- Ng, K. S., Hung, W. T., & Wong, W. G. (2002). An algorithm for assessing the risk of traffic accident. *Journal of safety research*, 33(3), 387-410.
- Noland, R. B., & Oh, L. (2004). The effect of infrastructure and demographic change on traffic-related fatalities and crashes: a case study of Illinois county-level data. *Accident Analysis & Prevention*, 36(4), 525-532.
- Noland, R. B., Klein, N. J., & Tulach, N. K. (2013). Do lower income areas have more pedestrian casualties?. *Accident Analysis & Prevention*, 59, 337-345.
- Odland, J. (1988). *Spatial autocorrelation* (Vol. 9). Newbury Park, CA: Sage Publications.
- Ouni, F., & Belloumi, M. (2019). Pattern of road traffic crash hot zones versus probable hot zones in Tunisia: A geospatial analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 128, 185-196.
- Pal, R., & Sinha, K. C. (1996). Analysis of crash rates at interstate work zones in Indiana. *Transportation Research Record*, 1529(1), 43-53.
- Pant, P. D., Liu, Y., & Vasisht, G. (2000). RATIONAL SCHEDULE OF BASE ACCIDENT RATES FOR RURAL HIGHWAYS IN OHIO-PHASE I (No. FHWA/OH-2000/003.).

- Persaud, B., & Dzbik, L. (1992). Accident prediction models for freeways. *Transportation Research Record*, 1401, 55-60.
- Petch, R. O., & Henson, R. R. (2000). Child road safety in the urban environment. *Journal of Transport Geography*, 8(3), 197-211.
- Pljakić, M., Jovanović, D., Matović, B., & Mičić, S. (2019a). Macro-level accident modeling in Novi Sad: a spatial regression approach. *Accident Analysis & Prevention*, 132, 105259.
- Pljakić, M., Jovanović, D., Matović, B., & Mičić, S. (2019b) Identification of Accident Hotspot Locations Using Network Kernel Density. *Journal of Mechatronics, Automation and Identification Technology*, Vol. 4, No. 3, pp. 8 -13.
- Pljakić, M., Basarić, Đ., & Gugleta, S. (2018a) Spatial clustering of traffic analysis zone: a case study from Novi Sad, Serbia, XIII International Symposium "Road accidents prevention 2018" Novi Sad, Serbia.
- Pljakić, M., Jovanović, D., Bačkalić, S., Matović, B., (2018b), Gis-based spatial analysis of child road accidents: case study city of Novi Sad, 18th International Conference on Transport Science, Portorož, Slovenia.
- Pljakić, M., Jovanović, D., Matović, B., Mičić, S., Bulajić, A., (2018c), Primena prediktivnih modela u analizi saobraćajnih nezgoda sa pešacima na signalisanim raskrscima: Studija slučaja Grad Novi Sad, 13. Međunarodna Konferencija „Bezbednost saobraćaja u lokalnoj zajednici“ Kopaonik, Srbija.
- Poch, M., & Mannering, F. (1996). Negative binomial analysis of intersection-accident frequencies. *Journal of transportation engineering*, 122(2), 105-113.
- Preusser, D. F., Leaf, W. A., DeBartolo, K. B., Blomberg, R. D., & Levy, M. M. (1982). The effect of right-turn-on-red on pedestrian and bicyclist accidents. *Journal of safety research*, 13(2), 45-55.
- Pulugurtha, S. S., & Sambhara, V. R. (2011). Pedestrian crash estimation models for signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 43(1), 439-446.
- Pulugurtha, S. S., Duddu, V. R., & Kotagiri, Y. (2013). Traffic analysis zone level crash estimation models based on land use characteristics. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 678-687.
- Pulugurtha, S., & Repaka, S. (2008). Assessment of models to measure pedestrian activity at signalized intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2073), 39-48.
- Qin, X., Ivan, J. N., & Ravishanker, N. (2004). Selecting exposure measures in crash rate prediction for two-lane highway segments. *Accident Analysis & Prevention*, 36(2), 183-191.
- Quddus, M. A. (2008). Modelling area-wide count outcomes with spatial correlation and heterogeneity: an analysis of London crash data. *Accident Analysis & Prevention*, 40(4), 1486-1497.
- Rao, J.N.K., (2003). *Small Area Estimation*. Wiley, New York. Sayed, T., Abdelwahab, W., Navin, F., 1995. Identifying accident-prone locations using fuzzy pattern recognition. *J. Transport. Eng. (ASCE)* 121 (4), 352–358.
- Retting, R. A., Williams, J., & Schwartz, S. I. (2000). Motor vehicle crashes on bridges and countermeasure opportunities. *Journal of Safety Research*, 31(4), 203-210.
- Rhee, K. A., Kim, J. K., Lee, Y. I., & Ulfarsson, G. F. (2016). Spatial regression analysis of traffic accidents in Seoul. *Accident Analysis & Prevention*, 91, 190-199.
- Rifaat, S. M., Tay, R., & De Barros, A. (2010). Effect of street pattern on road safety: are policy recommendations sensitive to aggregations of crashes by severity?. *Transportation Research Record*, 2147(1), 58-65.
- RIGTER, B., EVANS, A., & TESSON, M. (2007). *Human Factors and Road Tunnel Safety*

- Regarding Users.
- Roberts, I., et al.(1995) Effect of environmental factors on risk of injury of child pedestrians by motor vehicles: a casecontrol study. *British Medical Journal*, 310: 91–94
- Roosmond, D. A. (2001). Using intelligent agents for pro-active, real-time urban intersection control. *European Journal of Operational Research*, 131(2), 293-301.
- Routledge, D. A., REPETTO-WRIGHT, R., & Howarth, C. I. (1974). The exposure of young children to accident risk as pedestrians. *Ergonomics*, 17(4), 457-480.
- Rumar, K. (1999). Transport safety visions, targets and strategies: beyond 2000. 1st European Transport Safety Lecture. European Transport Safety Council, Brussels, Tech. Rep.
- Ryb, G. E., Dischinger, P. C., Kufera, J. A., & Soderstrom, C. A. (2007). Social, behavioral and driving characteristics of injured pedestrians: a comparison with other unintentional trauma patients. *Accident Analysis & Prevention*, 39(2), 313-318.
- Saha, D., Alluri, P., Gan, A., & Wu, W. (2018). Spatial analysis of macro-level bicycle accidents using the class of conditional autoregressive models. *Accident Analysis & Prevention*.
- Saleem, T., & Persaud, B. (2017). Another look at the safety effects of horizontal curvature on rural two-lane highways. *Accident Analysis & Prevention*, 106, 149-159.
- Salifu, M. (2004). Accident prediction models for unsignalised urban junctions in Ghana. *IATSS research*, 28(1), 68-81.
- Santamariña-Rubio, E., Pérez, K., Olabarria, M., & Novoa, A. M. (2014). Gender differences in road traffic injury rate using time travelled as a measure of exposure. *Accident Analysis & Prevention*, 65, 1-7.
- Sawalha, Z., & Sayed, T. (2001). Evaluating safety of urban arterial roadways. *Journal of Transportation Engineering*, 127(2), 151-158.
- Sayed, T., & Rodriguez, F. (1999). Accident prediction models for urban unsignalized intersections in British Columbia. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1665), 93-99.
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The annals of statistics*, 6(2), 461-464.
- Shankar, A. H., & Prasad, A. S. (1998). Zinc and immune function: the biological basis of altered resistance to infection. *The American journal of clinical nutrition*, 68(2), 447S-463S.
- Shankar, V., Mannering, F., & Barfield, W. (1995). Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies. *Accident Analysis & Prevention*, 27(3), 371-389.
- Siddiqui, C., & Abdel-Aty, M. (2012). Nature of modeling boundary pedestrian crashes at zones. *Transportation Research Record*, 2299(1), 31-40.
- Siddiqui, C., Abdel-Aty, M., & Choi, K. (2012). Macroscopic spatial analysis of pedestrian and bicycle accidents. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 382-391.
- Smeed R. J. Accident rates. *Int. Road Safety Traffic Rev.* 3(2), 30-40, 1955.
- Smith, A. and Gelfand, A. (1992) Bayesian statistics without tears: a sampling–resampling perspective. *The American Statistician*, 46(2), 84–88.
- Soleimani, S., Mousa, S. R., Codjoe, J., & Leitner, M. (2019). A comprehensive railroad-highway grade crossing consolidation model: a machine learning approach. *Accident Analysis & Prevention*, 128, 65-77.
- Spanos, A. (1999). *Probability theory and statistical inference: econometric modeling with observational data*. Cambridge University Press.
- Stamatiadis, N., & Puccini, G. (2000). Socioeconomic descriptors of fatal crash rates in the Southeast USA. *Injury control and safety promotion*, 7(3), 165-173.
- Stokes, R. W., Rys, M. J., Russell, E. R., Robinson, R. K., & Budke, B. (2000). Analysis of



- rural intersection accidents caused by stop sign violation and failure to yield the right-of-way.
- Strathman, J. G., Dueker, K., Zhang, J., & Williams, T. (2001). Analysis of design attributes and crashes on the Oregon highway system.
- Strauss, J., Miranda-Moreno, L. F., & Morency, P. (2013). Cyclist activity and injury risk analysis at signalized intersections: A Bayesian modelling approach. *Accident Analysis & Prevention*, 59, 9-17.
- Strauss, J., Miranda-Moreno, L. F., & Morency, P. (2014). Multimodal injury risk analysis of road users at signalized and non-signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 71, 201-209.
- Systematics, C., & Consult, A. E. C. O. M. (2007). A Recommended Approach to Delineating Traffic Analysis Zones in Florida. Prepared for: Federal Highway Administration Report, Washington, DC.
- Tasic, I., Elvik, R., & Brewer, S. (2017). Exploring the safety in numbers effect for vulnerable road users on a macroscopic scale. *Accident Analysis & Prevention*, 109, 36-46.
- Tay, R. (2015). A random parameters probit model of urban and rural intersection crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 84, 38-40.
- Torbic, D., Harwood, D., Bokenkroger, C., Srinivasan, R., Carter, D., Zegeer, C., & Lyon, C. (2010). Pedestrian safety prediction methodology for urban signalized intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2198), 65-74.
- Turner, D. S. (1984). Prediction of bridge accident rates. *Journal of transportation engineering*, 110(1), 45-54.
- Tzeng, O. C., & Jackson, J. W. (1991). Common methodological framework for theory construction and evaluation in the social and behavioral sciences. *Genetic, social, and general psychology monographs*.
- Ukkusuri, S., Hasan, S., & Aziz, H. A. (2011). Random parameter model used to explain effects of built-environment characteristics on pedestrian crash frequency. *Transportation research record*, 2237(1), 98-106.
- United Nations General Assembly (UNGA). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development [Internet]. 2015 [cited 2018 May 16]. Available from: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>
- United Nations. Department of Economic and Social Affairs. Population Division (UNDESA). (2006). World urbanization prospects: The 2009 revision. UN.
- Venugopal, S., & Tarko, A. (2000). Safety models for rural freeway work zones. *Transportation Research Record*, 1715(1), 1-9.
- Vuong, Q. H. (1989). Likelihood ratio tests for model selection and non-nested hypotheses. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 307-333.
- Wang, J., Huang, H., & Zeng, Q. (2017). The effect of zonal factors in estimating crash risks by transportation modes: Motor vehicle, bicycle and pedestrian. *Accident Analysis & Prevention*, 98, 223-231.
- Wang, X., Abdel-Aty, M., 2006. Temporal and spatial analyses of rear-end crashes at signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention* 38 (6), 1137–1150.
- Wang, X., Fan, T., Chen, M., Deng, B., Wu, B., & Tremont, P. (2015). Safety modeling of urban arterials in Shanghai, China. *Accident Analysis & Prevention*, 83, 57-66.
- Wang, X., Fan, T., Li, W., Yu, R., Bullock, D., Wu, B., & Tremont, P. (2016). Speed variation during peak and off-peak hours on urban arterials in Shanghai. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 67, 84-94.
- Wang, X., Jin, Y., Abdel-Aty, M., Tremont, P. J., & Chen, X. (2012). Macrolevel model development for safety assessment of road network structures. *Transportation*

- Research Record, 2280(1), 100-109.
- Wang, X., Yang, J., Lee, C., Ji, Z., & You, S. (2016). Macro-level safety analysis of pedestrian accidents in Shanghai, China. *Accident Analysis & Prevention*, 96, 12-21.
- Wang, X., Zhou, Q., Yang, J., You, S., Song, Y., & Xue, M. (2019). Macro-level traffic safety analysis in Shanghai, China. *Accident Analysis & Prevention*, 125, 249-256.
- Wang, Y., & Kockelman, K. M. (2013). A Poisson-lognormal conditional-autoregressive model for multivariate spatial analysis of pedestrian crash counts across neighborhoods. *Accident Analysis & Prevention*, 60, 71-84.
- Wang, Y., Zhu, Y., Salinas, R., Ramirez, D., Karnae, S., & John, K. (2008). Roadside measurements of ultrafine particles at a busy urban intersection. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(11), 1449-1457.
- Washington, S., Van Schalkwyk, I., Mitra, S., Mayer, M., Dumbaugh, E., Zoll, M., 2006. NCHRP Report 546: Incorporating Safety into Long-Range Transportation Planning. Transportation Research Board, Washington, DC.
- Wedagama, D. P., Bird, R. N., & Metcalfe, A. V. (2006). The influence of urban land-use on non-motorised transport casualties. *Accident Analysis & Prevention*, 38(6), 1049-1057.
- Wei, F., & Lovegrove, G. (2013). An empirical tool to evaluate the safety of cyclists: Community based, macro-level collision prediction models using negative binomial regression. *Accident Analysis & Prevention*, 61, 129-137.
- Weng, X. X., Tan, G. X., Yao, S. S., & Huang, Z. (2006). Traffic flow characteristics and short-term prediction model of urban intersection. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 6(1), 103-07.
- Wier, M., Weintraub, J., Humphreys, E. H., Seto, E., & Bhatia, R. (2009). An area-level model of vehicle-pedestrian injury collisions with implications for land use and transportation planning. *Accident Analysis & Prevention*, 41(1), 137-145.
- World Health Organization. (2015). Global status report on road safety 2015. World Health Organization.
- World Health Organization. (2018). Global status report on road safety 2018: Summary (No. WHO/NMH/NVI/18.20). World Health Organization.
- Wu, Y. (2014). A Comparative Analysis of Different Dilemma Zone Countermeasures at Signalized Intersections based on Cellular Automaton Model.
- Xie, K., Ozbay, K., & Yang, H. (2019). A multivariate spatial approach to model crash counts by injury severity. *Accident Analysis & Prevention*, 122, 189-198.
- Xie, K., Wang, X., Ozbay, K., & Yang, H. (2014). Crash frequency modeling for signalized intersections in a high-density urban road network. *Analytic methods in accident research*, 2, 39-51.
- Xu, C., Li, H., Zhao, J., Chen, J., & Wang, W. (2017). Investigating the relationship between jobs-housing balance and traffic safety. *Accident Analysis & Prevention*, 107, 126-136.
- Xu, P., & Huang, H. (2015). Modeling crash spatial heterogeneity: random parameter versus geographically weighting. *Accident Analysis & Prevention*, 75, 16-25.
- Xu, P., Huang, H., Dong, N., & Abdel-Aty, M. (2014). Sensitivity analysis in the context of regional safety modeling: identifying and assessing the modifiable areal unit problem. *Accident Analysis & Prevention*, 70, 110-120.
- Xu, P., Huang, H., Dong, N., & Wong, S. C. (2017). Revisiting crash spatial heterogeneity: a Bayesian spatially varying coefficients approach. *Accident Analysis & Prevention*, 98, 330-337.
- Yan, X., Radwan, E., & Abdel-Aty, M. (2005). Characteristics of rear-end accidents at signalized intersections using multiple logistic regression model. *Accident Analysis*

- & Prevention, 37(6), 983-995.
- Yang, B. Z., & Loo, B. P. (2016). Land use and traffic collisions: A link-attribute analysis using Empirical Bayes method. *Accident Analysis & Prevention*, 95, 236-249.
- Yao, S., Loo, B. P., & Lam, W. W. (2015). Measures of activity-based pedestrian exposure to the risk of vehicle-pedestrian collisions: space-time path vs. potential path tree methods. *Accident Analysis & Prevention*, 75, 320-332.
- Zajac, S. S., & Ivan, J. N. (2003). Factors influencing injury severity of motor vehicle–crossing pedestrian crashes in rural Connecticut. *Accident Analysis & Prevention*, 35(3), 369-379.
- Zegeer, C., Nabors, D., Gelinne, D., Lefler, N., & Bushell, M. (2010). Pedestrian safety strategic plan: Recommendations for research and product development (No. FHWA-10-035).
- Zegeer, C., Stewart, R., Reinfurt, D., Council, F., Neuman, T., Hamilton, E., ... & Hunter, W. (1991). Cost-effective geometric improvements for safety upgrading of horizontal curves.
- Zellner, A. (1985) Bayesian econometrics. *Econometrica*, 53, 253–270.
- Zeng, Q., & Huang, H. (2014). Bayesian spatial joint modeling of traffic accidents on an urban road network. *Accident Analysis & Prevention*, 67, 105-112.
- Zhai, X., Huang, H., Gao, M., Dong, N., & Sze, N. N. (2018). Boundary crash data assignment in zonal safety analysis: an iterative approach based on data augmentation and Bayesian spatial model. *Accident Analysis & Prevention*, 121, 231-237.