

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

САОБРАЋАЈНИ ФАКУЛТЕТ

Аница М. Коцић Стојановић

**МОДЕЛИРАЊЕ УТИЦАЈА ПЕШАЧКИХ
ТОКОВА НА САОБРАЋАЈНИ ПРОЦЕС НА
УКРШТАЊИМА**

докторска дисертација

Београд, 2025.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

Anica M. Kocić Stojanović

**MODELLING THE IMPACT OF PEDESTRIAN
FLOWS AT INTERSECTIONS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2025.

Ментор:

др **Никола Челар**, редовни професор
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет

Чланови комисије:

др **Владан Тубић**, редовни професор
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет

др **Владимир Ђорић**, редовни професор
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет

др **Горан Младеновић**, ванредни професор
Универзитет у Београду – Грађевински факултет

Датум одбране:

МОДЕЛИРАЊЕ УТИЦАЈА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА НА САОБРАЋАЈНИ ПРОЦЕС НА УКРШТАЊИМА

Сажетак: Пешачки прелази су уобичајени елементи саобраћајне инфраструктуре на градским саобраћајницама, при чему креирање и евалуација пројектантских решења регулисања и управљања саобраћајним токовима на овим укрштањима захтева познавање утицаја пешачких токова на возачке токове. На сигналисаним укрштањима то подразумева квантификовање утицаја пешачког тока на вредност засићеног тока незаштићеног скретања, обзиром да засићени ток представља основну улазну величину у поступку оптимизације параметара рада светлосних сигнала. Ефикасност опслуживања неприоритетних возачких токова на несигналисаним укрштањима заснива се на квантификовању утицаја пешачких токова на капацитет деонице. С друге стране, карактеристике пешачких и возачких токова, исказане кроз дефинисане параметре, су основ за квалитетно и безбедно опслуживање пешака, као најрањивијих учесника у саобраћају.

У складу са тим, у овој дисертацији су формирана два модела на основу експерименталних истраживања. Први је модел за прорачун засићеног тока незаштићеног левог или десног скретања које има конфликт са пешацима на сигналисној раскрсници. Овај модел превазилази недостатке модела из литературе и има могућност примене за лева скретања, за разлику од релевантних модела. Поред тога, формиран модел показује мања одступања од реалних вредности у односу на остале разматране моделе. На основу резултата истраживања дат је и предлог алтернативног третмана скретања, имајући у виду негативне последице заштићеног опслуживања. Други формиран модел намењен је прорачуну капацитета саобраћајне траке у зони несигнализованог пешачког прелаза на деоници, и представља пионирски приступ у моделирању утицаја пешачких токова на капацитет деонице. Опсежним истраживањем утврђене су и карактеристике понашања и параметари опслуживања пешачких и возачких токова који су значајни у поступку пројектовања саобраћајне сигнализације и оптимизације параметара рада светлосних сигнала, а могу имати значајну примену при калибрацији микросимулационих модела.

Кључне речи: Сигналисана раскрсница, несигналисани пешачки прелаз, незаштићено скретање, засићен саобраћајни ток, капацитет, пешачки ток, брзина преласка

Научна област: Саобраћајно инжењерство

Ужа научна област: Регулација и управљање саобраћајним токовима на мрежи путева и улица

УДК број:

MODELLING THE IMPACT OF PEDESTRIAN FLOWS AT INTERSECTIONS

Abstract: Pedestrian crossings are common component of pedestrian infrastructure on urban streets, so designing and evaluating traffic control and management solutions for these crossings relies on the established impact of pedestrians on vehicle flow. This requires quantifying the effect of pedestrian flow on the permitted turn saturation flow at signalized intersections, given the importance of saturation flow in the signal-timing optimization. At unsignalized midblock crossings, the vehicle-flow efficiency depends on the quantified pedestrian impact on the capacity of the urban street segment. On the other hand, the efficient and safe crossing of pedestrians, as the most vulnerable road users, depends on the characteristics and parameters of both pedestrian and vehicle flows.

This PhD dissertation proposes two models that describe pedestrian impact on vehicle flow, both developed from experimental research. First, a model of saturation flow of permitted turns yielding to pedestrians at signalized intersections is developed. This model overcomes the shortcomings of existing models in the literature and is applicable to left turns, unlike the currently relevant saturation-flow models. Moreover, the proposed model predicts saturation flow with less deviation than comparable models. The experimental research also identified an alternative turn treatment that mitigates the disadvantages of protected turn treatment. Second, the lane capacity of an urban street segment is modeled while accounting for the impact of a midblock pedestrian crossing. The capacity-modeling approach in this dissertation is pioneering. Additionally, the pedestrian-flow parameters and behavior characteristics determined through extensive experimental research can be applied in traffic-signal design, traffic-signal optimization, and microsimulation model calibration.

Key words: Signalized intersection, unsignalized midblock crossing, permitted turn, saturation flow, capacity, pedestrian flow, crossing speed

Scientific Field: Traffic engineering

Field of Academic Expertise: Traffic control and management

UDC nuber:

САДРЖАЈ

СПИСАК ТАБЕЛА	IV
СПИСАК ГРАФИКА	VI
СПИСАК СЛИКА	IX
1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА	1
1.1. ПРЕДМЕТ, ЦИЉЕВИ И ХИПОТЕЗЕ У ИСТРАЖИВАЊУ	4
1.2. ОЧЕКИВАНИ ДОПРИНОС.....	5
1.3. ПРИКАЗ САДРЖАЈА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ.....	6
2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ	7
2.1. МОДЕЛИ ЗАСИЋЕНОГ САОБРАЋАЈНОГ ТОКА НЕЗАШТИЋЕНИХ СКРЕТАЊА.....	7
2.1.1. Вебстеров модел.....	7
2.1.2. Амерички модел.....	9
2.1.3. Аустралијски модел.....	11
2.1.4. Модел за утврђивање засићеног тока незаштићеног десног скретања у микроимулационом моделу SIDRA	14
2.1.5. Канадски модел.....	15
2.1.6. Фински модел.....	18
2.1.7. Шведски модел.....	18
2.1.8. Немачки модел	20
2.1.9. Дански модел.....	22
2.1.10. Домаће препоруке.....	24
2.1.11. Експериментална истраживања утицаја пешачког тока на возила у скретању.....	25
2.1.12. Дискусија о представљеним моделима и резултатима истраживања засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања	26
2.2. ИСТРАЖИВАЊА УТИЦАЈА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА НА САОБРАЋАЈНИ ПРОЦЕС НА НЕСИГНАЛИСАНИМ УКРШТАЊИМА.....	29
2.2.1. Методологија за утврђивање нивоа услуге на деоницама у приручнику НСМ7	29
2.2.2. Методологија за утврђивање нивоа услуге на несигналисаним раскрсницама у приручнику НСМ7	32
2.2.3. Експериментална истраживања утицаја пешачких токова на саобраћајни процес на несигналисаним укрштањима	35
2.2.4. Дискусија о представљеним приступима у моделирању утицаја пешачких токова на несигналисаним укрштањима.....	36
2.3. ПРЕГЛЕД ИСТРАЖИВАЊА КАРАКТЕРИСТИКА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА	36
2.3.1. Преглед истраживања карактеристика пешачких токова на сигналисаним укрштањима	37
2.3.2. Дискусија о представљеним резултатима истраживања карактеристика пешачких токова на сигналисаним укрштањима	45
2.3.3. Преглед истраживања карактеристика пешачких токова на несигналисаним пешачким прелазима на пресеку.....	47
2.3.4. Дискусија о представљеним резултатима истраживања карактеристика пешачких токова на несигналисаним укрштањима.....	51
3. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА УТИЦАЈА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА НА САОБРАЋАЈНИ ПРОЦЕС НА УКРШТАЊИМА	53
3.1. ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА.....	53
3.1.1. Предмет истраживања - сигналисана укрштања.....	53

3.1.2. Предмет истраживања - несигналисана укрштања.....	54
3.2. ИЗБОР ЛОКАЦИЈА ИСТРАЖИВАЊА.....	54
3.2.1. Избор локација истраживања - сигналисана укрштања.....	55
3.2.2. Избор локација истраживања - несигналисана укрштања.....	63
3.3. ДЕФИНИСАЊЕ ПЕРИОДА ИСТРАЖИВАЊА.....	68
3.3.1. Дефинисање периода истраживања – сигналисана укрштања.....	69
3.3.2. Дефинисање периода истраживања – несигналисана укрштања.....	69
3.4. МЕТОДА И ТЕХНИКА ИСТРАЖИВАЊА.....	70
3.4.1. Метода и техника истраживања – сигналисана укрштања.....	70
3.4.2. Метода и техника истраживања – несигналисана укрштања.....	71
3.5. ОБРАДА СНИМАКА И ФОРМИРАЊЕ БАЗЕ ПОДАТАКА.....	71
3.5.1. Обрада снимка и формирање базе података – сигналисана укрштања.....	73
3.5.2. Обрада снимка и формирање базе података – несигналисана укрштања.....	76
4. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА.....	78
4.1. КАРАКТЕРИСТИКЕ ПЕШАЧКИХ ТОКОВА.....	78
4.1.1. Расподела започињања опслуживања пешака на сигналисаним укрштањима.....	78
4.1.2. Ефективна ширина пешачког прелаза.....	81
Анализа ефективне ширине пешачког прелаза на сигналисаним укрштањима.....	81
Анализа ефективне ширине пешачког прелаза на несигналисаним укрштањима.....	83
4.1.3. Интервал слеђења пешака.....	84
Анализа интервала слеђења пешака на сигналисаним укрштањима.....	85
Анализа интервала слеђења пешака на несигналисаним укрштањима.....	87
4.1.4. Брзина пешака приликом преласка.....	87
Анализа брзине пешака приликом преласка на сигналисаним укрштањима.....	88
Анализа брзине пешака приликом преласка на несигналисаним укрштањима.....	90
4.1.5. Време реакције пешака на почетак зеленог сигналног појма на сигналисаним укрштањима.....	91
4.1.6. Временски губици пешака на несигналисаним укрштањима.....	92
4.1.7. Поређење карактеристика пешачких токова на сигналисаним и несигналисаним укрштањима.....	93
4.2. КАРАКТЕРИСТИКЕ ВОЗАЧКИХ ТОКОВА.....	94
4.2.1. Време реакције возача на почетак зеленог сигналног појма.....	95
4.2.2. Брзина првог возила у реду на сигналисаним укрштањима.....	96
4.2.3. Интервал слеђења возила.....	97
Анализа интервала слеђења возила на сигналисаним укрштањима.....	100
Анализа интервала слеђења возила на несигналисаним укрштањима.....	102
4.2.4. Прихватљив интервал слеђења.....	103
Анализа прихватљивог интервала слеђења на сигналисаним укрштањима.....	104
Анализа прихватљивог интервала слеђења на несигналисаним укрштањима.....	108
4.2.5. Величина конфликтне зоне.....	112
Утврђивање дужине конфликтне зоне на сигналисаним укрштањима.....	113
Утврђивање дужине конфликтне зоне на несигналисаним укрштањима.....	116
4.2.6. Поређење карактеристика возачких токова на сигналисаним и несигналисаним укрштањима.....	118
5. ФОРМИРАЊЕ И ТЕСТИРАЊЕ МОДЕЛА.....	119

5.1. ФОРМИРАЊЕ МОДЕЛА ЗА ПРОРАЧУН ЗАСИЋЕНОГ САОБРАЋАЈНОГ ТОКА НЕЗАШТИЋЕНОГ СКРЕТАЊА.....	119
5.2. ТЕСТИРАЊЕ И ПОРЕЂЕЊЕ МОДЕЛА ЗАСИЋЕНОГ САОБРАЋАЈНОГ ТОКА НЕЗАШТИЋЕНОГ СКРЕТАЊА	125
5.3. ФОРМИРАЊЕ МОДЕЛА ЗА УТВРЂИВАЊЕ КАПАЦИТЕТА САОБРАЋАЈНЕ ТРАКЕ У ЗОНИ НЕСИГНАЛИСАНОГ ПЕШАЧКОГ ПРЕЛАЗА НА ДЕОНИЦИ.....	127
5.4. ТЕСТИРАЊЕ МОДЕЛА ЗА УТВРЂИВАЊЕ КАПАЦИТЕТА САОБРАЋАЈНЕ ТРАКЕ У ЗОНИ НЕСИГНАЛИСАНОГ ПЕШАЧКОГ ПРЕЛАЗА НА ДЕОНИЦИ.....	130
6. ПРЕПОРУКЕ ЗА ПРАКТИЧНУ ПРИМЕНУ	132
6.1. ПРАКТИЧНА ПРИМЕНА МОДЕЛА ЗА ПРОРАЧУН ЗАСИЋЕНОГ ТОКА.....	132
6.2. АЛТЕРНАТИВНИ ТРЕТМАН СКРЕТАЊА КОЈА ИМАЈУ КОНФЛИКТ СА ПЕШАЦИМА.....	133
7. ЗАКЉУЧЦИ И ПРАВЦИ БУДУЋИХ ИСТРАЖИВАЊА	137
ЛИТЕРАТУРА.....	142
ПРИЛОЗИ.....	149
Прилог 1. ПРАКТИЧНА ПРИМЕНА МОДЕЛА ЗАСИЋЕНОГ САОБРАЋАЈНОГ ТОКА НЕЗАШТИЋЕНОГ СКРЕТАЊА.....	149
Прилог 2. Код МАСРО-А КРЕИРАНОГ ЗА ПОТРЕБЕ ИСТРАЖИВАЊА.....	158
БИОГРАФИЈА АУТОРА.....	159
ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ	160
ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ ДОКТОРСКОГ РАДА.....	161
ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ	162

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 2.1. Базне вредности засићеног саобраћајног тока у зависности од ширине прилаза (Webster & Cobbe, 1966).....	8
Табела 2.2. Утицај непосредног окружења раскрснице на вредност засићеног саобраћајног тока (Webster & Cobbe, 1966)	8
Табела 2.3. Базне вредности засићеног саобраћајног тока у приручнику HCM7 (Transportation Research Board, 2022).....	9
Табела 2.4. Просечне вредности засићеног саобраћајног тока у зависности од типа окружења и типа саобраћајне траке (Akcelik, 1981)	11
Табела 2.5. Вредности еквивалента e_i за превођење возило-маневар i у путнички аутомобил право (Akcelik, 1981).....	12
Табела 2.6. Упоредни приказ досадашњих методологија у утврђивању вредности засићеног саобраћајног тока незаштићених скретања.....	27
Табела 2.7. Вредности фактора утицаја попречног профила у зависности од типа разделног острва и постојања ивичњака (Transportation Research Board, 2022)	31
Табела 2.8. Вредности фактора утицаја густине приступа у зависности од густине приступа и броја трака право (Transportation Research Board, 2022)	31
Табела 2.9. Базна вредност критичног интервала слеђења у зависности од типа манавра и типа саобраћајнице (Transportation Research Board, 2022)	33
Табела 2.10. Базна вредност интервала слеђења возила у зависности од типа манавра и типа саобраћајнице (Transportation Research Board, 2022)	34
Табела 2.11. Препоручене вредности брзине пешака у литератури	38
Табела 2.12. Упоредни приказ досадашњих истраживања и утицајних променљивих на брзину пешака на сигналисаним укрштањима.....	46
Табела 2.13. Упоредни приказ досадашњих истраживања и утицајних променљивих на брзину пешака на несигналисаним укрштањима.....	51
Табела 3.1. Неке од потенцијалних локација истраживања – сигналисана укрштања.....	55
Табела 3.2. Упоредни приказ карактеристика локација истраживања - сигналисана укрштања.....	61
Табела 3.3. Потенцијалне локације истраживања – несигналисана укрштања.....	64
Табела 3.4. Упоредни приказ карактеристика локација истраживања - несигналисана укрштања.....	67
Табела 3.5. Обим спроведених истраживања по локацијама сигналисаних укрштања ...	75
Табела 3.6. Обим спроведених истраживања по локацијама несигналисаних укрштања	77
Табела 4.1. Дескриптивна статистика интервала слеђења пешака на сигналисаним укрштањима.....	85
Табела 4.2. Статистика добијене зависности просечног интервала слеђења и броја пешака по циклусу на сигналисаним укрштањима	86
Табела 4.3. Дескриптивна статистика интервала слеђења пешака на несигналисаним укрштањима.....	87
Табела 4.4. Дескриптивна статистика брзине пешака на сигналисаним укрштањима ...	89
Табела 4.5. Дескриптивна статистика брзине пешака на несигналисаним укрштањима	90
Табела 4.6. Дескриптивна статистика времена реакције пешака на сигналисаним укрштањима.....	91

Табела 4.7. Дескриптивна статистика временских губитака пешака на несигналисаним укрштањима.....	92
Табела 4.8. Дескриптивна статистика времена реакције првог возила у скретању	95
Табела 4.9. Дескриптивна статистика брзине првог возила у скретању на сигналисаним укрштањима.....	97
Табела 4.10. Дескриптивна статистика интервала слеђења возила на сигналисаним укрштањима.....	100
Табела 4.11. Дескриптивна статистика интервала слеђења према редном броју возила у плотуну на сигналисаним укрштањима.....	101
Табела 4.12. Просечне вредности интервала слеђења према редном броју возила у плотуну на сигналисаним укрштањима.....	102
Табела 4.13. Дескриптивна статистика интервала слеђења возила на несигналисаним укрштањима.....	102
Табела 4.14. Дескриптивна статистика прихваћених и одбијених интервала слеђења на сигналисаним укрштањима.....	104
Табела 4.15. Упоредни приказ критичне вредности прихватљивог интервала слеђења утврђених различитим методама на сигналисаним укрштањима	108
Табела 4.16. Дескриптивна статистика прихваћених и одбијених интервала слеђења на несигналисаним укрштањима.....	108
Табела 4.17. Упоредни приказ критичне вредности прихватљивог интервала слеђења утврђених различитим методама на несигналисаним укрштањима	112
Табела 4.18. Дескриптивна статистика растојања уласка у конфликтну зону зависно од смера првог пешака на сигналисаним укрштањима	114
Табела 4.19. Дескриптивна статистика растојања изласка из конфликтне зоне зависно од смера првог пешака на сигналисаним укрштањима	115
Табела 4.20. Дескриптивна статистика растојања уласка у конфликтну зону зависно од смера првог пешака на несигналисаним укрштањима	116
Табела 4.21. Дескриптивна статистика растојања изласка из конфликтне зоне зависно од смера првог пешака на несигналисаним укрштањима	117
Табела 4.22. Упоредни приказ критичних вредности прихватљивих интервала слеђења на сигналисаним и несигналисаним укрштањима.....	118
Табела 5.1. Статистика добијене зависности експандираног времена окупирања конфликтне зоне и експандираног интензитета пешачког тока	123
Табела 5.2. Статистика добијене зависности засићеног тока незаштићеног скретања и експандираног времена блокирања.....	124
Табела 5.3. Вредности RMSE и MAPE по моделима	126
Табела 5.4. Статистика добијене зависности експандираног времена окупирања конфликтне зоне и експандираног интензитета пешачког тока на несигналисаним укрштањима.....	129
Табела 5.5. Статистика добијене зависности капацитета саобраћајне траке и експандираног времена блокирања на несигналисаним укрштањима	130
Табела 6.1. Статистика добијене зависности времена окупирања конфликтне зоне и броја пешака на нивоу циклуса на сигналисаним укрштањима	135
Табела 6.2. Карактеристике детектора који се могу применити за утврђивање броја накупљених пешака (Lin и остали, 2019).....	136

СПИСАК ГРАФИКА

График 4.1. Расподела започињања опслуживања пешака на сигналисаним укрштањима.....	79
График 4.2. Ефективна ширина пешачког прелаза на сигналисаним укрштањима.....	82
График 4.3. Ефективна ширина пешачког прелаза на несигналисаним укрштањима.....	84
График 4.4. Фреквенција интервала слеђења пешака на сигналисаним укрштањима.....	85
График 4.5. Расподела интервала слеђења пешака на сигналисаним укрштањима.....	85
График 4.6. Зависност просечног интервала слеђења пешака од броја пешака по циклусу на сигналисаним укрштањима.....	86
График 4.7. Фреквенција интервала слеђења пешака на несигналисаним укрштањима.....	87
График 4.8. Расподела интервала слеђења пешака на несигналисаним укрштањима.....	87
График 4.9. Фреквенција брзина пешака на сигналисаним укрштањима.....	89
График 4.10. Расподела брзина пешака на сигналисаним укрштањима.....	89
График 4.11. Фреквенција брзина пешака на несигналисаним укрштањима.....	90
График 4.12. Расподела брзина пешака на несигналисаним укрштањима.....	90
График 4.13. Расподела времена реакције пешака на сигналисаним укрштањима.....	92
График 4.14. Расподела временских губитака пешака на несигналисаним укрштањима.....	93
График 4.15. Упоредни приказ расподела брзина пешака на сигналисаним и несигналисаним укрштањима.....	94
График 4.16. Фреквенција времена реакције возила на сигналисаним укрштањима.....	96
График 4.17. Расподела времена реакције возила на сигналисаним укрштањима.....	96
График 4.18. Фреквенција брзине првог возила на сигналисаним укрштањима.....	97
График 4.19. Расподела брзине првог возила на сигналисаним укрштањима.....	97
График 4.20. Фреквенција интервала слеђења возила на сигналисаним укрштањима.....	100
График 4.21. Расподела интервала слеђења возила на сигналисаним укрштањима.....	100
График 4.22. Зависност просечног интервала слеђења од редног броја возила у плотуну на сигналисаним укрштањима.....	101
График 4.23. Фреквенција интервала слеђења возила на несигналисаним укрштањима.....	103
График 4.24. Расподела интервала слеђења возила на несигналисаним укрштањима.....	103
График 4.25. Расподела прихваћених интервала слеђења на сигналисаним укрштањима.....	105
График 4.26. Расподела одбијених интервала слеђења на сигналисаним укрштањима.....	105
График 4.27. Вероватноћа појаве прихватљивог интервала слеђења у зависности од броја пешака по циклусу на сигналисаним укрштањима.....	105
График 4.28. Greenshields метода утврђивања критичне вредности прихватљивог интервала слеђења на сигналисаним укрштањима.....	106
График 4.29. Raff метода утврђивања критичне вредности прихватљивог интервала слеђења на сигналисаним укрштањима.....	106
График 4.30. Sieglösch метода утврђивања критичне вредности прихватљивог интервала слеђења на сигналисаним укрштањима.....	107

График 4.31. Расподела прихваћених интервала слеђења на несигналисаним укрштањима.....	109
График 4.32. Расподела одбијених интервала слеђења на несигналисаним укрштањима	109
График 4.33. Вероватноћа појаве прихватљивог интервала слеђења у зависности од броја пешака по периоду на несигналисаним укрштањима.....	109
График 4.34. Greenshields метода утврђивања критичне вредности прихватљивог интервала слеђења на несигналисаним укрштањима	110
График 4.35. Raff метода утврђивања критичне вредности прихватљивог интервала слеђења на несигналисаним укрштањима	110
График 4.36. Siegloch метода утврђивања критичне вредности прихватљивог интервала слеђења на несигналисаним укрштањима	111
График 4.37. Расподела растојања уласка пешака у конфликтну зону зависно од смера првог пешака на сигналисаним укрштањима	114
График 4.38. Расподела растојања изласка пешака из конфликтне зоне на сигналисаним укрштањима.....	115
График 4.39. Расподела растојања уласка пешака у конфликтну зону зависно од смера првог пешака на несигналисаним укрштањима	116
График 4.40. Расподела растојања изласка пешака из конфликтне зоне зависно од смера последњег пешака на несигналисаним укрштањима	117
График 5.1. Зависност експандираног времена блокирања и експандираног времена окупирања на сигналисаним укрштањима	122
График 5.2. Зависност експандираног времена окупирања конфликтне зоне од експандираног интензитета пешачког тока на сигналисаним укрштањима	123
График 5.3. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од експандираног времена блокирања.....	124
График 5.4. Поређење вредности засићеног тока утврђених формираним моделом, као и ССГ3 и НСМ7 моделима са реалним подацима са Р8, Р10 и Р11.....	125
График 5.5. Зависност експандираног времена блокирања и експандираног времена окупирања на несигналисаним укрштањима	128
График 5.6. Зависност експандираног времена окупирања конфликтне зоне од експандираног интензитета пешачког тока на несигналисаним укрштањима	129
График 5.7. Зависност капацитета саобраћајне траке право на деоници од експандираног времена блокирања.....	130
График 5.8. Поређење вредности капацитета утврђене формираним моделом са реалним подацима са ПЗ.....	131
График 6.1. Зависност времена окупирања конфликтне зоне од броја пешака на нивоу циклуса на сигналисаним укрштањима.....	135
График П.1. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 10 m.....	149
График П.2. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 15 m.....	150
График П.3. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 20 m.....	151
График П.4. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 25 m.....	152

График П.5. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 30 m.....	153
График П.6. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 35 m.....	154
График П.7. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 40 m.....	155
График П.8. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 45 m.....	156
График П.9. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 50 m.....	157

СПИСАК СЛИКА

Слика 2.1. Комбинације утицајних фактора на засићен саобраћајни ток и смернице за доношење одлуке (Terly и остали, 2008).....	16
Слика 2.2. Фактор утицаја пешака у зависности од експандираног интензитета пешачког тока у односу на стварно зелено време пешачког тока (Terly и остали, 2008)	18
Слика 2.3. Фактор утицаја радијуса скретања (Wu, 2015).....	21
Слика 2.4. Зависност засићеног саобраћајног тока десног скретања од интензитета пешачког тока (Станић, 1991)	24
Слика 3.1. Примери плана фаза у случају незаштићеног опслуживања скретања.....	58
Слика 3.2. Примери раскрсница погодних за истраживање опслуживања левих скретања која имају конфликт само са пешацима	59
Слика 3.3. Потенцијалне и одабране локације истраживања – сигналисана укрштања..	60
Слика 3.4. Приказ Р1 Војислава Илића – Мис Ирбијеве - Римска.....	62
Слика 3.5. Приказ Р2 Војислава Илића – Господара Вучића.....	62
Слика 3.6. Приказ Р3 Господара Вучића – Булевар краља Александра – Вјекослава Ковача.....	62
Слика 3.7. Приказ Р4 Батутова - Булевар краља Александра – Станислава Сремчевића.	62
Слика 3.8. Приказ Р5 Булевар краља Александра – Краљице Марије - Синђелићева	62
Слика 3.9. Приказ Р6 Јужни булевар – Максима Горког	62
Слика 3.10. Приказ Р7 Драгице Кончар – Светозара Радојичића – Браће Јерковића.....	63
Слика 3.11. Приказ Р8 Устаничка - Војислава Илића	63
Слика 3.12. Приказ Р9 Катанићева - Макензијева - Курсулина	63
Слика 3.13. Приказ Р10 Кондина – Светогорска - Цетињска - Македонска.....	63
Слика 3.14. Приказ Р11 Николаја Кравцова – Булевар Вудроа Вилсона.....	63
Слика 3.15. Потенцијалне и одабране локације истраживања – несигналисана укрштања	67
Слика 3.16. Приказ П1 Омладинских бригада	68
Слика 3.17. Приказ П2 Војислава Илића	68
Слика 3.18. Приказ П3 Крунска	68
Слика 3.19. Приказ исечка из видео-записа на Р5 (лево) и Р11 (десно)	70
Слика 3.20. Приказ исечка из видео-записа на П1 (лево) и П2 (десно)	71
Слика 3.21. Пример дефинисаних сегмената ефективне ширине пешачког прелаза на сигналасаној раскрсници.....	73
Слика 3.22. Пример дефинисаних сегмената ефективне ширине несигналасаног пешачког прелаза.....	73
Слика 3.23. Приказ дефинисаних догађаја тј. одговарајућих позиција возила при скретању	74
Слика 3.24. Приказ дефинисаних догађаја тј. одговарајућих позиција пешака приликом преласка пешачког прелаза на сигналасаној раскрсници.....	74
Слика 3.25. Приказ дефинисаних догађаја тј. одговарајућих позиција возила при проласку дуж деонице	76
Слика 3.26. Приказ дефинисаних догађаја тј. одговарајућих позиција пешака приликом преласка несигналасаног пешачког прелаза.....	76

Слика 4.1. Графички приказ сакупљеног пешачког тока по дужини на сигналисаним укрштањима.....	80
Слика 4.2. Графички приказ раширеног пешачког тока по ширини на сигналисаним укрштањима.....	80
Слика 4.3. Пример евидентирања сегмента на коме пешак започиње прелазак.....	81
Слика 4.4. Пример косог правца преласка на пешачком прелазу	88
Слика 4.5. Опслуживање реда у скретању на сигналисаним укрштањима у форми једног плотуна	98
Слика 4.6. Опслуживање реда дуж деонице на несигналисаним укрштањима у форми једног плотуна	98
Слика 4.7. Опслуживање реда у скретању на сигналисаним укрштањима у форми више плотуна	99
Слика 4.8. Опслуживање реда дуж деонице на несигналисаним укрштањима у форми више плотуна.....	99
Слика 4.9. ROC крива за проверу поузданости Logit модела на сигналисаним укрштањима.....	107
Слика 4.10. ROC крива за проверу поузданости Logit модела – несигналисана укрштања	111
Слика 4.11. Дефинисање растојања уласка у конфликтну зону.....	113
Слика 4.12. Дефинисање растојања изласка из конфликтне зоне.....	113
Слика 6.1. Предложени алгоритам одлучивања о ранијем почетку зеленог сигналног појма за пешачке токове.....	134
Слика 6.2. Хипотетичка раскрсница са потребним детекторима за примену предложеног алгоритма	134
Слика 6.3. Предложени дијаграм стања.....	134

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Урбане средине се суочавају са растућом неравнотежом између саобраћајних захтева и капацитета саобраћајне мреже, чије последице осећају корисници саобраћајног система. Последице се огледају у ниском нивоу услуге свих корисника саобраћајног система, загађењу животне средине, што доводи и до лошијег квалитета живота. Стога је усклађен и квалитетан саобраћајни систем предуслов за функционисање свих сегмената урбаних средина. Настанак неравнотеже између саобраћајних захтева и капацитета се, према старом концепту, решавао додавањем нових саобраћајних капацитета. Међутим, повећање капацитета се није показало као одрживо решење насталог проблема, нити је данас могуће, јер су урбане средине већ оформљене и простор је ограничен. Дакле, неопходно је пронаћи најповољније решење искоришћења расположивих капацитета, што се постиже управљањем саобраћајем.

Критичне елементе у саобраћајном систему, са аспекта ефикасности и безбедности саобраћаја, представљају тачке укрштања саобраћајних токова. У зависности од категорије корисника, могућа је реализација укрштања токова истих категорија - возачки токови, или укрштања токова различитих категорија - возачки и пешачки токови. Возачки и пешачки токови се могу укрштати на раскрсницама и на пешачким прелазима на пресеку, који се изводе да би се смањило растојање пешачења пешака приликом преласка саобраћајнице у случају већих раздаљина између суседних раскрсница или позиције стајалишта возила јавног превоза и слично.

Зависно од начина регулације, тачке укрштања ових токова могу бити несигнализоване, односно регулисане саобраћајним знаковима и сигнализоване, регулисане светлосним сигнаlima. На несигнализаним раскрсницама и пешачким прелазима, сви токови се истовремено опслужују, а приоритет при проласку је дефинисан знаковима приоритета и општим правилима саобраћаја. Дакле, несигнализани пешачки прелаз на пресеку деонице представља укрштање са истовременим опслуживањем пешачког и возачког тока. С друге стране, на раскрсницама и пешачким прелазима регулисаним светлосним сигнаlima истовремено се могу опслуживати само токови чије се путање не укрштају (компатибилни) и токови из истих праваца чије се путање укрштају (условно компатибилни), док су токови из различитих праваца некомпатибилни и опслужују се у одвојеним временским периодима. Условно компатибилни токови се могу опслужити као заштићени, што подразумева да током опслуживања ти токови немају конфликт ни са једним другим саобраћајним током. Заштићено опслуживање токова захтева формирање већег броја фаза, што даље утиче на повећање временских губитака осталих токова на раскрсници. Такође, условно компатибилни токови се могу опслуживати и као незаштићени, што подразумева истовремено опслуживање ових токова, при чему је првенство пролаза дефинисано правилима саобраћаја. Дакле, раскрсница са незаштићеним опслуживањем токова у левом или десном скретању представља укрштање са истовременим опслуживањем токова у скретању и паралелних пешачких токова, који су међусобно условно компатибилни.

Регулација саобраћаја на укрштањима саобраћајних токова је изазовно, с обзиром на то да се ту суочавају међусобно конфликтни саобраћајни токови који имају исти циљ – безбедно опслуживање уз минималне временске губитке. Од посебног интереса је укрштање возачких и пешачких токова, јер је њихова интеракција уобичајена појава у урбаним срединама где пешаци имају потребу за честим преласцима улице (Zhao и остали, 2020). Ипак, истовремено опслуживање возачких и пешачких токова може бити условљено другим критеријумима. Наиме, на сигнализаним раскрсницама се десна

скретања и лева скретања без конфликтног тока право (из једносмерних улица и на трокраким раскрсницама) углавном истовремено опслужују са конфликтним пешачким токовима, јер опслуживање скретања као заштићених неповољно утиче на ефикасност осталих токова на раскрсници. С друге стране, пешачки прелази на пресеку су често несигналисани, јер нису увек испуњени критеријуми за увођење светлосних сигнала. Без обзира на начин регулисања пешачких прелаза, пешаци према правилима саобраћаја имају првенство пролаза, тако да је међусобни утицај ових токова неминован. У инжењерској пракси је неопходно познавати тај утицај и параметре од којих зависи, како би могла бити дефинисана одговарајућа решења за регулисање и управљање саобраћајним токовима на укрштањима.

Уколико посматрамо сигнализоване раскрснице, као места укрштања саобраћајних токова, управљање прерасподелом расположивих капацитета међу конфликтним саобраћајним токовима се постиже применом светлосних сигнала (Челар и остали, 2018). Начин рада светлосних сигнала је резултат поступка оптимизације, који се доминантно заснива на токовима моторних возила. Основни улазни параметар у том поступку је засићен саобраћајни ток, тј. максималан број путничких аутомобила који би прошао кроз раскрсницу када би зелени сигнални појам трајао сат времена и постојао константан захтев (Челар и остали, 2018). Прецизно утврђивање вредности засићеног тока је од круцијалног значаја за квалитетно спровођење поступка оптимизације параметара рада светлосних сигнала. Важно је напоменути да се вредност засићеног саобраћајног тока разликује за токове право и за скретања, при чему у случају скретања та вредност зависи и од начина опслуживања токова и геометрије раскрснице. Дакле, вредност засићеног саобраћајног тока неће бити иста када се скретање опслужује и када се не опслужује истовремено са пешацима. С обзиром на то да заштићено опслуживање левог или десног скретања захтева формирање већег броја фаза и неповољно утиче на ефикасност опслуживања осталих токова на раскрсници, скретања која имају конфликт само са пешацима се најчешће опслужују незаштићено. Из тог разлога, неопходно је прецизно квантификовати утицај пешачких токова на засићен ток и капацитет скретања, чиме би се створила основа за пројектовање система управљања саобраћајем (Chen и остали, 2008).

Вредност засићеног тока може се утврдити истраживањем на терену, али је у одређеним ситуацијама неопходно вредност засићеног тока утврдити применом модела (нпр. увођење светлосних сигнала, изградња нове раскрснице, промена геометрије постојеће раскрснице или промена начина опслуживања токова). Из тог разлога је засићен саобраћајни ток, од дефинисања тог појма, педесетих година прошлог века, био предмет бројних научних истраживања која су резултирала формирањем великог броја модела за утврђивање вредности засићеног тока. Ипак, релевантни модели засићеног тока углавном се заснивају на емпиријским истраживањима спроведеним крајем 20. века, а чињеница је да су се карактеристике саобраћајних система измениле током година.

Моделирање засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања је комплексно с обзиром на велики број параметара који утичу на опслуживање ових скретања. Један од првих модела за прорачун засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања, представљен у Вебстеровом приручнику, не разматра експлицитно утицај пешачких токова, већ тај утицај описује кроз карактеристике непосредног окружења раскрснице (Webster & Cobbe, 1966). Сличан приступ је примењен и у аустралијском моделу, за мањи и средњи интензитет пешачког тока (Akcelik, 1981). Међутим, с временом је уочен значај прецизног квантификовања утицаја пешачких токова на вредност засићеног тока. С тим у вези, развијени су модели за прорачун засићеног тока незаштићеног скретања који се

заснивају на интензитету пешачких токова, као параметру који највише утиче на карактеристике опслуживања незаштићених скретања. Углавном нису разматрани други потенцијално утицајни фактори на вредност засићеног тока незаштићеног скретања, као што су параметри рада светлосних сигнала и геометрија раскрснице. Модели који ипак разматрају параметре рада светлосних сигнала (шведски, дански и немачки модел), захтевају познавање експлицитних вредности ових параметара (Bang, 1978; Trafikverket, 2014; Bang и остали, 2016; Vejdirektoratet, 2010; Vejdirektoratet, 2019; FGSV, 2015). Практична примена наведених модела је отежана, имајући у виду чињеницу да параметри рада светлосних сигнала нису познати у тренутку прорачуна засићеног тока, тј. пре поступка оптимизације.

С друге стране, већина постојећих модела није универзална у примени за незаштићена лева и десна скретања која имају конфликт искључиво са пешацима. Тачније, само се шведски и фински модел, као и домаће препоруке, могу применити и за лево и за десно скретање (Bang, 1978; Trafikverket, 2014; Bang и остали, 2016; Niittymäki & Pursula, 1997). Релевантни модели за прорачун засићеног тока незаштићених скретања која имају конфликт са пешацима односе се искључиво на десно скретање. Тачније, најчешће примењивани модели, представљени у приручнику *Highway Capacity Manual* (НСМ) и аустралијском приручнику, могу се применити и за лево скретање из једносмерне улице, које при томе има конфликт са пешацима (Transportation Research Board, 2022; Akcelik, 1981). Иако овакво лево скретање има сличне оперативне карактеристике као десно скретање, не може се безусловно поистоветити са левим скретањем које није из једносмерне улице. Лева скретања која имају конфликт само са пешацима, а нису из једносмерне улице, постоје на трокраким раскрсницама или четворокраким раскрсницама на којима је супротни крак једносмеран излаз. Из наведеног произлази потреба за формирањем универзалног модела који се може применити за прорачун засићеног тока незаштићених десних и левих скретања која имају конфликт са пешацима.

Важно је осврнути се и на чињеницу да се у поступцима оптимизације параметара рада светлосних сигнала пешачки токови третирају само кроз минимално време неопходно за прелазак пешачког прелаза одређене дужине. Без обзира на примењену методу, прорачун минималног зеленог и заштитног времена, којима се обезбеђује безбедан прелазак пешака, заснива се на параметрима пешачких токова (брзина, време реакције, интервал слеђења итд.). Међутим, досадашња истраживања углавном се баве само брзином пешачких токова и закључују да постоји тенденција промене општеприхваћене вредности брзине пешака. Тачније, утврђено је да се брзина кретања пешака променила током времена, али и да се значајно разликује међу локацијама, што указује на потребу ревизије те вредности због безбеднијег и ефикаснијег управљања саобраћајем на раскрсницама (Wu и остали, 2017). Приручници углавном препоручују јединствене вредности брзине пешака које не узимају у обзир утицајне факторе као што су дужина пешачког прелаза, параметри рада светлосних сигнала и интензитет пешачких токова (Zhang и остали, 2011). Ипак, многа истраживања су показала да постоје бројни фактори који у мањој или већој мери утичу на брзину пешака, те се може закључити да јединствена брзина није увек оптимално решење (Коцић Стојановић, 2024). У складу са тим, истиче се потреба за познавањем карактеристика и параметара опслуживања пешачких токова од којих зависи њихово ефикасно и безбедно опслуживање, као најрањивијих корисника саобраћајног система.

Уколико посматрамо несигналисане пешачке прелазе, познати су различити начини посматрања утицаја пешака на возачке токове, зависно од локације пешачког прелаза. Пешачки прелази на пресеку представљају прелазе који се налазе на деоницама урбаних

саобраћајница између две раскрснице. У приручнику НСМ се дефинишу бројни утицаји на брзину путовања дуж деонице, као показатеља нивоа услуге, а један од тих утицаја јесте прелазак пешака на несигналисаним пешачком прелазу на пресеку. Међутим, метода за квантификовање утицаја пешака није дефинисана, већ је препорука да се, уколико постоји утицај пешака, временски губици настали услед пропуштања пешака утврде применом неке друге методе (Transportation Research Board, 2022). С друге стране, пешачки прелази могу бити лоцирани и на несигналисаним раскрсницама. На овим раскрсницама, токови који се крећу право и десно на главној саобраћајници су приоритетни и имају конфликт само са пешацима. Исти приручник ниво услуге на несигналисаној раскрсници утврђује на основу капацитета неприоритетних токова на раскрсници. Међутим, у оквиру методологије прорачуна капацитета дефинише се да токови право на приоритетном правцу немају ометања од стране пешака, иако возачи у реалним условима морају пропустити пешаке. Дакле, утицај пешака се занемарује, што се истиче као ограничење методологије (Transportation Research Board, 2022). Други приступ у истраживању утицаја пешачких токова се заснива на фундаменталним зависностима основних параметара саобраћајног тока – брзине, густине и протока. Проток је параметар којим се најчешће описује саобраћајни ток, али утврђивање густине и брзине повећава обим и цену истраживања. Пред тога, овакав приступ у истраживању потврђује утицај пешака (Kadali и остали, 2015), али не дефинише зависност капацитета деонице или саобраћајне траке од интензитета пешачког тока. У складу са наведеним, може се закључити да недостају методе за квантификовање утицаја пешачких токова у зони несигналисаним пешачког прелаза.

Истраживање карактеристика и утврђивање параметара пешачких и возачких токова на укрштањима представља неопходан предуслов за квалитетно и безбедно опслуживање пешака, као најрањивијих учесника у саобраћају. Такође, израда и евалуација пројектантских решења регулисања и управљања саобраћајним токовима на укрштањима заснивају се на познавању утицаја карактеристика пешачких токова на понашање возачких токова. У складу са тим, а на основу анализе досадашњих релевантних истраживања из предметне области, основни **МОТИВИ** за израду ове докторске дисертације су истраживање карактеристика пешачких и возачких токова и формирање модела за утврђивање утицаја пешачких токова на саобраћајни процес на укрштањима.

1.1. ПРЕДМЕТ, ЦИЉЕВИ И ХИПОТЕЗЕ У ИСТРАЖИВАЊУ

Предмет ове докторске дисертације је испитивање међусобне интеракције пешачких и возачких токова који се истовремено опслужују на сигналисаним и несигналисаним укрштањима. Задатак дисертације је експерименталним путем истражити кључне параметре опслуживања пешачких и возачких токова на сигналисаним и несигналисаним укрштањима, утврдити њихову међузависност и квантификовати утицај параметара пешачких токова на параметре возачких токова. Добијени резултати ће представљати основу за моделирање утицаја пешачких токова на саобраћајни процес на укрштањима.

У складу са тим, **основни научни циљ** ове дисертације је моделирање утицаја пешачких токова на саобраћајни процес на укрштањима. Истраживањем утицаја пешачких токова настојаће се да се одговори на питања и недостатке који су идентификовани кроз анализу досадашње релевантне литературе, као и да се допринесе постизању следећих **специфичних научних циљева** дисертације:

- квантификовање утицаја карактеристика конфликтног пешачког тока на возачке токове у скретању на сигналисаним раскрсницама,

- квантификовање утицаја геометријских карактеристика раскрснице на возачке токове у скретању на сигналисаним раскрсницама,
- квантификовање утицаја начина рада светлосних сигнала на возачке токове у скретању на сигналисаним раскрсницама,
- дефинисање методологије за квантификовање утицаја карактеристика пешачких токова на возачке токове у зони пешачких прелаза на пресеку, и
- утврђивање карактеристика пешачких и возачких токова на укрштањима.

На основу предмета и циљева истраживања, дефинисане су полазне **хипотезе** које заступа докторска дисертација:

- може се квантификовати утицај карактеристика пешачких токова, геометријских карактеристика раскрснице и начина опслуживања саобраћајних токова на вредност засићеног саобраћајног тока незаштићених скретања која имају конфликт само са пешацима на сигналисаним раскрсницама,
- могуће је формирати универзалан модел за прорачун засићеног тока за незаштићена скретања која имају конфликт само са пешацима,
- може се квантификовати и моделирати утицај карактеристика пешачких токова на возачке токове у зони пешачког прелаза на пресеку,
- карактеристике пешачких токова разликују се у зависности од начина регулисања укрштања.

1.2. ОЧЕКИВАНИ ДОПРИНОС

Очекивани резултати спроведених истраживања и научни доприноси дисертације се огледају у:

- идентификовању кључних параметара и квантификовању њиховог утицаја на саобраћајни процес на укрштањима,
- дефинисању методологије експерименталних истраживања пешачких и возачких токова на укрштањима и методологије обраде емпиријских података,
- утврђивању карактеристика пешачких токова који се опслужују истовремено за возачким токовима на сигналисаним и несигналисаним укрштањима, које су описане кроз дефинисане параметре (интензитет, брзина, време реакције, интервал слеђења и сл.) и њихову међузависност,
- утврђивању карактеристика возачких токова на укрштањима које су исказане кроз дефинисане параметре (интензитет, брзина, време реакције, интервал слеђења и сл.) и њихову међузависност,
- формирању и верификацији универзалног модела за утврђивање засићеног тока за десна скретања и незаштићена лева скретања која имају конфликт само са пешацима,
- формирању и верификацији модела за утврђивање утицаја пешачких токова на параметре возачких токова у зони пешачког прелаза на пресеку деонице градске саобраћајнице,
- систематизацији и анализи постојећих модела засићеног саобраћајног тока незаштићених скретања и њихово поређење са формираним моделом,
- дефинисању смерница за доношење одлуке о алтернативном третману скретања у систему управљања саобраћајем на сигналисаним раскрсницама, а у циљу смањења утицаја пешачких токова на ефикасност возачких токова.

Поред научних доприноса, очекује се да ће резултати докторске дисертације имати значајну практичну примену у инжењерској пракси. Формирани модели могу се применити у поступку оптимизације параметара рада светлосних сигнала и у поступку утврђивања нивоа услуге на деоницама. Поред тога, очекује се да ће утврђене вредности параметара саобраћајних токова и њихове расподеле вероватноћа имати практичну примену у поступцима оптимизације параметара рада светлосних сигнала и калибрисања микросимулационих модела у локалним условима.

1.3. ПРИКАЗ САДРЖАЈА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

У складу са дефинисаним предметом, циљевима истраживања и постављеним хипотезама, докторска дисертација је подељена у следећих седам целина:

Уводна разматрања – образложење значаја идентификовања утицаја пешачких токова на саобраћајни процес на укрштањима и потребе за његовим моделирањем; образложење мотива за избор теме, предмета и циљева истраживања; дефинисање хипотеза које заступа докторска дисертација.

Преглед литературе – преглед релевантне литературе, анализа постојећих модела за утврђивање засићеног саобраћајног тока незаштићених скретања, анализа постојећих приступа у моделирању утицаја пешачких токова на возачке токове у зони несигналисаних пешачких прелаза на пресеку, систематизација резултата досадашњих истраживања карактеристика пешачких токова на сигналисаним и несигналисаним укрштањима; поређења, коментари и закључци.

Методологија истраживања утицаја пешачких токова на саобраћајни процес на укрштањима – дефинисање циљева, задатака и предмета истраживања; формулисање критеријума за избор локација на којима ће се извршити истраживање; приказ методологије истраживања на сигналисаним и несигналисаним укрштањима и методологије обраде података.

Резултати истраживања – представљање резултата истраживања понашања и параметара опслуживања пешачких и возачких токова, у међусобној интеракцији на укрштањима; представљање резултата истраживања утицаја пешачких токова на саобраћајни процес на укрштањима; анализа и дискусија резултата истраживања.

Формирање и тестирање модела – приказ процедуре моделирања утицаја пешачких токова на саобраћајни процес на укрштањима - формирање модела за утврђивање засићеног саобраћајног тока незаштићених скретања на сигналисаним укрштањима и модела за утврђивање капацитета деонице у зони несигнализованог пешачког прелаза, основне поставке и ограничења, дефинисање међусобне зависности елемената модела на основу резултата истраживања; тестирање предложених модела на реалним подацима, поређење предложеног модела за прорачун засићеног тока са постојећим релевантним моделима; анализа и дискусија добијених резултата.

Препоруке за практичну примену – препоруке за практичну примену модела у инжењерској пракси; предлог третмана скретања које има конфликт са пешацима као алтернативе заштићеном опслуживању скретања.

Закључци и правци будућих истраживања – сумарни закључци спроведених истраживања; закључци у вези са предложеним моделима, могућности примене, ограничења и препоруке за њихов даљи развој; препоруке и правци даљих истраживања.

2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Преглед релевантне литературе организован је у три сегмента. Први сегмент се односи на досадашња достигнућа у моделирању утицаја пешачких токова на засићен саобраћајни ток незаштићених скретања, други сегмент се односи на досадашње приступе у моделирању утицаја пешачких токова на саобраћајни процес на деоници, док су у трећем сегменту сумирани резултати истраживања карактеристика пешачких токова на сигналисаним и несигналисаним укрштањима.

2.1. МОДЕЛИ ЗАСИЋЕНОГ САОБРАЋАЈНОГ ТОКА НЕЗАШТИЋЕНИХ СКРЕТАЊА

Засићен саобраћајни ток појединачне саобраћајне траке представља максималан број путничких аутомобила који би се могао опслужити у посматраној траци када би зелени сигнални појам трајао сат времена и постојао константан захтев (Челар и остали, 2018). Познавање вредности засићеног саобраћајног тока је значајно у поступку пројектовања и оптимизације, с обзиром на то да представља основни улазни податак при прорачуну параметара рада светлосних сигнала. Такође, засићен саобраћајни ток је неопходан параметар и у евалуацији пројектантских решења.

Засићен саобраћајни ток, поред геометријских и саобраћајних карактеристика, зависи и од типа маневра кретања на раскрсници (Косић и остали, 2022). У случају токова у скретању, засићен саобраћајни ток зависи и од начина опслуживања тих токова. Токови у скретању могу се опслужити као незаштићени тј. истовремено са приоритетним конфликтним пешачким и/или возачким током. У том случају, доминантан утицај на вредност засићеног тока скретања имају карактеристике поменутих приоритетних токова. Уколико ток у скретању има конфликт са пешачким током, карактеристике пешачког тока утичу на вредност засићеног тока и, последично, на саобраћајни процес на сигналисаним укрштањима.

У наставку је дат преглед аналитичких модела за утврђивање засићеног саобраћајног тока незаштићених скретања. Најпре су приказани модели из релевантних приручника у области саобраћајног инжењерства, а потом и модели који су резултат експерименталних истраживања. Уколико модел за прорачун засићеног тока незаштићеног скретања није експлицитно дефинисан, дат је општи облик модела и листа дефинисаних утицајних фактора, док су детаљније представљени само фактори који утичу на засићени ток незаштићеног скретања које има конфликт са пешацима.

2.1.1. ВЕБСТЕРОВ МОДЕЛ

Један од првих модела за прорачун засићеног саобраћајног тока дефинише базну вредност засићеног тока траке право, без утицаја паркираних возила, искључиво у функцији ширине прилаза (2-1), при чему је та вредност изражена у путнички аутомобил јединицама (ПАЈ) на час (Webster & Cobbe, 1966).

$$S_b = 525 \cdot \check{S}P \quad (2-1)$$

где је:

S_b - базна вредност засићеног саобраћајног тока [ПАЈ/h],

$\check{S}P$ - ширина прилаза [m].

Релација (2-1) се примењује за ширине прилаза између 5,5 и 18,3 метра, док су базне вредности засићеног тока за ширине прилаза између 3,0 и 5,2 метара дате у наредној табели (Табела 2.1).

Табела 2.1. Базне вредности засићеног саобраћајног тока у зависности од ширине прилаза (Webster & Cobbe, 1966)

$\check{S}P$ [m]	3,0	3,4	3,7	4,0	4,3	4,6	4,9	5,2
S_b [PA]/h]	1850	1875	1900	1950	2075	2250	2475	2700

Међутим, у случају десног скретања, дефинисано је да се засићен саобраћајни ток утврђује независно, при чему зависи од геометрије раскрснице и интензитета конфликтног пешачког тока.

Утицај геометрије раскрснице. Релација којом се описује утицај геометрије раскрснице, тачније радијуса скретања, на вредност засићеног тока десног скретања дата је наредним једначинама (Webster & Cobbe, 1966):

$$S_d = \begin{cases} \frac{1800}{1 + \frac{1,524}{R}}, & \text{за једну саобраћајну траку у десном скретању} \\ \frac{3000}{1 + \frac{1,524}{R}}, & \text{за две саобраћајне траке у десном скретању} \end{cases} \quad (2-2)$$

$$(2-3)$$

где је:

S_d - засићен саобраћајни ток незаштићеног десног скретања [PA]/h],

R - радијус десног скретања [m].

Утицај пешака није прецизно утврђен овим моделом, већ се наводи да вероватно зависи од услова на конкретној локацији. Аутори препоручују да, за просечан проток пешака нема потребе за додатним кориговањем вредности засићеног саобраћајног тока утврђеног релацијама (2-2) и (2-3), јер су пешаци били присутни током истраживања на основу којих су те релације формиране. Ефекат веома великог протока пешака квантификује се кроз утицај карактеристика непосредног окружења раскрснице. Ипак, аутори не дефинишу шта се подразумева под просечним или веома великим протоком пешака.

Утицај непосредног окружења раскрснице. Бројни други фактори који у мањој мери утичу на вредност засићеног саобраћајног тока обједињени су у једном утицају – типу непосредног окружења раскрснице. Дефинисана је зависност вредности засићеног тока од типа, тј. преовлађујућих карактеристика непосредног окружења локације (Табела 2.2). Аутори истичу да је током истраживања највећа забележена вредност засићеног тока била 135%, а најмања вредност 70% у односу на базну вредност засићеног тока.

Табела 2.2. Утицај непосредног окружења раскрснице на вредност засићеног саобраћајног тока (Webster & Cobbe, 1966)

Тип непосредног окружења раскрснице	Опис	Процент базне вредности засићеног саобраћајног тока
Добар	Две коловозне траке; Без значајног утицаја пешака, паркираних возила, левих скретања; Добра прегледност; Адекватан радијус скретања; Адекватна ширина и геометрија излаза.	120 (135)
Просечан	Подразумева поједине карактеристике и доброг и лошег типа окружења.	100
Лош	Ниска просечна брзина; Постоји утицај паркираних возила, пешака, левих скретања; Лоша прегледност и/или геометрија раскрснице; Улица у зони комерцијалних садржаја.	85 (70)

2.1.2. АМЕРИЧКИ МОДЕЛ

У америчком приручнику HCM7 (енг. *Highway Capacity Manual 7th edition*) базна вредност засићеног тока дефинисана је као вредност засићеног тока за саобраћајну траку право, при идеалној геометрији и условима у саобраћајном току, без утицаја структуре тока (Transportation Research Board, 2022). Базна вредност зависи од величине града, тачније од броја становника, и дата је у следећој табели (Табела 2.3).

Табела 2.3. Базне вредности засићеног саобраћајног тока у приручнику HCM7 (Transportation Research Board, 2022)

	Популација > 250000 становника	У супротном
S_b [PAJ/h/traci]	1900	1750

Утврђивање оперативне вредности засићеног саобраћајног тока незаштићеног десног скретања подразумева прилагођавање базне вредности засићеног тока маневру скретања, узимањем у обзир бројних утицаја на ту вредност. Ово се постиже применом наредне релације (Transportation Research Board, 2022):

$$S_d = S_b \cdot f_{\check{S}T} \cdot f_{KV_UN} \cdot f_{park} \cdot f_{BUS} \cdot f_a \cdot f_{LU} \cdot f_d \cdot f_{pe\check{s}_bic} \cdot f_{zr} \cdot f_{zas_iz} \cdot f_{zas_pr} \quad (2-4)$$

где је:

- S_d - засићен саобраћајни ток незаштићеног десног скретања [voz/h/traci],
- S_b - базна вредност засићеног саобраћајног тока [PAJ/h/traci],
- $f_{\check{S}T}$ - фактор утицаја ширине саобраћајне траке ($\check{S}T$) [-], стандардна $\check{S}T = 3,5$ метара
- f_{KV_UN} - фактор утицаја структуре тока (учешћа комерцијалних возила (KV) у току) и уздужног нагиба (UN) [-], применљив за $\%KV \leq 50\%$ и $-4\% \leq UN \leq +10\%$,
- f_{park} - фактор утицаја паркирања [-],
- f_{BUS} - фактор утицаја аутобуских стајалишта [-],
- f_a - фактор утицаја непосредног окружења раскрснице [-],
- f_{LU} - фактор утицаја коришћења саобраћајне траке [-],
- f_d - фактор утицаја присуства десних скретања на прилазу [-],
- $f_{pe\check{s}_bic}$ - фактор утицаја пешака и/или бициклиста [-],
- f_{zr} - фактор утицаја зоне радова [-],
- f_{zas_iz} - фактор утицаја засићења на излазу [-],
- f_{zas_pr} - фактор утицаја засићења на прилазу [-].

Већина наведених фактора се, заправо, усваја при прорачуну засићеног тока без обзира на тип маневра на раскрсници. Међутим, на вредност засићеног тока незаштићеног десног скретања највећи утицај имају геометрија раскрснице и конфликтни пешачки ток. Због тога су у даљем тексту детаљније представљени фактори којима се квантификују ова два утицаја.

Утицај присуства десних скретања на прилазу огледа се у утицају геометрије раскрснице, пре свега радијуса скретања, на вредност засићеног саобраћајног тока десног скретања. У складу са тим, овај утицај је квантификован фактором утицаја присуства десних скретања, који се, за ексклузивну саобраћајну траку, утврђује применом наредне релације (Transportation Research Board, 2022):

$$f_d = \frac{1}{E_d} \quad (2-5)$$

где је:

- E_d - еквивалент за превођење засићеног саобраћајног тока траке право у засићени ток заштићеног десног скретања [-], $E_d = 1,18$.

Утицај пешака на вредност засићеног тока десног скретања квантификован је фактором утицаја пешака. НСМ7 модел утврђује фактор утицаја пешака на основу степена заузетости конфликтне зоне, што је засновано на ранијим истраживањима аутора Milazzo и остали (1998). Фактор утицаја пешака се утврђује једначинама (2-6) и (2-7), у зависности од броја саобраћајних трака на излазу раскрснице (Transportation Research Board, 2022). У приручнику се наводи да ће, уколико је број трака на излазу једнак броју трака намењених десном скретању, возила имати мање простора за маневрисање и обилажење пешака (2-6). Међутим, уколико је број трака на излазу већи од броја трака намењених скретању, возачи ће имати више простора за маневрисање око пешака, те ће њихов утицај бити мањи (2-7). Ипак, наводи се и да није довољно усвојити одређену релацију само на основу геометријских карактеристика раскрснице, већ је неопходно сагледати и понашање возача при скретању, будући да на неким раскрсницама возачи доследно непрописно скрећу из саобраћајне траке намењене току право, док је на другим раскрсницама могуће заузимање траке на излазу непрописним паркирањем.

$$f_{peš_bic} = \begin{cases} 1 - OCC_f, & N_{iz} = N_d \\ 1 - 0,6 \cdot OCC_f, & N_{iz} > N_d \end{cases} \quad (2-6)$$

$$(2-7)$$

где је:

OCC_f - степен заузетости конфликтне зоне током фазе у којој се опслужују возила у десном скретању [-],

N_{iz} - број саобраћајних трака на излазу раскрснице [трака],

N_d - број саобраћајних трака на прилазу раскрснице намењених десном скретању [трака].

Утврђивање степена заузетости конфликтне зоне током фазе заснива се на претпоставци да се пешаци опслужују током ефективног зеленог времена за пешаке $Z_{e_peš}$, и да нема прелазака пешака током периода $Z_{e_d} - Z_{e_peš}$, уколико тај период постоји. У складу са тим, степен заузетости конфликтне зоне током фазе се рачуна на следећи начин (Transportation Research Board, 2022):

$$OCC_f = \frac{Z_{e_peš}}{Z_{e_d}} \cdot OCC_{Ze_peš} \quad (2-8)$$

где је:

$Z_{e_peš}$ - ефективно зелено време конфликтног пешачког тока [s],

$$Z_{e_peš} = \begin{cases} \min(Z_{e_d}, Z_{st_peš} + \Delta t_{peš}), & \text{у променљивом режиму рада светлосних сигнала} \\ Z_{e_d}, & \text{у супротном} \end{cases}$$

Z_{e_d} - ефективно зелено време фазе у којој се опслужују возила у десном скретању [s],

$OCC_{Ze_peš}$ - степен заузетости конфликтне зоне током ефективног зеленог времена пешачког тока [-], гранична вредност $OCC_{Ze_peš} \leq 0,9$,

$Z_{st_peš}$ - стварно зелено време конфликтног пешачког тока [s],

$\Delta t_{peš}$ - заштитно време након завршетка зеленог за пешачки ток [s].

Степен заузетости конфликтне зоне током ефективног зеленог времена пешачког тока зависи од експандираног интензитета пешачког тока у односу на ефективно зелено време и рачуна се применом следећих једначина (Transportation Research Board, 2022):

$$OCC_{Ze_peš} = \begin{cases} \frac{Q_{Ze_peš}}{2000}, & Q_{Ze_peš} \leq 1000 \\ 0,4 + \frac{Q_{Ze_peš}}{10000}, & 1000 < Q_{Ze_peš} \leq 5000 \end{cases} \quad (2-9)$$

$$(2-10)$$

где је:

$Q_{Ze_peš}$ - експандиран интензитет пешачког тока у односу на ефективно зелено време пешачког тока [peš/h].

За утврђивање експандираног интензитета пешачког тока неопходно је познавати параметре рада светлосних сигнала, тј. дужину ефективног зеленог времена и циклуса (Transportation Research Board, 2022):

$$Q_{Ze_peš} = Q_{peš} \cdot \frac{C}{Z_{e_peš}} \leq 5000 \quad (2-11)$$

где је:

$Q_{peš}$ - интензитет пешачког тока који се опслужи током циклуса у оба смера [peš/h],

C - дужина циклуса [s].

Описани модел је применљив и за прорачун засићеног саобраћајног тока левог скретања из једносмерне улице.

2.1.3. АУСТРАЛИЈСКИ МОДЕЛ

Аустралијски модел за утврђивање вредности засићеног саобраћајног тока дефинише базне вредности засићеног тока у зависности од типа непосредног окружења раскрснице и типа саобраћајне траке (Табела 2.4) (Akcelik, 1981).

Табела 2.4. Просечне вредности засићеног саобраћајног тока у зависности од типа окружења и типа саобраћајне траке (Akcelik, 1981)

S_b [PA] pravo/h	Тип саобраћајне траке		
Тип непосредног окружења раскрснице	1	2	3
А	1850	1810	1700
Б	1700	1670	1570
Ц	1580	1550	1270

При томе, дефинисани типови непосредног окружења раскрснице окарактерисани су на следећи начин:

- **тип А** - идеални или приближно идеални услови за кретање возила:
 - добра прегледност,
 - занемарљиво мали интензитет пешачких токова,
 - занемарљив утицај паркирања или доставних возила на саобраћајни процес на раскрсници;
- **тип Б** - просечни услови:
 - адекватна геометрија раскрснице,
 - мали до средњи интензитет пешачких токова,
 - одређени утицај паркирања и доставних возила на саобраћајни процес на раскрсници;
- **тип Ц** - лоши услови:
 - велики интензитет пешачких токова,
 - лоша прегледност,
 - утицај заустављања и паркирања, доставних возила, такси и аутобуских стајалишта на саобраћајни процес на раскрсници.

Типови саобраћајних трака су дефинисани у зависности од намене саобраћајне траке, геометрије и утицаја пешачких токова:

- **тип 1** - ексклузивна саобраћајна трака право;

- **тип 2** - ексклузивна или мешовита саобраћајна трака намењена скретањима, са адекватним радијусом скретања и занемарљивим утицајем пешачких токова на возила у скретању;
- **тип 3** - ексклузивна или мешовита саобраћајна трака намењена скретањима, са малим радијусом скретања и/или значајнијим утицајем пешачких токова.

Према аустралијском моделу, на оперативну вредност засићеног саобраћајног тока утичу уздужни нагиб, ширина траке и структура саобраћајног тока. Оперативна вредност засићеног тока рачуна се применом следеће релације (Akcelik, 1981):

$$S = S_b \cdot \frac{f_{ST} \cdot f_{UN}}{f_{KV}} \quad (2-12)$$

где је:

S - оперативна вредност засићеног саобраћајног тока [voz/h],

S_b - базна вредност засићеног саобраћајног тока утврђена из Табела 2.4 [PA] pravo/h],

f_{ST} - фактор утицаја ширине саобраћајне траке [-],

f_{UN} - фактор утицаја уздужног нагиба [-],

f_{KV} - фактор утицаја структуре саобраћајног тока [-].

У случају засићеног тока незаштићеног десног скретања, утицаји геометрије раскрснице и конфликтног пешачког тока обухваћени су утицајем структуре саобраћајног тока кроз еквивалент за превођење тока израженог у возило-маневар i (возило одређене категорије у одређеном маневру) у ток изражен у путнички аутомобил право.

Утицај структуре саобраћајног тока у овом моделу квантификован је фактором утицаја структуре саобраћајног тока (2-13), којим се вредност засићеног тока претвара из ПА] право на час у возила на час (Akcelik, 1981).

$$f_{KV} = \frac{\sum e_i Q_i}{Q} \quad (2-13)$$

где је:

e_i - еквивалент за превођење возило-маневар i (возило одређене категорије у одређеном маневру) у путнички аутомобил право [PA] pravo/voz],

Q_i - проток за возило-маневар i [voz],

Q - укупан проток [voz], $Q = \sum Q_i$.

Фактор утицаја структуре саобраћајног тока узима у обзир и тип маневра кретања, јер се еквивалентом e_i квантификује утицај како категорије возила, тако и типа маневра (Табела 2.5). Дефинисане су две категорије возила:

- **тешко теретно возило** - подразумева сва возила са више од две осовине или са удвојеним точковима задње осовине (аутобуси, камиони, аутовозови, трактори, аутомобили са приколицама и друга спора возила), и
- **путнички аутомобил** - обухвата сва остала (лака) возила.

Табела 2.5. Вредности еквивалента e_i за превођење возило-маневар i у путнички аутомобил право (Akcelik, 1981)

e_i [PA] pravo/voz]		Тип маневра		
		Право	Неометана скретања	
Категорија возила	нормална		ограничена	
Путнички аутомобил	1	1	1,25	e_o
Тешко теретно возило	2	2	2,5	$e_o + 1$

Дефинисана су и два типа маневара, право и скретања. У зависности од тога да ли се при реализацији скретања јављају одређена ометања, која могу бити последица приоритета конфликтног тока или геометрије раскрснице, дефинисана су **неометана** и **ометана** скретања. У складу са тим, неометана скретања су она која се опслужују заштићено или немају приоритетан возачки ток, те немају утицај тог тока. Према осталим утицајима, неометана скретања се деле на:

- **нормална** - подразумевају лева и десна скретања која имају одговарајући радијус скретања и немају утицај пешака, или је утицај занемарљив. На основу резултата ранијих истраживања аутора Webster (1964) и Ellson (1969), наводи се да радијус од 15 и више метара има веома мали утицај. У случају мањих радијуса, за прорачун вредности засићеног тока примењује се следећа релација (Ellson, 1969):

$$S_{sk} = \frac{1850}{1 + 100 \cdot R^{-3}} \quad (2-14)$$

где је:

S_{sk} - засићен саобраћајни ток скретања [voz/h],

R - радијус скретања [m].

- **ограничена** – подразумевају лева и десна скретања која имају мањи радијус скретања и одређено ометање од стране пешачког тока.

Ометана скретања су она скретања која имају конфликт (условна компатибилност) са возачким или пешачким током. У ову групу скретања спадају:

- незаштићена десна скретања или лева скретања из једносмерних улица која уступају првенство пролаза пешачким токовима,
- незаштићена лева скретања која уступају првенство пролаза конфликтном возачком току,
- десна скретања која се опслужују применом условне лантерне и уступају првенство пролаза пешачким и возачким конфликтним токовима.

У случају ометаних скретања, од којих су незаштићена десна скретања предмет ове дисертације, у аустралијском моделу постоје **два приступа** за утврђивање вредности засићеног саобраћајног тока у зависности од тога да ли се посматра цела дужина зеленог сигналног појма конфликтног пешачког тока или само незасићени део зеленог.

Први приступ - Вредност засићеног саобраћајног тока током целе дужине зеленог сигналног појма конфликтног пешачког тока утврђује се на следећи начин (Akcelik, 1981):

$$S_d = \frac{1800}{e_o} \quad (2-15)$$

где је:

S_d - засићен саобраћајни ток незаштићеног десног скретања [voz/h],

e_o - еквивалент за превођење ПА] право у ток возила незаштићеног десног скретања [PA] право/voz].

Еквивалент за превођење тока путничких аутомобила право у ток возила незаштићеног десног скретања рачуна се према једначини (2-16) (Akcelik, 1981).

$$e_o = \frac{0,5 \cdot Z_{e_d}}{s_{nz_d} \cdot Z_{nz_{peš}} + n_{\Delta t}} \quad (2-16)$$

где је:

- 0,5 - константа која се користи за апроксимацију базне вредности засићеног саобраћајног тока у ПАЈ право у секунди (= 1800 PAJ право/h).
- Z_{e_d} - ефективно зелено време незаштићеног десног скретања [s],
- $Z_{nz_{peš}}$ - незасићени део зеленог времена пешачког тока [s],
- $n_{\Delta t}$ - број возила која скрену након завршетка зеленог сигналног појма [voz/ciklus], препоручена вредност $n_{\Delta t} = 1,5$ voz/ciklus,
- s_{nz_d} - засићен саобраћајни ток незаштићеног десног скретања током незасићеног дела зеленог времена пешачког тока [voz/s], рачуна се применом наредне релације:

$$s_{nz_d} = \frac{q_{peš} \cdot e^{-t_{h_{krit}} \cdot q_{peš}}}{1 - e^{-t_h \cdot q_{peš}}} \quad (2-17)$$

- $q_{peš}$ - интензитет конфликтног пешачког тока [peš/s],
- $t_{h_{krit}}$ - критичан интервал слеђења у конфликтном току пешака за возила у скретању [s],
- t_h - интервал слеђења возила у скретању [s].

Важно је напоменути да се, према приручнику, представљени модел за утврђивање засићеног тока незаштићеног скретања током незасићеног дела зеленог времена пешачког тока примењује без обзира на то да ли возила у скретању уступају првенство пролаза возилима или пешацима. Међутим, нису децидно наведени параметри модела који се примењују у случају скретања које има конфликт искључиво са пешачким током. Такође, у приручнику се наводи да незасићени део зеленог времена пешачког тока зависи од дужине пешачког прелаза и интензитета пешачког тока, али није дефинисан поступак прорачуна ове вредности, већ се препоручује да се она утврди на терену.

Претпоставка је да метода за утврђивање незасићеног дела зеленог времена и параметри модела нису дефинисани јер се у методи критичних токова ретко примењује план фаза који подразумева истовремено опслуживање возила у скретању и пешачких токова великог интензитета. Ситуације у којима се возила у скретању опслужују истовремено са пешачким токовима мањих и средњих интензитета обухваћене су табелом базних вредности засићеног тока (Табела 2.4) и табелом вредности еквивалената e_i (Табела 2.5).

Други приступ - Засићен саобраћајни ток десног скретања може се рачунати и применом једначине (2-18), узимајући у обзир само незасићени део зеленог времена пешачког тока (Акселик, 1981). Овај приступ заснива се на претпоставци да се први део зеленог сигналног појма за возила у скретању не може користити за пролазак возила, јер је блокиран опслуживањем конфликтног тока пешака.

$$S_d = 3600 \cdot s_{nz_d} \quad (2-18)$$

2.1.4. МОДЕЛ ЗА УТВРЂИВАЊЕ ЗАСИЋЕНОГ ТОКА НЕЗАШТИЋЕНОГ ДЕСНОГ СКРЕТАЊА У МИКРОСИМУЛАЦИОНОМ МОДЕЛУ SIDRA

У микросимулационом моделу SIDRA, који се заснива на аустралијском моделу аутора Акселик (1981) и резултатима других истраживања, утицај пешака на десна скретања се третира нешто другачије. Наиме, у приручнику за примену овог симулационог модела

се наводи да се ефекат пешака на возила у скретању може изразити на два начина (Akcelik, 1990; Akcelik and Associates, 2012):

- додељивањем већих губитака на старту, с обзиром на то да се на почетку зеленог сигналног појма опслужују пешаци и блокира се пролазак возила (препоручени начин),
- редуковањем вредности засићеног саобраћајног тока применом еквивалента e_{LV} , који се рачуна према наредној релацији:

$$e_{LV} = \frac{1}{0,85 - \frac{Q_{peš}}{2100}} \quad (2-19)$$

где је:

e_{LV} - еквивалент за претварање тока путничких аутомобила право у ток лаких возила незаштићеног скретања [-].

$Q_{peš}$ - интензитет конфликтног пешачког тока [peš/h], $50 \leq Q_{peš} \leq 1600$ peš/h

У складу са тим, засићен саобраћајни ток незаштићеног десног скретања може се утврдити применом релације испод (Akcelik, 1990; Akcelik and Associates, 2012):

$$S_d = \frac{S}{e_{LV}} \quad (2-20)$$

где је:

S - оперативна вредност засићеног саобраћајног тока редукована факторима утицаја ширине траке, нагиба, паркирања и аутобуса [voz/h].

2.1.5. КАНАДСКИ МОДЕЛ

Канадски приручник CCG3 (енг. *Canadian Capacity Guide 3rd edition*) дефинише базну вредност засићеног саобраћајног тока као вредност засићеног тока за саобраћајну траку право при идеалној геометрији, површини коловоза и условима у саобраћају, без утицаја временских прилика. Ова вредност у приручнику CCG3 дата је у односу на базну вредност препоручену HCM7 приручником (Terly и остали, 2008):

$$S_{HCM} = 1,05 \cdot S_{CCG} \quad (2-21)$$

где је:

S_{HCM} - базна вредност засићеног саобраћајног тока препоручена приручником HCM7 (Табела 2.3) [PA/h],

S_{CCG} - базна вредност засићеног саобраћајног тока S_b препоручена приручником CCG3 [PA/h].

У канадском моделу, оперативна вредност засићеног тока посматраног маневра утврђује се множењем базне вредности засићеног тока са утицајним факторима релевантним за посматрани маневар, применом наредне релације (Terly и остали, 2008):

$$S = S_b f(f_{adj}) \quad (2-22)$$

где је:

S - оперативна вредност засићеног саобраћајног тока [PA/h],

S_b - базна вредност засићеног саобраћајног тока [PA/h],

f_{adj} - утицајни фактори [-].

Према приручнику CCG3 утицајни фактори су груписани у три категорије: (1) фактори који се односе на геометрију раскрснице, (2) фактори који се односе на саобраћајне услове и (3) фактори који се односе примењен систем регулисања и управљања

саобраћајем (Слика 2.1). Групу фактора који се односе на геометрију раскрснице чине фактори утицаја ширине саобраћајне траке, уздужног нагиба, радијуса скретања и расположивог простора на прилазу и излазу раскрснице за формирање и пражњење реда возила. У групу фактора који се односе на саобраћајне услове спадају фактори утицаја присуства аутобуског стајалишта, паркирања и пешака у зони раскрснице, док у групу фактора који се односе на примењен систем регулисања и управљања саобраћајем спада утицај дужине трајања зеленог сигналног појма, третмана скретања у плану фаза и намене саобраћајне траке.

Аутори приручника дају и смернице за доношење одлуке о примени наведених фактора за сваку комбинацију (Слика 2.1). Поједини фактори могу се међусобно множити (нпр. фактори утицаја ширине саобраћајне траке и уздужног нагиба), док за неке комбинације инжењери морају размотрити најутицајнији фактор, те усвојити само један или комбинацију више фактора (нпр. фактори утицаја ширине саобраћајне траке и пешака). С друге стране, за примену појединих фактора дефинисане су посебне процедуре – као, на пример за факторе утицаја пешака и радијуса скретања у случају десних скретања.

		А. Геометрија раскрснице				Б. Саобраћајни услови			В. Регулисање и управљање					
		а. ширина траке	б. уздужни нагиб	в. радијус скретања	г. расположив простор	а. аутобуско стајалиште	б. паркирање	в. пешаци	а. дужина зеленог	б. заштићено ЛС	в. незаштићено ЛС	г. незаштићено ЛС + пешаци	д. ДС + пешаци	ђ. мешовите траке
А. Геометрија раскрснице	а. ширина траке	×	×	×	×	⊗	○	×	×	⊗	⊗	○	×	
	б. уздужни нагиб	×		×	×	×	○	×	×	⊗	⊗	○	⊗	
	в. радијус скретања	×	×		○	⊗	×	○	×	○	○	○	●	○
	г. расположив простор	×	×	○		○	⊗	○	⊗	○	○	○	○	○
Б. Саобраћајни услови	а. аутобуско стајалиште	×	×	⊗	○		○	○	⊗	○	○	○	○	○
	б. паркирање	⊗	×	×	⊗	○		○	○	○	○	○	○	○
	в. пешаци	○	○	○	○	○	○		⊗	○	○	●	●	○
В. Регулисање и управљање	а. дужина зеленог	×	×	×	⊗	⊗	○	⊗		●	○	○	○	○
	б. заштићено ЛС	×	×	○	○	○	○	○	●		•	•	•	○
	в. незаштићено ЛС	⊗	⊗	○	○	○	○	○	○	•		•	•	○
	г. незаштићено ЛС + пешаци	⊗	⊗	○	○	○	○	●	○	•	•		•	○
	д. ДС + пешаци	○	○	●	○	○	○	●	○	•	•	•		○
	ђ. мешовите траке	×	⊗	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

• није примењиво ○ неопходна процена доминантнијег утицаја
 × множење фактора ⊗ могуће множење фактора
 ● посебна процедура или препорука

Слика 2.1. Комбинације утицајних фактора на засићен саобраћајни ток и смернице за доношење одлуке (Терлу и остали, 2008)

У случају десних скретања која имају конфликт са пешацима, за већину утицаја је дефинисано да је потребно размотрити доминантнији утицај, док су за утицаје радијуса и пешака прописане посебне процедуре и препоруке (Слика 2.1). Наиме, у приручнику

се наводи да су ранија истраживања показала да утицај пешака може бити израженији од утицаја радијуса (Terly, 1990). У складу са препорукама приручника, фактор утицаја радијуса се не примењује у случају раскрсница које се налазе у зонама са великом активношћу пешака, као што су централне градске зоне, јер је у тим условима утицај пешака доминантан, чак и у односу на утицај малих радијуса скретања. С друге стране, фактори утицаја радијуса и пешака могу се комбиновати (множити) у случају раскрсница са мањом активношћу пешака, као што су индустријске зоне и слична подручја.

Утицај радијуса скретања. Геометрија путање, односно радијус скретања, утиче на вредност засићеног саобраћајног тока десног скретања и левог скретања из једносмерне у једносмерну улицу. Овај утицај је квантификован фактором утицаја радијуса скретања, који се одређује применом наредне једначине (Terly и остали, 2008):

$$f_R = \begin{cases} 0,5 + \frac{R}{30}, & \text{за } R < 15,0 \\ 1, & \text{за } R \geq 15,0 \end{cases} \quad (2-23)$$

где је:

f_R - фактор утицаја радијуса скретања [-],

R - радијус скретања [m].

Утицај пешака. У првом кораку се интензитет пешачког тока који се опслужује током циклуса експандира у односу на стварно зелено време пешачког тока, применом наредне релације (Terly и остали, 2008):

$$Q_{Zst_peš} = Q_{peš} \cdot \frac{C}{Z_{st_peš}} \quad (2-24)$$

где је:

$Q_{Zst_peš}$ - експандиран интензитет пешачког тока у односу на стварно зелено време пешачког тока [peš/h],

$Q_{peš}$ - интензитет пешачког тока који се опслужи током циклуса у оба смера [peš/h],

C - дужина циклуса [s],

$Z_{st_peš}$ - стварно зелено време пешачког тока [s].

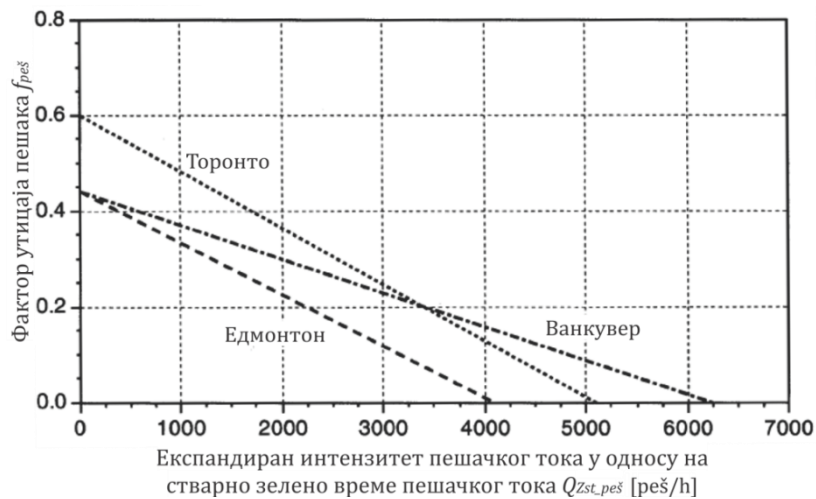
У другом кораку се проверава испуњеност услова да је вредност експандираног интензитета пешачког тока највише 200 пешака на час. Ако је овај услов испуњен, пешаци немају утицаја на вредност засићеног тока десног скретања, те је $f_{peš} = 1,00$. Уколико претходно дефинисан услов није испуњен, односно уколико је експандиран интензитет пешачког тока већи од 200 пешака на час, прелази се на трећи корак, односно утврђивање фактора утицаја пешака. Дате су три релације за утврђивање овог фактора, развијене у Торонту, Едмонтону и Ванкуверу, респективно (Terly и остали, 2008):

$$f_{peš} = \begin{cases} 0,60 - \frac{Q_{Zst_peš}}{8516} & (2-25) \\ 0,44 - \frac{Q_{Zst_peš}}{9320} & (2-26) \\ 0,44 - \frac{Q_{Zst_peš}}{14100} & (2-27) \end{cases}$$

где је:

$f_{peš}$ - фактор утицаја пешака [-],

Зависност фактора утицаја пешака од експандираног интензитета пешачког тока у односу на стварно зелено време приказана је графички на наредној слици (Слика 2.2).



Слика 2.2. Фактор утицаја пешака у зависности од експандираног интензитета пешачког тока у односу на стварно зелено време пешачког тока (Терлу и остали, 2008)

На локацијама са већом активношћу пешака у утицајној зони раскрснице, $f_{peš}$ се рачуна применом датих релација, чак и када је $Q_{Zst_peš} = 0$, јер се сматра да возачи возе опрезније услед могућности изненадног почетка преласка пешака. Међутим, на локацијама са малим интензитетом пешака или без тротоара, у приручнику се наводи да пешаци практично немају утицај на вредност засићеног саобраћајног тока.

Важно је напоменути да приручник истиче да геометрија раскрснице нема значајан утицај на број возила која скрену десно током заштитиних времена; У зависности од понашања возача и интензитета пешака, препоручена вредност је од 1,0 до 2,0 возила по циклусу (Терлу, 1990).

2.1.6. ФИНСКИ МОДЕЛ

У финском приручнику модели за прорачун вредности засићеног саобраћајног тока дефинисани су у зависности од намене саобраћајне траке и начина опслуживања возачких токова (Luttinen & Nevala, 2002; Väylävirasto, 2022). У складу с тим, вредност засићеног саобраћајног тока незаштићеног десног или левог скретања, из ексклузивне саобраћајне траке, које има конфликт само са пешацима, утврђује се применом наредних релација (Niittymäki & Pursula, 1997):

$$S_{d/l} = \begin{cases} 1692 - 1,13 \cdot Q_{peš}, & \text{за } Q_{peš} \leq 900 \\ 660 - 0,083 \cdot (Q_{peš} - 900), & \text{за } Q_{peš} > 900 \end{cases} \quad (2-28)$$

(2-29)

где је:

$S_{d/l}$ - засићен саобраћајни ток десног или левог скретања које има конфликт само са пешацима [voz/h],

$Q_{peš}$ - интензитет пешачког тока [пећ/ч].

2.1.7. ШВЕДСКИ МОДЕЛ

У шведском приручнику засићен саобраћајни ток је дефинисан у зависности од намене саобраћајне траке и начина опслуживања возачких токова (Bang, 1978; Trafikverket, 2014; Bang и остали, 2016). Вредност засићеног саобраћајног тока незаштићеног десног или левог скретања током незасићеног дела зеленог времена конфликтног пешачког тока рачуна се применом релација (2-30) и (2-31), у зависности од верзије приручника.

$$s_{nz_d/l} = \begin{cases} \frac{q_{peš} \cdot e^{-t_{h_krit} \cdot q_{peš}}}{1 - e^{-q_{peš}/s_{zaš_d}}}, & \text{(Trafikverket, 2014; Bang, и остали, 2016)} \\ \frac{q_{peš} \cdot e^{-t_{h_krit} \cdot q_{peš}}}{1 - e^{-3 \cdot q_{peš}}}, & \text{(Bang, 1978)} \end{cases} \quad (2-30)$$

$$(2-31)$$

где је:

- $s_{nz_d/l}$ - засићен саобраћајни ток десног или левог скретања током незасићеног дела зеленог времена конфликтног пешачког тока [voz/s],
- $q_{peš}$ - интензитет конфликтног пешачког тока у оба смера [peš/s],
- t_{h_krit} - критичан интервал слеђења у конфликтном току пешака за возила у скретању [s],
- $s_{zaš_d}$ - засићен саобраћајни тока заштићеног десног или левог скретања, без конфликта са пешачким током [voz/s].

Критичан интервал слеђења између пешака за возила у скретању износи 4,2 секунде у старијој верзији приручника (Bang, 1978), односно 3,6 секунди у новијој верзији (Trafikverket, 2014; Bang и остали, 2016).

У наредном кораку утврђује се период блокирања услед опслуживања пешачких токова. Претпоставља се да је пролазак возила у скретању блокиран током опслуживања плотуна пешака, те да се возила могу опслужити тек након периода блокирања, односно у незасићеном делу зеленог времена конфликтног пешачког тока. Време блокирања се утврђује применом следеће релације (Trafikverket, 2014):

$$t_{blok} = \begin{cases} ((t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)) \cdot (1 - e^{-r_{peš} \cdot q_{peš} / 2}), & \text{за } t_2 < t_3 \\ (t_4 - t_1) \cdot (1 - e^{-r_{peš} \cdot q_{peš} / 2}), & \text{за } t_2 \geq t_3 \end{cases} \quad (2-32)$$

$$(2-33)$$

где је:

- t_{blok} - време блокирања проласка возила у скретању услед опслуживања пешака [s],
- $r_{peš}$ - црвени сигнални појам конфликтног пешачког тока [s],
- t_1 - време од почетка зеленог сигналног појма за возила до наиласка плотуна ближих пешака [s], утврђује се применом релације:

$$t_1 = \begin{cases} \frac{\frac{L_{pp}}{2} - L_{th}}{V_{peš_max}}, & \text{за } \frac{L_{pp}}{2} > L_{th} \\ 0, & \text{за } \frac{L_{pp}}{2} \leq L_{th} \end{cases} \quad (2-34)$$

$$(2-35)$$

- t_2 - време од почетка зеленог сигналног појма за возила до завршетка опслуживања плотуна ближих пешака [s], утврђује се применом релације:

$$t_2 = \begin{cases} \frac{L_{th} + L_{pl_peš}}{V_{peš_min}}, & \text{за } \frac{L_{pp}}{2} > L_{th} \\ \frac{\frac{L_{pp}}{2} + L_{pl_peš}}{V_{peš_min}}, & \text{за } \frac{L_{pp}}{2} \leq L_{th} \end{cases} \quad (2-36)$$

$$(2-37)$$

- t_3 - време од почетка зеленог сигналног појма за возила до наиласка плотуна даљих пешака [s], утврђује се применом релације:

$$t_3 = \begin{cases} \frac{L_{pp} - L_{th}}{V_{peš_max}}, & \text{за } \frac{L_{pp}}{2} > L_{th} \\ \frac{\frac{L_{pp}}{2}}{V_{peš_max}}, & \text{за } \frac{L_{pp}}{2} \leq L_{th} \end{cases} \quad (2-38)$$

$$(2-39)$$

t_4 - време од почетка зеленог сигналног појма за возила до завршетка опслуживања плотуна даљих пешака [s], утврђује се применом релације:

$$t_4 = \begin{cases} \frac{\frac{L_{pp}}{2} + L_{th} + L_{pl_peš}}{V_{peš_min}}, & \text{за } \frac{L_{pp}}{2} > L_{th} \\ \frac{L_{th} + L_{pl_peš}}{V_{peš_min}}, & \text{за } \frac{L_{pp}}{2} \leq L_{th} \end{cases} \quad (2-40)$$

$$(2-41)$$

$V_{peš_max}$ - максимална брзина пешака [m/s], $V_{peš_max} = 1,60$ m/s,

$V_{peš_min}$ - минимална брзина пешака [m/s], $V_{peš_min} = 1,00$ m/s,

L_{pp} - дужина пешачког прелаза [m],

L_{th} - прихватљив просторни интервал слеђења између пешака [m], $L_{th} = 3,5$ m

$L_{pl_peš}$ - дужина плотуна пешака [m], утврђује се применом релације:

$$L_{pl_peš} = \frac{r_{peš} \cdot q_{peš} \cdot a_{peš}}{2 \cdot W_{pp}} \quad (2-42)$$

W_{pp} - ширина пешачког прелаза [m],

$a_{peš}$ - површина коју заузима један пешак [m²/пеš], $a_{peš} = 0,8$ m²/пеš.

Након утврђивања времена блокирања, вредност укупног засићеног тока незаштићеног десног или левог скретања утврђује се применом следеће релације (Трафикverket, 2014):

$$S_{d/l} = \left((Z_{e_peš} - t_{blok}) \cdot \frac{q_{peš} \cdot e^{-3,6 \cdot q_{peš}}}{1 - e^{-q_{peš}/s_{zaš.d}}} + n_{\Delta t} \right) \cdot \frac{3600}{Z_{e_d/l}} \quad (2-43)$$

где је:

$S_{d/l}$ - засићен саобраћајни ток десног или левог скретања које има конфликт само са пешацима [voz/h zelenog],

$Z_{e_peš}$ - ефективно зелено време конфликтног пешачког тока [s],

$n_{\Delta t}$ - број возила који може скренути током заштитног времена на нивоу циклуса [voz], препоручене вредности $n_{\Delta t} = \begin{cases} 1, & \text{токови на раскрсници се опслужују у две фазе} \\ 2, & \text{токови на раскрсници се опслужују у три или четири фазе} \end{cases}$

$Z_{e_d/l}$ - ефективно зелено време незаштићеног десног или левог скретања [s].

2.1.8. НЕМАЧКИ МОДЕЛ

Према немачком приручнику НБС 2015 (нем. *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*), оперативна вредност засићеног саобраћајног тока утврђује се применом наредне релације (FGSV, 2015):

$$S = \frac{3600}{t_h} \quad (2-44)$$

где је:

S - оперативна вредност засићеног саобраћајног тока [voz/h/traci],

t_h - просечан интервал слеђења [s].

У овом приручнику базна вредност просечног интервала слеђења износи 1,8 секунди, што одговара базној вредности засићеног саобраћајног тока од 2000 возила на час по траци. С обзиром на то да постоје различити спољашњи утицаји, вредност интервала

слеђења се коригује факторима утицаја ширине саобраћајне траке, радијуса скретања и уздужног нагиба, применом наредне релације (FGSV, 2015):

$$t_h = t_{h,b} \cdot f_{KV} \cdot f_1 \cdot f_2 \quad (2-45)$$

где је:

$t_{h,b}$ - базна вредност просечног интервала слеђења [s], $t_{h,b}=1,8$ s,

f_{KV} - фактор утицаја структуре саобраћајног тока [-],

f_1 - $\max(f_{\xi T}, f_R, f_{UN})$,

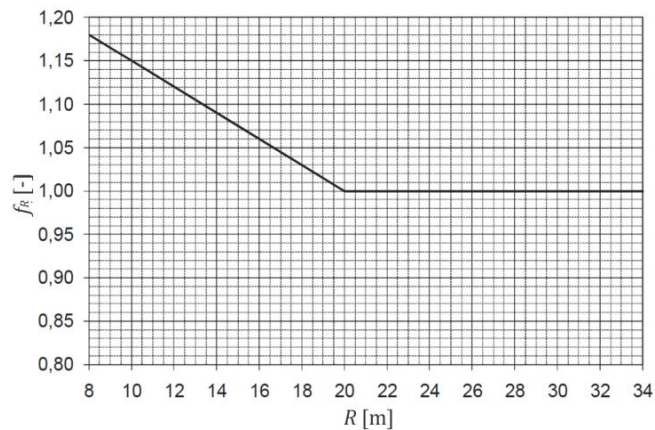
f_2 - $\min(1, f_{UN})$,

$f_{\xi T}$ - фактор утицаја ширине саобраћајне траке [-],

f_R - фактор утицаја радијуса скретања [-],

f_{UN} - фактор утицаја уздужног нагиба прилаза [-].

Утицај радијуса скретања на засићен саобраћајни ток квантификује се фактором који се утврђује на основу графика приказаног на наредној слици (Слика 2.3).



Слика 2.3. Фактор утицаја радијуса скретања (Wu, 2015)

На основу наведеног, уочава се да модел за прорачун оперативне вредности засићеног саобраћајног тока, представљен у овом приручнику, узима у обзир утицај структуре тока, ширине саобраћајне траке, радијуса скретања и уздужног нагиба прилаза. Међутим, у случају незаштићеног десног скретања које има конфликт са пешацима, НБС приручник не дефинише процедуру за утврђивање засићеног тока, већ даје процедуру за утврђивање капацитета незаштићеног десног скретања.

Утицај пешака је, у овој процедури, квантификован временом блокирања проласка возила у десном скретању током зеленог сигналног појма. Време блокирања на почетку зеленог сигналног појма зависи од броја пешака по циклусу и рачуна се применом релације (FGSV, 2015):

$$t_{blok} = \frac{N_{peš}}{0,024 \cdot N_{peš} + 0,48} \quad (2-46)$$

где је:

t_{blok} - време блокирања проласка возила у скретању услед опслуживања пешака [s],

$N_{peš}$ - број пешака по циклусу [peš/ciklusu].

Незасићени део зеленог времена десног скретања утврђује се применом релације (2-47) (FGSV, 2015).

$$Z_{nz_d} = \max \left\{ \begin{array}{l} Z_{st_d} - t_{blok} + Z_a - n_{\Delta t} \cdot t_h \\ 0 \end{array} \right. \quad (2-47)$$

где је:

Z_{nz_d} - незасићени део зеленог времена десног скретања [s],

Z_{st_d} - стварно зелено време десног скретања [s],

Z_a - ранији почетак зеленог за пешачки ток у односу на зелено за возачки ток, тј. временски период између почетака зелених сигналних појмова за пешачки и возачки ток [s],

$n_{\Delta t}$ - број возила која се могу зауставити у раскрсници између линије заустављања и конфликтног пешачког прелаза [voz],

t_h - просечан интервал слеђења возила у десном скретању [s].

На крају, капацитет незаштићеног десног скретања утврђује се применом следеће релације (FGSV, 2015):

$$K_d = \min \left\{ \begin{array}{l} S_{za\check{s}_d} \cdot \frac{Z_{nz_d}}{C} + n_{\Delta t} \cdot \frac{3600}{C} \\ K_{za\check{s}_d} \end{array} \right. \quad (2-48)$$

где је:

K_d - капацитет незаштићеног десног скретања [voz/h/traci],

$S_{za\check{s}_d}$ - засићен саобраћајни ток заштићеног десног скретања [voz/h/traci],

$K_{za\check{s}_d}$ - капацитет заштићеног десног скретања [voz/h/traci], $K_{za\check{s}_d} = S_{za\check{s}_d} \cdot \lambda$

λ - удео ефективног зеленог времена у циклусу [-], $\lambda = \frac{Z_{e_d}}{C}$.

Утврђивање капацитета применом описане процедуре захтева познавање вредности стварног зеленог времена и дужине циклуса, које нису познате на почетку поступка оптимизације параметара рада сигнала, већ представљају излазни резултат тог поступка. Стога се утицај пешака квантификује тек након утврђивања параметара рада светлосних сигнала, што отежава примену HBS модела у инжењерској пракси.

2.1.9. ДАНСКИ МОДЕЛ

У данском приручнику је дефинисана зависност засићеног саобраћајног тока од интервала слеђења појединачних маневара, при чему се базна вредност засићеног саобраћајног тока утврђује применом релације (Vejdirektoratet, 2010; Vejdirektoratet, 2019):

$$S_b = \frac{3600 \cdot f_L}{t_h} \quad (2-49)$$

где је:

S_b - базна вредност засићеног саобраћајног тока [PA/h],

f_L - фактор утицаја конфликтног возачког тока за возила у левом скретању [-],

t_h - просечан интервал слеђења за појединачне маневре кретања [s].

Према овом приручнику, у случају незаштићеног десног скретања, користи се базна вредност засићеног тока у поступку оптимизације параметара рада светлосних сигнала. Након утврђивања параметара рада сигнала, квантификује се утицај конфликтног пешачког тока на капацитет ексклузивне траке за десно скретање, што овај модел разликује од модела за утврђивање капацитета датог у HBS приручнику.

Утицај пешака на возила у десном скретању је двојак. С једне стране, утицај пешака се огледа у повећању интервала слеђења возила у десном скретању, у односу на

заштићено десно скретање. У старијој верзији приручника, препоручене вредности просечног интервала слеђења за заштићено и незаштићено десно скретање износе 2,2 и 3,2 секунде, респективно (Vejdirektoratet, 2010). У новијој верзији приручника, препоручене вредности за заштићено и незаштићено десно скретање су 2,4 секунде и 2,8 секунди, респективно (Vejdirektoratet, 2019). У складу са тим, базна вредност засићеног тока незаштићеног десног скретања је:

$$S_{b_d} = \frac{3600}{2,8} = 1286 \text{ PAJ/h}$$

С друге стране, утицај пешака се огледа у смањењу расположивог зеленог времена за пролазак возила. Наиме, пролазак возила у десном скретању је блокиран одређени део зеленог времена услед опслуживања пешака. Време блокирања се утврђује наредном релацијом (Vejdirektoratet, 2010; Vejdirektoratet, 2019):

$$t_{blok} = 0,9 \cdot (r_{peš} - 2,9 \cdot Z_a) \cdot q_{peš} \quad (2-50)$$

где је:

t_{blok} - време блокирања проласка возила у скретању услед опслуживања пешака [s],

$r_{peš}$ - црвени сигнални појам конфликтног пешачког тока [s],

Z_a - ранији почетак зеленог за пешачки ток у односу на зелено за возачки ток, тј. временски период између почетака зелених сигналних појмова за пешачки и возачки ток [s],

$q_{peš}$ - интензитет конфликтног пешачког тока [peš/s].

Напомена: уколико је $2,9 \cdot Z_a > r_{peš}$, онда је $r_{peš} - 2,9 \cdot Z_a = 0$.

У наредном кораку се, применом релације (2-51), утврђује незасићени део зеленог времена десног скретања (Vejdirektoratet, 2010; Vejdirektoratet, 2019):

$$Z_{nz_d} = Z_{st_d} - t_{blok} \quad (2-51)$$

где је:

Z_{nz_d} - незасићени део зеленог времена десног скретања [s],

Z_{st_d} - стварно зелено време десног скретања [s].

Ефективно зелено време десног скретања утврђује се додавањем једне секунде на претходно утврђену вредност (Vejdirektoratet, 2010; Vejdirektoratet, 2019):

$$Z_{e_d} = Z_{nz_d} + 1 \quad (2-52)$$

где је:

Z_{e_d} - ефективно зелено време незаштићеног десног скретања [s].

На крају, капацитет незаштићеног десног скретања се утврђује применом следеће релације (Vejdirektoratet, 2010; Vejdirektoratet, 2019):

$$K_d = \frac{S_{b_d} \cdot Z_{e_d}}{C} + \frac{Q_d \cdot 3600}{Q_{uk} \cdot C} \quad (2-53)$$

где је:

K_d - капацитет незаштићеног десног скретања [PAJ/h],

S_{b_d} - базна вредност засићеног саобраћајног тока незаштићеног десног скретања [PAJ/h],

C - дужина циклуса [s],

Q_d - саобраћајни захтев у десном скретању [PAJ/h],

Q_{uk} - укупан саобраћајни захтев у саобраћајној траци [PAJ/h], за ексклузивну саобраћајну траку $Q_{uk} = Q_d$.

2.1.10. ДОМАЋЕ ПРЕПОРУКЕ

Домаће препоруке за прорачун засићеног тока заснивају се на истраживањима у локалним условима аутора Станић (1991). Базна вредност засићеног саобраћајног тока се, према домаћим препорукама, дефинише у зависности од намене саобраћајне траке (Станић, 1991; Stanić и остали, 2011). У складу са тим, препоручена базна вредност засићеног тока за ексклузивну саобраћајну траку намењену скретању је 1500 возила на час зеленог. Максималне забележене вредности, између 1750 и 1880 возила на час зеленог, везују се за ситуације примене минималних зелених времена.

Уопштено, базна вредност засићеног тока се коригује факторима, и у случају незаштићеног десног или левог скретања, које има конфликт са пешацима, то су фактори утицаја пешачког тока, структуре тока и величине града (2-54) (Станић, 1991).

$$S_{d/l} = S_{b_skr} \cdot f_{peš} \cdot f_{KV} \cdot f_{vel_gr} \quad (2-54)$$

где је:

$S_{d/l}$ - засићен саобраћајни ток незаштићеног десног или левог скретања које има конфликт само са пешацима [PAJ/h],

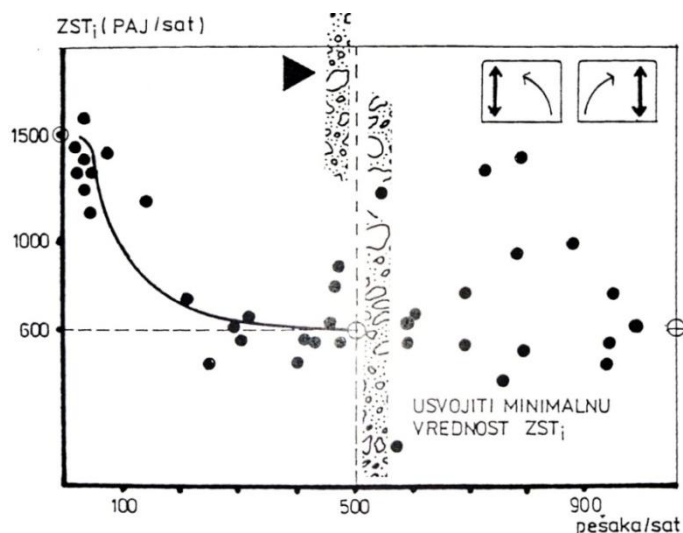
S_{b_skr} - базна вредност засићеног саобраћајног тока скретања [PAJ/h],

$f_{peš}$ - фактор утицаја пешака [-],

f_{KV} - фактор утицаја структуре тока [-],

f_{vel_gr} - фактор утицаја величине града [-].

Утицај пешака. На следећој слици (Слика 2.4) уочава се да вредност засићеног тока опада до интензитета пешачког тока од 500 пешака на час, док се за интензитета веће од 500 пешака на час уочава расипање вредности засићеног тока. У том домену интензитета пешачког тока, аутор препоручује да се усвоји минимална вредност засићеног тока од приближно 600 возила на час. Фактор утицаја интензитета пешачког тока утврђује се применом релације (2-55) (Станић, 1991).



Слика 2.4. Зависност засићеног саобраћајног тока десног скретања од интензитета пешачког тока (Станић, 1991)

$$f_{peš} = 1 - \frac{1}{0,371 \cdot 0,990^{(Q_{peš} - 21,5)} + 0,0183} \quad (2-55)$$

где је:

$Q_{peš}$ - интензитет пешачког тока [peš/h].

2.1.11. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА УТИЦАЈА ПЕШАЧКОГ ТОКА НА ВОЗИЛА У СКРЕТАЊУ

Rouphail и Eads (1997) су истраживали утицај пешака на вредност засићеног тока десног скретања применом микросимулационог модела CORSIM. У оквиру истраживања аутори су у микросимулационом моделу формирали четворокраку раскрсницу са ексклузивним саобраћајним тракама намењеним десном скретању. Интензитет пешака у CORSIM-у је дефинисан у четири ранга: без пешака, мали интензитет пешака (100-250 пешака на час), средњи интензитет пешака (250-500 пешака на час) и велики интензитет пешака (преко 500 пешака на час). Резултати симулације показали су да се базна вредност засићеног тока десног скретања креће између 1606 и 1610 возила на час. Аутори су разматрали три модела зависности засићеног тока од интензитета пешачког тока - линеарни, експоненцијални и полиномски. Због једноставности примене, усвојен је линеарни модел ($R^2=0,958$) који је дат наредном релацијом (Rouphail & Eads, 1997):

$$S_d = 1562,7 - 1,7189 \cdot Q_{pe\check{s}} \quad (2-56)$$

где је:

S_d - засићен саобраћајни ток незаштићеног десног скретања [voz/h zelenog],

$Q_{pe\check{s}}$ - интензитет пешачког тока [peš/h].

У раду је, такође, дат прелиминарни модел ($R^2=0,73$) за утврђивање фактора утицаја пешака на возила у левом скретању. Модел је развијен на основу експерименталних истраживања утицаја пешака на возила у левом скретању из једносмерне улице у једносмерну улицу. Према овом моделу, фактор утицаја пешака утврђује се применом наредне релације (Rouphail & Eads, 1997):

$$f_{pe\check{s}} = 1,0 - 1,02(19 \cdot \ln(Q_{Zst_pe\check{s}}) - 85) \quad (2-57)$$

где је:

$f_{pe\check{s}}$ - фактор утицаја пешака [-],

$Q_{Zst_pe\check{s}}$ - експандиран интензитет пешачког тока у односу на стварно зелено време пешачког тока [peš/h zelenog].

Chen и остали (2011) истраживали су утицај пешачких токова на вредност засићеног тока мешовите траке право-лево (напомена: вози се левом страном пута) у Аичи региону, у Јапану. У истраживању су аутори применили технику снимања видео-записа на девет мешовитих саобраћајних трака на шест сигналисаних раскрсница. Резултати су показали да је на вредност засићеног тока утицала дужина реда и трајање зеленог сигналног појма, док је највећи утицај имао проценат скретања. Такође, утврдили су да интензитет пешачких и бицикличких токова није имао велики утицај на вредност засићеног тока. Аутори су овакав резултат објаснили чињеницом да у подацима за развој модела није било ситуација са великим вредностима интензитета пешака и бициклиста. Формиран је модел за утврђивање засићеног тока мешовите траке намењене токовима право и лево ($R^2=0,591$), који је дат релацијом (2-58) (Chen и остали, 2011).

$$S_{pl} = 1758,80 - 286,50 \cdot P_L - 0,36 \cdot Q_{pe\check{s}/bic} + 37,26 \cdot DR - 17,75 \cdot Z_{st} \quad (2-58)$$

где је:

- S_{pl} - засићен саобраћајни ток траке право-лево [voz/h zelenog/traci],
 P_L - проценат левих скретања [-], за ексклузивну саобраћајну траку намењену левом скретању
 $P_L = 1,0$,
 $Q_{pe\check{s}/bic}$ - интензитет пешачког и бициклическог тока [peš i bic/h],
 DR - дужина реда [voz/ciklusu],
 Z_{st} - стварно зелено време скретања [s].

Roshani и Bargegol (2017) истраживали су утицај пешачког тока на возила у десном скретању у иранском граду Рашту, применом технике снимања видео-записа. Истраживање су спровели на две сигнализоване раскрснице, на којима су посматране три саобраћајне траке намењене десном скретању. Период посматрања био је циклус, који је даље подељен на периоде од 10 секунди, што је омогућило искључивање незасићених периода. Добијене вредности су затим експандиране на сатни ниво како би се анализирао утицај пешака на вредност засићеног тока десног скретања. Резултати овог истраживања су показали да су пешаци имали мањи утицај него у другим студијама, што су аутори повезали са малом спремношћу возача у Рашту да пропусте пешаке. У наставку је дат модел ($R^2=0,6261$) за прорачун засићеног саобраћајног тока незаштићеног десног скретања (Roshani & Bargegol, 2017):

$$S_d = 1768,068 - 0,4263 \cdot Q_{pe\check{s}} \quad (2-59)$$

где је:

- S_d - засићен саобраћајни ток незаштићеног десног скретања [voz/h],
 $Q_{pe\check{s}}$ - интензитет пешачког тока [peš/h].

2.1.12. ДИСКУСИЈА О ПРЕДСТАВЉЕНИМ МОДЕЛИМА И РЕЗУЛТАТИМА ИСТРАЖИВАЊА ЗАСИЋЕНОГ САОБРАЋАЈНОГ ТОКА НЕЗАШТИЋЕНОГ СКРЕТАЊА

Засићен саобраћајни ток је, од дефинисања тог појма педесетих година прошлог века, био предмет бројних научних истраживања. Упоредни приказ досадашњих методологија за утврђивање засићеног саобраћајног тока незаштићених скретања дат је у наредној табели (Табела 2.6). Приказ обухвата сагледавање теоријске основе модела, променљивих које у њему фигуришу, као и применљивости модела за лево и десно скретање које има конфликт само са пешацима.

На основу прегледа литературе, уочава се да на вредност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања утичу стандардни утицајни фактори који се односе на геометријске и функционалне карактеристике раскрснице. Ипак, у једном од првих модела за прорачун засићеног тока - Вебстеровом моделу - утицај пешачких токова није експлицитно разматран, већ је дат описно кроз карактеристике непосредног окружења раскрснице. Сличан приступ, када је реч о мањим и средњим интензитетима пешачких токова, уочава се у изворном аустралијском моделу. Важно је напоменути да су квалитет опслуживања пешачких токова и њихов утицај на возачке токове у почетку били занемарени, с обзиром на то да су саобраћајни системи били доминантно фокусирани на моторизован саобраћај.

Изворни аустралијски модел и шведски модел заснивају се на теорији прихватљивог интервала слеђења, при чему вредност засићеног тока зависи од интензитета конфликтног пешачког тока и параметара опслуживања возила у скретању. Параметри

опслуживања возила у скретању су прихватљив интервал слеђења и интервал слеђења возила у скретању. Теорија прихватљивих интервала слеђења је намењена анализи капацитета несигналисаних раскрсница, те се заснива на процесима који се реализују на истим (Станковић, 2023).

Табела 2.6. Упоредни приказ досадашњих методологија у утврђивању вредности засићеног саобраћајног тока незаштићених скретања

Модел (Извор)	Основа модела		Утицајне променљиве				Примена модела и за лево скретање
	Теорија прихватљивих интервала слеђења	Експериментална истраживања	Прихватљив интервал слеђења	Интензитет пешачког тока	Непосредно окружење раскрснице	Параметри рада светлосних сигнала	
Вебстеров модел (Webster & Cobbe, 1966)		+		инкорпориран у утицају непосредног окружења раскрснице	+		
HCM 7 th ed. (Transportation Research Board, 2022)		+		+	+	индиректно	
Аустралијски модел (Akcelik, 1981)	+		+	+	+	+	
SIDRA (Akcelik and Associates, 2012)		+		+			
CCG 3 rd ed. (Teplý и остали, 2008)		+		+		индиректно	
Фински модел (Väylävirasto, 2022, Luttinen & Nevala, 2002)		+		+			+
Шведски модел (Bang, 1978; Trafikverket, 2014; Bang и остали, 2016)	+		+	+		+	+
Немачки модел, HBS 2015 (FGSV, 2015)		+		+	на нивоу циклуса	+	
Дански модел (Vejdirektoratet, 2010; Vejdirektoratet, 2019)		+		+		+	
Домаће препоруке (Станић, 1991)		+		+			+
(Rouphail & Eads, 1997)		+		+			
(Chen и остали, 2011)		+		+		+	
(Roshani & Bargegol, 2017)		+		+			

Остали приказани модели за утврђивање засићеног тока незаштићених скретања која имају конфликт са пешацима резултат су експерименталних истраживања. Очекивано, у свим моделима као кључна променљива фигурише интензитет пешачких токова, будући да представља најутицајнији параметар на вредност засићеног тока незаштићеног скретања. При томе, постоје различити приступи у посматрању овог параметра. У већини модела интензитет конфликтног пешачког тока се посматра на нивоу једног часа, експандиран у односу на дужину циклуса. Међутим, у HCM7 и CCG3 моделима се посматра интензитет пешачког тока експандиран на ниво једног часа зеленог - стварног или ефективног. Експандирање интензитета пешачког тока у односу на ефективно (HCM7) или стварно (CCG3) зелено време омогућава да се индиректно узме у обзир време опслуживања пешака, односно преостало расположиво време за опслуживање возила у скретању.

Утицај пешачког тока квантификован је на различите начине, у зависности од модела. У финском моделу и моделима представљеним у радовима аутора Roshani и Bargegol (2017), Rourhail и Eads (1997) и Chen и остали (2011), засићени ток је дефинисан као функција интензитета конфликтног пешачког тока. С друге стране, у аустралијском моделу SIDRA, CCG3 моделу и моделу домаћих препорука, утицај пешака је квантификован фактором утицаја, који је дат као функција интензитета пешачког тока. Нешто другачији приступ квантификовању утицаја пешака примењен је у моделима HCM7, HBS, као и у шведском и данском моделу. Ови модели се заснивају на претпоставци да опслуживање пешака блокира пролазак возила у скретању на почетку зеленог сигналног појма (Bang, 1978; Vejdirektoratet, 2010; Trafikverket, 2014; Wu, 2015; Bang и остали, 2016; Vejdirektoratet, 2019). У HCM7 моделу фактор утицаја пешака зависи од степена заузетости конфликтне зоне, док се у HBS, шведском и данском моделу утврђује трајање периода блокирања проласка возила у скретању током зеленог сигналног појма.

Међутим, утврђивање времена блокирања у шведском и данском моделу, као и утврђивање капацитета у HBS моделу, захтева познавање параметара рада светлосних сигнала који нису познати на почетку поступка оптимизације. У данском моделу овај проблем је решен тако што се базна вредност засићеног тока користи у поступку оптимизације, док се утицај конфликтног пешачког тока на капацитет ексклузивне траке за десно скретање квантификује након утврђивања параметара рада сигнала. Усвајањем базне вредности засићеног тока, степен искоришћења идеалног капацитета незаштићеног десног скретања не може бити адекватно утврђен у поступку оптимизације, што може резултирати недовољним зеленим временом. HCM7 и CCG3 модели захтевају познавање параметара рада светлосних сигнала, али индиректно - ради експандирања интензитета пешачког тока у односу на зелено време.

Утицај конфликтног пешачког тока може бити смањен или елиминисан у зависности од начина опслуживања токова на раскрсници. Наиме, уколико зелени сигнални појам пешачког тока почиње раније у односу на зелено за возачки ток, утицај пешака може бити смањен, јер ће се део пешака опслужити пре почетка опслуживања возачког тока. У данском и HBS моделу препознат је значај ранијег почетка зеленог сигналног појма за пешачке токове, те је овај параметар уврштен у прорачун капацитета. Имајући у виду претходно наведено, овај параметар може бити значајан у спрези са утицајем пешачких токова при прорачуну засићеног тока незаштићеног скретања. Поред утицаја на ефикасност опслуживања возачких токова у скретању, ранији почетак зеленог сигналног појма за пешаке има позитивне ефекте и у погледу безбедности пешачких токова. Наиме, истраживањем у Израелу утврђено је да је током целог зеленог већи

процент пропуштања пешака од стране возача возила у скретању, уколико је дефинисано да зелено за пешаке почне раније (Gitelman и остали, 2020).

Шведски и фински приручник, као и домаће препоруке, прецизирају могућност примене модела и за лева и за десна скретања која имају конфликт искључиво са пешацима. Остали представљени модели намењени су утврђивању засићеног тока незаштићеног десног скретања које има конфликт са пешацима. Међутим, ови модели могу се применити и у случају левог скретања из једносмерне улице у једносмерну улицу, обзиром на сличне оперативне карактеристике (Rouphail & Eads, 1997). На основу наведеног може се закључити да релевантни модели нису универзални у примени и за лева и за десна скретања. Разлог за то лежи у чињеници да се лева скретања најчешће опслужују истовремено са конфликтним возачким током, па се утицај пешачког тока посматра у комбинацији са утицајем возачког тока. У том случају, утицај пешачког тока није занемарен, али је утицај возачког тока доминантнији, јер се сматра да се одређени број пешака опслужи током опслуживања иницијалног реда конфликтног возачког тока (Transportation Research Board, 2022; Terly и остали, 2008). Ипак, лево скретање може имати конфликт само са пешацима на трокраким раскрсницама или четворокраким раскрсницама на којима је супротни крак једносмеран излаз. Карактеристике опслуживања таквог левог скретања се не могу у потпуности поистоветити са опслуживањем десног скретања, тако да примена представљених модела за десно скретање није у потпуности адекватна. Наиме, возила у левом скретању имају дужу путању до конфликтног пешачког прелаза, па утицај пешака може бити смањен, с обзиром на то да се пешаци делимично или потпуно опслуже за то време (Соеуманс & Herrera, 2003). Међутим, не може се априори усвојити да пешачки ток нема утицај на возила у левом скретању због дужег времена путовања. Дакле, време путовања или дужина трајекторије до конфликтног пешачког прелаза може бити значајан фактор у комбинацији са утицајем пешачких токова.

2.2. ИСТРАЖИВАЊА УТИЦАЈА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА НА САОБРАЋАЈНИ ПРОЦЕС НА НЕСИГНАЛИСАНИМ УКРШТАЊИМА

У наставку дат је преглед досадашњих приступа у истраживању и моделирању утицаја конфликтног пешачког тока на реализацију саобраћајног процеса у зони несигналисаних укрштања.

2.2.1. МЕТОДОЛОГИЈА ЗА УТВРЂИВАЊЕ НИВОА УСЛУГЕ НА ДЕОНИЦАМА У ПРИРУЧНИКУ HCM7

Деоница се, према приручнику HCM7, дефинише као део градске саобраћајнице између две раскрснице, при чему се у овој дисертацији посматра случај деонице између две сигнализане раскрснице. Према наведеном приручнику, ниво услуге на деоницама утврђује се на основу брзине путовања дуж деонице која узима у обзир утицаје као што су (Transportation Research Board, 2022):

- начин регулисања саобраћаја и геометрија излазне раскрснице,
- тип управљања саобраћајем на улазној раскрсници,
- густина саобраћајног тока,
- маневри скретања на приступе са посматране деонице,
- растојање сигнализаних раскрсница,
- попречни профил (тип разделног острва и постојање ивичњака),
- густина приступа,

- присуство уличног паркирања,
- прелазак пешака на несигналисаном пешачком прелазу,
- присуство бициклиста у саобраћајној или засебној бициклическој траци,
- маневари упаркиравања и испаркиравања.

Наведени утицаји квантификовани су факторима утицаја или додатним временским губицима који се користе у поступку утврђивања брзине путовања дуж деонице. У овој дисертацији детаљније је разматран утицај пешака, с обзиром на предмет истраживања.

Брзина путовања дуж деонице утврђује се применом наредне релације (Transportation Research Board, 2022):

$$V_{put} = \frac{3,6 \cdot L}{t_{put} + d_{pravo}} \quad (2-60)$$

где је:

V_{put} - брзина путовања дуж деонице [km/h],

L - дужина деонице [m],

t_{put} - време путовања дуж деонице [s],

d_{pravo} - временски губици токова право који осликавају утицај начина регулисања и геометрије излазне раскрснице [s/voz].

Највећи део претходно наведених утицаја на брзину путовања је, заправо, инкорпориран у време путовања дуж деонице, које се утврђује применом релације (2-61) (Transportation Research Board, 2022):

$$t_{put} = \frac{6,0 - l_{st}}{0,0082 \cdot L} \cdot f_{upr} + \frac{3,6 \cdot L}{V_{sl}} \cdot f_{gust} + \sum_{i=1}^{N_{pris}} d_{pris,i} + d_{ost} \quad (2-61)$$

где је:

l_{st} - временски губици на старту [s], за сигнализоване раскрснице $l_{st} = 2,0$ s,

f_{upr} - фактор утицаја типа управљања улазне раскрснице [-], за сигнализоване раскрснице $f_{upr} = 1,00$

f_{gust} - фактор утицаја густине саобраћајног тока дуж деонице [-], утврђује се применом наредне релације:

$$f_{gust} = \frac{2}{1 + \left(1 - \frac{Q}{32,8 \cdot N_{pravo} \cdot V_{sl}}\right)^{0,21}} \quad (2-62)$$

Q - проток дуж деонице [voz/h],

N_{pravo} - број саобраћајних трака право на деоници у посматраном смеру [трака],

V_{sl} - брзина слободног тока [km/h], утврђује се применом наредне релације:

$$V_{sl} = V_{sl,b} \cdot f_{L,sig} \geq V_{ogr} \quad (2-63)$$

V_{ogr} - ограничена брзина [km/h],

$f_{L,sig}$ - фактор утицаја растојања сигнализаних раскрсница [-], утврђује се применом наредне релације:

$$f_{L,sig} = 1,02 - 0,89 \cdot \frac{V_{sl,b} - 31,4}{\max(L_{sig}, 121,9)} \leq 1,0 \quad (2-64)$$

L_{sig} - растојање између сигнализаних раскрсница [m],

$V_{sl,b}$ - базна вредност брзине слободног тока [km/h], утврђује се применом релације (2-65)

$$V_{sl_b} = V_{kalib} + V_{konst} + f_{pprof} + f_{pris} + f_{park} \quad (2-65)$$

- V_{kalib} - калибрациони фактор базне вредности брзине слободног тока [km/h], препоручена вредност $V_{kalib} = 0$ km/h за Сједињене Америчке Државе; за потребе примене у локалним условима вредност утврдити истраживањем,
- V_{konst} - константа брзине [km/h], $V_{konst} = 41,20 + 0,47 \cdot V_{ogr}$
- f_{pprof} - фактор утицаја попречног профила [km/h] (Табела 2.7),
- f_{pris} - фактор утицаја густине приступа [km/h] (Табела 2.8),
- f_{park} - фактор утицаја присуства уличног паркирања [km/h], $f_{park} = -4,83 \cdot p_{park}$
- p_{park} - проценат дужине деонице на којој је дозвољено улично паркирање са десне стране (децимални запис) [-],
- $d_{pris,i}$ - временски губици услед скретања на приступе са посматране деонице [s/voz],
- N_{pris} - број приступа са десне и леве стране саобраћајнице (узимајући у обзир само оне приступе са леве стране саобраћајнице на које возило из посматраног смера може скренути),
- d_{ost} - временски губици услед осталих утицаја, нпр. маневри упаркиравања на уличним паркинџ местима, *прелазак пешака на несигналисаном пешачком прелазу*, присуство бициклиста [s/voz].

Табела 2.7. Вредности фактора утицаја попречног профила у зависности од типа разделног острва и постојања ивичњака (Transportation Research Board, 2022)

Тип разделног острва	Процент дужине са рестриктивним разделним острвом [%]	Фактор утицаја попречног профила [km/h]	
		Без ивичњака	Са ивичњаком
Рестриктивно (подразумева физичку баријеру између смерова, нпр. бетонска ограда или зелена површина)	20	0,48	-1,45
	40	0,96	-2,25
	60	1,45	-2,90
	80	1,93	-3,54
	100	2,41	-4,34
Нерестриктивно (не подразумева физичку баријеру између смерова, нпр. бојено острво)	Није применљиво	0,00	-0,80
Без разделног острва	Није применљиво	0,00	-0,80

Табела 2.8. Вредности фактора утицаја густине приступа у зависности од густине приступа и броја трака право (Transportation Research Board, 2022)

Густина приступа [pripusta/km]	Фактор утицаја густине приступа [km/h]		
	Број трака право		
	1 трака	2 траке	3 траке
0,00	0,00	0,00	0,00
1,25	-0,32	-0,16	-0,16
2,50	-0,48	-0,32	-0,16
6,25	-1,29	-0,64	-0,48
12,50	-2,57	-1,29	-0,80
25,00	-4,99	-2,57	-1,61
37,50	-7,56	-3,70	-2,57

Утицај пешака. У приручнику се наводи да постојање несигнализованог пешачког прелаза на деоници евидентно доводи до временских губитака и утиче на брзину путовања. Уколико дуж деонице постоји овај утицај, препоручује се да се временски губици утврде другим моделима и да се добијене вредности уврсте у једначину (2-61), с обзиром да у оквиру ове методологије није дефинисан модел за прорачун временских губитака услед утицаја пешака.

2.2.2. МЕТОДОЛОГИЈА ЗА УТВРЂИВАЊЕ НИВОА УСЛУГЕ НА НЕСИГНАЛИСАНИМ РАСКРСНИЦАМА У ПРИРУЧНИКУ НСМ7

На несигналисаним раскрсницама возачки токови који се крећу право дуж приоритетног правца морају пропустити само пешаке на пешачком прелазу преко приоритетног правца. У складу са тим, кретање ових токова на приоритетног правцу може се посматрати као кретање токова дуж деонице. Из тог разлога сагледана је и методологија за утврђивање нивоа услуге на раскрсницама регулисаним саобраћајним знаковима, дата у приручнику НСМ7. Ова методологија се заснива на утврђивању нивоа услуге неприоритетних токова (Transportation Research Board, 2022).

Први корак у поступку утврђивања нивоа услуге на несигналисаним раскрсницама, према приручнику НСМ7, подразумева рангирање токова на раскрсници. Рангирање се заснива на приоритету опслуживања токова, тачније приоритету коришћења расположивог интервала слеђења. Исправан редослед приоритета опслуживања, на површинској четворокракој раскрсници, је :

- лева скретања са приоритетног правца,
- десна скретања са неприоритетног правца,
- полукружна окретања на приоритетном правцу,
- токови право са неприоритетног правца,
- лева скретања са неприоритетног правца.

У складу са тим, токови су ранжирани на следећи начин:

- **ранг 1** - токови на приоритетном правцу, који не морају пропустити ниједан други ток:
 - право и десно на приоритетном правцу,
 - пешачки токови преко неприоритетног правца,
- **ранг 2** – неприоритетни токови у односу на токове ранга 1:
 - лева скретања са приоритетног правца,
 - полукружна окретања на приоритетном правцу,
 - десна скретања са неприоритетног правца,
 - пешачки токови преко приоритетног правца,
- **ранг 3** – неприоритетни токови у односу на токове ранга 1 и 2:
 - токови право на неприоритетном правцу на четворокракој раскрсници,
 - лева скретања са неприоритетног правца на трокракој раскрсници,
- **ранг 4** – неприоритетни токови у односу на све претходно наведене рангове:
 - лева скретања са неприоритетног правца на четворокракој раскрсници.

У другом кораку се интензитет возачких токова конвертује у меродавно саобраћајно оптерећење на основу фактора вршног сата.

У трећем кораку, за сваки неприоритетан ток, утврђује се који токови имају приоритет у односу на тај ток, на основу чега се рачуна меродаван конфликтни ток. Интензитет пешачког тока се такође уврштава у меродаван конфликтни ток за све возачке токове који имају конфликт са пешацима.

Следећи, четврти корак подразумева утврђивање критичног интервала слеђења и интервала слеђења за сваки неприоритетан ток. Базне вредности критичног интервала

слеђења, које су дате за сваки тип маневра и тип саобраћајнице (Табела 2.9), даље се коригују у зависности од структуре тока, уздужног нагиба и геометрије раскрснице (Transportation Research Board, 2022):

$$t_{krit,x} = t_{krit,b} + t_{krit,KV} \cdot P_{KV} + t_{krit,UN} \cdot UN - t_{3,lsk} \quad (2-66)$$

где је:

$t_{krit,x}$ - критичан интервал слеђења за маневар x [s],

$t_{krit,b}$ - базна вредност критичног интервала слеђења [s],

$t_{krit,KV}$ - фактор утицаја структуре тока [s],

$$t_{krit,KV} = \begin{cases} 1,0, & \text{за приоритетни правац са једном траком по смеру} \\ 2,0, & \text{за приоритетни правац са две или три траке по смеру} \end{cases}$$

P_{KV} - проценат комерцијалних возила [%/100],

$t_{krit,UN}$ - фактор утицаја уздужног нагиба [s],

$$t_{krit,UN} = \begin{cases} 0,1, & \text{за токове десно са неприоритетног правца} \\ 0,2, & \text{за токове право и лево са неприоритетног правца} \end{cases}$$

UN - проценат уздужног нагиба (целобројна вредност) [-],

$t_{3,lsk}$ - фактор утицаја геометрије раскрснице [s],

$$t_{3,lsk} = \begin{cases} 0,7, & \text{за токове лево са неприоритетног правца на трокракој раскрсници} \\ 0,0, & \text{у супротном} \end{cases}$$

Табела 2.9. Базна вредност критичног интервала слеђења у зависности од типа маневра и типа саобраћајнице (Transportation Research Board, 2022)

$t_{krit,x}$ [s] Тип маневра	Тип саобраћајнице		
	Две траке	Четири траке	Шест трака
Лево скретање са приоритетног правца	4,1	4,1	5,3
Полукружно окретање на приоритетном правцу	-	6,4 за разделно острво ширине < 6,4 m 6,9 за разделно острво ширине ≥ 6,4 m	5,6
Десно скретање са неприоритетног правца	6,2	6,9	7,1
Токови право на неприоритетном правцу	Пролазак у 1 фази: 6,5 Пролазак у 2 фазе, фаза I: 5,5	Пролазак у 1 фази: 6,5 Пролазак у 2 фазе, фаза I: 5,5	Пролазак у 1 фази: 6,5 Пролазак у 2 фазе, фаза I: 5,5
	Пролазак у 2 фазе, фаза II: 5,5	Пролазак у 2 фазе, фаза II: 5,5	Пролазак у 2 фазе, фаза II: 5,5
Лево скретање са неприоритетног правца	Пролазак у 1 фази: 7,1 Пролазак у 2 фазе, фаза I: 6,1	Пролазак у 1 фази: 7,5 Пролазак у 2 фазе, фаза I: 6,5	Пролазак у 1 фази: 6,4 Пролазак у 2 фазе, фаза I: 7,3
	Пролазак у 2 фазе, фаза II: 6,1	Пролазак у 2 фазе, фаза II: 6,5	Пролазак у 2 фазе, фаза II: 6,7

Интервал слеђења за сваки неприоритетан ток утврђује се на основу базне вредности, дате у зависности од типа маневра и типа саобраћајнице (Табела 2.10), која се даље коригује у зависности од структуре тока (Transportation Research Board, 2022):

$$t_{h,x} = t_{h,b} + t_{h,KV} \cdot P_{KV} \quad (2-67)$$

где је:

$t_{h,x}$ - интервал слеђења возила за маневар x [s],

$t_{h,b}$ - базна вредност критичног интервала слеђења возила [s],

$t_{h,KV}$ - фактор утицаја структуре тока [s],

$$t_{h,KV} = \begin{cases} 0,9, & \text{за приоритетни правац са једном траком по смеру} \\ 1,0, & \text{за приоритетни правац са две или три траке по смеру} \end{cases}$$

У петом кораку приступа се прорачуну потенцијалног капацитета неприоритетних токова, применом модела заснованог на теорији прихватљивих интервала слеђења, који је дат наредном релацијом (Transportation Research Board, 2022):

$$K_{p,x} = Q_{konf,x} \cdot \frac{e^{-t_{krit,x} \cdot Q_{konf,x}/3600}}{1 - e^{-t_{h,x} \cdot Q_{konf,x}/3600}} \quad (2-68)$$

где је:

$K_{p,x}$ - потенцијални капацитет маневра x [voz/h],

$Q_{konf,x}$ - меродавно конфликтно оптерећење [voz/h].

Табела 2.10. Базна вредност интервала слеђења возила у зависности од типа манавра и типа саобраћајнице (Transportation Research Board, 2022)

$t_{h,x}$ [s] Тип маневра	Тип саобраћајнице		
	Две траке	Четири траке	Шест трака
Лево скретање са приоритетног правца	2,2	2,2	3,1
Полукружно окретање на приоритетном правцу	-	2,5 за разделно острво ширине $\geq 6,4$ m 3,1 за разделно острво ширине $< 6,4$ m	2,3
Десно скретање са неприоритетног правца	3,3	3,3	3,9
Токови право на неприоритетном правцу	4,0	4,0	4,0
Лево скретање са неприоритетног правца	3,5	3,5	3,8

Даљи кораци подразумевају одређивање реалног капацитета, временских губитака и дужине редова. Реалан капацитет представља коригован потенцијални капацитет, узимајући у обзир утицај мешовите траке, утицај кратке траке за лево скретање, утицај пешака, вероватноћу да токови виших рангова искористе одређени интервал слеђења уколико у исто време чекају прихватљив интервал слеђења, и сл. У приручнику се наводи да се за токове ранга 1 претпоставља да немају ометања од стране токова нижег ранга и да немају временске губитке услед заустављања или успоравања кроз несигналисану раскрсницу. Евентуално токови ранга 1 могу имати временске губитке услед левих скретања из мешовите траке. Међутим, у приручнику се истиче да су експериментална истраживања показала да је тај утицај углавном мали, јер на приоритетном правцу углавном постоји довољно простора за обилажења возила која чекају да скрену лево.

Утицај пешака. У оквиру приказане методологије наводи се да токови ранга 1 немају ометања ни од стране пешака, што, *de facto*, није тачно и може се окарактерисати као ограничење методологије. Утицај пешака на токове осталих рангова се квантификује фактором блокирања од стране пешака, односно процентом времена током којег пешаци блокирају пролазак возила у периоду од једног сата, који се утврђује применом наредне релације (Transportation Research Board, 2022):

$$f_{peš} = \frac{N_{pl_peš} \cdot \check{T}}{3600} \quad (2-69)$$

где је:

$f_{peš}$ - проценат времена током ког пешаци блокирају пролазак возила у току сат времена [-],

$N_{pl_peš}$ - број група/плотуна пешака [-],

\check{T} - ширина саобраћајне траке на излазу (дужина конфликтне зоне) [m],

$V_{peš}$ - брзина пешака [m/s], претпоставља се $V_{peš} = 1,07$ m/s.

Даље се потенцијални капацитет множи фактором утицаја пешака, који представља вероватноћу да пешачки ток не блокира пролазак возила, а рачуна се применом следеће релације (Transportation Research Board, 2022):

$$p_{peš} = 1 - f_{peš} \quad (2-70)$$

где је:

$p_{peš}$ - фактор отпора пешака [-].

2.2.3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА УТИЦАЈА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА НА САОБРАЋАЈНИ ПРОЦЕС НА НЕСИГНАЛИСАНИМ УКРШТАЊИМА

Вак и Киес (2012) су истраживали утицај пешака на капацитет деонице у зони стандардних несигналисаних пешачких прелаза и несигналисаних пешачких прелаза са пешачким острвом применом микросимулационог модела VISSIM. У спроведеном истраживању узет је у обзир различит проценат возача који пропуштају пешаке, што репрезентује примењену законску регулативу и саобраћајну културу возача у Немачкој и Пољској. Аутори су утврдили да увођење пешачког острва на пешачком прелазу у Немачкој није значајно утицало на смањење капацитета, јер је велики број возача пропуштао пешаке, без обзира на постојање пешачког острва. С друге стране, установили су да је увођење разделног острва у Пољској допринело повећању процента пропуштања пешака, а последично и смањењу капацитета деонице, у просеку за око 200 возила на час. На основу резултата истраживања дефинисали су модел за прорачун капацитета деонице у зони пешачког прелаза са разделним острвом (Вак & Киес, 2012):

$$K_{pravo} = 1550 \cdot e^{\frac{-(1,75 \cdot Y_r + 4,24) \cdot Q_{peš}}{3600}} \quad (2-71)$$

где је:

K_{pravo} - капацитет деонице у зони несигналисаног пешачког прелаза са разделним острвом [voz/h],

Y_r - просечан проценат пропуштања пешака на пешачком прелазу [-].

Kadali и остали (2015) су у Гунтру, у Индији, истраживали утицај пешака на параметре саобраћајних токова дуж деоница са две траке по смеру, применом технике снимања видео-записа. У циљу поређења параметара саобраћајних токова у присуству пешака, аутори су истраживање спровели на две деонице: на деоници са пешачким прелазом и на деоници без пешачког прелаза, са баријером између смерова, тако да нема ни непрописних прелазака. У спроведеном истраживању, карактеристике пешачких и возачких токова утврђене су за период посматрања од пет минута, након чега су експандиране на часовни ниво. Резултати су указали на статистички значајну разлику у брзинама на анализираним деоницама, те да је брзина на деоници са пешачким прелазом била 7,7 километара на час нижа него на деоници без пешачког прелаза. Како је истраживање спроведено за категорије мотоцикл, рикша и путнички аутомобил, показало се да су пешаци најмање утицали на брзину кретања мотоцикала. Аутори наводе да су возачи мотоцикала чешће мењали путању и обилазили пешака, него што су успоравали или заустављали се. Kadali и остали (2015) су истраживањем показали да је редукција брзине услед утицаја пешака износила 2,3 километара на час за мотоцикле, 7,4 километара на час за рикше, а нешто више од 8 километара на час за путничке аутомобиле. На основу брзине и протока успостављене су фундаменталне зависности протока, брзине и густине за локације са пешачким

прелазом и без пешачког прелаза. Резултати су показали да је пешачки прелаз на деоници, поред смањења брзине, допринео и повећању густине, као и смањењу протока. Теоријски капацитет деонице, по смеру, износио је 2486 возила на час у случају постојања пешачког прелаза, а 3676 возила на час када није постојао утицај пешака.

2.2.4. ДИСКУСИЈА О ПРЕДСТАВЉЕНИМ ПРИСТУПИМА У МОДЕЛИРАЊУ УТИЦАЈА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА НА НЕСИГНАЛИСАНИМ УКРШТАЊИМА

Евидентно је да прелазак пешака на несигналисаним пешачким прелазима утиче на возачке токове дуж деонице, а тај утицај може бити квантификован временским губицима возачких токова или смањењем капацитета деонице. Ипак, интензитет утицаја пешака зависи од процента пропуштања пешака, на који, пак, утичу примењена законска регулатива и саобраћајна култура (Bak & Kieć, 2012). Иако је у литератури препознат утицај пешачких токова на несигналисаним пешачким прелазима, тај утицај није често предмет истраживања. На пример, у оквиру методологије HCM7 за утврђивање нивоа услуге на деоници препознат је утицај пешака на несигналисаном пешачком прелазу, те су временски губици услед преласка пешака уврштени у прорачун времена путовања дуж деонице (Transportation Research Board, 2022). Међутим, у оквиру исте методологије није дефинисана процедура за утврђивање вредности тих временских губитака. С друге стране, методологија за прорачун нивоа услуге на несигналисаним раскрсницама, у истом приручнику, не узима у обзир утицај пешачких токова на возачке токове који се крећу право на приоритетном правцу, упркос чињеници да пешаци имају апсолутни приоритет и да их возачки токови морају пропустити.

Комплексност истраживања овог феномена допринела је развоју различитих приступа у његовом проучавању. Bak и Kieć (2012) су применили микросимулациони модел за анализу утицаја пешака, што омогућава свеобухватније сагледавање свих утицајних променљивих и прикупљање неопходних података. Примена микросимулационих модела у истраживањима захтева њихово калибрисање на локалне услове (Коцић, Челар и Станковић, 2018), што се заснива на опсежним истраживањима. С друге стране, Kadali и остали (2015) су утицај присуства пешака на несигналисаном пешачком прелазу утврдили на основу фундаменталних зависности протока, густине и брзине тока. Овај приступ повећава обим и трошкове истраживања, а притом не дефинише јасну зависност између капацитета деонице и карактеристика пешачких токова. Примена успостављања фундаменталних зависности забележена је у више истраживања утицаја непрописних прелазака пешака, на локацијама без пешачког прелаза (Dhamaniya & Chandra, 2014; Golakiya и остали, 2019; Amin и остали, 2021; Thakur и остали, 2021).

2.3. ПРЕГЛЕД ИСТРАЖИВАЊА КАРАКТЕРИСТИКА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА

Пешаци представљају једну од најугроженијих категорија учесника у саобраћају, имајући у виду да је, током 2024. године, у саобраћајним незгодама у Србији смртно страдало 111 пешака, а скоро 2600 их је повређено (Агенција за безбедност саобраћаја, 2025). Од укупног броја страдалих пешака, 20,7% смртно страдалих и 46,7% повређених пешака учествовало је у незгодама приликом преласка на обележеном пешачком прелазу, при чему је незаустављање возила испред пешачког прелаза

најчешћи утицајни фактор повезан са повређивањем пешака (Агенција за безбедност саобраћаја, 2025). С обзиром на то, поред карактеристика возачких токова, неопходно је познавати и карактеристике пешачких токова, у циљу постизања ефикасног и безбедног опслуживања на местима њиховог укрштања.

У даљем тексту дат је преглед истраживања карактеристика пешачких токова, са посебним фокусом на истраживању брзине пешачког тока на сигналисаним раскрсницама и несигналисаним пешачким прелазима на пресеку. Преглед досадашњих истраживања параметара пешачких токова заснива се на резултатима добијеним на сигналисаним раскрсницама и несигналисаним пешачким прелазима, с обзиром на то да је утврђено да су брзине преласка улице статистички значајно веће у односу на брзину кретања по тротоару (Montufar и остали, 2007; Chandra & Bharti, 2013; Nteziyaremye & Sinclair, 2013).

2.3.1. ПРЕГЛЕД ИСТРАЖИВАЊА КАРАКТЕРИСТИКА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА НА СИГНАЛИСАНИМ УКРШТАЊИМА

У овом поглављу представљени су резултати досадашњих истраживања брзине пешака и времена реакције на почетак зеленог сигналног појма на сигналисаним раскрсницама. Сигналисани пешачки прелазни на пресеку нису разматрани у оквиру дисертације, јер су ранија истраживања показала да се параметри пешачких токова разликују на пешачким прелазима на пресеку у односу на сигнализоване раскрснице (Bennett и остали, 2001). Наиме, брзине преласка су мање, а времена реакције краћа на сигналисаним пешачким прелазима на пресеку, у поређењу са резултатима ранијих истраживања аутора Akcelik and Associates (2001), такође спроведених у Аустралији на сигналисаним раскрсницама.

Време реакције представља време потребно пешацима да перцепирају почетак зеленог сигналног појма и започну прелазак ступањем на пешачки прелаз, односно коловоз (Transportation Research Board, 2022). Овај параметар се примењује у процедурама за утврђивање минималног зеленог времена за пешачке токове.

Брзина пешака је један од кључних параметара у поступцима оптимизације параметара рада светлосних сигнала на сигналисаним раскрсницама. Поступци оптимизације се заснивају на 15. перцентилу брзине пешака, што представља вредност брзине од које се спорије креће 15% пешака. Из тог разлога, већина истраживања усмерена је на утврђивање просечне брзине и 15. перцентиала брзине.

Релевантни приручници дефинишу брзину пешака која се користи при прорачуну минималног зеленог времена или заштитног времена за пешаке (Табела 2.11). Препоручене вредности варирају међу приручницима, а поједини приручници дефинишу и распон вредности брзине. Може се закључити да различите карактеристике пешачких токова утичу на брзину преласка, те је неопходно утврдити адекватну вредност брзине пешака у локалним условима. Посебну улогу може имати микролокација сигнализоване раскрснице, где, на пример, већи удео старијих пешака у току може допринети нижој просечној брзини. Из тог разлога, у даљем тексту дат је преглед досадашњих истраживања који приказује утицајне факторе од којих зависе параметри пешачких токова - брзина и време реакције пешака.

Табела 2.11. Препоручене вредности брзине пешака у литератури

Приручник	$V_{peš}$ [m/s] препоручена за прорачун $Z_{peš, min}$	$V_{peš}$ [m/s] препоручена за прорачун $\Delta t_{peš}$	Извор
Вебстеров приручник	1,22	1,22	(Webster & Cobbe, 1966)
MUTCD	-	1,15 за млађе пешаке 0,92 за старије пешаке	(FHWA, 2009)
HCM	1,22 за 0-20% пешака старијих од 65 година; 1,00 за >20% пешака старијих од 65 година	1,07 или мања	(Transportation Research Board, 2022)
Аустралијске препоруке	-	1,20	(Akcelik, 1981)
Немачке препоруке	-	1,20	(Akcelik and Associates, 2012)
Канадски приручник	1,20 или 1,00 у нормалним условима	1,00 – 1,50; 1,20 препоручена брзина 1,20 или 1,00 у нормалним условима; 1,50 у индустријској зони, при мањим интензитетима пешака; размотрити ниже вредности у специјалним случајевима	(FGSV, 2015b)
Финске препоруке	1,30 до 1,45 је просечна брзина пешака на сигналисаним пешачким прелазима; 1,20 је 15% брзине пешака	1,20 у нормалним условима; 1,40 за дугачке пешачке прелазе; 1,00 за кратке пешачке прелазе	(Luttien & Nevala, 2002)
Дански приручник	1,00	1,00 у нормалним условима; 0,70 за старије пешаке	(Vejdirektoratet, 2010)
Шведски приручник	1,40	1,40	(Trafikverket, 2014; Bang и остали, 2016)
Домаће препоруке	-	1,00 - 1,40	(Особа и остали, 1999)

Где су:

$V_{peš}$ – брзина пешака приликом преласка [m/s],

$Z_{peš, min}$ – минимално зелено време пешачке сигналне групе [s],

$\Delta t_{peš}$ – заштитно време након опслуживања пешачке сигналне групе [s].

Knoblauch и остали (1996) су истраживали брзину и време реакције пешака на почетак зеленог сигналног појма на шеснаест сигналисаних раскрсница у четири града у Сједињеним Америчким Државама. Аутори су дефинисали две старосне групе пешака, тако да је главни фокус спроведеног истраживања био на старосној групи 65 година и старији, а за поређење су користили групу пешака млађих од 65 година (нису разматрали децу млађу од 13 година). Овим истраживањем су утврдили да је просечна брзина млађих пешака била 1,51 метар у секунди, а просечна брзина старијих пешака 1,25 метара у секунди. Вредност 15. перцентила брзине био је 1,25 и 0,97 метара у секунди за млађе и старије пешаке, респективно. Утврдили су да су млађи мушкарци најбрже прелазили улицу (1,56 метара у секунди), док су најспорије прелазиле старије жене (1,19 метара у секунди). Међутим, аутори су истакли да прорачун параметара рада светлосних сигнала треба заснивати само на брзинама оних пешака који прелазе током зеленог сигналног појма. У складу са тим, када су из анализе искључили пешаке који прелазе

током црвеног, утврдили су просечну брзину млађих пешака 1,46 метара у секунди, а старијих пешака 1,21 метар у секунди. За исти узорак су утврдили и 15. перцентил брзине, 1,21 метар у секунди за млађе пешаке и 0,94 метара у секунди за старије пешаке. Аутори су даље анализирали утицај сигналног појма током ког се започиње прелазак (зелено, трепћуће црвено, које се приказује током заштитног времена за пешаке, и црвено) на брзину свих пешака. Истраживањем су показали да су се спорије кретали пешаци који су започели прелазак током зеленог сигналног појма од оних који су прелазак започели током трепћућег црвеног или црвеног. Утврдили су и да су се пешаци кретали брже на раскрсницама на којима је примењена већа дужина циклуса, што су аутори повезали са већим дужинама пешачких прелаза. Такође, пешаци су се кретали брже на пешачким прелазима са краћим трајањем зеленог за пешаке. Што се тиче времена реакције, резултати су показали да је просечна вредност за млађе пешаке била 1,93 секунде (1,83 и 2,01 секунда за мушкарце и жене, респективно). За старије пешаке, просечна вредност времена реакције била је 2,48 секунди, тј. 2,39 и 2,57 секунди за мушкарце и жене, респективно. Даље су утврдили да је 85. перцентил времена реакције за млађе пешаке био 3,06 секунди, и за старије пешаке 3,76 секунди. Дакле, резултати истраживања су показали да су на време реакције утицале карактеристике пешака, тачније пол и старост, те је време реакције старијих пешака и жена било веће. Истраживањем нису утврдили значајан утицај величине групе (да ли су се пешаци кретали самостално или у групи) на вредност времена реакције. (Knoblauch и остали, 1996)

Bennett и остали (2001) су спровели истраживање брзине и времена реакције пешака на четири сигнализоване раскрснице у четири града у Аустралији. Истраживањем су утврдили просечну брзину пешака 1,63 метара по секунди, и 15. перцентил брзине 1,24 метара у секунди. Аутори су установили да је просечна брзина пешака са тешкоћама у кретању (старији пешаци, пешаци са инвалидитетом, родитељи са малим дететом, родитељи који гурају дечја колица) била 1,35 метара у секунди, а 15. перцентил брзине 1,14 метара у секунди. Резултати су показали да је брзина пешака била нешто нижа током викенда (1,58 метара у секунди) у односу на радне дане (1,68 метара у секунди). Аутори су утврдили и да је време реакције на почетак зеленог сигналног појма било 2,68 секунди, као и да се време реакције разликовало током дана викенда и током радних дана (2,57 и 2,79 секунди, респективно). (Bennett и остали, 2001)

Tarawneh (2001) је истраживао брзину пешака у Аману, у Јордану, на дванаест сигнализаних раскрсница, при чему су истраживачи мерили време преласка, анкетирали пешаке о старости и бележили пол пешака и величину групе. Спроведеним истраживањем аутор је утврдио да је 15. перцентил брзине свих пешака био 1,11 метара у секунди, као и да је брзина пешака опадала што су пешаци старији. Резултати су показали и да су се најбрже кретали пешаци између 21 и 30 година (просечна брзина 1,49 метара у секунди, 15. перцентил брзине 1,24 метра у секунди), а након тога пешаци између 31 и 45 година (просечна брзина 1,47 метара у секунди, 15. перцентил брзине 1,22 метра у секунди). Најспорији су били пешаци старији од 65 година са просечном брзином од 1,17 метара у секунди и 15. перцентилом брзине 0,97 метара у секунди. Аутор је истакао да је од тренда опадања брзине што су пешаци старији, одступала просечна брзина пешака млађих од 20 година, која је 1,29 метара у секунди, док је 15. перцентил брзине 1,07 метара у секунди. Исте вредности брзине су утврђене и за пешаке између 46 и 65 година. Аутор је утврдио да је пол пешака утицао на брзину, јер су мушкарци улицу прелазили нешто брже од жена (1,35 и 1,33 метра у секунди, респективно). Пешаци који су улицу прелазили индивидуално или у пару, кретали су се нешто брже од пешака у већим групама. Такође, показало се да је брзина расла са порастом дужине пешачког прелаза, тј. пешаци су се кретали брже приликом преласка улице већих ширина. Све утврђене разлике биле су статистички значајне. (Tarawneh, 2001)

Gates и остали (2006) су истраживали зависност брзине кретања пешака од пола, старости, величине групе и начина управљања на једнаест раскрсница (осам сигналисаних и три несигналисаних) у Висконсину, Сједињене Америчке Државе. Резултати истраживања показали су да је 15. перцентил брзине свих пешака био 1,15 метара у секунди, док је просечна брзина била 1,40 метара у секунди. Аутори су истакли да је старост пешака имала значајан утицај на брзину кретања: млади пешаци били су најбржи (15. перцентил 1,27 метара у секунди; просечна брзина 1,48 метара у секунди), пешаци средњих година (30 - 64 године) нешто спорији (15. перцентил 1,22 метра у секунди; просечна брзина 1,44 метара у секунди), док су најспорији били старији пешаци (> 64 године) са 15. перцентилом 0,92 метра у секунди и просечном брзином 1,16 метара у секунди. Деца која су се кретала заједно са родитељима имала су 15. перцентил брзине 1,02 метра у секунди, а пешаци са тешкоћама у кретању 0,86 метара у секунди. Резултати су показали да и сигнални појам током ког се започиње прелазак утиче на брзину преласка пешака, јер је брзина у просеку била већа 0,15 – 0,18 метара у секунди уколико су пешаци прелазак започели током црвеног или трепћућег црвеног, у односу на зелени сигнални појам. При томе, жене су биле нешто брже од мушкараца уколико су прелазак започеле током црвеног или трепћућег црвеног сигналног појма, а нешто спорије током зеленог. Аутори су утврдили и да брзина преласка опада како величина групе расте, а разлика у брзинама је била статистички значајна. Утврђено је и да је између полова постојала мала, статистички незначајна разлика у брзини, при чему су жене улицу прелазиле нешто спорије од мушкараца. (Gates и остали, 2006)

Montufar и остали (2007) су истраживали брзину пешака на осам сигналисаних раскрсница у Винипегу у Канади, где су истраживачи применом штоперице бележили време преласка. Током истраживања, пешаци су разврставани у две старосне групе: млађи пешаци (20 – 64 година) и старији пешаци (> 65 година). Аутори су показали да су се брзине преласка млађих и старијих пешака статистички значајно разликовале. Наиме, просечна брзина млађих пешака износила је 1,61 метар у секунди, а старијих 1,36 метара у секунди. Утврђено је да је 15. перцентил брзине млађих и старијих пешака 1,33 метра у секунди и 1,08 метара у секунди, респективно. Резултати су показали и да су мушкарци улицу прелазили статистички значајно брже од жена. Такође, истраживањем је утврђено да су временске прилике утицале на брзину преласка, јер је брзина била статистички значајно већа током зиме него током лета. (Montufar и остали, 2007)

Rep и остали (2011) су, истраживањем на двадесет шест сигналисаних раскрсница у три града у Кини, утврдили просечну брзину пешака од 1,37 метара у секунди. Резултати тог истраживања показали су да су се жене кретале спорије од мушкараца, при чему је брзина женских пешака била 1,36 метара у секунди, а мушких пешака 1,38 метара у секунди. (Rep и остали, 2011)

Rengarasu и остали (2012) су спровели пилот-истраживање брзине пешака на једној локацији на Шри Ланци, применом технике снимања видео-записа. Према резултатима спроведеног истраживања, просечна брзина свих пешака износила је 1,33 метара у секунди, док је 15. перцентил брзине био 1,20 метара у секунди. Резултати су показали да није било статистички значајне разлике просечних брзина мушкараца (1,33 метара у секунди) и жена (1,32 метра у секунди). Међутим, аутори су напоменули да је на резултат могао утицати мали узорак, као и чињеница да је истраживање спроведено у зони факултета, обухватајући само старосну групу од 22 до 26 година. (Rengarasu и остали, 2012)

Goh и остали (2012) су истраживали брзину пешака, у зависности од пола, старости и доба дана, на две сигнализоване раскрснице у Куала Лумпуру, у Малезији. Резултати тог

истраживања су показали да је просечна брзина свих пешака била 1,31 метар у секунди, док је 15. перцентил брзине био 1,09 метара у секунди. Када је реч о утицају пола, аутори су утврдили да су се мушкарци кретали брже од жена, без обзира на доба дана. Такође, без обзира на доба дана, деца (< 20 година) су се кретала брже од пешака средњих година (21 - 54 година) и најстаријих пешака (> 55 година), чија је брзина била најмања. (Goh и остали 2012)

Cook и Koorey (2013) су, истраживањем на три сигнализоване раскрснице у Инверкаргилу, на Новом Зеланду, утврдили да су се пешаци млађи од 60 година кретали статистички значајно брже од пешака старијих од 60 година. Истим истраживањем је утврђено и да је, за све старосне групе, 15. перцентил брзине био већи са повећањем дужине пешачког прелаза. (Cook & Koorey, 2013)

Hediyeh и остали (2014) су истраживали брзину пешака на стандардним (на краковима раскрснице) и дијагоналним пешачким прелазима на сигнализаној раскрсници у Оукланду, у Сједињеним Америчким Државама. Спроведеним истраживањем је утврђено да се 15. перцентил брзине разликовао за дијагоналне и стандардне пешачке прелазе, а вредности су износиле 1,25 и 1,12 метара у секунди, респективно. Аутори су закључили да је брзина пешака на дијагоналним пешачким прелазима била већа услед већих дужина тих прелаза. Исто истраживање је показало и да брзина преласка опада са порастом броја пешака у групи, без обзира на тип пешачког прелаза. Утврдили су и да је брзина преласка била значајно нижа током трајања зеленог сигналног појма за пешаке, него током трепћућег црвеног. Поред тога, резултати су показали да су пешаци успоравали како прилазе крају пешачког прелаза, у односу на прве три четвртине пешачког прелаза. (Hediyeh и остали, 2014)

Zhang и остали (2014) су истраживањем брзине пешака који имају конфликт са возилима у скретању обухватили седам пешачких прелаза на пет сигнализаних раскрсница у Нагоји, у Јапану. У том истраживању брзина пешака је анализирана у првој и другој половини прелаза и у зависности од смера наилазак пешака, па су тако ближи пешаци били они који су ближи конфликтној зони, док су даљи пешаци даљи од конфликтне зоне у тренутку наилазак. Аутори су истакли да је брзина ближих пешака била статистички значајно већа у првом делу пешачког прелаза где имају конфликт са возилима, него у другом делу пешачког прелаза. Заправо, исти тренд су утврдили за оба смера - и ближи и даљи пешаци кретали су се брже у делу пешачког прелаза где наилазе возила у скретању, него у делу где немају конфликт са возилима. Аутори су закључили да су се пешаци осећали несигурно и да су настојали да убрзају и ослободе конфликтну зону. У истом истраживању је анализиран утицај дужине пешачког прелаза на два пешачка прелаза, различитих дужина (16,2 и 36,2 метра), и резултати су показали да су се пешаци кретали брже на дужим пешачким прелазима. Даље, анализом брзине на једном пешачком прелазу утврђено је да су брзине преласка расле како је зелени сигнални појам одмицао. (Zhang и остали, 2014)

Alhajyaseen (2015) је, такође у Нагоји, у Јапану, истраживао брзину пешака на три сигнализоване раскрснице, посматрајући брзину започињања, брзину преласка и брзину завршетка преласка. Аутор је утврдио да је брзина започињања преласка расла како је зелени сигнални појам одмицао, те да је ова брзина била статистички значајно већа током трепћућег зеленог него током зеленог сигналног појма. Резултати су показали исти тренд и за брзину преласка. На брзину преласка је утицала и дужина пешачког прелаза, те је брзина била статистички значајно већа на дужим прелазима него на краћим. Аутор је пешаке посматрао независно по смеру кретања, и дефинисао ближе и даље пешаке у односу на конфликтну зону. Према резултатима истраживања, брзина

преласка даљих пешака је била мања када је возило у скретању стајало или прилазило конфликтној зони, него када није било возила. Аутор је овај резултат објаснио тиме што су даљи пешаци имали бољу прегледност, те су успоравали тако да би возило могло проћи. Међутим, за ближе пешаке није утврђен овај тренд, за шта је аутор закључио да су ближи пешаци имали лошију прегледност на возила у скретању. Резултати су показали да је током трепћућег зеленог брзина даљих пешака на крају пешачког прелаза била већа него брзина ближих пешака. Аутор је закључио да су пешаци евидентно убрзавали да би што пре напустили конфликтну зону, с обзиром на то да су се осећали несигурније и мање безбедно, јер су прелазак завршавали у делу пешачког прелаза где су наилазила возила у скретању. (Alhajaseen, 2015)

Wu и остали (2017) су брзину пешака истраживали на четири сигнализане раскрснице у граду Сиан, у Кини, и утврдили да је просечна брзина свих пешака (посматрани су само пешаци који прелазе током зеленог сигналног појма) била 1,18 метара у секунди, док је 15. перцентил брзине био 0,87 метара у секунди. Истраживали су утицај пола и старости пешака, као и дужине пешачког прелаза на брзину пешака. Просечна брзина мушких пешака износила је 1,23 метра у секунди, док је 15. перцентил брзине био 0,90 метара у секунди. С друге стране, просечна брзина женских пешака била је 1,13 метара у секунди, а 15. перцентил брзине био је 0,89 метара у секунди. Аутори су утврдили да је просечна брзина младих пешака била 1,25 метара у секунди (15. перцентил 0,93 метара у секунди), пешака средњих година 1,13 метара у секунди (15. перцентил 0,86 метара у секунди), а старијих пешака 1,02 метра у секунди (15. перцентил 0,79 метара у секунди). Резултати су показали да су се, на истој раскрсници, пешаци кретали већом брзином у случају веће дужине пешачког прелаза. (Wu и остали, 2017)

Das и остали (2018) су, применом технике снимања видео-записа, истраживали брзину пешака на једној сигнализаној раскрсници у Калкути, у Индији. Резултати истраживања показали су да су се мушкарци кретали брже од жена, а њихове просечне брзине износиле су 1,52 и 1,46 метара у секунди, респективно. Аутори су утврдили да су мушкарци чешће претрчавали улицу приликом преласка у односу на жене. Истим истраживањем установљено је да су се деца кретала најбрже - просечном брзином 1,64 метара у секунди, одрасли пешаци су се кретали просечном брзином 1,54 метара у секунди, док су се најспорије кретали старији пешаци просечном брзином 1,35 метара у секунди. Резултати су, даље, показали да ношење пртљага није имало утицаја на брзину, а накнадном анкетом пешака утврђено је да већина њих носи лакши пртљак на путу до или са посла. (Das и остали, 2018)

Muley и остали (2018) су истраживали брзину пешака на три пешачка прелаза на две сигнализане раскрснице у Дохи, у Катару, применом технике снимања видео-записа. Утврдили су да је само око 24% пешака прелазило улицу током зеленог и трепћућег зеленог, те да је велики проценат пешака прелазео током црвеног сигналног појма. У складу с тим, аутори су брзине даље анализирали у зависности од сигналног појма током ког су пешаци започињали прелазак, при чему су посматрали брзину започињања, брзину преласка и брзину завршетка преласка. Аутори су утврдили да је брзина започињања преласка током зеленог и трепћућег зеленог сигналног појма била статистички значајно већа за пешаке даље од конфликтне зоне, него за пешаке ближе конфликтној зони. Овај резултат су аутори објаснили чињеницом да су ближи пешаци били обазривији када су започињали прелазак због возила која су напуштала раскрсницу током заштитних времена. Исти тренд брзине започињања преласка утврдили су и током црвеног сигналног појма, али разлика се није показала као статистички значајна. Што се брзине преласка тиче, током зеленог и трепћућег зеленог сигналног појма утврдили су да је на ову брзину утицала дужина пешачког прелаза, јер

је брзина преласка расла са порастом дужине пешачког прелаза. За преласке током црвеног сигналног појма нису утврдили потпуно исти тренд, иако је постојала разлика у брзинама преласка међу пешачким прелазима. Током црвеног сигналног појма брзина завршетка преласка била је статистички значајно мања за даље пешаке него за ближе. Резултати су показали да су ближи пешаци повећавали брзину како би што пре напустили конфликтну зону, што су аутори објаснили чињеницом да су се осећали угрожено јер су прелазили током црвеног сигналног појма. (Muley и остали, 2018)

Zhu и Yang (2019) су истраживали брзину преласка 940 пешака на десет раскрсница у Шангају, од којих је шест било сигналисаних, а четири несигналисаних. Резултати спроведеног истраживања показали су да је просечна брзина свих пешака на сигналисаним раскрсницама била 1,45 метара у секунди, док је 15. перцентил брзине био 1,20 метара у секунди. Аутори су утврдили да су се најспорије кретали старији пешаци (1,30 метара у секунди), а најбрже пешаци средњих година (1,50 метара у секунди), док је брзина младих пешака била 1,42 метра у секунди. Поред тога, разлика у брзинама мушкараца (1,47 метара у секунди) и жена (1,42 метра у секунди) се показала као статистички значајна. Утврђена је негативна корелација између брзине преласка и броја пешака који су прелазили заједно у групи. Аутори су утврдили и да су пешаци убрзавали до конфликтне зоне, након чега би успоравали до краја пешачког прелаза. Такође, резултати су показали да је брзина преласка расла са порастом дужине пешачког прелаза, као и да је брзина преласка била већа пред крај зеленог сигналног појма него на његовом почетку. (Zhu & Yang, 2019)

Muley и остали (2019) су, применом технике снимања видео-записа, истраживали брзину кретања пешака на пет сигналисаних раскрсница у Дохи, у Катару. Резултати су показали да је 15. перцентил брзине износио 1,26 метара у секунди, док је просечна брзина свих пешака била 1,49 метара у секунди. Аутори су утврдили статистички значајну разлику у просечним брзинама мушких (1,50 метара у секунди) и женских пешака (1,39 метара у секунди). Даље су анализе спровели посебно за мушке и женске пешаке. Брзина мушких пешака била је значајно нижа када су сигнали били опремљени каунтерима за одбројавање трајања зеленог сигналног појма (1,42 метра у секунди) него у случају стандардних светлосних сигнала (1,53 метра у секунди). На сигналисаним раскрсницама са каунтерима, брзине мушких пешака који су прелазак започињали током зеленог, заштитног времена и црвеног сигналног појма нису се статистички значајно разликовале. С друге стране, на раскрсницама без каунтера, резултати су показали да су брзине мушких пешака биле значајно ниже када су прелазак започињали током зеленог (1,41 метар у секунди) него током трепћућег зеленог, заштитног времена или црвеног сигналног појма (1,78 метара у секунди, 1,74 метра у секунди и 1,56 метара у секунди, респективно). Аутори су утврдили и да је постојао утицај дужине пешачког прелаза на брзину кретања мушких пешака, јер су брзине на дужим пешачким прелазима биле статистички значајно веће него на краћим прелазима. Што се женских пешака тиче, резултати су показали да брзина није зависила ни од једног од анализираних утицаја (постојање каунтера, дужина пешачког прелаза, сигнални појам током ког се започиње прелазак). Међутим, аутори су напоменули да је узорак женских пешака био врло мали (46 пешака), те да овај резултат не би требало генерализовати. (Muley и остали, 2019)

Hassouna (2020) је истраживањем брзине пешака обухватио три сигналисаних раскрснице у граду Наблусу, у Палестини. На основу спроведеног истраживања, аутор је утврдио да су просечна брзина и 15. перцентил брзине свих пешака 1,35 и 1,06 метара у секунди, респективно. Према резултатима, мушкарци су се кретали брже од жена, при чему је просечна брзина мушких пешака била 1,39 метара у секунди (15. перцентил 1,13

метара у секунди), а женских пешака 1,30 метара у секунди (15. перцентил 1,03 метра у секунди). Аутор је утврдио да су се најбрже кретали млади пешаци (13 – 29 година), просечном брзином 1,45 метара у секунди и 15. перцентилом брзине 1,15 метара у секунди, а најспорије пешаци старији од 64 године, просечном брзином 1,13 метара у секунди и 15. перцентилом брзине 0,89 метара у секунди. (Hassouna, 2020)

Bargegol и остали (2022) су, применом технике снимања видео-записа, истраживали брзину пешака на две сигнализоване раскрснице у Рашту, у Ирану. Брзина је анализирана у зависности од старости, пола, физичких карактеристика пешака (телесне масе), начина облачења (ношење хиџаба или не) и временских услова (са или без кише). Резултати истраживања показали су да је просечна брзина свих пешака при нормалним временским условима била 1,16 метара у секунди, док је 15. перцентил брзине износио 0,97 метара у секунди. Аутори су утврдили да су се пешаци кретали брже када је падала киша - просечна брзина тада је била 1,24 метра у секунди, а 15. перцентил брзине 1,05 метара у секунди. Истраживањима је даље утврђено да су се мушкарци кретали брже од жена, без обзира на старост, телесну масу, временске услове и начин облачења жена. Та разлика није била статистички значајна само у случају пешака млађих од 18 година, за све групе телесне масе. Резултати овог истраживања показали су да су се жене које су носиле хиџаб кретале статистички значајно спорије од оних које хиџаб нису носиле. (Bargegol и остали, 2022)

Alomari и остали (2023) су, применом технике снимања видео-записа, истраживали брзину пешака на девет сигнализаних раскрсница (на свакој је одабран по један пешачки прелаз са највећим интензитетом пешака) у три града у Јордану. Резултати су показали да су просечна брзина и 15. перцентил брзине пешака износили, респективно, 1,18 и 0,89 метара у секунди. Као и у претходним истраживањима, просечна брзина мушких пешака била је већа од просечне брзине женских пешака, и те вредности су износиле 1,23 и 1,10 метара у секунди, респективно. На основу резултата, аутори су закључили да су се деца кретала најбрже, просечном брзином од 1,24 метра у секунди, пешаци средњих година су се кретали брзином 1,18 метара у секунди, а да су се старији пешаци кретали најспорије, брзином 1,04 метра у секунди. (Alomari и остали, 2023)

Параметри и карактеристике пешачких токова истраживани су у Србији и окружењу. Трпковић (2017) је спровела истраживање брзине пешака у локалним условима, фокусирано на пешаке старије 65 година, и закључила да се брзина кретања пешака разликовала у зависности од постојања пешачког острва и примене каунтера на сигнализаном пешачком прелазу. Наиме, утврђено је да су на стандардном сигнализаном пешачком прелазу просечна брзина и 15. перцентил брзине старијих пешака износили 1,08 и 0,82 метра у секунди, респективно. На сигнализаном пешачком прелазу са пешачким острвом, просечна брзина и 15. перцентил износили су, респективно, 1,22 и 1,05 метара у секунди. На пешачким прелазима на којима су светлосни сигнали били опремљени каунтером за одбројавање трајања зеленог, просечна брзина и 15. перцентил били су, респективно, 1,11 и 0,90 метара у секунди. Сличне вредности брзина пешака утврђене су за пешачке прелазе на којима је постојало пешачко острво и био је примењен каунтер (просечна брзина пешака била је 1,12 метара у секунди, а 15. перцентил 0,91 метар у секунди). Истим истраживањем показано је да је удео зеленог времена у циклусу имао статистички значајну негативну корелацију са брзином пешака. (Трпковић, 2017)

Кичић и остали (2023) истраживали су брзину 561 пешака на два пешачка прелаза на сигнализаним раскрсницама у Добоју и закључили да су старост и пол пешака утицали на брзину кретања пешака. Резултати спроведеног истраживања показали су да су се

девојчице кретале просечном брзином од 1,40 и 1,43 метра у секунди, док су се дечаки кретали брзином од 1,47 и 1,48 метара у секунди, на локацијама 1 и 2, респективно. С друге стране, просечна брзина старијих жена била је 1,23 и 1,26 метара у секунди, а старијих мушкараца 1,27 и 1,38 метара у секунди, на локацијама 1 и 2, респективно. (Кичић и остали, 2023)

2.3.2. ДИСКУСИЈА О ПРЕДСТАВЉЕНИМ РЕЗУЛТАТИМА ИСТРАЖИВАЊА КАРАКТЕРИСТИКА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА НА СИГНАЛИСАНИМ УКРШТАЊИМА

Фокус истраживања на сигналисаним раскрсницама био је на брзини пешака и утицајним факторима на тај параметар, што се уочава на основу досадашњих достигнућа у истраживању карактеристика пешачких токова. То је очекивано, с обзиром на значај брзине пешака у поступку оптимизације параметара рада светлосних сигнала. Иако су резултати већине истраживања доследни, уочена су одређена одступања у методологијама и резултатима (Табела 2.12), што може бити последица саобраћајне културе и законске регулативе која важи у окружењу у ком је истраживање спроведено.

Најчешће анализирани утицајни фактори биле су карактеристике самих пешака, при чему су потврђени утицаји пола и старости. Мушки пешаци су углавном били бржи од женских, док је брзина старијих пешака увек била најмања. Међутим, поједини аутори су из узорка искључивали карактеристике као што су тешкоће у кретању (инвалидитет, ношење терета, телесна маса, ходање са децом или љубимцима, гурање колица или бицикла и сл.). С друге стране, истраживања аутора Bennett и остали (2001) и Gates и остали (2006) утврдила су утицај тешкоћа приликом кретања на брзину пешака и истакла значај познавања брзина ове групе пешака.

Многи аутори нису разматрали, односно искључили су из анализе, понашања пешака приликом преласка, као што су претрчавање, прелазак дијагонално, прелазак ван површине пешачког прелаза, прелазак у групи, и сл. Иако ова понашања нису уобичајена, њихово истраживање може указати на специфичности у понашању и потенцијалне проблеме при опслуживању пешака на одређеним локацијама (неадекватна ширина или позиција пешачког прелаза, недовољно време за прелазак и сл.). Ипак, више истраживања је потврдило да су се пешаци у групи кретали спорије, услед међусобне интеракције између пешака у групи (Tarawneh, 2001; Gates и остали, 2006; Hediye и остали, 2014; Zhu & Yang, 2019).

Поред познавања утицаја карактеристика пешака на брзину, значајно је узети у обзир и понашање пешака у интеракцији са возилима у скретању. Наиме, одлука пешака да убрзају када се налазе у конфликтној зони, јер се осећају несигурно (Iryo-Asano & Alhajjaseen, 2017), може изненадити возаче и довести до небезбедних ситуација. У више представљених истраживања потврђен је утицај присуства возила испред конфликтне зоне на брзину пешака у конфликтној зони. Ови резултати су веома значајни и приликом анализе утицаја пешака на возила у скретању.

На промену брзине пешака, поред присуства возила испред конфликтне зоне, утицај има и сигнални појам током кога започињу прелазак, као и примена каунтера за одбројавање трајања зеленог сигналног појма. Истраживања су потврдила да су пешаци убрзавали како зелени сигнални појам одмиче, и да су се брже кретали током трепћућег зеленог и црвеног, у односу на зелени сигнални појам. Овај резултат може бити значајан приликом одређивања заштитних времена за пешаке. Каунтери инсталирани на уређајима за давање светлосних сигнала пружају пешацима информацију о преосталом времену за прелазак, што им улива одређену сигурност, те улицу прелазе мањом брзином него када ту информацију немају.

Табела 2.12. Упоредни приказ досадашњих истраживања и утицајних променљивих на брзину пешака на сигналисаним укрштањима

Извор	Утицајне променљиве												
	Пол	Старост	Тешкоће при кретању	Величина групе	Дужина пешачког прелаза	Дужина трајања зеленог сигналног појама	Сигнални појам током ког пешак започиње прелазак	Сигнали опремљени каунтерима	Временске прилике	Начин облачења	Интеракција са возилима		
(Knoblauch и остали, 1996)	+	+			+	+	+						
(Bennett и остали, 2001)			+										
(Tagawneh, 2001)	+	+		+	+								
(Gates и остали, 2006)	+	+	+	+			+						
(Montufar и остали, 2007)	+	+							+				
(Ren и остали, 2011)	+												
(Rengarasu и остали, 2012)	+												
(Goh и остали 2012)	+	+											
(Cook & Koorey, 2013)		+			+								
(Hediyeh и остали, 2014)				+	+		+					+	
(Zhang и остали, 2014)					+		+					+	
(Alhajyaseen, 2015)					+		+					+	
(Wu и остали, 2017)	+	+			+								
(Das и остали, 2018)	+	+	+										
(Muley и остали, 2018)					+		+					+	
(Zhu & Yang, 2019)	+	+		+	+		+					+	
(Muley и остали, 2019)	+				+		+	+					
(Hassouna, 2020)	+	+											
(Bargegol и остали, 2022)	+	+	+						+		+		
(Alomari и остали, 2023)	+	+											
(Трпковић, 2017)		+						+					
(Кичић и остали, 2023)	+	+											

Од геометријских карактеристика раскрснице, дужина пешачког прелаза је најчешће истраживана као утицајни фактор и потврђено је да су се, са повећањем дужине пешачког прелаза, пешаци кретали већим брзинама.

Важно је напоменути да се време реакције на почетак зеленог сигналног појма, такође примењује у поступку оптимизације параметара рада светлосних сигнала (утврђивање времена потребног за прелазак пешака). Ипак, овај параметар је ретко био предмет истраживања, а утврђено је да зависи од пола и старости пешака (Knoblauch и остали, 1996). Приручник НСМ7, у процедури за утврђивање минималног зеленог времена за пешаке, дефинише да је време реакције 7 секунди и да ова вредност одговара већини пешака (Transportation Research Board, 2022).

Познавање брзине и времена реакције пешака у зависности од свих утицајних фактора је значајно. Међутим, утврђене разлике, чак и статистички значајне, немају велики практични значај за инжењере, те је препоручено да се у поступцима пројектовања система управљања саобраћајем примењују просечне вредности утврђене на узорку свих пешака који прелазе током зеленог сигналног појма (Knoblauch и остали, 1996).

2.3.3. ПРЕГЛЕД ИСТРАЖИВАЊА КАРАКТЕРИСТИКА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА НА НЕСИГНАЛИСАНИМ ПЕШАЧКИМ ПРЕЛАЗИМА НА ПРЕСЕКУ

Међусобни утицај пешачких и возачких токова на несигналисаним пешачким прелазима на пресеку је неминован. Утицај пешака на параметре возачких токова је претходно објашњен, али чињеница је да и возачки токови утичу на карактеристике пешачких токова на несигналисаним прелазима. У даљем тексту дат је преглед истраживања брзине, временских губитака пешака и њиховог понашања у интеракцији са возачким токовима на несигналисаним пешачким прелазима.

Временски губици пешака представљају просечно време чекања пешака од доласка до појаве прилике за прелазак пешачког прелаза (Transportation Research Board, 2022). Овај параметар одсликава утицај возачког тока на пешачки ток и примењује се у поступку утврђивања нивоа услуге пешака.

Li и остали (2013) су истраживали карактеристике пешачких токова на четири несигналисана пешачка прелаза у близини основних школа у Пекингу, у Кини. У овом истраживању акценат је био на понашању деце, те су пешаке разврставали у три групе: деца која улицу прелазе без присуства одраслих, деца која улицу прелазе са одраслима и одрасли. Што се брзине пешака тиче, аутори су утврдили да су се одрасли и одрасли са децом кретали приближно истим брзинама око 1,20 метара у секунди, док су се деца без присуства одраслих кретала брже (1,35 метара у секунди). Резултати су показали и да су пешаци углавном брже прелазили другу половину пешачког прелаза. Овај тренд је био најочигледнији код деце која су прву половину пешачког прелаза прелазила брзином око 1,22 метра у секунди, а другу половину брзином око 1,48 метара у секунди. Даље су аутори анализирали временске губитке услед чекања на прихватљив интервал слеђења или уступање првенства пролаза, и утврдили да су временски губици расли са порастом интензитета возачких токова. На основу овог резултата аутори су закључили да је мала спремност возача да пропусти пешаке. Иако се временски губици нису статистички значајно разликовали, утврдили су да су деца имала веће временске губитке када су се кретала без одраслих, у односу на друге две посматране групе. Поред ових параметара, аутори су анализирали и небезбедно понашање приликом преласка, као што су претрчавање и прелазак без уверавања да ли је безбедно за прелазак. Утврдили су да су деца била склонија небезбедном понашању када су се кретала без присуства одраслих. Наиме, 14,8% до 28,9% деце је претрчавало улицу приликом преласка, у односу на 0 до 4% одраслих или деце са одраслима. Такође, 5,3% до 14,8% деце је започело прелазак без уверавања да је безбедно прећи улицу, док је ово понашање било уочено код око 1% одраслих, самостално или са децом. Резултати су показали да су се деца веома ослањала

на одрасле са којима су се кретала, јер се у том случају 20% до 45% деце није уверило да ли је безбедно пре преласка. (Li и остали, 2013)

Jiang и остали (2015) су истраживали брзину и време чекања пешака на по три несигналисана пешачка прелаза на пресеку у Пекингу, у Кини и у Минхену, у Немачкој, са циљем утврђивања утицаја различитих култура на понашање пешака. Општи закључак аутора је да је просечна брзина пешака у Немачкој била већа него у Кини, и вредности су 1,51 и 1,41 метар у секунди, респективно. Такође, просечна брзина мушких пешака била је већа (у Немачкој 1,56 метара у секунди, у Кини 1,47 метара у секунди) од просечне брзине женских пешака (у Немачкој 1,46 метара у секунди, у Кини 1,36 метара у секунди). Старији пешаци у Немачкој кретали су се брзином 1,34 метара у секунди, што је 11% нижа брзина у односу на цео узорак. У Кини је брзина старијих пешака била 9% нижа у односу на просечну брзину целог узорка и износила је 1,26 метара у секунди. Резултати овог истраживања показали су и да су се пешаци у групи кретали 2% спорије од пешака који су прелазили индивидуално, у обе државе. Аутори су утврдили и да су пешаци убрзавали након проласка конфликтне тачке до краја пешачког прелаза, и исти тренд је утврђен и у Кини и у Немачкој. Што се тиче временских губитака пешака, истраживањем су добијени различити резултати за Немачку и Кину. Наиме, у Немачкој је 70% пешака непосредно по доласку започињало прелазак, и временски губици износили су до 2 секунде. С друге стране, у Кини се 80% пешака одлучивало да чека, чак и да се цео плотун возила опслужи, како би започели прелазак, те су временски губици били и до 16 секунди, у зависности од интензитета возачког тока. Аутори су, на основу тог резултата, закључили да су возачи у Немачкој спремнији да поштују прописе и пропусте пешаке који су показали намеру или започели прелазак. (Jiang и остали, 2015)

Zhao и остали (2016) су, применом технике снимања видео-записа, истраживали брзину и време преласка пешака на три несигналисана пешачка прелаза у граду Чангша, у Кини. Аутори су утврдили просечне брзине пешака између 1,00 и 1,10 метара у секунди, али су истакли да је нижим брзинама преласка можда допринело значајно учешће старијих пешака у пешачком току. Утврдили су да је са повећањем старости пешака расло време преласка, тј. опадала брзина преласка. Резултати су показали да су се најбрже кретали пешаци млађи од 20 година, просечном брзином од 1,06 до 1,20 метара у секунди, а нешто спорији су били пешаци између 20 и 40 година са просечном брзином од 1,00 до 1,10 метара у секунди. Пешаци старости између 40 и 60 година кретали су се брзинама од 0,98 до 1,11 метара у секунди, док су пешаци старији од 60 година улицу прелазили брзинама од 0,92 до 1,01 метар у секунди. Резултати су показали да ни на једној локацији није била статистички значајна разлика у временима преласка мушкараца и жена, док је утицај величине групе на време преласка био статистички значајан само на једној локацији. (Zhao и остали, 2016)

Hassouna (2020) је истраживао брзину пешака на три несигналисана пешачка прелаза у граду Наблусу, у Палестини, при чему је брзину утврђивао на основу дужине пешачког прелаза и времена потребног за прелазак, мереног на терену помоћу штопернице. Резултати су показали да је просечна брзина свих пешака износила 1,39 метара у секунди, док је вредност 15. перцентила брзине била 1,09 метара у секунди. Аутор је разматрао утицај пола и старости пешака, при чему су пешаци, према старости, разврставани у четири старосне групе - млађи од 13 година, између 13 и 29 година, између 30 и 64 године и старији од 64 године. Спроведеним истраживањем је утврђено да су се мушкарци кретали брже од жена, тј. просечна брзина мушкараца била је 1,43 метра у секунди (15. перцентил 1,07 метара у секунди), а жена 1,32 метра у секунди (15. перцентил 1,06 метара у секунди). Утврђено је и да је брзина пешака старих између 13

и 29 година била највећа (просечна брзина 1,42 метра у секунди, 15. перцентил 1,13 метара у секунди), док су се најспорије кретали пешаци старији од 64 године (просечна брзина 1,09 метара у секунди, 15. перцентил 0,80 метара у секунди). (Hassouna, 2020)

Kadali & Vedagiri (2020) су, применом технике снимања видео-записа, истраживали брзину пешака на осам несигналисаних пешачких прелаза у Мумбају, у Индији. У овом истраживању, брзину су анализирали у зависности од карактеристика пешачког и возачког тока, као и геометријских карактеристика раскрснице. Резултати спроведеног истраживања показали су да су се мушкарци кретали брже од жена, при чему је 15. перцентил брзине мушкараца и жена био, респективно, 0,93 метра у секунди и 0,86 метара у секунди. Аутори су утврдили да је већа вероватноћа да мушки пешаци убрзају приликом преласка, у односу на жене. Најспорији су били старији пешаци са 15. перцентилом брзине 0,80 метара у секунди, а најбржи млади пешаци чији је 15. перцентил брзине био 0,95 метара у секунди. Вредности 15. перцентила брзине деце и пешака средњих година биле су, респективно, 0,88 и 0,90 метара у секунди. Аутори су закључили да је брзина пешака опадала са повећањем броја пешака у групи, јер је просечна брзина у случајевима преласка једног пешака износила 1,28 метара у секунди, два пешака 1,20 метара у секунди, а три или више пешака 1,15 метара у секунди. Такође, утврдили су да је са повећањем броја саобраћајних трака, тј. дужином пешачког прелаза, брзина преласка била већа. Што се тиче карактеристика возачког тока, аутори су закључили да су брзина и категорија наилазећег возила имале утицаја на брзину кретања пешака. Наиме, уколико је брзина возила била 35 километара на час и мања, просечна брзина пешака је била 1,22 метра у секунди, а уколико је брзина возила била већа од 35 километара на час, пешаци су прелазили улицу просечном брзином 1,29 метара у секунди. С друге стране, пешаци су се кретали брже уколико је наилазило тешко теретно возило, него уколико је аутомобил, рикша или двоточкаш. (Kadali & Vedagiri, 2020)

Forde и Daniel (2021) су спровели истраживање брзине пешака на два несигналисана пешачка прелаза у Њуарку, у Њу Џерсију, у Сједињеним Америчким Државама, применом технике снимања видео-записа. Резултати овог истраживања показали су да је просечна брзина свих пешака била 1,45 метара у секунди (15. перцентил износио је 1,24 метра у секунди). Брзину су даље анализирали у зависности од старости пешака, и утврдили да су се најбрже кретали млади пешаци (19 – 30 година) са просечном брзином од 1,55 метара у секунди, док је 15. перцентил брзине био 1,35 метара у секунди. Најспорије су се кретали пешаци са инвалидитетом, чија је просечна брзина била 1,04 метра у секунди (15. перцентил брзине био је 0,91 метар у секунди). Пешаци старији од 60 година, без тешкоћа у кретању, кретали су се просечном брзином 1,26 метара у секунди (15. перцентил био је 1,09 метара у секунди). Аутори су утврдили статистички значајну разлику између брзина свих старосних група, осим између брзине тинејџера (13 – 18 година) и пешака средњих година (31 – 60 година). Просечна брзина ове две старосне групе била је 1,45 метара у секунди, а 15. перцентил 1,24 метра у секунди. (Forde & Daniel, 2021)

Роојари и остали (2021) су, применом технике снимања видео-записа, истраживали брзину пешака на несигналисаним пешачком прелазу у Хајдерабаду, у Индији. Резултати тог истраживања показали су да су се најспорије кретали старији пешаци, просечном брзином мањом од 0,60 метара у секунди, док је просечна брзина деце и младих пешака била приближно иста - 0,75 метара у секунди. Пешаци средњих година су се, према резултатима истраживања, кретали просечном брзином 0,76 метара у секунди. Аутори су утврдили да су жене брже прелазиле улицу од мушкараца, а њихове просечне брзине биле су 0,76 и 0,67 метара у секунди, респективно. Такође, пешаци

који су носили пртљаг кретали су се просечном брзином 0,64 метра у секунди, а они који нису носили пртљаг просечном брзином 0,72 метра у секунди. Аутори су закључили да је коришћење телефона утицало на брзину кретања пешака, јер су се пешаци који користе телефон кретали спорије (просечна брзина 0,65 метара у секунди) од оних пешака који не користе телефон (просечна брзина 0,72 метра у секунди). Резултати су показали и да су се пешаци у групи кретали спорије (просечна брзина 0,67 метара у секунди), у односу на пешаке који су се кретали сами (просечна брзина 0,75 метара у секунди). (Роојаги и остали, 2021)

Samarakoon и Sivakumar (2021) су истраживањем брзине пешака обухватили једанаест несигналисаних пешачких прелаза у граду Гале на Шри Ланци. Аутори су применили технику снимања видео-записа, а на основу резултата закључили су да су на брзину пешака утицали пол и старост пешака, као и одређене тешкоће у кретању (инвалидитет, ношење терета, трудноћа). Наиме, мушкарци су улицу прелазили брже од жена, и њихове просечне брзине биле су 1,35 и 1,29 метара у секунди, респективно. Утврђено је да је брзина пешака опадала са старашћу пешака. Међутим, од овог тренда одступала је вредност брзине деце млађе од 6 година, јер је била нешто мања од брзине деце школског узраста, која су се кретала најбрже. Резултати су показали да је просечна брзина трудница (1,19 метара у секунди) била мања од просечне брзине свих жена. Такође, особе са инвалидитетом кретале су се значајно спорије од просечне брзине, тачније 0,99 метара у секунди. Мушкарци и жене који су носили терет, кретали су се брзинама 1,18 и 1,16 метара у секунди, респективно. С друге стране, резултати су показали да су одрасли пешаци имали већу брзину када су се кретали заједно са децом, без обзира на пол. (Samarakoon & Sivakumar, 2021)

Bargegol и остали (2022) су, применом технике снимања видео-записа, истраживали брзину пешака на два несигналисана пешачка прелаза на пресеку у Рашту, у Ирану. У спроведеном истраживању, брзина је анализирана у зависности од старости, пола, физичких карактеристика пешака (телесне масе), начина облачења (ношење хиџаба или не) и временских услова (са или без кише). Резултати су показали да је просечна брзина свих пешака при нормалним временским условима износила 1,10 метара у секунди, док је 15. перцентил брзине био 0,82 метра у секунди. Даље су аутори утврдили да су временски услови утицали на брзину преласка, пошто су се пешаци кретали брже у кишним условима. У том случају је просечна брзина пешака била 1,23 метра у секунди, а 15. перцентил брзине био је 1,03 метра у секунди. Мушкарци су се кретали статистички значајно брже од жена, без обзира на старост, телесну масу, временске услове и ношење хиџаба. Спроведеним истраживањем је утврђено да је ношење хиџаба додатно допринело споријем кретању жена (статистички значајна разлика). На основу резултата истраживања, аутори су закључили и да су брзине на несигналисаним пешачком прелазу биле мање у односу на брзине на сигналисаним раскрсницама. (Bargegol и остали, 2022)

Брзина пешака на несигналисаним пешачким прелазима је, такође, истраживана у Србији и окружењу. Трпковић (2017) је у Београду истраживала брзину пешака старијих од 65 година. Резултати тог истраживања показали су да је просечна брзина старијих пешака на несигналисаним пешачким прелазима била 1,02 метра у секунди, док је 15. перцентил брзине износио 0,77 метара у секунди. Ауторка је закључила да су се пешаци старији од 65 година кретали статистички значајно спорије на несигналисаним пешачким прелазима, у односу на све анализиране типове сигналисаних прелаза (са и без пешачког острва и каунтера). (Трпковић, 2017)

Бајбић (2022) је, истраживањем брзине пешака у Теслићу, у Босни и Херцеговини, обухватио два несигналисана пешачка прелаза, исте ширине и дужине, у близини основне и средње школе. Резултати овог истраживања показали су да пол пешака није био значајан фактор у анализи брзине, за разлику од старости пешака која је била утицајан фактор. Аутор је пешаке разврставао у две старосне групе - млађи и старији од 18 година. Пешаци млађи од 18 година кретали су се просечном брзином од 1,30 метара у секунди и 1,19 метара у секунди, респективно на локацији 1 и локацији 2. Аутор је овај резултат објаснио чињеницом да су, у овој старосној групи, на локацији 1 углавном били заступљени ученици средње школе, а на локацији 2 углавном ученици основне школе. Дакле, млађа деца су улицу прелазила спорије од средњошколаца. Резултати су показали и да су старији од 18 година улицу прелазили сличним брзинама на обе локације. Тачније, брзина пешака старијих од 18 година на локацији 1 била је 1,26 метара у секунди, а на локацији 2 била је 1,21 метар у секунди. (Бајбић, 2022)

2.3.4. ДИСКУСИЈА О ПРЕДСТАВЉЕНИМ РЕЗУЛТАТИМА ИСТРАЖИВАЊА КАРАКТЕРИСТИКА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА НА НЕСИГНАЛИСАНИМ УКРШТАЊИМА

Сумирањем резултата досадашњих истраживања карактеристика пешачких токова на несигналисаним пешачким прелазима може се закључити да је предмет анализе сличан као и на сигналисаним раскрсницама. Акцент је био на истраживању брзине преласка и фактора који на њу утичу (Табела 2.13). Пол и старост пешака су, у већини студија, потврђени као значајни утицајни фактори: мушкарци су се кретали брже од жена, док је брзина преласка показивала тенденцију опадања са порастом старости пешака. Поред тога, утврђено је да су на смањење брзине преласка утицале различите тешкоће приликом кретања, као што су инвалидитет, ношење терета, повећана телесна маса или трудноћа.

Табела 2.13. Упоредни приказ досадашњих истраживања и утицајних променљивих на брзину пешака на несигналисаним укрштањима

Извор	Утицајне променљиве								
	Пол	Старост	Тешкоће при кретању	Величина групе	Дужина пешачког прелаза	Временске прилике	Начин облачења	Интеракција са возилима	Употреба мобилног телефона
(Li и остали, 2013)		+						+	
(Jiang и остали, 2015)	+	+		+				+	
(Zhao и остали, 2016)	+	+		+					
(Hassouna, 2020)	+	+							
(Kadali & Vedagiri, 2020)	+	+		+	+			+	
(Forde & Daniel, 2021)		+	+						
(Poojari и остали, 2021)	+	+	+	+					+
(Samarakoon & Sivakumar, 2021)	+	+	+						
(Bargegol и остали, 2022)	+	+	+			+	+		
(Трпковић, 2017)		+							
(Бајбић, 2022)	+	+							

Неки аутори су у истраживању уврстили и временске услове, начин облачења, кретање у групи и геометријске карактеристике локације као факторе који утичу на брзину преласка. Показало се да је брзина преласка била већа у условима кише, као и да су се

жене које су носиле хиџаб кретале спорије. Такође, утврђена је негативна корелација између брзине кретања пешака и величине групе, као и у случају сигналисаних раскрсница. Исти тренд као на сигналисаним раскрсницама утврђен је и у случају утицаја дужине пешачког прелаза, с обзиром да су се пешаци кретали брже на прелазима већих дужина.

Истраживања су обухватила и понашање пешака у интеракцији са моторним возилима на несигналисаним пешачким прелазима. С једне стране, утврђено је да наилазак возила испред конфликтне зоне утиче на понашање пешака. Наиме, утврђено је да су пешаци мењали брзину приликом преласка, што је можда била последица несигурности и неповерења у возаче, али овакво понашање може довести до ризичних ситуација. Пешаци су мењали брзину преласка и у зависности од брзине и категорије наилазећег возила, па су прелазили улицу брже уколико се наилазеће возило кретало већом брзином или је припадало категорији возила већих габарита. С друге стране, резултати су показали да су пешаци на несигналисаним прелазима на пресеку били склонији небезбедном понашању, као што је претрчавање улице или прелазак без уверавања да ли је безбедно. Овакво понашање доводи до ризичних ситуација, с обзиром на то да возачи не могу адекватно одреаговати како би избегли настанак незгоде услед изненадног започињања преласка. Анализа понашања пешака омогућава идентификовање потенцијалних проблема у опслуживању пешака и процену потребе за увођењем адекватних мера санкционисања непрописног понашања пешака и возача.

Поред брзине преласка, истраживани су и временски губици услед чекања пешака на прелазак, који указују на ниво услуге пешачких токова. Показало се да на временске губитке утиче спремност возача да пропусти пешаке, што зависи од саобраћајне културе и примене законске регулативе (Jiang и остали, 2015). Наиме, када возачи нису уступали првенство пролаза, пешаци су били приморани да чекају прихватљив интервал слеђења или чак да се опслужи цео плотун возила како би добили шансу за прелазак. С друге стране, када су возачи уступали првенство пролаза, пешаци су започињали прелазак непосредно по доласку до пешачког прелаза и остваривали су мале временске губитке. Дакле, параметри пешачких токова и њихово понашање, зависи од понашања возача у зони несигналисаних пешачких прелаза. Уколико се возачи придржавају прописа, ниво услуге пешака је већи, с обзиром на то да имају мање временске губитке и веће брзине преласка. Ово је врло значајан закључак, који указује да се адекватним мерама може допринети унапређењу пешачког саобраћаја, што је циљ развоја одрживих урбаних транспортних система у савременим градовима (ЦЕП & CeS.TRA, 2020).

Многи аутори наводе да се 15. перцентил брзине, утврђен на несигналисаним пешачким прелазима, може користити у поступцима оптимизације параметара рада светлосних сигнала. Међутим, показало се да се брзине пешачких токова разликују на сигналисаним и несигналисаним пешачким прелазима (Трпковић, 2017; Bargogol и остали, 2022). Другим речима, неопходно је независно истраживање карактеристика пешачких токова на сигналисаним и несигналисаним пешачким прелазима. Познавање карактеристика пешачких и возачких токова на несигналисаним пешачким прелазима представља основу за дефинисање пројектантских решења која ће омогућити ефикасно и безбедно опслуживање пешака.

3. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА УТИЦАЈА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА НА САОБРАЋАЈНИ ПРОЦЕС НА УКРШТАЊИМА

Методологија истраживања детаљније одређује предмет и циљ истраживања, локације и време спровођења истраживања, као и начин прикупљања и обраде података. Истраживање се спроводи на сигналисаним и несигналисаним укрштањима, при чему су у сваком сегменту методологије најпре дате смернице за истраживање које важе без обзира на начин регулисања. Након тога, дате су и смернице које се односе посебно на сигналисана, а затим и на несигналисана укрштања.

3.1. ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

У циљу утврђивања утицаја пешачких токова на саобраћајни процес на укрштањима, предмет експерименталних истраживања у оквиру дисертације јесте међусобна интеракција пешачких и возачких токова који се истовремено опслужују на сигналисаним и несигналисаним укрштањима.

Задатак дисертације је да се експерименталним путем истраже кључни параметри опслуживања пешачких и возачких токова на сигналисаним и несигналисаним укрштањима, да се утврди њихова међузависност и квантификује утицај параметара пешачких токова на параметре возачких токова. С обзиром на то да се параметри опслуживања предметних саобраћајних токова делимично разликују у зависности од начина регулисања саобраћаја на укрштањима, посебно су дефинисани параметри који ће бити истраживани на сигналисаним, а посебно на несигналисаним укрштањима. Поред тога, методологијом су дефинисани и поступци утврђивања и евидентирања карактеристика пешака (старост, пол, правац и смер кретања).

Резултати спроведених истраживања ће представљати основу за постизање циља дисертације. С једне стране, то подразумева моделирање утицаја пешачких токова на засићени ток незаштићеног скретања које има конфликт само са пешацима. С друге стране, подразумева и моделирање утицаја пешачких токова на капацитет саобраћајне траке на деоници у зони несигнализованог пешачког прелаза.

3.1.1. ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА - СИГНАЛИСАНА УКРШТАЊА

У оквиру ове дисертације, под појмом сигнализованог укрштања подразумева се сигналисана раскрсница на којој се токови у скретању из ексклузивних саобраћајних трака опслужују незаштићено, тј. имају конфликт са условно компатибилним пешачким током, без утицаја возачких токова. Предмет истраживања на сигналисаним укрштањима јесте међусобна интеракција возачког тока у десном или левом скретању и њему конфликтног пешачког тока.

Предмет истраживања на сигналисаним укрштањима су кључни параметри опслуживања:

- возачких токова, и то:
 - време реакције првог возила у скретању на почетак зеленог сигналног појма,
 - брзина путовања првог возила у скретању од линије заустављања до пешачког прелаза,
 - интервал слеђења возила у скретању, и
 - интензитет возачког тока у скретању,

- пешачких токова, и то:
 - време реакције пешака на почетак зеленог сигналног појма,
 - брзина пешака приликом преласка пешачког прелаза,
 - време окупирања конфликтне зоне од стране пешака (време током којег пешаци окупирају конфликтну зону – од тренутка уласка првог пешака у конфликтну зону до тренутка изласка последњег пешака из конфликтне зоне),
 - време блокирања проласка возила у скретању од стране пешака (време током којег возило у скретању не може да скрене због окупирања конфликтне зоне – од тренутка доласка возила испред конфликтне зоне, па до тренутка проласка возила у скретању),
 - интервал слеђења пешака, и
 - интензитет пешачког тока.

3.1.2. ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА - НЕСИГНАЛИСАНА УКРШТАЊА

Под несигналисаним укрштањем се, у овој дисертацији, подразумева несигналисани пешачки прелаз на пресеку деонице, између две раскрснице. У зони несигналисаних пешачких прелаза возачки и пешачки токови се опслужују истовремено, а приоритет проласка дефинисан је општим правилима саобраћаја. Дакле, предмет истраживања на несигналисаним укрштањима је међусобна интеракција возачког тока дуж деонице и пешачког тока на несигналисаном пешачком прелазу на пресеку.

Предмет истраживања на несигналисаним укрштањима су кључни параметри опслуживања:

- возачких токова, и то:
 - интервал слеђења возила, и
 - интензитет возачког тока,
- пешачких токова, и то:
 - временски губици пешака од тренутка доласка до почетка преласка,
 - брзина пешака приликом преласка пешачког прелаза,
 - време окупирања конфликтне зоне од стране пешака,
 - време блокирања проласка возила од стране пешака (време током којег возило дуж деонице не може да прође због окупирања конфликтне зоне – од тренутка доласка возила испред конфликтне зоне, па до тренутка проласка возила),
 - интервал слеђења пешака, и
 - интензитет пешачког тока.

3.2. ИЗБОР ЛОКАЦИЈА ИСТРАЖИВАЊА

Поступак одабира локација истраживања за сигналисана и несигналисана укрштања заснивао се на следећим корацима:

Корак 1. Дефинисање потенцијалних локација

Потенцијалне локације истраживања морају испуњавати примарни критеријум **да се предметни токови истовремено опслужују**. С обзиром на то да примарни критеријум испуњава велики број локација, тј. сигналисаних и несигналисаних укрштања, у даљем тексту су дате неке од потенцијалних локација.

Корак 2. Формулисање додатних критеријума

Током прве итерације обиласка потенцијалних локација, као и спровођења пилот истраживања, утврђено је да није довољно да локације испуне само примарни критеријум. У складу са тим, формулисани су и додатни критеријуми које локације морају да испуне да би се постигао циљ истраживања.

Корак 3. Одабир коначних локација

Одабир коначних локација истраживања заснива се на спровођењу друге итерације пилот истраживања на дефинисаним потенцијалним локацијама. Пилот истраживањем утврђује се да ли локације испуњавају све критеријуме и проверава се практична применљивост предложене методологије истраживања (Челар, 2013).

3.2.1. ИЗБОР ЛОКАЦИЈА ИСТРАЖИВАЊА - СИГНАЛИСАНА УКРШТАЊА

Неке од потенцијалних локација истраживања на сигнализаним укрштањима, дефинисане у првом кораку, дате су у наредној табели (Табела 3.1).

Табела 3.1. Неке од потенцијалних локација истраживања – сигнализана укрштања

Раскрсница	Намена саобраћајне траке	Посматрано скретање
Париске Комуне – Тошин бунар	лево	лево скретање из Париске Комуне у Тошин бунар
	десно	десно скретање из Тошиног бунара у Париске Комуне
Угриновачка – Ивићева – Вртларска	десно	десно скретање из Угриновачке у Ивићеву
Булевар Михајла Пупина – Милентија Поповића	право(ЈПП)-десно	десно скретање из Булеvara Михајла Пупина у Милентија Поповића
Николаја Кравцова – Булевар Вудроа Вилсона	десно	десно скретање из Николаја Кравцова у Булевар Вудроа Вилсона
Немањина – Савска	десно	десно скретање из Немањине у Савску
Масарикова – Кнеза Милоша	десно	десно скретање из Масарикове у Кнеза Милоша
Кондина – Светогорска - Цетињска - Македоснка	право-десно	десно скретање из Кондине у Светогорску
Катанићева – Макензијева - Курсулина	лево	лево скретање из Катанићеве у Макензијеву
Београдска – Булевар краља Александра	право-десно	десно скретање из Београдске у Булевар краља Александра
27. марта – Старине Новака	право(ЈПП)-десно	десно скретање из Старине Новака у , али има . марта
Цвијићева – Булевар деспота Стефана	десно	десно скретање из Цвијићеве у Булевар деспота Стефана
Цвијићева – Старине Новака	десно	десно скретање из Цвијићеве у Старине Новака
Булевар краља Александра – Краљице Марије - Синђелићева	десно	десно скретање из Булеvara краља Александра у Краљице Марије
Јужни булевар – Максима Горког	право(ЈПП)-десно	десно скретање из Јужног булеvara у Максима Горког
	право(ЈПП)-десно	десно скретање из Максима Горког у Јужни булевар
Јована Суботића – Устаничка – Крушевачка	десно	десно скретање из Јована Суботића у Устаничку
Дарвинова – Браће Јерковић	десно	десно скретање из Дарвинове у Браће Јерковић
Драгице Кончар – Светозара Радојчића – Браће Јерковић	лево	лево скретање из Драгице Кончар у Светозара Радојчића
	право-десно	десно скретање из Светозара Радојчића у Драгице Кончар

Табела 3.1. (наставка) Неке од потенцијалних локација истраживања – сигналисана укрштања

Устаничка – Војислава Илића	право(ЈПП)-десно	десно скретање из Устаничке у Војислава Илића
Војислава Илића – Мис Ирбијеве - Римска	право-десно	десно скретања из Војислава Илића у Мис Ирбијеве
Војислава Илића – Господара Вучића	право(ЈПП)-десно	десно скретање из Војислава Илића у Господара Вучића
Господара Вучића – Булевар краља Александра – Вјекослава Ковача	десно	десно скретање из Господара Вучића у Булевар краља Александра
	десно	десно скретање из Булевара краља Александра у Господара Вучића
Булевар краља Александра – Батутова - Станислава Сремчевића	десно	десно скретање из Булевара краља Александра у Батутову
	лево	лево скретање из Батутове у Булевар краља Александра
Батутова – Димитрија Туцовића	право(ЈПП)-десно	десно скретање из Димитрија Туцовића у Батутову
Шпанских бораца - Булевар Михајла Пупина	лево и лево	лево скретање из Шпанских Бораца у Булевар Михајла Пупина
Цвијићева – Таковска	десно и право-десно	десно скретање из Цвијићеве у Таковску

Након прве итерације пилот истраживања формулисани су додатни критеријуми које треба да задовоље раскрснице на којима ће се истраживати дефинисани параметри и карактеристике, и то су:

- **Геометрија раскрснице**

Опслуживање скретања најповољније је истраживати на раскрсницама са стандардном геометријом, дакле оним раскрсницама код којих се кракови укрштају под правим или приближно правим углом. На тај начин се искључује утицај неповољне геометрије раскрснице, тј. оштрих углова укрштања кракова, малих радијуса скретања и недовољне прегледности.

Ипак, избором локација истраживања треба обухватити различите типове стандардних геометрија раскрсница како би се утврдио њихов комбиновани утицај са карактеристикама пешачких токова на вредности засићеног саобраћајног тока левог и десног скретања. Под тиме се првенствено мисли на дужину трајекторије од линије заустављања до конфликтног пешачког прелаза.

Приликом избора локације, такође, треба узети у обзир да десно скретање не буде каналисано, с обзиром да се у том случају возила у скретању не опслужују истовремено са пешачким токовима.

- **Намена саобраћајних трака**

Предметне саобраћајне траке требало би да су ексклузивне, дакле, намењене опслуживању само десног или левог скретања. Евентуално, уколико је мешовита саобраћајна трака са доминантним уделом возила у десном скретању, могу се из анализе накнадно искључити ситуације у којима се појављују возила која настављају право. На пример, у случају десног скретања намена траке може бити право-десно, уколико је право намењено возилима јавног превоза (аутобус или тролејбус), а њихово учешће у току је занемарљиво.

За истраживање нису погодне ни раскрснице са удвојеним тракама у десном или левом скретању. Наиме, скретање које се опслужује из две саобраћајне траке најчешће захтева и заштићено опслуживање (Станковић, 2023), што ограничава број локација на којима би истраживање било спроведено.

- **Структура саобраћајних токова**

Полазећи од основне дефиниције засићеног саобраћајног тока, локације треба бирати тако да је у структури возачког тока доминантно учешће путничких аутомобила, са циљем да се искључи утицај осталих категорија возила на вредност засићеног тока. Ипак, на градским саобраћајницама у Београду, где се истраживање реализује, заступљени су и аутобуси и тролејбуси као део система јавног градског превоза путника. Дакле, ова возила није могуће потпуно избећи, али локације треба бирати тако да се у возачком току ретко појављују аутобуси и/или тролејбуси.

У складу са предметом и циљем дисертације, фокус истраживања је на изолованом утицају пешачких токова на возила у скретању. Дакле, за истраживање нису погодне локације на којима се поред пешачког прелаза налази и прелаз бицикличке траке или стазе, или је категорија двоточкаша (бицикли и електрични тротинети) значајно заступљена на пешачком прелазу.

- **Саобраћајни захтеви**

Саобраћајни захтев у десном или левом скретању треба да буде довољан да се током црвеног сигналног појма може формирати ред, полазећи од дефиниције засићеног саобраћајног тока према којој мора да постоји константан саобраћајни захтев. У складу са тим, раскрснице са малим саобраћајним захтевом у скретању нису адекватне за реализацију истраживања. С друге стране, за истраживање нису погодне ни локације на којима углавном влада стање презасићења, када су саобраћајни захтеви било ког тока на раскрсници већи од расположивог капацитета. У таквим условима неопслужена возила по завршетку фазе у којој се опслужују могу окупирати предметну конфликтну зону или излаз раскрснице, ометајући опслуживања предметних саобраћајних токова. Уколико, ипак, таква стања не трају током већег дела дана, истраживање је могуће реализовати у периодима у којима се избегава стање презасићења, под условом да су испуњени остали критеријуми.

Током периода истраживања би било пожељно да постоје варијације у саобраћајном захтеву пешачких токова, како би се утврдио утицај различитих услова у конфликтном пешачком току. Ипак, требало би избегавати екстремне ситуације. Наиме, није повољно да је интензитет пешачких токова изузетно велики, те да се пешаци опслужују током читавог зеленог времена. У том случају возила се опслужују током заштитних времена и може постојати утицај токова из наредне фазе. С друге стране, није повољно ни уколико је интензитет пешака веома мали, с обзиром да то подразумева ретке ситуације у којима се може истражити утицај пешачког тока на возачке токове.

- **Начин рада светлосних сигнала**

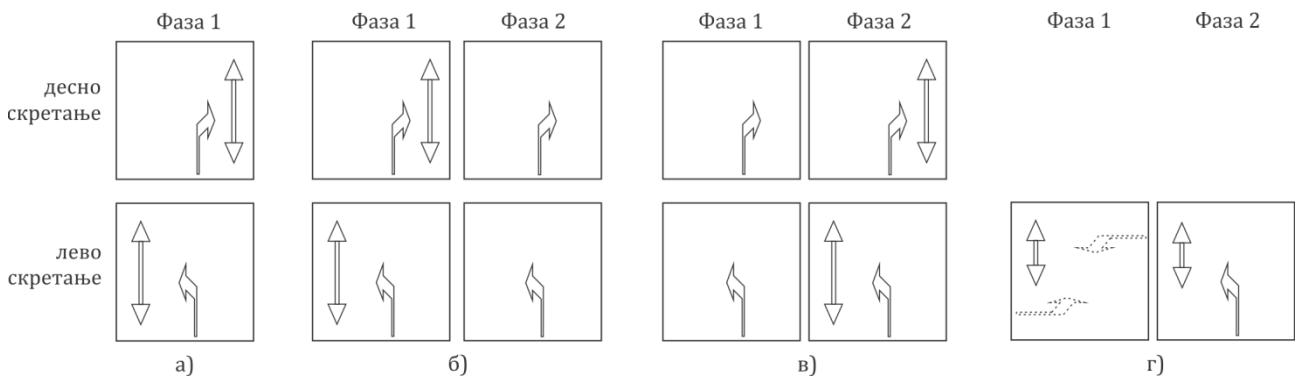
Светлосни сигнали на раскрсницама могу радити у фиксном режиму, када су параметри рада светлосних сигнала непроменљиви током одређеног временског периода, или у променљивом режиму, када се параметри рада сигнала константно прилагођавају актуелном саобраћајном захтеву (Челар и остали, 2018). На све већем броју раскрсница примењују се детекторски системи, с обзиром на модернизацију саобраћајних система, те сигнали раде у променљивом режиму. Истраживање је могуће спровести без обзира на примењени режим рада светлосних сигнала, уколико тај режим рада не утиче на формирање иницијалног реда возила у скретању.

Такође, истраживање би требало спровести на прилазу раскрснице који није део система линијске координације. Наиме, када је рад сигнала на раскрсници усаглашен са сигналимa на осталим раскрсницама дуж коридора, наилазак возила је условљен појавом зеленог сигналног појма на претходној раскрсници. То може довести до тога да се у траци намењеној скретању не формира иницијални ред возила, те таква раскрсница није погодна за спровођење истраживања.

• **План фаза**

На сигналисаним раскрсницама возачки токови у скретању углавном се опслужују незаштићено, тј. истовремено са паралелним пешачким токовима (Слика 3.1. а). Под незаштићеним опслуживањем подразумева се и када су почеци и/или завршеци зеленог за пешачки и возачки ток временски „смакнути“, као последица различитих вредности заштитних времена. Третман скретања у плану фаза може бити и комбинација незаштићеног и заштићеног опслуживања, и тада се примењују следеће варијанте:

- **варијанта 1** - у првој фази се возачки ток опслужује незаштићено, заједно са пешацима, док се у следећој фази опслужује заштићено, без пешака (Слика 3.1. б),
- **варијанта 2** - у првој фази се возачки ток опслужује заштићено, док се у следећој фази опслужује незаштићено (Слика 3.1. в). Ова варијанта се не препоручује с обзиром да возачи возила у скретању не знају када могу да очекују почетак преласка пешака, чиме је безбедност пешачких токова угрожена.
- **варијанта 3** - у првој фази се пешачки токови опслужују без конфликтног возачког тока, док у следећој фази почиње незаштићено опслуживање возачких токова (Слика 3.1. г). Овај начин опслуживања најчешће подразумева да се пешачки токови у првој фази опслужују истовремено са другим токовима на раскрсници са којима немају конфликтних тачака, нпр. лева скретања на главном правцу и део пешачког прелаза преко главног правца који нема конфликт са тим токовима.



Слика 3.1. Примери плана фаза у случају незаштићеног опслуживања скретања

Поред тога, за истраживање нису погодне раскрснице на којима се десно скретање опслужује током црвеног сигналног појма, применом условне лантерне. Иако је то уобичајена пракса, у том случају може доћи до следећих ситуација неповољних за истраживање:

- сва возила у реду опслуже се током црвеног сигналног појма и не постоји ред возила формиран на почетку зеленог сигналног појма,
- возачи возила у десном скретању не обраћају пажњу на почетак опслуживања пешачког тока и не уступају првенство пролаза, чиме се повећава ризик од настанка ризичних ситуација.

- **Остали утицаји**

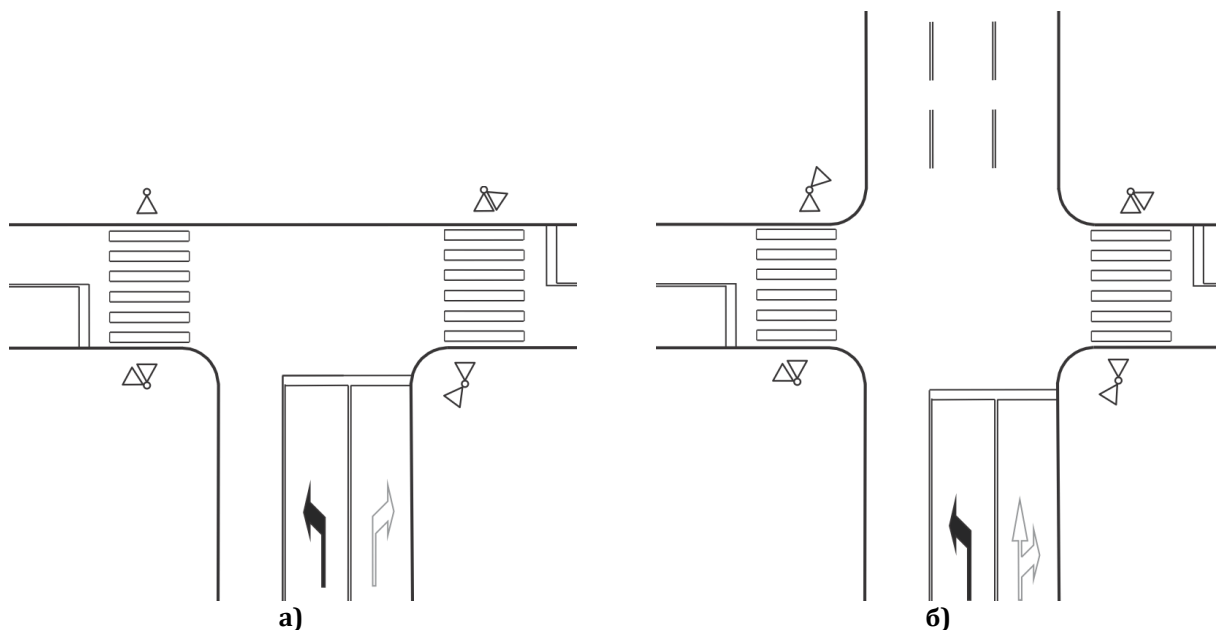
Паркирање на предметном прилазу и излазу раскрснице не би требало да буде дозвољено. Уколико паркирање јесте дозвољено, треба да буде организовано тако да не омета пражњење реда у предметној саобраћајној траци, нпр. да се паркирање реализује из саобраћајне траке која није предмет посматрања.

Уколико у непосредној близини раскрснице постоје стајалишта јавног превоза, треба да буду изведена у нишама или у тракама намењеним за возила јавног превоза како заустављена возила не би имала утицај на пражњење реда токова у скретању.

Претходно наведени критеријуми се односе на раскрснице са десним или левим скретањем које се опслужује као незаштићено. На раскрсницама са незаштићеним левим скретањем, значајан је и следећи критеријум:

- **Елиминација утицаја конфликтног возачког тока право и десно**

Локације истраживања опслуживања левих скретања морају бити одабране тако да нема утицаја конфликтног возачког тока. У складу са тим, најповољније би било да се истраживање спроводи на раскрсницама на којима лево скретање нема конфликтни ток. На пример, то могу бити трокраке раскрснице (Слика 3.2 а) или четворокраке раскрснице уколико је супротни крак једносмеран излаз (Слика 3.2 б). Као алтернатива могу послужити и четворокраке раскрснице на којима је интензитет конфликтног тока занемарљив, те је број циклуса у којима се појављује возило у конфликтном току занемарљив у односу на укупан узорак.



Слика 3.2. Примери раскрсница погодних за истраживање опслуживања левих скретања која имају конфликт само са пешацима

Након сагледавања додатних критеријума утврђено је да највећи број потенцијалних локација не задовољава критеријуме саобраћајног захтева и структуре возачког и/или пешачког тока. Даље су из укупног узорка изузете локације које не задовољавају критеријуме намене саобраћајне траке и/или плана фаза. Изузимањем раскрсница које не задовољавају један или више критеријума, преостало је 11 локација на којима ће бити спроведено истраживање. Слика 3.3 приказује неке од потенцијалних локација, означене жутом бојом, као и одабране локације, обележене розе бојом.



Слика 3.3. Потенцијалне и одабране локације истраживања – сигналисана укрштања

У даљем тексту прецизније су дефинисана скретања која су предмет посматрања приликом истраживања и дате су специфичне геометријске и саобраћајне карактеристике појединих локација. Табела 3.2 садржи детаљне карактеристике свих локација као што су намена предметне саобраћајне траке, дужина трајекторије скретања од линије заустављања до пешачког прелаза, ширина и дужина пешачког прелаза мерена по средини, као и временски период између почетака зелених сигналних појмова за пешаке и возила.

Локације P1, P2, P3, P5, P6, и P8 су четворокраке раскрснице, при чему је, по локацијама, посматрано:

- P1 - десно скретање из Војислава Илића у Мис Ирбијеве ка ТЦ Бео (Слика 3.4),
- P2 - десно скретање из Војислава Илића у Господара Вучића ка Булевару краља Александра (Слика 3.5),
- P3 - десно скретање из Господара Вучића у Булевар краља Александра ка Устаничкој (Слика 3.6),
- P5 - десно скретање из Булевара краља Александра у Краљице Марије ка Рувелтовој (Слика 3.8),
- P6 - десно скретање из Јужног булевара у Максима Горког ка Устаничкој (Слика 3.9),
- P8 – десно скретање из Устаничке у Војислава Илића ка Плавом мосту (Слика 3.11),
- P10 - десно скретање из Кондине у Светогорску ка Палилулској пијаци (Слика 3.13).

Локације P4, P7 и P11 су такође четворокраке раскрснице, на којима се конфликтни пешачки ток опслужује у две сигналне групе. Посматрана је само сигнална група која се опслужује истовремено са предметним скретањем. При томе, предмет посматрања, по локацијама, је:

- P4 - лево скретање из Батутове у Булевар краља Александра ка Господара Вучића (Слика 3.7) које нема конфликтни ток право или десно, с обзиром да је супротни крак једносмеран излаз из раскрснице,
- P7 - лево скретање из Драгице Кончар у Светозара Радојчића ка Медаковићу (Слика 3.10), при чему постоји конфликтни ток право и десно, али је занемарљиво малог интензитета,
- P11 - десно скретање из Николаја Кравцова у Булевар Вудроа Вилсона ка Карађорђевој (Слика 3.14).

Локација P9 представља четворокраку раскрсницу на којој је посматрано лево скретање из Катанићеве у Макензијеву ка Славији (Слика 3.12). Укрштања Катанићеве и Курсулине са Макензијевом смакнута су за 24 метра, а прилаз из Курсулине улице има занемарљиво мало саобраћајно оптерећење, те је укрштање Катанићеве и Макензијеве посматрано као независна трокрака раскрсница.

Табела 3.2. Упоредни приказ карактеристика локација истраживања - сигналисана укрштања

Ознака	Раскрсница	Намена саобраћајне траке	Скретање	Утицај конфликтног тока	Дужина трајекторије скретања L_{lz-pp} [m]	Дужина пешачког прелаза $L_{peš}$ [m]	Ширина пешачког прелаза $W_{peš}$ [m]	Почетак зеленог за пешаке у односу на зелено за возила Z_a [s]
P1	Војислава Илића – Мис Ирбијеве - Римска	право-десно	десно	-	32,6	11	5	0
P2	Војислава Илића – Господара Вучића	право(ЈГП)-десно	десно	-	20	12	5	0
P3	Господара Вучића – Булевар краља Александра – Вјекослава Ковача	десно	десно	-	26	14	5	0
P4	Батутова – Булевар краља Александра - Станислава Сремчевића	лево	лево	нема	41	6,6	6	0
P5	Булевар краља Александра – Краљице Марије - Синђелићева	десно	десно	-	18	12	5	0
P6	Јужни булевар – Максима Горког	право(ЈГП)-десно	десно	-	15	11	5	-7
P7	Драгице Кончар – Светозара Радојчића – Браће Јерковић	лево	лево	занемарљив	45	7	5	0
P8	Устаничка – Војислава Илића	право(ЈГП)-десно	десно	-	33,2	20	5	-3
P9	Катанићева – Макензијева - Курсулина	лево	лево	занемарљив	24	10,5	5	+1
P10	Кондина – Светогорска - Цетињска - Македоснка	право-десно	десно	-	18	9	5	+1
P11	Николаја Кравцова – Булевар Вудроа Вилсона	право-десно	десно	-	19,7	10	5	0



Слика 3.4. Приказ Р1 Војислава Илића – Мис Ирбијеве - Римска



Слика 3.5. Приказ Р2 Војислава Илића – Господара Вучића



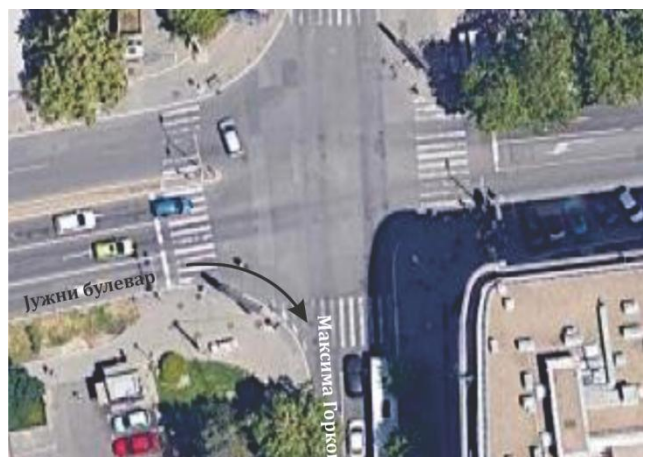
Слика 3.6. Приказ Р3 Господара Вучића – Булевар краља Александра – Вјекослава Ковача



Слика 3.7. Приказ Р4 Батутова - Булевар краља Александра – Станислава Сремчевића



Слика 3.8. Приказ Р5 Булевар краља Александра – Краљице Марије - Синђелићева



Слика 3.9. Приказ Р6 Јужни булевар – Максима Горког



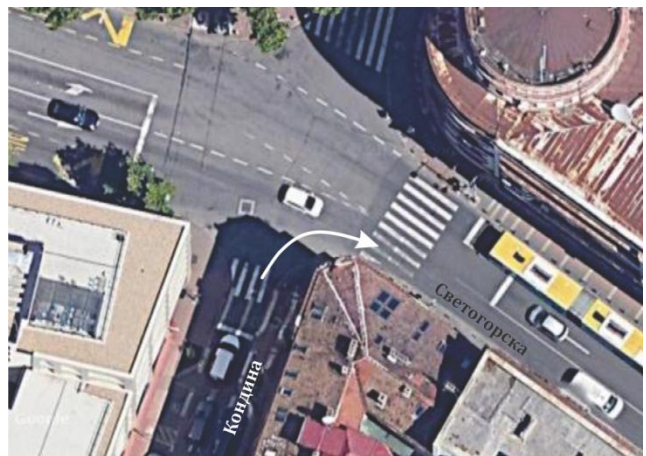
Слика 3.10. Приказ Р7 Драгице Кончар – Светозара Радојичића – Браће Јерковића



Слика 3.11. Приказ Р8 Устаничка - Војслава Илића



Слика 3.12. Приказ Р9 Катанићева - Макензијева - Курсулина



Слика 3.13. Приказ Р10 Кондина – Светогорска - Цетињска - Македонска



Слика 3.14. Приказ Р11 Николаја Кравцова – Булевар Вудроа Вилсона

3.2.2. ИЗБОР ЛОКАЦИЈА ИСТРАЖИВАЊА - НЕСИГНАЛИСАНА УКРШТАЊА

Неке од потенцијалних локација истраживања на несигналисаним укрштањима, дефинисане у првом кораку, дате су у наредној табели (Табела 3.3). Локације на којима постоји несигналисани пешачки прелаз на пресеку, али ниједна од суседних раскрсница није регулисана светлосним сигнаlima, нису разматране као потенцијалне локације.

Табела 3.3. Потенцијалне локације истраживања – несигналисана укрштања

Улица у којој се налази пешачки прелаз	Позиција пешачког прелаза	Посматрана саобраћајна трака
Главна	код улице Давидовићева	трака ка Новом Београду
Омладинских бригада	код зграде ГО (градске општине) Нови Београд	трака на прилазу кружној раскрсници, ближа разделном острву
Омладинских бригада	код зграде ГО Нови Београд, ближе кружној раскрсници	трака на прилазу кружној раскрсници, у средини
Булевар Ослобођења	између улице Катанићева и кружне раскрснице Славија	трака на прилазу кружној раскрсници ближа средини коловоза
Књегиње Зорке	код улице Николаја Краснова	трака на прилазу кружној раскрсници ближа траци резервисаној за возила јавног градског превоза
Макензијева	код улице Коче Капетана	трака ка Булевару Ослобођења
Крунска	код парка Војводе Бојовића	трака ка Славији
Максима Горког	код улице Каленићева	трака ка улици Максима Горког
Војислава Илића	код улице Велимира Теодоровића	трака ка парку Војводе Бојовића
Устаничка	код Шумица	трака ка Црвеном крсту ближе средини коловоза
Заплањска	код ТЦ Стадион	трака ка улици Господара Вучића ближе средини коловоза
Светозара Радојичића	код улице Игњата Јоба	трака ка граду ближе средини коловоза
Браће Јерковић	код окретнице аутобуса бр. 26	трака ка улици Војислава Илића ближа разделном острву
Војводе Степе	код студентског дома „4. април“	трака ка улици Војислава Илића ближа десној ивици коловоза
		трака ка Кружном путу вождовачком ближа средини коловоза
		трака ка улици Саве Машковића

У другом кораку формулисани су додатни критеријуми које треба да испуне локације на којима ће се истраживати дефинисани параметари и карактеристике на несигналисаним укрштањима, и то су:

- **Позиција пешачког прелаза у односу на друга укрштања саобраћајних токова**

Пешачки прелаз треба да се налази на деоници између раскрсница регулисаних светлосним сигнаlima. На тај начин се обезбеђује наилазак возила у плотуну са улазне раскрснице, у циљу анализе утицаја пешака при константном захтеву у возачком току и, евентуално, утицаја на капацитет саобраћајне траке. С друге стране, удаљеност сигналисана раскрснице треба да буде таква да не омета реализацију процеса опслуживања возила након проласка пешачког прелаза.

На градској уличној мрежи чести су приступи или улице које воде до различитих садржаја. Несигналисани пешачки прелаз у близини таквог приступа или улице може бити локација истраживања само уколико је саобраћајно оптерећење приступа занемарљиво, и мала је вероватноћа појаве возила у скретању.

Такође, одабране локације истраживања не би требало да се налазе у непосредној близини других несигналисаних пешачких прелаза. Наиме, истраживања су показала да ако се два пешачка прелаза налазе на међусобном растојању од 50 метара или мање, постоји додатни утицај на редукцију капацитета деонице (Knoop & Daganzo, 2018; Efimov и остали, 2021).

- **Геометрија саобраћајнице**

Опслуживање возачких токова дуж деонице је најповољније истраживати на деоници у правцу, где не постоји утицај радијуса хоризонталне кривине. Такође, нагиб саобраћајнице би требало да буде приближно 0%, чиме се искључује утицај нагиба на кретање возила.

- **Намена саобраћајних трака**

С обзиром на то да је предмет истраживања опслуживање возачких токова дуж деонице, предметне саобраћајне траке треба да буду намењене искључиво опслуживању токова право. На тај начин се искључује утицај потенцијалних ометања због скретања. Ипак, уколико у зони пешачког прелаза постоји одређени садржај који генерише и привлачи саобраћајне токове и постоји потреба за скретањем у или из предметне саобраћајне траке, требало би да је вероватноћа реализације таквих ситуација мала.

Саобраћајна трака или траке на улазној раскрсници требало би да буду намењене искључиво токовима право, тако да нема утицаја возила у скретању на наилазак возила дуж деонице.

- **Структура саобраћајних токова**

Локације истраживања треба бирати тако да је у структури возачког тока доминантно заступљена категорија путничких аутомобила, чиме се искључује утицај осталих категорија у саобраћајном току. Такође, за истраживање нису погодне локације на којима се, поред пешачког прелаза, налази и прелаз бициклистичке траке или стазе, или на којима је категорија двоточкаша значајно заступљена на пешачком прелазу.

- **Саобраћајни захтеви**

Саобраћајни захтев дуж деонице условљен је радом светлосних сигнала на улазној сигналисној раскрсници. Саобраћајни захтев на улазној раскрсници треба да буде довољно велики да се током црвеног сигналног појма формира ред возила. Другим речима, локације нису погодне ако је саобраћајно оптерећење мало, односно ако се на улазној раскрсници не формира ред на почетку зеленог.

С друге стране, локација није погодна за истраживање ни ако дуж деонице влада стање презасићења, које доводи до ометања реализације саобраћајног процеса дуж деонице. Уколико такво стање не траје током већег дела дана, истраживање треба реализовати у периодима у којима ће се избећи стање презасићења, под условом да су испуњени остали критеријуми.

Варијације у интензитету пешачког тока током периода истраживања су пожељне како би се утврдио утицај различитих услова у конфликтном пешачком току. Ипак, није повољно да је интензитет пешачког тока веома мали, јер то подразумева ретке ситуације у којима се може истражити утицај пешачког тока на возачке токове.

- **Остали утицаји**

Елементи за успоравање саобраћаја (нпр. „лежећи полицајац“) нису погодни на локацији истраживања, јер утичу на понашање возача. Уколико у зони пешачког

прелаза постоји елемент за успоравање саобраћаја, возачи успоравају, што даље утиче на интервале слеђења возила и на анализу опслуживања возачких токова.

Паркирање дуж деонице, у зони предметног пешачког прелаза, не би требало да буде дозвољено, а уколико јесте, требало би да буде организовано тако да не омета реализацију саобраћајног процеса дуж деонице у зони пешачког прелаза. То подразумева да се, на пример, паркирање реализује из саобраћајне траке која није предмет посматрања.

Уколико се у непосредној близини раскрснице налазе стајалишта јавног превоза, требало би да буду изведена у нишама или у посебним тракама за возила јавног превоза како заустављена возила јавног превоза не би утицала на реализацију саобраћајног процеса дуж деонице у зони пешачког прелаза.

Сагледавањем и додатних критеријума, из укупног узорка изузете су потенцијалне локације које не испуњавају један или више формулисаних критеријума. Најчешће су то критеријуми саобраћајних захтева и структуре пешачког и/или возачког тока, позиције несигнализованог укрштања у односу на друга укрштања и присуство елемената за успоравање саобраћаја. Изузимањем тих локација, преостале су 3 локације и 5 саобраћајних трака на којима ће бити спроведено истраживање. Слика 3.15 приказује све локације, при чему су одабране локације обележене розе бојом, а потенцијалне локације жутом бојом.

У наставку је дато прецизније дефинисање предметних саобраћајних трака на локацијама, као и специфичне карактеристике сваке од локација. У наредној табели (Табела 3.4) дат је упоредни приказ осталих карактеристика одабраних локација, као што су удаљеност улазне сигнализације раскрснице, ширина и дужина пешачког прелаза мерена по средини.

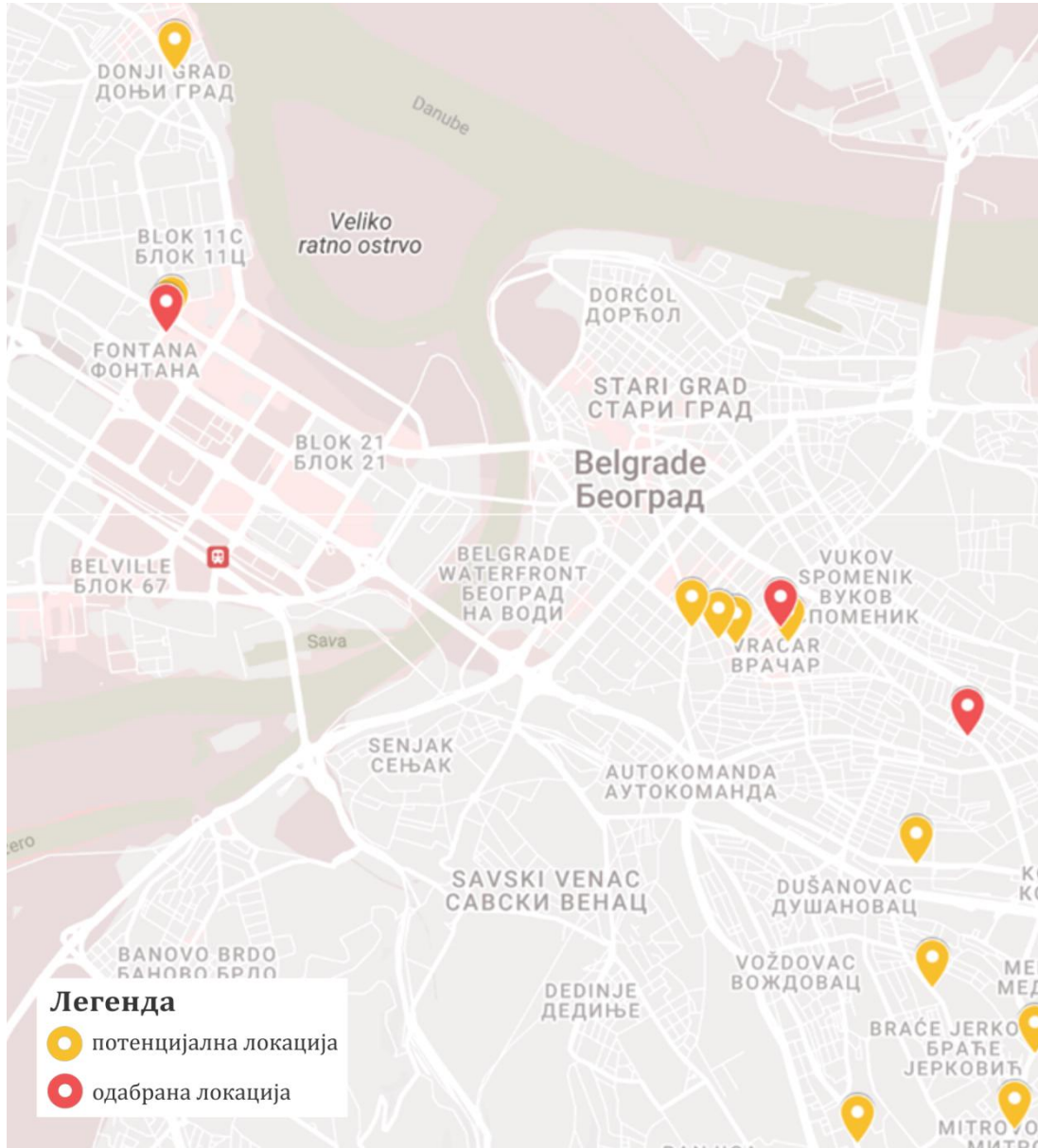
П1 је пешачки прелаз у улици Омладинских бригада код зграде ГО Нови Београд (Слика 3.16). Смерови у овој улици су одвојени разделним острвом и пешачки прелаз се састоји из два дела. У таквим ситуацијама, пешаци улицу могу прећи у две фазе, што им омогућава да независно посматрају возачке токове по смеровима (Ваk & Киес, 2012). У складу са тим, посматран је само део пешачког прелаза на коловозној траци намењеној смеру ка кружној раскрсници. Наредни несигнализани пешачки прелаз налази се на растојању већем од 50 метара, те је тај критеријум задовољен. Имајући у виду да саобраћајну траку уз десну ивицу коловоза доминантно користе возила јавног превоза и токови у скретању, предмет посматрања су две од три саобраћајне траке:

- П1_Т1 - саобраћајна трака уз леву ивицу коловоза, тј. ближа разделном острву,
- П1_Т2 - саобраћајна трака у средини.

Локација П2 представља пешачки прелаз у улици Војислава Илића код улице Велимира Теодоровића (Слика 3.17). Улица Војислава Илића има две саобраћајне траке по смеру, при чему су саобраћајне траке ближе десној ивици коловоза, посматрано у смеру кретања, намењене возилима јавног превоза. У складу са тим, предметне саобраћајне траке су ближе средини коловоза, и то:

- П2_Т1 - саобраћајна трака у смеру ка Црвеном крсту,
- П2_Т2 - саобраћајна трака у смеру ка улици Господара Вучића.

П3 је пешачки прелаз у улици Крунска код парка Војводе Бојовића (Слика 3.18). Посматран је смер ка улици Максима Горког, и у том смеру постоје две саобраћајне траке. Предметна саобраћајна трака П3_Т1 је ближа средини коловоза, јер траку уз десну ивицу коловоза доминантно користе возила јавног превоза.



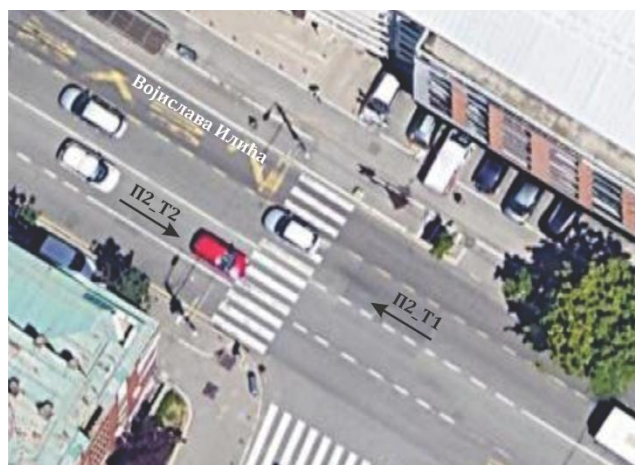
Слика 3.15. Потенцијалне и одабране локације истраживања – несигналисана укрштања

Табела 3.4. Упоредни приказ карактеристика локација истраживања - несигналисана укрштања

Ознака	Улица	Позиција пешачког прелаза	Смер/трака	Удаљеност сигнализационе раскрснице L_{sig} [m]	Дужина пешачког прелаза $L_{peš}$ [m]	Ширина пешачког прелаза $W_{peš}$ [m]
П1_Т1	Омладинских бригада	код зграде ГО Нови Београд	ка кружној раскрсници/ крајња лева	266	12	5
П1_Т2			ка кружној раскрсници/ у средини			
П2_Т1	Војислава Илића	код ул. Велимира Теодоровића	ка Црвеном крсту/ лева	152	12	4
П2_Т2			ка Господара Вучића/ лева			
П3_Т1	Крунска	код парка Војводе Бојовића	ка Максима Горког/ лева	63	9	5



Слика 3.16. Приказ П1 Омладинских бригада



Слика 3.17. Приказ П2 Војислава Илића



Слика 3.18. Приказ П3 Крунска

3.3. ДЕФИНИСАЊЕ ПЕРИОДА ИСТРАЖИВАЊА

Истраживање је потребно спровести на дневном светлу, при уобичајеним метео условима, тачније без кише, снега и јаких ветрова који би могли да утичу на реализацију саобраћајног процеса на укрштањима.

Период истраживања условљен је дефинисаном методологијом. Наиме, потребно је истраживање спровести у периодима када је испуњен критеријум саобраћајних захтева. У циљу обухватања различитих стања саобраћајног процеса, у зависности од локације, истраживањем су обухваћени вршни и ванвршни периоди.

Период континуираног истраживања ограничен је примењеном техником истраживања, тачније капацитетом батерије камере. У ситуацијама када је било могуће применити екстерну батерију, истраживање је спроведено континуирано у трајању од шест часова. У супротном, континуирано истраживање је било могуће у трајању од највише 90 минута. У складу са тим, на појединим локацијама је, у циљу прикупљања већег узорка, истраживање спроведено у два одвојена периода истог или различитих дана.

У оквиру континуираног периода истраживања (90 минута), истраживање дефинисаних параметара опслуживања возачких и пешачких токова је реализовано на нивоу појединачних циклуса на сигналисаним укрштањима, односно појединачних

периода на несигналисаним укрштањима. Период посматрања у оквиру циклуса, односно периода, почиње доласком првог возила или првог пешака до пешачког прелаза и завршава се проласком последњег возила или последњег пешака, што је прецизније дефинисано у поглављима 3.5.1 и 3.5.2.

3.3.1. ДЕФИНИСАЊЕ ПЕРИОДА ИСТРАЖИВАЊА – СИГНАЛИСАНА УКРШТАЊА

Истраживање у трајању од шест часова спроведено је једино на локацији P1, у периоду од 12 до 18 часова 27. маја 2021. године.

На P3 је истраживање спроведено у два периода од 90 минута истог дана 12. маја 2022. године, и то од 8 часова и 30 минута, и од 16 часова и 30 минута. Истраживање у периодима од 90 минута током два различита дана је реализовано на локацији:

- P2
 - 11. маја 2022. године, од 15 часова и 30 минута, и
 - 6. јуна 2022. године, од 10 часова;
- P5
 - 7. јула 2022. године, од 16 часова и 30 минута, и
 - 18. јула 2022. године, од 16 часова и 30 минута;
- P9
 - 14. августа 2023. године, од 9 часова и 30 минута, и
 - 15. августа 2023. године, од 11 часова;
- P11
 - 15. августа 2023. године, од 16 часова,
 - 16. августа 2023. године, од 16 часова и 30 минута.

С друге стране, истраживање само у једном континуираном периоду од 90 минута је спроведено на:

- P4 - 6. јула 2022. године, од 15 часова и 30 минута,
- P6 - 13. маја 2022. године, од 15 часова и 30 минута,
- P7 - 13. маја 2022. године, од 10 часова и 30 минута,
- P8 - 14. августа 2023. године, од 16 часова,
- P10 - 16. августа 2023. године, од 11 часова и 30 минута.

3.3.2. ДЕФИНИСАЊЕ ПЕРИОДА ИСТРАЖИВАЊА – НЕСИГНАЛИСАНА УКРШТАЊА

Истраживање на несигналисаним укрштањима спроведено је, по локацијама:

- П1
 - 19. јула 2022. године, од 16 часова, и
 - 09. новембра 2023. године од 15 часова,
- П2 - 03. јуна 2022. године, од 15 часова, и
- П3 - 17. августа 2023. године, од 10 часова и 30 минута.

3.4. МЕТОДА И ТЕХНИКА ИСТРАЖИВАЊА

Експериментално истраживање дефинисаних параметара опслуживања предметних саобраћајних токова реализовано је применом технике снимања видео-записа. Овакав начин прикупљања података омогућава снимање саобраћајног процеса у континуитету и прикупљање већег узорка (Кајалић, 2020). Техника снимања видео-записа олакшава истовремено снимање опслуживања предметних саобраћајних токова. Наиме, примена технике мануелног истраживања је компликована, јер бележење свих дефинисаних података захтева велики број истраживача, чији рад мора бити прецизно усаглашен. Такође, техника снимања омогућава прегледања снимака више пута како би се забележили сви неопходни подаци и процениле карактеристике пешака (Forde & Daniel, 2021).

За снимање опслуживања предметних токова коришћене су, зависно од локације, једна или две GoPro HERO7 камере. Капацитет батерије омогућава снимање у континуитету 90 минута. Камере је на локацијама неопходно позиционирати тако да се на видео-запису обухвате предметни саобраћајни токови, при чему је видео-запис подешен за широкоугаони снимак. Ипак, позиција камере мора бити таква да њено присуство није очигледно пешацима и возачима, како не би утицала на њихово понашање. На појединим локацијама то захтева постављање камере на већој удаљености од предметних токова, па је приликом прегледања снимка неопходно увеличавање, што омогућава висок квалитет снимка.

3.4.1. МЕТОДА И ТЕХНИКА ИСТРАЖИВАЊА – СИГНАЛИСАНА УКРШТАЊА

На свим локацијама сигналисаних укрштања коришћена је једна камера, осим на локацији P1, где су коришћене две камере и екстерна батерија за допуну батерије камере.

Подешавање видео-записа за широкоугаони снимак омогућава да се обухвати посматрано скретање од линије заустављања до проласка конфликтног пешачког прелаза, као и читава површина коју пешаци користе за прелазак. Приказ примера позиције камера на локацијама P5 и P11 дат је на наредним сликама (Слика 3.19).



Слика 3.19. Приказ исечка из видео-записа на P5 (лево) и P11 (десно)

3.4.2. МЕТОДА И ТЕХНИКА ИСТРАЖИВАЊА – НЕСИГНАЛИСАНА УКРШТАЊА

На свим локацијама несигналисаних укрштања примењена је једна камера. Подешавање видео-записа за широкоугаони снимак омогућава да се обухвати одређена дужина деонице, а не само уска зона пешачког прелаза, као и читава површина коју пешаци користе за прелазак. Приказ примера позиције камера на локацијама П1 и П2 дат је на наредним сликама (Слика 3.20).



Слика 3.20. Приказ исечка из видео-записа на П1 (лево) и П2 (десно)

3.5. ОБРАДА СНИМАКА И ФОРМИРАЊЕ БАЗЕ ПОДАТАКА

Након спроведеног истраживања следи обрада видео-снимака у циљу формирања базе података. У складу са тим, дефинисана је методологија обраде видео снимака, која се састоји од наредних корака:

- Корак 1.** Дефинисање кључних догађаја опслуживања предметних токова које је потребно евидентирати,
- Корак 2.** Начин евидентирања дефинисаних кључних догађаја опслуживања предметних токова,
- Корак 3.** Дефинисање карактеристика пешачких и возачких токова које је потребно евидентирати,
- Корак 4.** Формирање базе података и утврђивање обима истраживања.

Први корак подразумева дефинисање кључних догађаја опслуживања предметних токова, који омогућавају утврђивање параметара дефинисаних методологијом у поглављима 3.1.1 и 3.1.2. На нивоу сваког појединачног периода истраживања неопходно је усвојити јединствен почетни тренутак бележења података за сва возила и пешаке. У односу на тај почетни тренутак евидентирају се тренуци реализације сваког од дефинисаних кључних догађаја за свако возило и сваког пешака. На тај начин формира се јединствена временска база, која омогућава утврђивање параметара и њихову даљу анализу. Кључни догађаји и почетни тренуци се разликују у зависности од начина регулисања саобраћаја на укрштањима и детаљније су објашњени у поглављима 3.5.1 и 3.5.2.

У следећем кораку неопходно је дефинисати начин евидентирања временских тренутака кључних догађаја, у циљу формирања база података. Обрада снимака обављена је мануелним путем у лабораторијским условима, како за сигналисана, тако и за несигналисана укрштања. Видео-снимци су прегледани на једном рачунару коришћењем VLC Media Player програмског пакета, док су на другом рачунару бележени тренуци реализације кључних догађаја. Ти тренуци су евидентирани директно у Microsoft Excel

програму, применом Масго-а креираног у Visual Basic for Applications (VBA) за потребе овог истраживања, чији код је дат у прилогу (Прилог 2). Прва три реда кода креираног Масго-а дефинишу тип променљивих. Четврти ред кода одређује да се, у тренутку активирања Масго-а, забележи тренутно време. Пошто тако утврђено време нема прецизност милисекунде, петим редом кода дефинише се евидентирање и милисекунди. Шестим редом кода прецизира се формат времена које се уписује у одабрану ћелију, што је дефинисано седмим редом кода. Последњи ред кода дефинише да се, након уписивања тренутног времена у активну ћелију, аутоматски изабере следећа ћелија у реду, у којој ће се, поновним активирањем Масго-а, уписати време реализације наредног догађаја.

Активирањем креираног Масго-а омогућава се бележење тачног времена у тренутку реализације дефинисаних догађаја. Активирање Масго-а је олакшано формирањем тастера у Excel-у. То подразумева да се при реализацији сваког од дефинисаних догађаја, притиском на тастер, бележи тачно време за свако појединачно возило и пешака. На тај начин је аутоматски креирана база података, спремна за даљу анализу.

Снимци су прегледани у више итерација, тачније у онолико итерација колико се возила и пешака опслужило током једног периода посматрања.

Карактеристике пешачких и возачких токова евидентирани су мануелним путем за сваког појединачног пешака и возило. Евидентирани карактеристике пешака су:

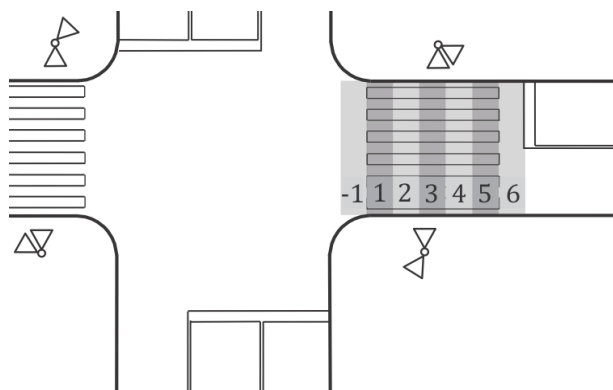
- пол:
 - мушки, и
 - женски;
- процењена старост:
 - деца до 15 година,
 - млади пешаци од 15 до 40 година,
 - пешаци средњих година од 40 до 60 година, и
 - старији пешаци преко 60 година.

У циљу минимизирања утицаја различитих процена старости, снимке је прегледао исти истраживач.

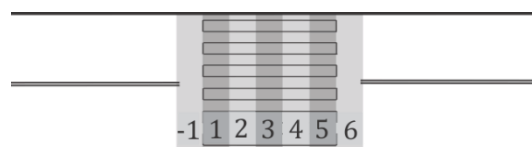
- смер кретања приликом преласка:
 - смер 1 - смер пешака ближих конфликтном пресеку, и
 - смер 2 - смер пешака даљих од конфликтног пресека;
- сегмент ширине пешачког прелаза на ком пешак започиње и завршава прелазак, имајући у виду чињеницу да пешаци мењају правац приликом преласка.

Сегменти ширине пешачког прелаза су креирани тако што је реална ширина пешачког прелаза подељена на ширине од једног метра (Слика 3.21 и Слика 3.22). Тако, сегмент 1 представља сегмент у првом метру пешачког прелаза од ивице ближе предметном возачком току, док сегмент 2 представља сегмент у другом метру итд. Међутим, пилот истраживањем је утврђено да пешаци за прелазак користе и површину коловоза ван обележеног пешачког прелаза. У складу са тим, дефинисани су сегменти -1, -2 итд, посматрано од сегмента 1 према наилазећим возилима (према центру раскрснице на сигналисаним укрштањима), као и сегменти 6, 7 итд, посматрано од последњег сегмента на пешачком прелазу ка излазу. На овај начин је могуће утврдити правац кретања приликом преласка и ефективну ширину пешачког прелаза коју пешаци заиста користе приликом преласка.

- напомена:
 - претрчавање,
 - ношење терета,
 - коришћење штапа/штака,
 - гурање колица, и сл.



Слика 3.21. Пример дефинисаних сегмената ефективне ширине пешачког прелаза на сигнализаној раскрсници



Слика 3.22. Пример дефинисаних сегмената ефективне ширине несигнализованог пешачког прелаза

С друге стране, за возила нису бележене категорије, с обзиром на то да су методолошким поставкама одабране локације са доминантним учешћем путничких аутомобила у саобраћајном току. Ипак, сваки појединачни период посматрања је прво прегледан и уколико су остале категорије возила биле заступљене, тај период је искључен из анализе.

Последњи корак, након прегледања снимака и формирања база података подразумева утврђивање укупног обима спроведених истраживања. Из анализе су искључени циклуси, односно периоди у којима долази до ометања реализације саобраћајног процеса, појаве возила јавног превоза или возила која нису предмет истраживања (возила која настављају право кроз раскрсницу у мешовитој траци на сигнализаним укрштањима или возила у скретању на несигнализаним укрштањима). Свакако, број оваквих циклуса, односно периода, сведен је на минимум применом дефинисаних критеријума за избор локација истраживања.

Даље су сви подаци, и за сигнализана и за несигнализана укрштања, подељени у по две независне базе података:

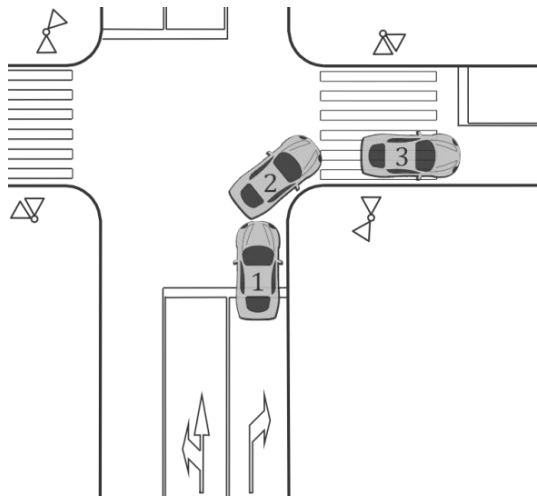
- **базе података за анализу** карактеристика возачких и пешачких токова, као и **моделирање** утицаја пешачких токова на саобраћајни процес на укрштањима,
- **базе података за тестирање** формираних модела.

За анализирање података, графичке приказе и формирање модела коришћени су програмски пакети Microsoft Excel и OriginPro 2023b. Програмски пакет OriginPro 2023b, за утврђивање параметара модела који најбоље описују податке (енг. *best fit*), користи алгоритам најмањих квадрата, који се заснива на алгоритму Levenberg-Marquardt - итеративном поступку који комбинује методу Gauss-Newton и методу најстрмијег спуста (OriginLab, 2023).

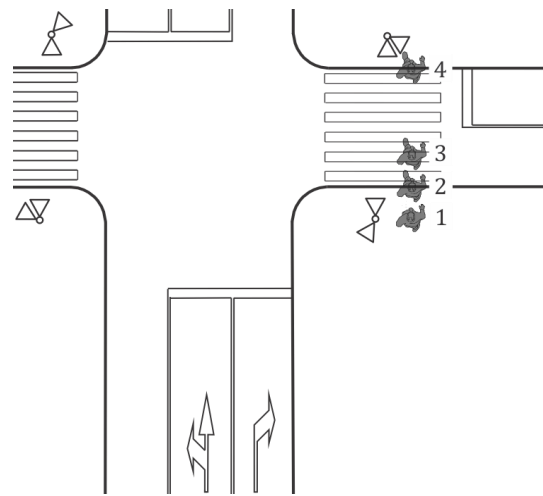
3.5.1. ОБРАДА СНИМАКА И ФОРМИРАЊЕ БАЗЕ ПОДАТАКА – СИГНАЛИСАНА УКРШТАЊА

Кључни догађаји у реализацији опслуживања предметних токова на сигнализаним раскрсницама су следећи:

- за возачке токове (Слика 3.23):
 - почетак зеленог сигналног појма за возачки ток,
 - почетак опслуживања возила у скретању - прелазак првог возила у скретању задњом осовином преко линије заустављања (позиција 1),
 - долазак возила до конфликтне зоне - у случају пропуштања пешака то подразумева заустављање испред пешачког прелаза, док у случају да на пешачком прелазу нема пешака, то подразумева прелазак предњом осовином возила преко ближе ивице пешачког прелаза (позиција 2),
 - излазак возила из конфликтне зоне – прелазак предњом осовином возила преко даље ивице пешачког прелаза (позиција 3),
- за пешачке токове (Слика 3.24):
 - долазак пешака до пешачког прелаза – заустављање пешака испред пешачког прелаза (позиција 1),
 - почетак зеленог сигналног појма за пешачки ток,
 - почетак преласка пешака – напуштање тротоара и ступања пешака на коловоз, односно на пешачки прелаз (позиција 2),
 - пролазак пешака преко конфликтног пресека – пролазак пешака преко замишљеног пресека конфликтне зоне, који је позициониран на средини путање возила у скретању (позиција 3),
 - завршетак преласка пешака – напуштање коловоза, односно пешачког прелаза и ступање пешака на тротоар (позиција 4).



Слика 3.23. Приказ дефинисаних догађаја тј. одговарајућих позиција возила при скретању



Слика 3.24. Приказ дефинисаних догађаја тј. одговарајућих позиција пешака приликом преласка пешачког прелаза на сигнализаној раскрсници

Период посматрања на сигналисаним укрштањима је циклус, а за јединствен почетни тренутак истраживања, на нивоу циклуса, усваја се први од следећих тренутака:

- тренутак доласка првог пешака до пешачког прелаза, или
- тренутак почетка зеленог, где су могуће две ситуације:
 - тренутак почетка оба зелена сигнална појма када зелено за пешачки и возачки ток почињу у истом тренутку, и
 - тренутак почетка првог зеленог сигналног појма када зелено за пешачки и возачки ток не почињу у истом тренутку.

За завршни тренутак обраде снимака на нивоу циклуса усваја се последњи од следећих тренутака:

- тренутак изласка последњег возила у скретању из конфликтне зоне, или
- тренутак завршетка преласка последњег пешака, без обзира на смер.

Важно је имати на уму да прорачун параметара рада светлосних сигнала треба заснивати само на брзинама оних пешака који прелазе током зеленог сигналног појма (Knoblauch и остали, 1996), као и да они пешаци који прелазе током црвеног немају утицај на понашање возача. Из наведених разлога не разматрају се пешаци који започну и заврше свој прелазак пре почетка:

- оба зелена сигнална појма, када зелено за пешачки и возачки ток почињу у истом тренутку,
- првог зеленог сигналног појма, када зелено за пешачки и возачки ток не почињу у истом тренутку.

С обзиром на то да су тренуци реализације претходно дефинисаних догађаја бележени директно у Excel-у, на тај начин је креирана база података за сваку локацију сигналисаних укрштања. Укупан обим спроведених истраживања на сигналисаним укрштањима приказан је у наредној табели (Табела 3.5), која обухвата укупан број релевантних циклуса, укупан и просечан број возила у скретању, као и укупан и просечан број пешака обухваћених овим истраживањем.

Табела 3.5. Обим спроведених истраживања по локацијама сигналисаних укрштања

Ознака	Раскрсница	Скретање	Период истраживања	Број циклуса	Број возила	Број пешака	Просечан број возила по циклусу N_{voz_pros} [voz/ciklus]	Просечан број пешака по циклусу $N_{peš_pros}$ [peš/ciklus]	
подаци за анализу карактеристика токова и развој модела	P1	Војислава Илића – Мис Ирбијеве	десно	6 часова	73	380	636	5,8	9,8
	P2	Војислава Илића – Господара Вучића	десно	3 часа	39	410	156	10,5	4,0
	P3	Господара Вучића – Булевар краља Александра	десно	3 часа	32	156	817	4,9	25,5
	P4	Батутова – Булевар краља Александра	лево	1 час и 30 минута	27	183	179	7,0	6,9
	P5	Булевар краља Александра – Краљице Марије	десно	3 часа	64	543	402	8,6	6,4
	P6	Јужни булевар – Максима Горког	десно	1 час и 30 минута	29	220	193	7,9	6,9
	P7	Драгице Кончар – Светозара Радојчића	лево	1 час и 30 минута	31	185	155	6,0	5,0
		укупно	19 часова и 30 минута	295	2077	2538	-	-	
подаци за тестирање модела	P8	Устаничка – Војислава Илића	десно	1 час и 30 минута	12	44	214	3,7	17,8
	P9	Катанићева – Макензијева	лево	3 часа	46	186	625	4,0	13,6
	P10	Кондина – Светогорска	десно	1 час и 30 минута	26	99	262	3,7	9,8
	P11	Николаја Кравцова – Булевар Вудроа Вилсона	десно	3 часа	24	97	177	4,0	7,4
		укупно	9 часова	108	426	1278	-	-	
		УКУПНО	28 часова и 30 минута	403	2503	3816	-	-	

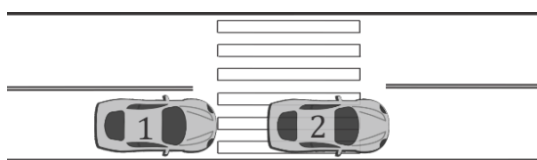
На свим сигналисаним укрштањима снимљено је укупно 28 часова и 30 минута видео-записа, који су у лабораторијским условима обрађени на претходно описан начин. Прегледањем видео-записа издвојено је укупно 403 циклуса који задовољавају критеријум саобраћајног захтева. Најмање релевантних циклуса, 12, издвојено је на локацији P8, где је и интензитет десног скретања био најмањи.

Укупан узорак је подељен тако да су формиране две базе података. Базу коришћену за анализу карактеристика предметних токова и за формирање модела за прорачун засићеног саобраћајног тока незаштићених скретања чине подаци из 295 циклуса (око 73%) са седам локација (P1 - P7). Подаци из преосталих 108 циклуса (око 27%) са четири локације, од P8 до P11, чине базу података која је коришћена за тестирање формираног модела.

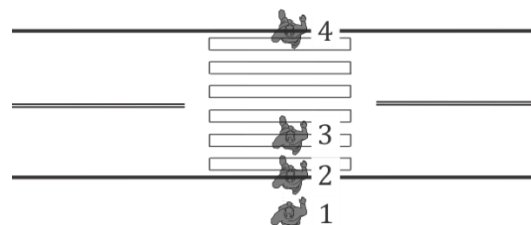
3.5.2. ОБРАДА СНИМАКА И ФОРМИРАЊЕ БАЗЕ ПОДАТАКА – НЕСИГНАЛИСАНА УКРШТАЊА

Кључни догађаји у опслуживању предметних токова у зони несигналисаног пешачког прелаза на деоници су:

- за возачке токове (Слика 3.25):
 - долазак возила до конфликтне зоне - у случају пропуштања пешака то подразумева заустављање испред пешачког прелаза, док у случају да на пешачком прелазу нема пешака, то подразумева прелазак предњом осовином возила преко ближе ивице пешачког прелаза (позиција 1),
 - излазак возила из конфликтне зоне – прелазак предњом осовином возила преко даље ивице пешачког прелаза (позиција 2),
- за пешачке токове (Слика 3.26):
 - долазак пешака до пешачког прелаза – заустављање пешака испред пешачког прелаза (позиција 1),
 - почетак преласка пешака – напуштање тротоара и ступања пешака на коловоз, односно пешачки прелаз (позиција 2),
 - пролазак пешака преко конфликтног пресека – пролазак пешака преко замишљеног пресека конфликтне зоне, који је позициониран на средини путање возила на деоници (позиција 3),
 - завршетак преласка – напуштање коловоза, односно пешачког прелаза, и ступање пешака на тротоар (позиција 4).



Слика 3.25. Приказ дефинисаних догађаја тј. одговарајућих позиција возила при проласку дуж деонице



Слика 3.26. Приказ дефинисаних догађаја тј. одговарајућих позиција пешака приликом преласка несигналисаног пешачког прелаза

На нивоу сваког појединачног периода посматрања на несигналисаном укрштањима дефинисано је да јединствени почетни тренутак евидентирања података за сва возила и пешаке буде први од следећа два тренутка:

- тренутак доласка првог пешака до пешачког прелаза, или
- тренутак доласка првог возила до ближе ивице пешачког прелаза.

За завршни тренутак обраде снимака на нивоу периода усваја се последњи од следећих тренутака:

- тренутак изласка последњег возила из конфликтне зоне, или
- тренутак завршетка преласка последњег пешака, без обзира на смер.

Важно је напоменути да пешаци који свој прелазак реализују пре наиласка возила, односно без икаквог утицаја на понашање возача (успоравање, заустављање), нису разматрани. Дакле, посматране су само ситуације међусобне интеракције возила и пешака.

Евидентирањем тренутака реализације претходно дефинисаних догађаја, креиране су базе података за сваку локацију несигналисаних укрштања. Укупан обим спроведених истраживања на несигналисаним укрштањима приказан је у наредној табели (Табела 3.6), која обухвата укупан број релевантних периода, укупан и просечан број возила, као и укупан и просечан број пешака обухваћених овим истраживањем.

Табела 3.6. Обим спроведених истраживања по локацијама несигналисаних укрштања

	Ознака	Улица	Смер/трака	Период истраживања	Број периода	Број возила	Број пешака	Просечан број возила по периоду N_{voz_pros} [voz/period]	Просечан број пешака по периоду $N_{peš_pros}$ [peš/period]	
подаци за анализу карактеристика токова и развој модела	P1_T1	Омладинских бригада	ка кружној раскрсници/ крајња лева	3 часа		71	840	446	11,8	6,3
	P1_T2		ка кружној раскрсници/ у средини			73	967	-	13,2	-
	P2_T1	Војислава Илића	ка Црвеном крсту/лева	1 час и 30 минута		23	262	83	11,4	3,6
	P2_T2		ка Господара Вучића/лева			16	137	72	8,6	4,5
			укупно		4 часа и 30 минута		183	2206	1018	-
подаци за тестирање модела	P3_T1	Крунска	ка Максима Горког/лева	1 час и 30 минута		41	254	211	6,4	5,3
			укупно	1 час и 30 минута		41	254	211	-	-
		УКУПНО		6 часова		224	2460	1229	-	-

На несигналисаним укрштањима је снимљено укупно 6 часова видео-записа, који су обрађени на претходно описан начин у лабораторијским условима. Том обрадом издвојена су 224 периода која задовољавају критеријум саобраћајног оптерећења токова дуж деонице. И на несигналисаним укрштањима је укупан узорак подељен на два дела, тако да су формиране две базе података. Базу коришћену за анализу карактеристика предметних токова, као и за моделирање утицаја пешачких токова на возачке токове дуж деонице чине подаци из 183 периода (око 82%) са четири саобраћајне траке на две локације П1 и П2. Подаци из преосталих периода (41 период, око 18%) са локације П3 чине независну базу података коришћену за тестирање формираног модела.

4. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

У овом поглављу представљени су резултати експерименталних истраживања спроведених на седам сигналисаних укрштања, P1 – P7, и два несигналисана укрштања, П1 и П2. У првом делу поглавља представљене су карактеристике пешачких токова, а у другом делу карактеристике возачких токова на сигналисаним и несигналисаним укрштањима.

4.1. КАРАКТЕРИСТИКЕ ПЕШАЧКИХ ТОКОВА

Истраживање карактеристика пешачких токова условљено је начином регулисања саобраћаја на укрштањима, те нису спроведене потпуно исте анализе понашања и параметара опслуживања пешака на сигналисаним и несигналисаним укрштањима. У складу са тим, на сигналисаним укрштањима спроведене су анализе:

- расподеле започињања опслуживања пешака,
- ефективне ширине пешачког прелаза,
- интервала слеђења пешака,
- брзине пешака, и
- времена реакције пешака на почетак зеленог сигналног појма.

С друге стране, на несигналисаним укрштањима, спроведене су анализе:

- ефективне ширине пешачког прелаза,
- интервала слеђења пешака,
- брзине пешака, и
- временских губитака пешака.

Важно је напоменути да су у анализи карактеристика пешака на несигналисаним укрштањима, на локацији П1 посматрани само пешаци који су снимљени у интеракцији са возилима у П1_T1. Ова одлука је донета након евалуације снимљених видео-записа и закључивања да се на локацији П1 возила у обе траке опслужују готово истовремено. Дакле, возила у П1_T1 и П1_T2 се зауставе у приближно истом тренутку ради пропуштања пешака, те је сваки пешак који је прешао улицу снимљен у интеракцији са возилима у обе траке. У том смислу, разматрање укупног узорка пешака на овој локацији не би било методолошки оправдано, јер би допринело анализи карактеристика истих пешака.

На крају су међусобно упоређене карактеристике пешачких токова истраживане на сигналисаним и несигналисаним укрштањима.

4.1.1. РАСПОДЕЛА ЗАПОЧИЊАЊА ОПСЛУЖИВАЊА ПЕШАКА НА СИГНАЛИСАНИМ УКРШТАЊИМА

Расподела започињања опслуживања пешака на сигналисаним укрштањима подразумева графички приказ кумулативне вероватноће започињања преласка пешака у свакој секунди циклуса. У складу са тим, расподела започињања опслуживања пешака, са прецизношћу једне секунде, утврђена је на нивоу сваке локације, и то на основу тренутка започињања преласка сваког пешака у односу на тренутак почетка зеленог за пешаке, који је означен са 0 на x-оси на наредном графику (График 4.1 а – е). Негативне вредности на x-оси означавају дужину трајања црвеног, а позитивне вредности дужину трајања зеленог сигналног појма на посматраној раскрсници.

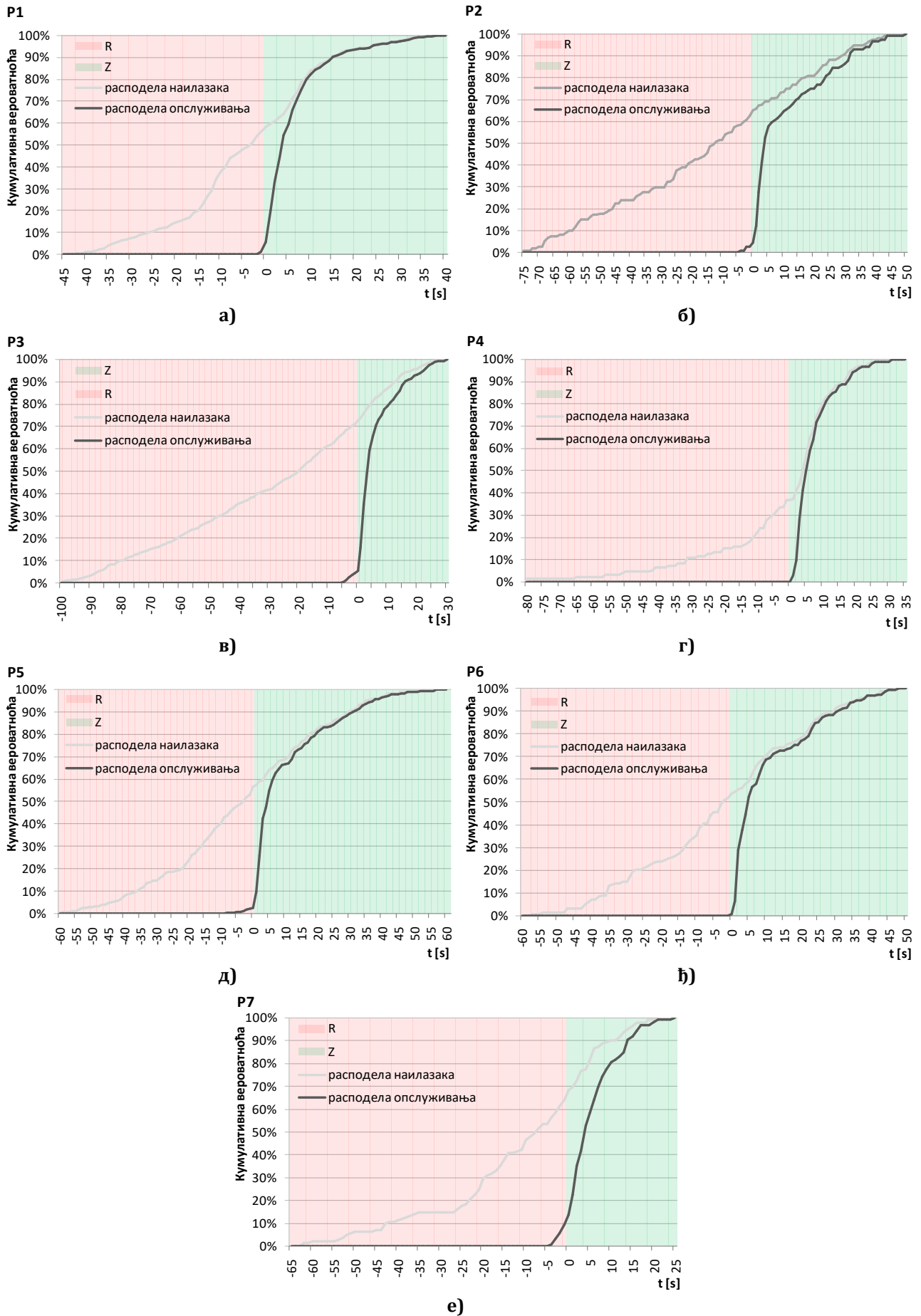
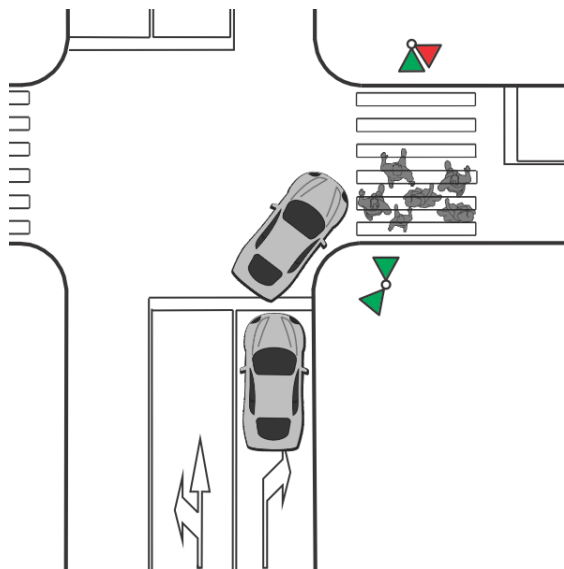


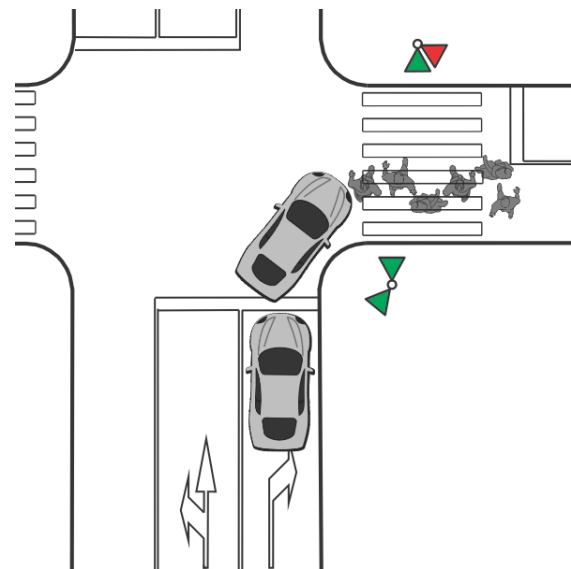
График 4.1. Расподела започињања опслуживања пешака на сигналисаним укрштањима

На основу утврђених расподела започињања опслуживања (График 4.1 а – е) уочава се да део пешака започиње прелазак око 5 секунди пре почетка зеленог сигналног појма за пешаке. Зависно од локације, тј. вредности заштитног времена, 0-10% од укупног броја пешака започне прелазак пре почетка зеленог за пешаке. Дакле, може се закључити да пешаци разумеју концепт заштитног времена, па за прелазак користе и време од завршетка зеленог за конфликтни возачки ток, тј. од заустављања возачког тока, до почетка зеленог за пешаке. Ова појава је препозната и у ранијим истраживањима (Knoblauch и остали, 1996).

Даље, утврђене расподеле започињања опслуживања указују да највећи број пешака (преко 70%) започне опслуживање у првих 15 секунди зеленог (График 4.1 а – е). Дакле, пешаци који чекају током црвеног започињу прелазак непосредно по промени сигналног појма. Овај тренд је уочен на свим локацијама, без обзира на интензитет тока пешака, геометријске карактеристике локације или примењене параметре рада светлосних сигнала. Наведени резултат доводи до закључка да се са повећањем протока пешаци следе мањим интервалима слеђења. Претпоставка је да се мањи интервали слеђења приликом преласка на сигналисаним укрштањима реализују услед сакупљања пешачког тока по дужини и ширења по ширини. Ове појаве се, најчешће, реализују истовремено, али је због једноставнијег разумевања дат одвојен графички приказ истих (Слика 4.1 и Слика 4.2). Сакупљање по дужини подразумева да се пешаци следе на мањем растојању, тј. са мањим интервалима слеђења (Слика 4.1). Ширење пешачког тока по ширини подразумева да пешаци обилазе друге пешаке, користећи и површину коловоза ван обележеног пешачког прелаза (Слика 4.2). У том случају пешаци паралелно прелазе преко конфликтног пресека реализујући тако минималне интервале слеђења (око 0 секунди). Претпоставља се да су ове појаве израженије са повећањем саобраћајног захтева пешака, и детаљније су анализирани у поглављима „Интервал слеђења пешака“ и „Ефективна ширина пешачког прелаза“.



Слика 4.1. Графички приказ сакупљеног пешачког тока по дужини на сигналисаним укрштањима



Слика 4.2. Графички приказ раширеног пешачког тока по ширини на сигналисаним укрштањима

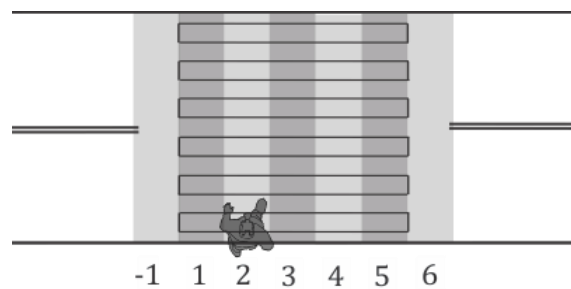
Расподеле започињања опслуживања пешака на претходном графику (График 4.1 а – е) приказане су у односу на расподеле наилазака пешака, које подразумевају графички приказ кумулативне вероватноће наилазака пешака до пешачког прелаза у свакој секунди циклуса, и утврђене су на основу тренутка доласка сваког пешака до пешачког

прелаза у односу на тренутак почетка зеленог за пешаке. Утврђене расподеле започињања опслуживања у односу на расподеле наилазака пешака (График 4.1 а – е) указују да, након опслуживања накупљених пешака, тј. након 15 секунди, пешаци у конфликтном пресеку наилазе интензитетом долазног тока и опслужују се тим интензитетом до краја зеленог сигналног појма и током заштитног времена.

Ова анализа није спроведена на несигналисаним укрштањима, јер није била сврсисходна. Наиме, на овим укрштањима нема накупљања пешака, имајући у виду да почетак њиховог опслуживања није условљен одређеним догађајем.

4.1.2. ЕФЕКТИВНА ШИРИНА ПЕШАЧКОГ ПРЕЛАЗА

Ефективна ширина пешачког прелаза представља ширину коју пешаци заиста користе приликом преласка, која, дакле, може обухватити и део коловоза ван реалне ширине пешачког прелаза. Утврђивање ефективне ширине пешачког прелаза на сигналисаним и несигналисаним укрштањима заснива се на анализи фреквенција коришћења сваког сегмента ширине пешачког прелаза. Фреквенције коришћења ових сегмената дефинисане су по смеровима кретања пешака, на основу евидентираног сегмента на ком је сваки пешак започео прелазак. Начин дефинисања сегмената објашњен је у поглављу 3.5 (Слика 3.21 и Слика 3.22), а на наредној слици (Слика 4.3) дат је пример у коме пешак започиње прелазак на сегменту 2 на пешачком прелазу.



Слика 4.3. Пример евидентирања сегмента на коме пешак започиње прелазак

С обзиром на то да је обим узорка по локацијама различит, утврђене су просечне фреквенције коришћења сваког сегмента (на нивоу циклуса, односно периода посматрања) како би подаци били упоредиви.

Анализа ефективне ширине пешачког прелаза на сигналисаним укрштањима

Фреквенције коришћења сваког сегмента ефективне ширине пешачког прелаза на сигналисаним укрштањима утврђене су за седам разматраних локација и дате су у односу на реалне ширине пешачких прелаза (График 4.2 а – е). На овај начин омогућено је утврђивање ефективне ширине пешачког прелаза и проверавање претпоставке да ће пешаци користити већу ширину од ширине пешачког прелаза како би се што пре опслужили. Наиме, такво понашање пешака је утврђено у Ирану, где су аутори показали да пешаци за прелазак користе површину коловоза ван површине пешачког прелаза како би избегли гужву и брже прешли улицу (Bargegol и остали, 2017).

На приказаним графицима се уочава да је на свим локацијама ефективна ширина пешачког прелаза већа за 3 до 7 метара од реалне ширине. На пример, на локацији РЗ (График 4.2 в) ефективна ширина пешачког прелаза износи око 10 метара, што је двоструко више у односу на реалну ширину. Дакле, за започињање преласка се

интензивно користе сегменти ван обележеног пешачког прелаза у оба смера кретања. Услед великог саобраћајног захтева пешачког тока на овој локацији, пешаци се током црвеног фронтално распоређују дуж тротоара како би избегли формирање колона у зони накупљања на тротоару. Овакво понашање омогућава пешацима да започну прелазак непосредно по промени сигналног појма, чиме минимизирају потенцијалне временске губитке услед расформирања формиране колоне пешака. Поред тога, коришћење површине коловоза ван пешачког прелаза омогућава обилажење споријих пешака. Може се, дакле, закључити да је ефективна ширина пешачког прелаза знатно већа од реалне ширине у ситуацијама великих саобраћајних захтева пешачких токова.

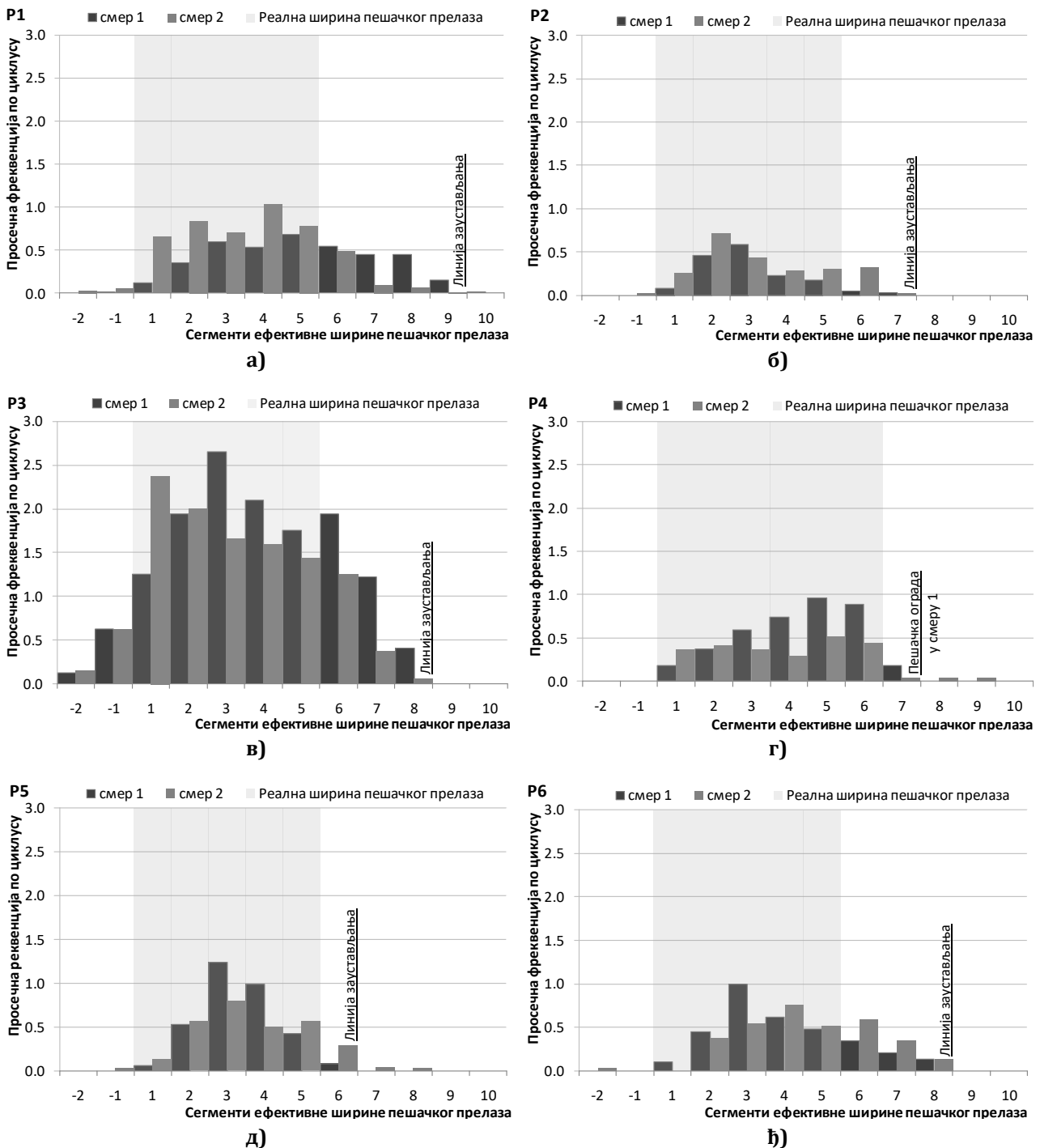


График 4.2. Ефективна ширина пешачког прелаза на сигналисаним укрштањима

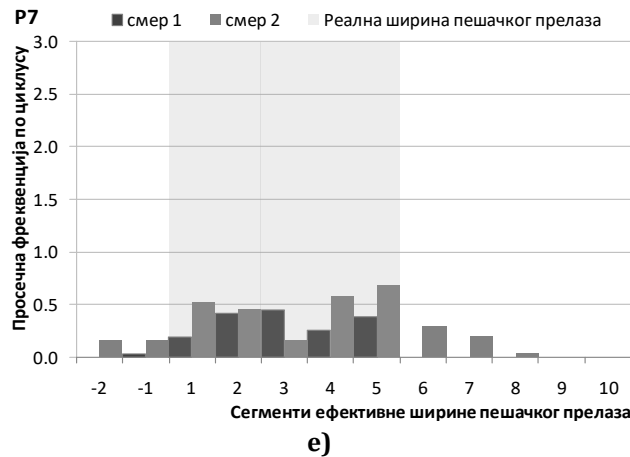


График 4.2. (наставка) Ефективна ширина пешачког прелаза на сигналисаним укрштањима

На локацијама Р1, Р6 и Р7 (График 4.2 а, ђ, е) приликом започињања преласка фаворизују се сегменти дуж ивица пешачког прелаза или ван његове реалне ширине, углавном у једном смеру. Разлог за ово понашање лежи у тежњи пешака да се крећу најкраћом путањом до и од атракција у непосредној близини пешачког прелаза, као на пример до/од улаза у ТЦ Бео (Р1) и стајалишта јавног превоза путника (Р6 и Р7). Овај резултат доводи до закључка да ефективна ширина пешачког прелаза може бити већа од његове реалне ширине у ситуацијама када се жељена путања пешака не поклапа са позицијом изведеног пешачког прелаза.

С друге стране, иако је на локацијама Р2, Р4 и Р5 ефективна ширина пешачког прелаза нешто већа од реалне ширине, уочава се да се највећи део пешака опслужује управо на сегментима који се поклапају са реалном ширином пешачког прелаза (График 4.2 б, г, д). Ово указује да се позиција пешачког прелаза на овим локацијама знатно поклапа са жељеном путањом кретања пешака. Ипак, на локацији Р4 постоји и пешачка ограда која каналише кретање пешака, тако да у смеру 1 није могуће започињање преласка ван површине пешачког прелаза. Овај резултат је значајан јер показује да се применом адекватне саобраћајне опреме жељена путања пешака може изменити, а самим тиме и ефективна ширина пешачког прелаза приближити његовој реалној ширини.

На основу изнетих резултата може се потврдити да се пешачки ток на сигналисаним укрштањима приликом опслуживања шири по ширини као последица већег интензитета пешачког тока. Добијени резултати имају практичну примену у инжењерској пракси, јер указују на потребу дефинисања ширине пешачког прелаза у зависности од интензитета пешачког тока, као и дефинисања његовог положаја у зависности од жељене путање пешачког тока. Поред тога, показано је да се применом адекватне саобраћајне опреме, уколико је неопходно, пешачки ток може каналити на дефинисану ширину пешачког прелаза.

Анализа ефективне ширине пешачког прелаза на несигналисаним укрштањима

Фреквенције коришћења сваког сегмента ефективне ширине пешачког прелаза на несигналисаним укрштањима установљене су за две разматране локације (три саобраћајне траке) и дате су у односу на реалне ширине пешачких прелаза (График 4.3 а - в).

На основу приказаних графика (График 4.3 а - в) може се уочити да је ефективна ширина пешачког прелаза већа за 1 до 6 метара од реалне ширине. При томе, уочава се да се најчешће користи површина коловоза са једне стране пешачког прелаза, што је

углавном последица тежње пешака да се крећу најкраћом путањом до и од атракција у непосредној близини пешачког прелаза (стајалишта јавног превоза путника). Овај резултат је делимично у складу са резултатима истраживања према којем пешаци на несигналисаним пешачким прелазима користе за прелазак до 3 метра са обе стране пешачког прелаза (Noh и остали, 2021).

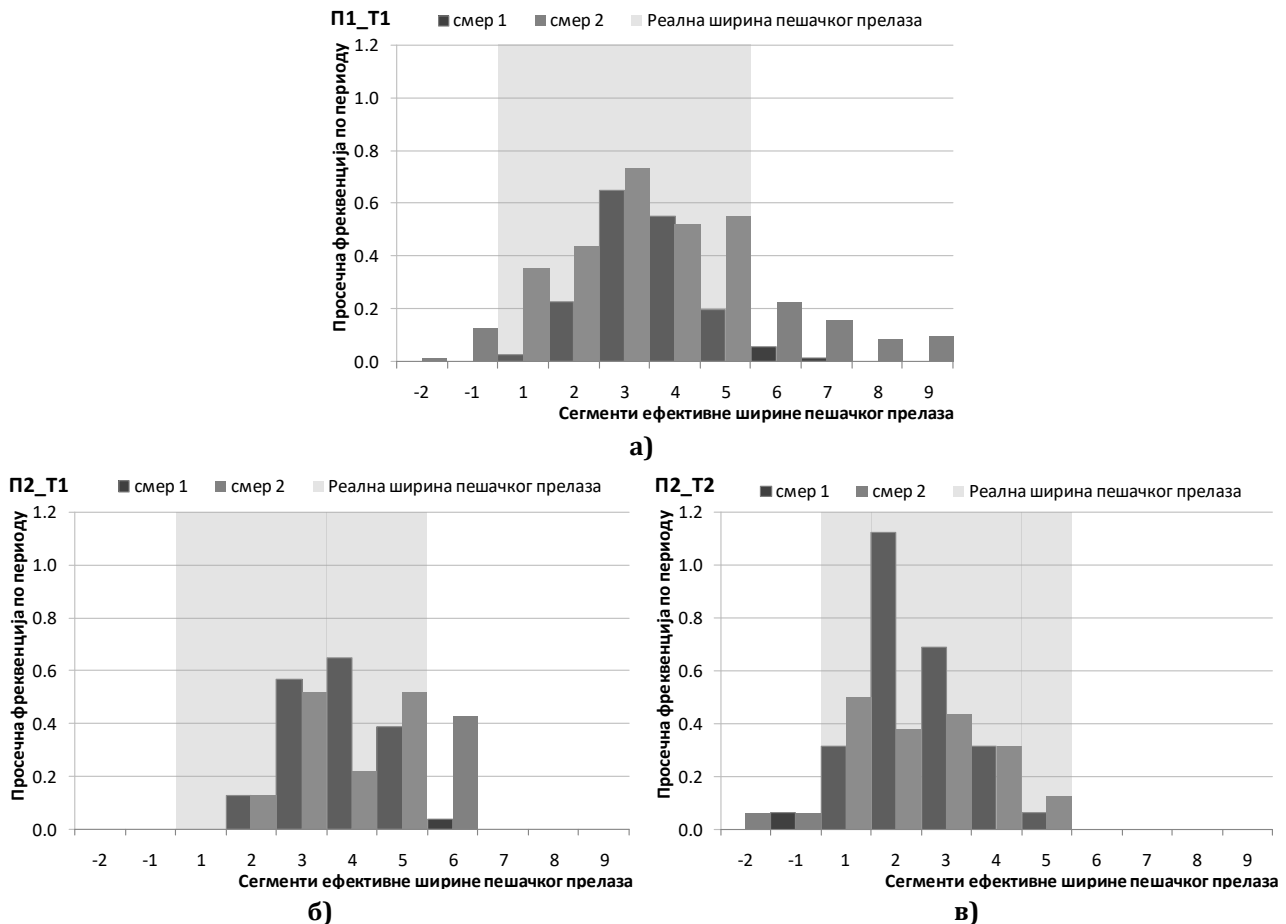


График 4.3. Ефективна ширина пешачког прелаза на несигналисаним укрштањима

Резултати су показали да на несигналисаним укрштањима знатно мањи број пешака започиње прелазак на сегментима ван пешачког прелаза, па се може закључити да пешаци у највећој мери користе реалну ширину пешачког прелаза. Овај резултат је у складу са резултатима датим у литератури (Nkurunziza и остали, 2024). Један од разлога за кретање пешака јасно дефинисаном ширином пешачког прелаза може бити њихова несигурност због наилазећих возила. С друге стране, на несигналисаним укрштањима нема накупљања пешака, те је пешацима реална ширина пешачког прелаза увек потпуно или делимично слободна, па стога немају потребу да користе површину коловоза ван пешачког прелаза.

4.1.3. ИНТЕРВАЛ СЛЕЂЕЊА ПЕШАКА

Интервал слеђења пешака посматран је као време које протекне између проласка два узастопна пешака кроз дефинисани конфликтни пресек, без обзира на смер кретања и сегмент ефективне ширине којим се пешак креће. Наведено произилази из чињенице да возач који се позиционира возилом испред пешачког прелаза, разматра интервале слеђења између пешака без обзира на смер кретања и сегмент ефективне ширине којим се пешак креће. Дескриптивна статистика интервала слеђења утврђена је за укупан узорак, као и по локацијама сигналисаних и несигналисаних укрштања.

Анализа интервала слеђења пешака на сигналисаним укрштањима

У спроведеној анализи коришћен је укупан узорак од 2525 снимљених интервала слеђења пешака на седам локација сигналисаних укрштања (Табела 4.1). Реализовани интервали слеђења пешака су у распону од 0 секунди, што представља ситуацију када два или више пешака прелазе конфликтни пресек истовремено (паралелно кретање или мимоилажење), до преко 37 секунди, што представља екстремну ситуацију случајног наилаaska пешака након опслуживања пешака накупљених током црвеног сигналног појма (График 4.4). Ипак, чак 90% реализованих интервала слеђења је у распону од 0 до 6 секунди, док интервали слеђења преко 10 секунди имају вероватноћу појаве око 5% (График 4.5).

Табела 4.1. Дескриптивна статистика интервала слеђења пешака на сигналисаним укрштањима

$t_{h_peš}$ [s]	Све локације	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
n	2525	635	155	811	179	401	193	151
min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
max	37,49	27,58	32,76	13,08	16,02	37,49	22,20	18,22
просечна вредност	2,34	2,11	5,33	0,93	2,43	3,80	3,66	2,44
медијана	0,88	1,07	2,87	0,39	1,11	2,16	2,02	1,39
стандардно одступање	3,81	3,11	6,91	1,52	3,10	4,93	4,73	2,98
15% ₀₀	0,04	0,01	0,52	0,04	0,04	0,08	0,19	0,01
85% ₀₀	4,57	4,03	9,29	1,70	5,85	7,75	7,66	5,31

Спроведеним истраживањем је утврђено да је просечна вредност интервала слеђења, на нивоу целог узорка, 2,34 секунде. Ова вредност одсликава интервале слеђења свих пешака, те постоји утицај, иако ретких, максималних вредности интервала слеђења. Чак 72% пешака се следи интервалима слеђења до просечне вредности (График 4.5). Медијана од око 0,90 секунди одсликава најчешће реализоване вредности интервала слеђења при опслуживању пешака накупљених током црвеног сигналног појма.

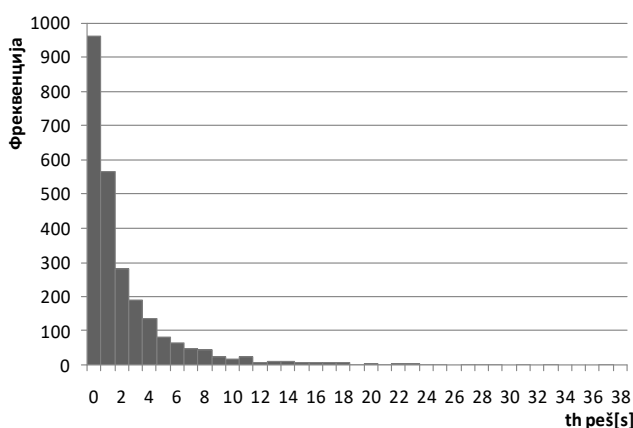


График 4.4. Фреквенција интервала слеђења пешака на сигналисаним укрштањима

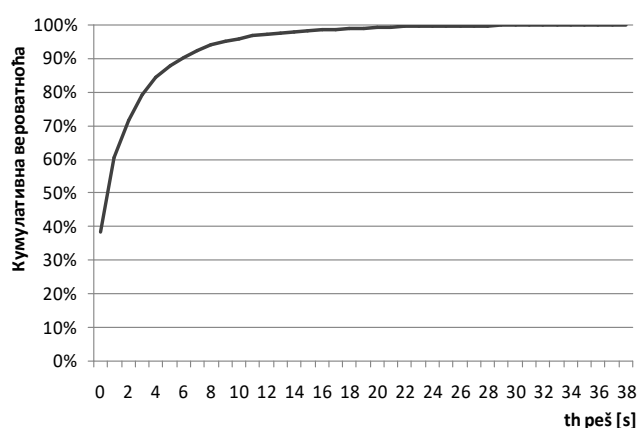


График 4.5. Расподела интервала слеђења пешака на сигналисаним укрштањима

Просечне вредности интервала слеђења разликују се међу локацијама (Табела 4.1). Најмања вредност просечног интервала слеђења, 0,93 секунде, реализована је на локацији P3 где је највећи број пешака по циклусу, док је највећа вредност 5,33 секунде реализована на P2 са најмањим бројем пешака по циклусу. Овај резултат представља основ за спровођење анализе утицаја броја пешака по циклусу на просечан интервал слеђења пешака.

Анализа утицаја броја пешака по циклусу на просечан интервал слеђења пешака

Раније изнета претпоставка да интервал слеђења пешака зависи од интензитета пешачког тока проверена је успостављањем зависности просечног интервала слеђења од броја пешака по циклусу (График 4.6). На приказаном графику уочава се да је просечан интервал слеђења око 4 секунде у случају када се опслужује 2 - 4 пешака по циклусу, и да вредност опада до минималних 0,45 – 0,50 секунди у случају када се опслужује преко 33 пешака по циклусу. На основу ових резултата може се потврдити претпоставка да се пешачки ток приликом преласка на сигналисаним укрштањима сакупља по дужини, реализујући мање интервале слеђења како се проток пешака повећава.

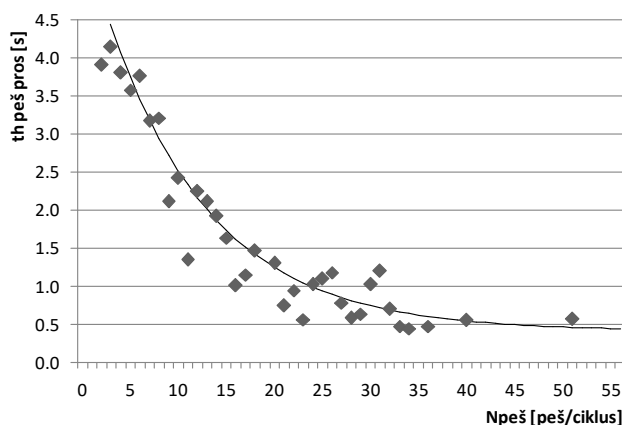


График 4.6. Зависност просечног интервала слеђења пешака од броја пешака по циклусу на сигналисаним укрштањима

Утврђена експоненцијална функција, која најбоље описује зависност просечног интервала слеђења од броја пешака по циклусу, приказана је на претходном графику (График 4.6) и дата је наредном једначином:

$$t_{h_peš_pros} = 0,4148 + 4,8385 \cdot e^{-N_{peš}/10,8230} \quad (4-1)$$

где је:

$t_{h_peš_pros}$ - просечан интервал слеђења на нивоу циклуса [s],

$N_{peš}$ - број пешака током циклуса [peš/ciklus].

Коефицијенти утврђене зависности интервала слеђења од броја пешака по циклусу статистички су значајни и различити од нуле, на основу резултата t -теста (Табела 4.2). Коефицијент детерминације $R^2 = 0,9291$ показује да утврђена експоненцијална једначина (4-1) веома добро описује ову зависност. Имајући у виду резултате ANOVA анализе ($p < 0,0001 < 0,05$), може се закључити да је утврђена функција значајно боља у односу на алтернативну хипотезу да је $t_{h_peš_pros} = const.$

Табела 4.2. Статистика добијене зависности просечног интервала слеђења и броја пешака по циклусу на сигналисаним укрштањима

Коефицијент	Вредност	Стандардно одступање	t -value	Prob> t	Зависност
y_0	0,4148	0,1593	2,6047	0,01384	0,8861
A_1	4,8385	0,2617	18,4924	0,00000	0,6362
t_1	10,8230	1,4744	7,3405	0,00000	0,9071

Потврђена зависност интервала слеђења од интензитета пешачког тока указује да је оправдано у модел за утврђивање утицаја пешака на возачки ток уврстити искључиво интензитет пешачког тока, будући да је то параметар који је познат у поступку оптимизације.

Анализа интервала слеђења пешака на несигналисаним укрштањима

У спроведеној анализи интервала слеђења на несигналисаним укрштањима коришћен је узорак од укупно 601 интервала слеђења пешака (Табела 4.3). Утврђена минимална вредност интервала слеђења од 0 секунди реализује се у ситуацијама када два или више пешака прелазе конфликтни пресек истовремено (паралелно кретање или мимоилажење). Максимална вредност интервала слеђења од преко 43 секунде има малу вероватноћу појаве (График 4.7 и График 4.8) и представља екстремну ситуацију спорадичног наилаaska пешака током дугих периода посматрања.

Табела 4.3. Дескриптивна статистика интервала слеђења пешака на несигналисаним укрштањима

$t_{h_peš}$ [s]	Све локације	П1_Т1	П2_Т1	П2_Т2
n	601	446	83	72
min	0,00	0,00	0,00	0,01
max	43,65	43,65	36,56	39,00
просечна вредност	6,42	6,05	8,00	6,90
медијана	3,63	2,74	7,08	4,91
стандардно одступање	7,54	7,67	7,30	6,82
15‰	0,20	0,10	0,95	1,17
85‰	13,30	12,23	15,26	13,16

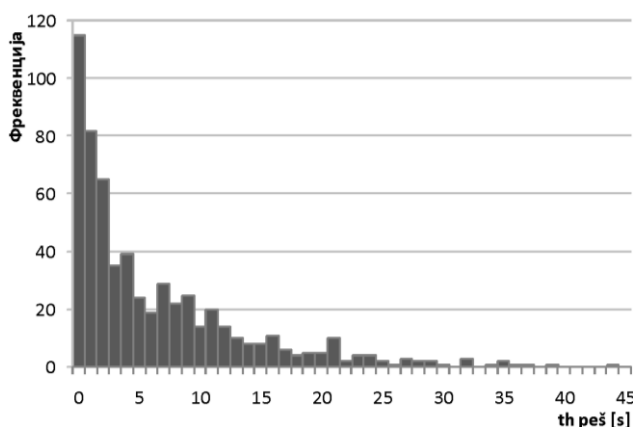


График 4.7. Фреквенција интервала слеђења пешака на несигналисаним укрштањима

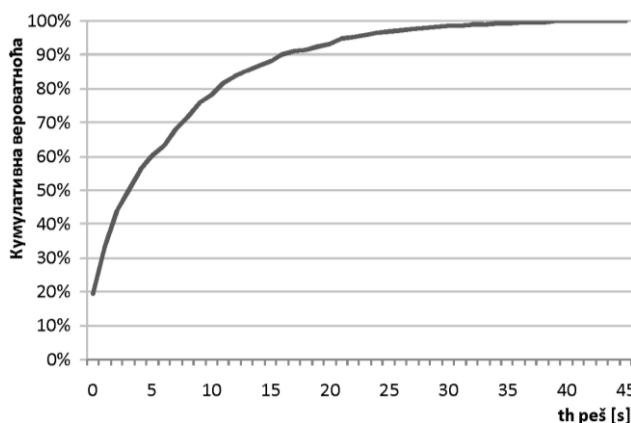


График 4.8. Расподела интервала слеђења пешака на несигналисаним укрштањима

Имајући у виду да су, по локацијама, утврђене просечне вредности интервала слеђења од преко 6 секунди (Табела 4.3), може се закључити да се реализују већи интервали слеђења без обзира на број пешака и локацију несигнализованог пешачког прелаза. Тиме је потврђено да пешаци наилазе на случајан начин и да не долази до накупљања пешака. Дакле, интеракција између пешака је минимална, те не постоји основ за анализу утицаја броја пешака на вредност интервала слеђења.

4.1.4. БРЗИНА ПЕШАКА ПРИЛИКОМ ПРЕЛАСКА

Брзина пешака приликом преласка преко пешачког прелаза представља један од најзначајнијих параметара пешачког тока. Брзина сваког појединачног пешака најчешће се утврђује на основу времена преласка и дужине пешачког прелаза мерене по средини и паралелно са осом пешачког прелаза, применом једначине (4-2).

$$V_{peš} = \frac{L_{pp}}{t_{peš}} \quad (4-2)$$

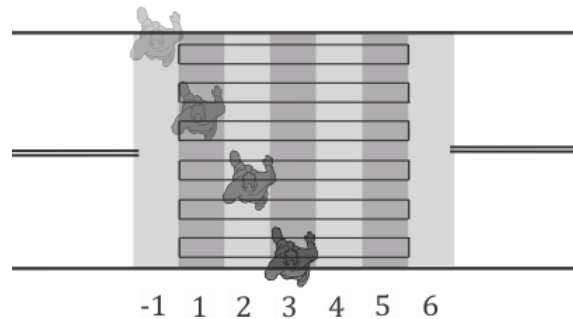
где је:

$V_{peš}$ - брзина пешака приликом преласка пешачког прелаза [m/s],

L_{pp} - дужина пешачког прелаза [m],

$t_{peš}$ - време преласка преко пешачког прелаза [s].

Међутим, у овом истраживању је утврђено да око 70% пешака прелази улицу косо, правцем који није паралелан са осом пешачког прелаза, без обзира на начин регулисања укрштања. Пример косог правца преласка приказан је на слици испод (Слика 4.4), при чему пешак започиње прелазак на 3. сегменту пешачког прелаза, а завршава на -1. сегменту ван пешачког прелаза, прелазећи притом три сегмента ширине. Разлог за овакво понашање пешака може бити потреба за обилажењем споријих пешака, као и атракције са друге стране саобраћајнице које су циљ кретања пешака.



Слика 4.4. Пример косог правца преласка на пешачком прелазу

Из тог разлога, брзина је утврђена и на основу времена преласка и стварно пређеног растојања приликом преласка, применом наредне једначине:

$$V_{peš_{st}} = \frac{L_{peš_{st}}}{t_{peš}} \quad (4-3)$$

где је:

$V_{peš_{st}}$ - брзина пешака приликом преласка пешачког прелаза узимајући у обзир стварно пређено растојање [m/s],

$L_{peš_{st}}$ - дужина стварно пређеног растојања приликом преласка [m],

$t_{peš}$ - време преласка преко пешачког прелаза [s].

Резултати су показали да разлика у брзинама утврђеним на два представљена начина није статистички значајна ($p > 0,05$) и износи око 0,01 метар у секунди на несигналисаним и око 0,02 метра у секунди на сигналисаним укрштањима. Поред тога, рад светлосних сигнала се пројектује за прелазак путањом паралелном са осом пешачког прелаза, и не може узети у обзир све могуће нерегуларне преласке. У складу са тим, настављена је анализа брзина утврђених на основу првог начина, тј. стварне дужине пешачког прелаза.

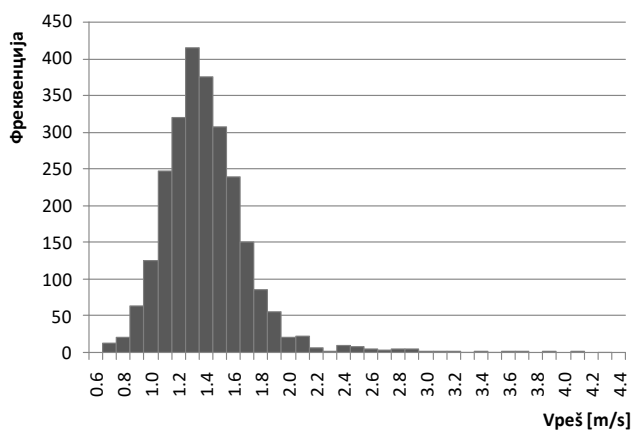
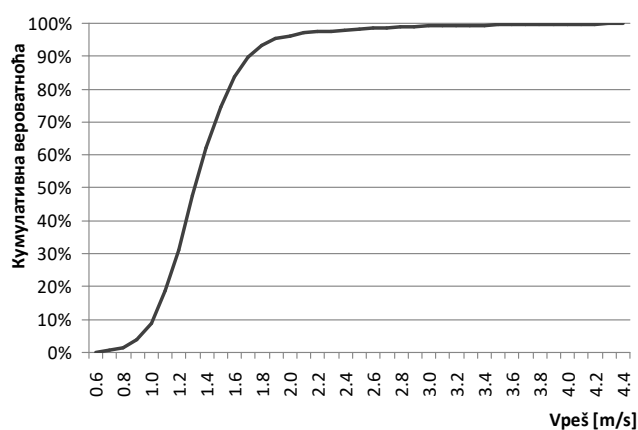
Анализа брзине пешака приликом преласка на сигналисаним укрштањима

Спроведеним истраживањем на сигналисаним укрштањима утврђена је брзина за укупно 2538 пешака. Просечна брзина свих пешака износи 1,41 метар у секунди, док је медијана 1,37 метара у секунди (Табела 4.4).

Табела 4.4. Дескриптивна статистика брзине пешака на сигналисаним укрштањима

$V_{peš}$ [m/s]	сви	смер		пол		старост			
		1	2	мушкарци	жене	деца	млађи	средњих година	старији
n	2538	1267	1271	987	1452	130	1066	622	212
min	0,65	0,65	0,68	0,68	0,65	0,85	0,78	0,78	0,68
max	4,29	4,12	4,29	4,29	3,42	4,12	4,29	3,24	2,36
просечна вредност	1,41	1,40	1,42	1,47	1,38	1,37	1,50	1,40	1,20
медијана	1,37	1,35	1,38	1,40	1,35	1,27	1,44	1,37	1,17
стандардно одступање	0,35	0,36	0,35	0,41	0,30	0,41	0,38	0,30	0,27
15‰	1,12	1,10	1,13	1,15	1,10	1,11	1,20	1,13	0,92
85‰	1,67	1,66	1,67	1,75	1,63	1,66	1,74	1,63	1,48

На наредним графицима (График 4.9 и График 4.10) се уочава да се реализују и екстремне вредности брзина, које достижу максималних 4,29 метара у секунди. Брзинама преко 2,50 метра у секунди креће се око 1,5% пешака за које је утврђено да су претрчавали преко дела или целог пешачког прелаза, што је утврђено и у ранијим истраживањима (Almodfer и остали, 2017). Такође, брзинама од минималних 0,65 метара у секунди до 1,00 метра у секунди креће се око 4% пешака, за које је установљено да се отежано крећу или носе неки терет.


График 4.9. Фреквенција брзина пешака на сигналисаним укрштањима

График 4.10. Расподела брзина пешака на сигналисаним укрштањима

Важно је осврнути се на 15. перцентил брзине, који се користи у прорачуну минималног зеленог времена за пешаке и заштитних времена, чиме се омогућава да се 85% пешака опслужи безбедно током расположивог времена. У овом истраживању је утврђено да је 15. перцентил брзине 1,12 метара у секунди (Табела 4.4), што је слично резултатима појединих истраживања у литератури 1,09 – 1,15 метара у секунди (Tarawneh, 2001; Gates и остали, 2006; Goh и остали, 2012; Hediye и остали, 2014). Утврђена вредност је мања од најчешће примењене вредности од 1,20 метара у секунди, што може довести до тога да се одређени проценат пешака не опслужи уколико је примењено минимално зелено време утврђено на основу брзине од 1,20 метара у секунди. Овај проблем је најизраженији у случају старијих пешака чији је 15. перцентил брзине 0,92 метра у секунди. Наиме, око 60% старијих пешака креће се спорије од 1,20 метара у секунди и неће се опслужити током расположивог времена. Заправо, само млађи пешаци имају 15. перцентил брзине од 1,20 метара у секунди, што указује да минимална зелена и заштитна времена најчешће одговарају само овој старосној групи пешака.

Резултати истраживања брзине преласка пешака имају значајну практичну примену у инжењерској пракси, пре свега у поступцима прорачуна заштитних и минималних

Реализују се и екстремне вредности брзина, које достижу максималних 3,99 метара у секунди (График 4.11 и График 4.12). Показало се да се брзинама преко 2,50 метра у секунди креће око 2,5% пешака, за које је установљено да су претрчавали преко дела или целог пешачког прелаза, што је утврђено и у ранијим истраживањима (Almodfer и остали, 2017). Брзинама мањим од 1,00 метра у секунди, до минималних 0,81 метар у секунди, креће се 1% пешака за које је утврђено да се отежано крећу или носе неки терет.

4.1.5. ВРЕМЕ РЕАКЦИЈЕ ПЕШАКА НА ПОЧЕТАК ЗЕЛЕНОГ СИГНАЛНОГ ПОЈМА НА СИГНАЛИСАНИМ УКРШТАЊИМА

Време реакције пешака на почетак зеленог сигналног појма представља други значајан параметар пешачког тока на сигналисаним укрштањима, те је истраживано на седам локација сигналисаних укрштања. Време реакције пешака утврђено је за сваког појединачног пешака на основу тренутка започињања преласка у односу на тренутак започињања зеленог сигналног појма за пешаке, који је означен са 0 на x-оси на наредном графику (График 4.13).

Анализа времена реакције пешака обухватила је узорак од 1415 пешака који су у тренутку започињања зеленог сигналног појма за пешаке чекали на тротоару. Просечна вредност времена реакције, утврђена у овом истраживању, износи 2,79 секунди (Табела 4.6) и једнака је вредности времена реакције за коју је утврђено да важи радним данима у ранијим истраживањима у Аустралији (Bennett и остали, 2001). Ова вредност је нижа од вредности 7 секунди коју препоручује приручник НСМ (Transportation Research Board, 2022).

Табела 4.6. Дескриптивна статистика времена реакције пешака на сигналисаним укрштањима

$t_{r_peš}$ [m/s]	сви	смер		пол		старост			
		1	2	мушкарци	жене	деца	млађи	средњих година	старији
n	1415	714	701	539	829	78	602	352	108
min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00
max	13,20	13,20	13,12	9,26	13,20	9,84	9,15	13,20	9,26
просечна вредност	2,79	2,91	2,66	2,70	2,84	3,72	2,79	2,82	2,79
медијана	2,40	2,47	2,36	2,38	2,39	3,32	2,38	2,50	2,41
стандардно одступање	1,75	1,81	1,67	1,72	1,76	2,18	1,75	1,79	1,61
15‰	1,23	1,27	1,19	1,15	1,27	1,51	1,18	1,27	1,23
85‰	4,41	4,67	3,98	4,24	4,47	6,07	4,44	4,42	4,39

На основу утврђене расподеле времена реакције пешака (График 4.13) уочавају се екстремне вредности од преко 13 секунди, које су последица одређених дистракција пешака (коришћење мобилног телефона или разговор са другим пешаком) услед чега не обраћају пажњу на промену сигналног појма. С друге стране, узрок екстремних вредности времена реакције јесу ситуације када пешак стоји даље од пешачког прелаза (нпр. у хладовини), те је долазак до пешачког прелаза обухваћен временом реакције. Ипак, вероватноћа реализације ових екстремних вредности је мала, штавише, времена реакције преко 6 секунди имају вероватноћу реализације од око 6% (График 4.13). Најмања вредност од 0 секунди указује на то да пешак започиње прелазак у истом тренутку када почиње зелени сигнални појам, и реализује се у 10% случајева. У том случају, пешаци су одлуку о преласку донели након заустављања возачког тока на том краку, тј. пре почетка зеленог сигналног појма за пешаке.

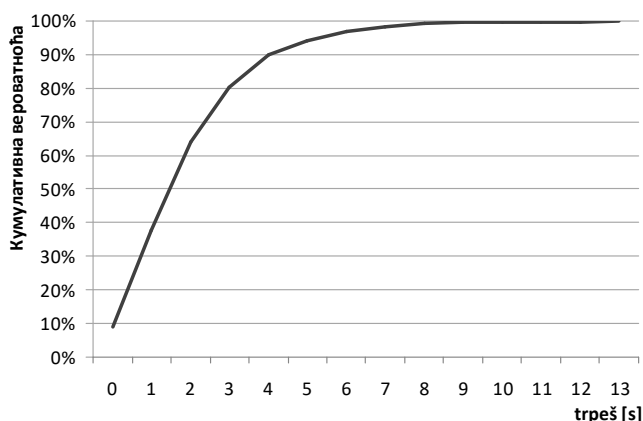


График 4.13. Расподела времена реакције пешака на сигналисаним укрштањима

Резултати истраживања времена реакције налазе практичну примену у поступку прорачуна минималних зелених времена за пешаке и калибрације микросимулационих модела. Такође, ANOVA анализа показала је да постоји статистички значајна разлика ($p=0,0002 < 0,05$) у времену реакције између старосних група. Тај резултат истиче важност усвајања вредности времена реакције која одговара старосној структури пешачког тока на посматраној микролокацији раскрснице, чиме би се обезбедило ефикасно и безбедно опслуживање пешака.

4.1.6. ВРЕМЕНСКИ ГУБИЦИ ПЕШАКА НА НЕСИГНАЛИСАНИМ УКРШТАЊИМА

Временски губици пешака су, поред брзине, значајан параметар пешачког тока на несигналисаним укрштањима. Временски губици су утврђени за сваког пешака на основу тренутка започињања преласка у односу на тренутак доласка пешака до пешачког прелаза, који је означен са 0 на x-оси на наредном графику (График 4.14). Анализа временских губитака у овом истраживању обухватила је укупан узорак од 601 пешака са три локације несигналисаних укрштања.

Минимална вредност временских губитака утврђена истраживањем је око 0 секунди и указује на то да постоје пешаци који прелазак започињу одмах по доласку до пешачког прелаза (Табела 4.7). Може се претпоставити да су то пешаци који су наишли након заустављања возила ради пропуштања другог пешака. Међутим, детаљнијом анализом података утврђено је да поједини пешаци који наиђу први до пешачког прелаза започињу прелазак одмах по доласку, што указује на поверење у возаче да ће им сигурно уступити првенство пролаза.

Табела 4.7. Дескриптивна статистика временских губитака пешака на несигналисаним укрштањима

$d_{peš}$ [s]	сви	смер		пол		старост			
		1	2	мушкарци	жене	деца	млађи	средњих година	старији
n	601	231	370	265	336	27	233	218	45
min	0,00	0,00	0,09	0,00	0,01	0,18	0,08	0,00	0,09
max	35,79	35,79	17,31	17,31	35,79	15,33	17,25	35,79	22,08
просечна вредност	1,62	1,80	1,51	1,65	1,60	3,13	1,11	1,56	2,85
медијана	0,80	0,82	0,78	0,82	0,76	1,17	0,67	0,72	1,19
стандардно одступање	2,82	3,50	2,30	2,51	3,05	4,68	1,57	2,95	4,66
15%	0,28	0,27	0,28	0,30	0,26	0,48	0,27	0,25	0,34
85%	2,59	2,69	2,55	2,67	2,53	6,85	1,77	2,58	4,31

Максимална вредност временских губитака је последица несигурности пешака или дистракције, као што су коришћење мобилног телефона, разговор са другим пешаком и слично. У сваком случају, вероватноћа временских губитака преко 10 секунди је око 2%. Просечна вредност од 1,62 секунде указује на то да пешаци на несигналисаним пешачким прелазима имају ниво услуге А, јер су им временски губици мањи од 5 секунди (Transportation Research Board, 2016).

Даље је утврђена расподела временских губитака пешака на несигналисаним укрштањима (График 4.14), на основу које се уочава да око 90% пешака започне прелазак у року од 4 секунде од тренутка доласка до пешачког прелаза. Више од 80% пешака прелазак започне након 2 секунде по доласку до пешачког прелаза, што је слично резултатима истраживања у Немачкој (Jiang и остали, 2015). Овај резултат указује на велику вероватноћу пропуштања пешака од стране возача. Тиме је показано да возачи поштују прописе и пропуштају пешаке који су на пешачком прелазу или су показали намеру да започну прелазак.

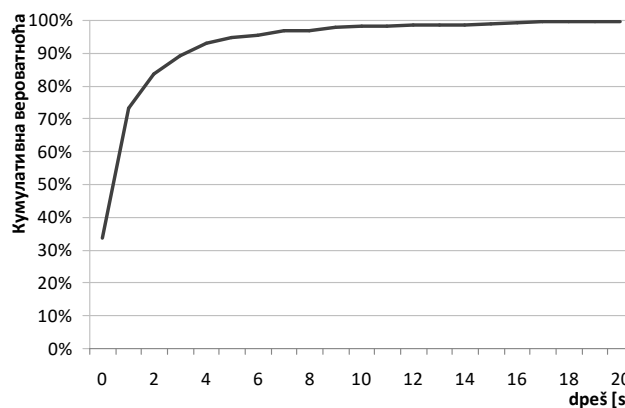


График 4.14. Расподела временских губитака пешака на несигналисаним укрштањима

Временски губици пешака на несигналисаним укрштањима имају практичну примену при утврђивању нивоа услуге пешачких токова, а резултати су показали да је на предметним локацијама у Београду велика спремност возача да пропусте пешака. Може се закључити да пешаци јесу приоритетни ток, што указује да нема потребе за анализом интервала слеђења возила прихватљивих за пешачке токове.

На сигналисаним укрштањима нису утврђени временски губици, јер они зависе искључиво од примењених параметара рада светлосних сигнала и не одсликавају утицај међусобне интеракције возачких и пешачких токова на овим укрштањима.

4.1.7. ПОРЕЂЕЊЕ КАРАКТЕРИСТИКА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА НА СИГНАЛИСАНИМ И НЕСИГНАЛИСАНИМ УКРШТАЊИМА

Поређење карактеристика пешачких токова заснива се на поређењу ефективне ширине пешачког прелаза и брзине пешака приликом преласка.

Резултати истраживања су показали да је, без обзира на начин регулисања саобраћаја на укрштањима, ефективна ширина пешачког прелаза већа од реалне ширине. Иако овај резултат указује на слично понашање пешака, уочено је да на несигналисаним укрштањима пешаци ређе користе сегменте ширине ван обележеног пешачког прелаза, као последица мањег интензитета пешака и њихове несигурности.

Ипак, основна разлика утврђена међу карактеристикама пешака на сигналисаним и несигналисаним укрштањима јесте разлика у брзинама приликом преласка. Резултати су показали да се пешаци на сигналисаним укрштањима крећу спорије него на несигналисаним (График 4.15). Утврђена просечна брзина пешака на сигналисаним и несигналисаним укрштањима је 1,41 и 1,62 метра у секунди, респективно. На основу резултата t -теста утврђено је да је разлика у брзинама на сигналисаним и несигналисаним укрштањима статистички значајна ($p \approx 0,0000 < 0,05$). Овим резултатом потврђена је једна од полазних хипотеза ове дисертације, да се карактеристике пешачких токова разликују у зависности од начина регулисања укрштања.

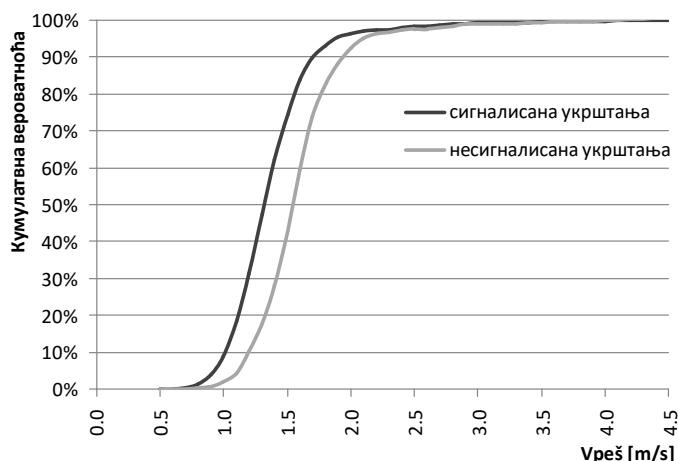


График 4.15. Упоредни приказ расподела брзина пешака на сигналисаним и несигналисаним укрштањима

Разлог описаног понашања може се пронаћи у чињеници да на несигналисаним укрштањима пешаци осећају већи притисак, с обзиром на то да су им возачи уступили првенство пролаза. Дакле, иако имају право првенства, пешаци убрзавају како би што пре напустили конфликтну зону да не би ометали пролазак возила. Иако и на сигналисаним укрштањима возачи уступају првенство пролаза пешацима, пешаци су опуштенији приликом преласка и осећају мањи притисак, јер користе јасно дефинисано време за њихов прелазак. На основу ових резултата може се закључити да се у поступку оптимизације параметара рада светлосних сигнала не може усвојити брзина утврђена на несигналисаним укрштањима, као што је наведено у појединим истраживањима.

Исти тренд међу брзинама на сигналисаним и несигналисаним укрштањима утврђен је у истраживању спроведеном у Палестини, где је просечна брзина на сигналисаним укрштањима била 1,35 метара у секунди, а на несигналисаним 1,39 метара у секунди (Hassouna, 2020). Међутим, у том истраживању разлика међу брзинама није била статистички значајна. С друге стране, резултати истраживања представљеног у овој дисертацији одступају од резултата ранијих истраживања у Бангладешу и Ирану која су утврдила да се пешаци спорије крећу на несигналисаним него на сигналисаним укрштањима (Zafri и остали, 2019; Bargegol и остали, 2022). Утврђена одступања могу се приписати другачијој саобраћајној култури у Бангладешу и Ирану, што се огледа у мањој спремности возача да пропусте пешаке на несигналисаним укрштањима, услед чега пешаци несигурније и спорије прелазе улицу.

4.2. КАРАКТЕРИСТИКЕ ВОЗАЧКИХ ТОКОВА

Утврђивање карактеристика возачких токова подразумевало је истраживање параметара опслуживања возачких токова, као и истраживање понашања возача у интеракцији са пешацима на сигналисаним и несигналисаним укрштањима.

Истраживање карактеристика возачких токова условљено је начином регулисања саобраћаја на укрштањима, те утврђене карактеристике возачких токова нису сасвим исте на сигналисаним и несигналисаним укрштањима. У складу са тим, на сигналисаним укрштањима утврђене су следеће карактеристике:

- време реакције возача првог возила у реду на почетак зеленог сигналног појма,
- брзина првог возила у реду,
- интервал слеђења возила,
- интервали слеђења између пешака који су прихватљиви за возаче, и
- дужина конфликтне зоне.

На несигналисаним укрштањима утврђене су следеће карактеристике:

- интервал слеђења возила,
- интервали слеђења између пешака који су прихватљиви за возаче, и
- дужина конфликтне зоне.

На крају је дато и међусобно поређење карактеристика возачких токова истраживаних на сигналисаним и несигналисаним укрштањима.

4.2.1. ВРЕМЕ РЕАКЦИЈЕ ВОЗАЧА НА ПОЧЕТАК ЗЕЛЕНОГ СИГНАЛНОГ ПОЈМА

Време реакције возача на почетак зеленог сигналног појма представља време које протекне од тренутка почетка зеленог за возила до проласка задње осовине првог возила у реду преко линије заустављања. Време реакције је анализирано на нивоу целог узорка прикупљеног у истраживању на сигналисаним укрштањима (Табела 4.8, График 4.16, График 4.17).

Утврђено је да је просечна вредност времена реакције 2,30 секунди, док медијана има вредност од 2,10 секунди (Табела 4.8). Минимална вредност времена реакције од -0,65 секунди указује да постоје возачи који прођу линију заустављања и пре појаве зеленог, тј. током црвено-жутог сигналног појма, али је таквих возача око 1% у укупном узорку (График 4.16, График 4.17). С друге стране, максимална вредност времена реакције од око 6 секунди се приписује ситуацијама када возачи услед дистракције (нпр. употреба мобилног телефона, разговор са сапутницима) не уоче одмах промену сигналног појма.

Табела 4.8. Дескриптивна статистика времена реакције првог возила у скретању

t_{r_voz} [s]	све ситуације	када нема пешака на пеш. прелазу на почетку зеленог	када има пешака пеш. прелазу на почетку зеленог
n	295	26	269
min	-0,65	-0,65	-0,02
max	6,05	6,03	6,05
просечна вредност	2,30	2,09	2,32
медијана	2,10	1,29	2,13
стандардно одступање	1,29	1,89	1,22
15‰	1,00	0,47	1,06
85‰	3,70	4,24	3,64

Уколико се упореде ситуације када је у тренутку појаве зеленог сигналног појма за возила пешак присутан на пешачком прелазу и ситуације када није, добијају се просечне вредности времена реакције од 2,09 и 2,32 секунди, респективно (Табела 4.8). Разлика у временима реакције није статистички значајна, што је утврђено резултатима

Mann-Whitney теста ($p=0,1293 > 0,05$), те се може закључити да присуство пешака не утиче на време реакције возача првог возила у реду. Овај резултат је очекиван, с обзиром да су возачи примарно фокусирани на светлосни сигнал, очекујући промену сигналног појма, а у мањој мери на пешаке који се налазе на пешачком прелазу. Резултати истраживања времена реакције возача првог возила у реду имају практичну примену, пре свега, у процесу калибрације микросимулационих модела.

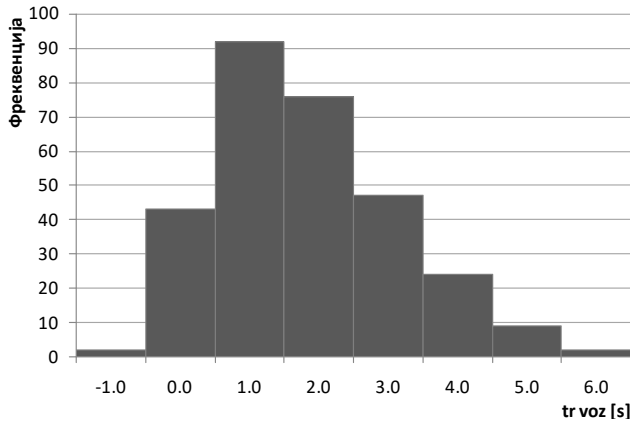


График 4.16. Фреквенција времена реакције возила на сигналисаним укрштањима

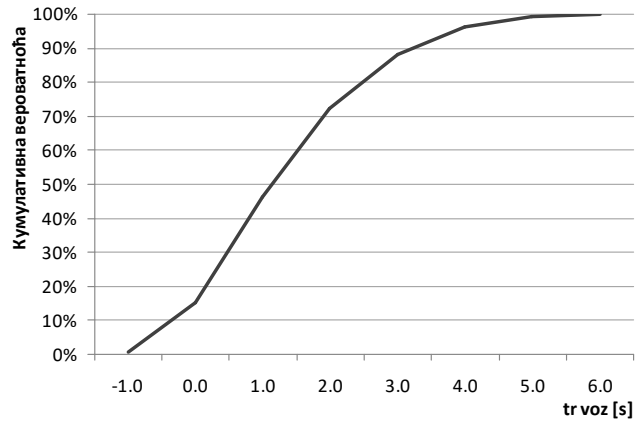


График 4.17. Расподела времена реакције возила на сигналисаним укрштањима

4.2.2. БРЗИНА ПРВОГ ВОЗИЛА У РЕДУ НА СИГНАЛИСАНИМ УКРШТАЊИМА

У овом истраживању брзина првог возила у реду утврђена је применом релације (4-4), на основу дужине трајекторије возила у скретању (од линије заустављања до ближе ивице пешачког прелазу) и времена путовања између те две позиције. Дакле, примењена је релација за утврђивање просечне брзине, не разматрајући убрзање и успорење возила. Наиме, истраживање је показало да возачи не убрзавају нагло, како не би морали нагло да успоравају због наилазећих пешака на пешачком прелазу, те се може претпоставити да је брзина приближно константна на кратким трајекторијама возила у скретању.

Важно је напоменути да је време путовања утврђено као време које протекне од проласка задње осовине првог возила у реду преко линије заустављања, до позиционирања тог возила испред пешачког прелазу. Истраживањем је утврђено да, када се возило позиционира испред пешачког прелазу, задња осовина се налази на око 5 метара од ивице пешачког прелазу. У складу са тим, да би се утврдила дужина трајекторије возила у скретању, неопходно је наведено растојање одузети од укупне дужине трајекторије скретања од линије заустављања до ближе ивице пешачког прелазу.

$$V_{1.voz} = \frac{L_{put}}{t_{put}} = \frac{L_{lz-pp} - 5}{t_{put}} \quad (4-4)$$

где је:

$V_{1.voz}$ - брзина првог возила у реду приликом приласка пешачком прелазу [m/s],

L_{put} - дужина трајекторије првог возила у реду од линије заустављања до пешачког прелазу [m],

t_{put} - време путовања првог возила у реду од линије заустављања до пешачког прелазу [s],

L_{lz-pp} - укупна дужина трајекторије скретања од линије заустављања до пешачког прелазу [m].

Резултати спроведеног истраживања показују да је просечна брзина свих првих возила 4,99 метара у секунди, тј. 18 километара на час (Табела 4.9). Иако су вредности брзине распоређене између минималне и максималне вредности (од 2,33 метра у секунди, тј.

8,39 километара на час до 8,76 метара у секунди, тј. 31,54 километара на час), ипак се уочава да су вредности најчешће око просечне вредности (График 4.18, График 4.19).

Табела 4.9. Дескриптивна статистика брзине првог возила у скретању на сигналисаним укрштањима

$V_{1.voz}$ [m/s]	све ситуације	када нема пешака на пеш.прелазу на почетку зеленог	када има пешака пеш.прелазу на почетку зеленог
n	295	26	269
min	2,33	3,61	2,33
max	8,76	8,09	8,76
просечна вредност	4,99	5,82	4,91
медијана	4,71	5,54	4,63
стандардно одступање	1,52	1,33	1,52
15%	3,39	4,38	3,31
85%	6,83	7,12	6,78

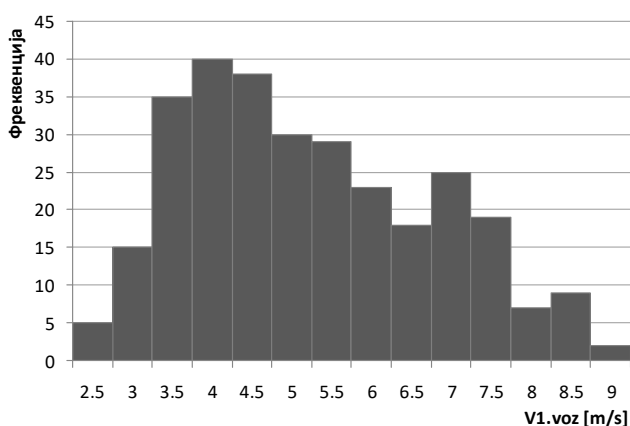


График 4.18. Фреквенција брзине првог возила на сигналисаним укрштањима

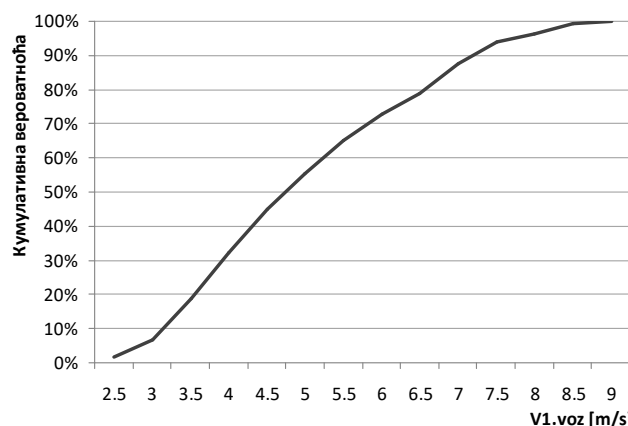


График 4.19. Расподела брзине првог возила на сигналисаним укрштањима

У циљу утврђивања утицаја пешака на понашање возача приликом приласка пешачком прелазу, анализирани су ситуације када је пешак присутан на пешачком прелазу у тренутку појаве зеленог за возила и ситуације када није присутан (Табела 4.9). Резултати показују да се возило креће брже када пешак није присутан на пешачком прелазу (5,82 метра у секунди тј. 21 километар на час), него када је пешак присутан (4,91 метар у секунди тј. око 17,7 километара на час). Разлика у брзинама је статистички значајна, што је утврђено на основу резултата Mann-Whitney теста ($p=0,0024 < 0,05$). Може се закључити да возачи свесно прилагођавају своју брзину, како би се пешаци потпуно или делимично опслужили за време путовања, тако да их што мање ометају приликом скретања.

Резултати истраживања брзине првог возила у реду биће примењени приликом формирања модела за утврђивање утицаја пешачких токова на сигналисаним укрштањима у овој дисертацији. Наиме, за прорачун времена путовања у формираном моделу биће примењена брзина првог возила у реду када су пешаци присутни на пешачком прелазу, с обзиром да је њихово присуство уобичајено на почетку зеленог сигналног појма.

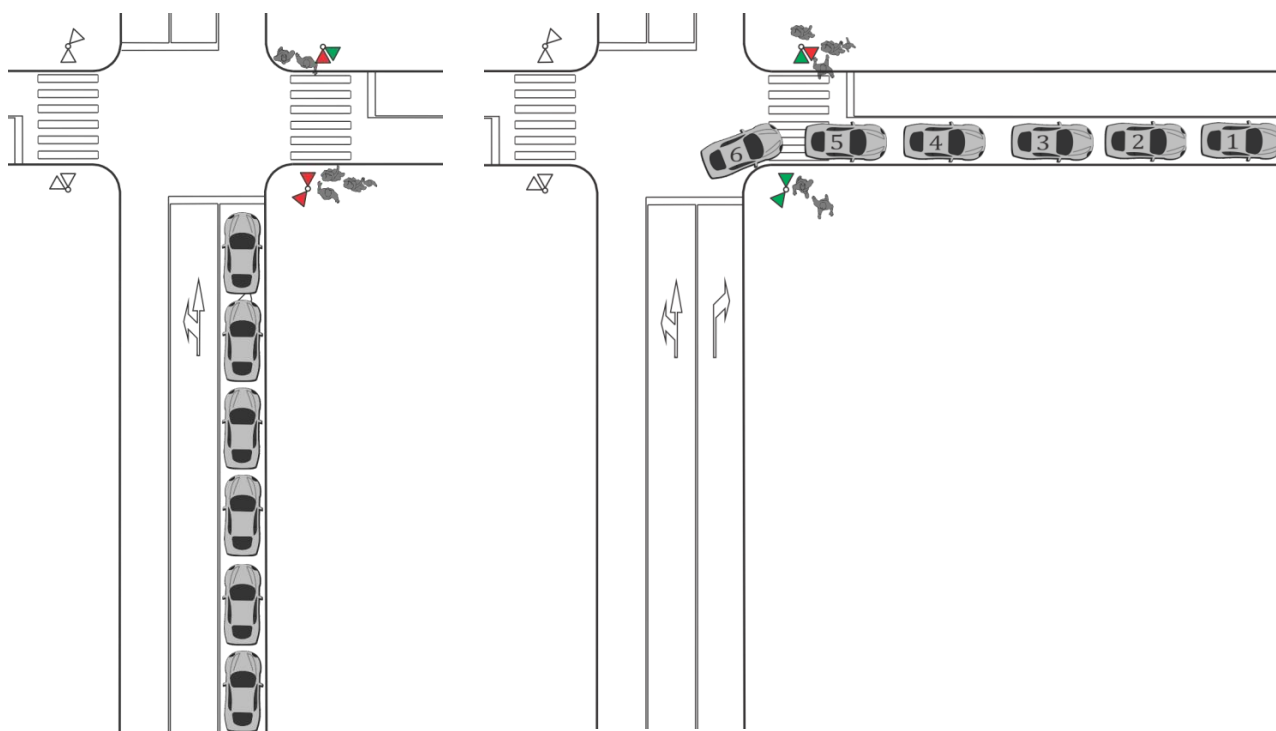
4.2.3. ИНТЕРВАЛ СЛЕЂЕЊА ВОЗИЛА

Интервал слеђења возила посматран је као временски период између проласка предње осовине два узастопна возила преко даље ивице пешачког прелазу. Даља ивица

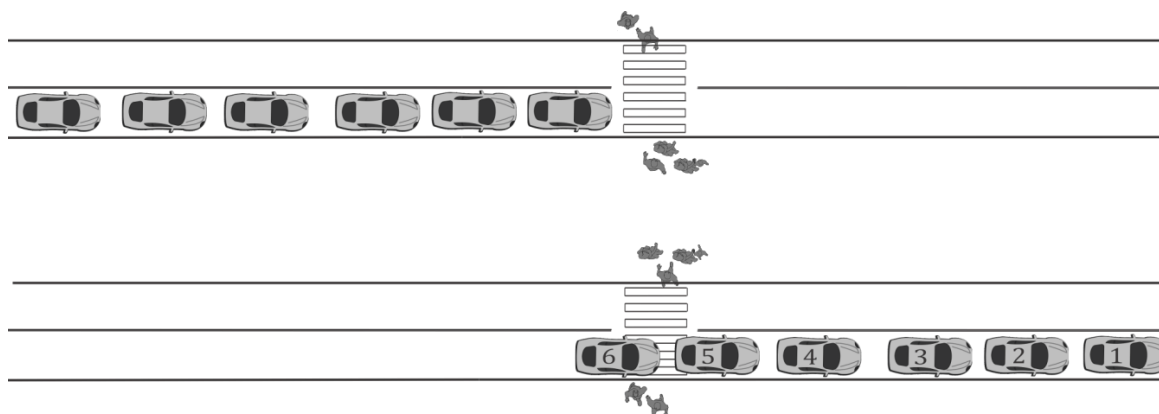
пешачког прелаза представља пресек на излазу из конфликтне зоне у коме престаје утицај пешачког тока. При томе, интервали слеђења су евидентирани само за она возила која су:

- на сигналисаним укрштањима:
 - била у реду на почетку зеленог за возила, и
 - наишла након почетка зеленог, али су се придружила реду возила која су пропуштала конфликтне пешаке,
- на несигналисаним укрштањима:
 - наишла са улазне сигнализационе раскрснице након почетка зеленог сигналног појма на тој раскрсници, и
 - придружила се реду возила која су пропуштала конфликтне пешаке.

Међутим, опслуживање незаштићених скретања на сигналисаним укрштањима и токова дуж деонице на несигналисаним укрштањима је специфично и комплексно услед утицаја конфликтног пешачког тока. Наиме, ред возила може се опслужити одједном, у форми једног плотуна, најчешће на крају опслуживања свих пешака (Слика 4.5 и Слика 4.6).

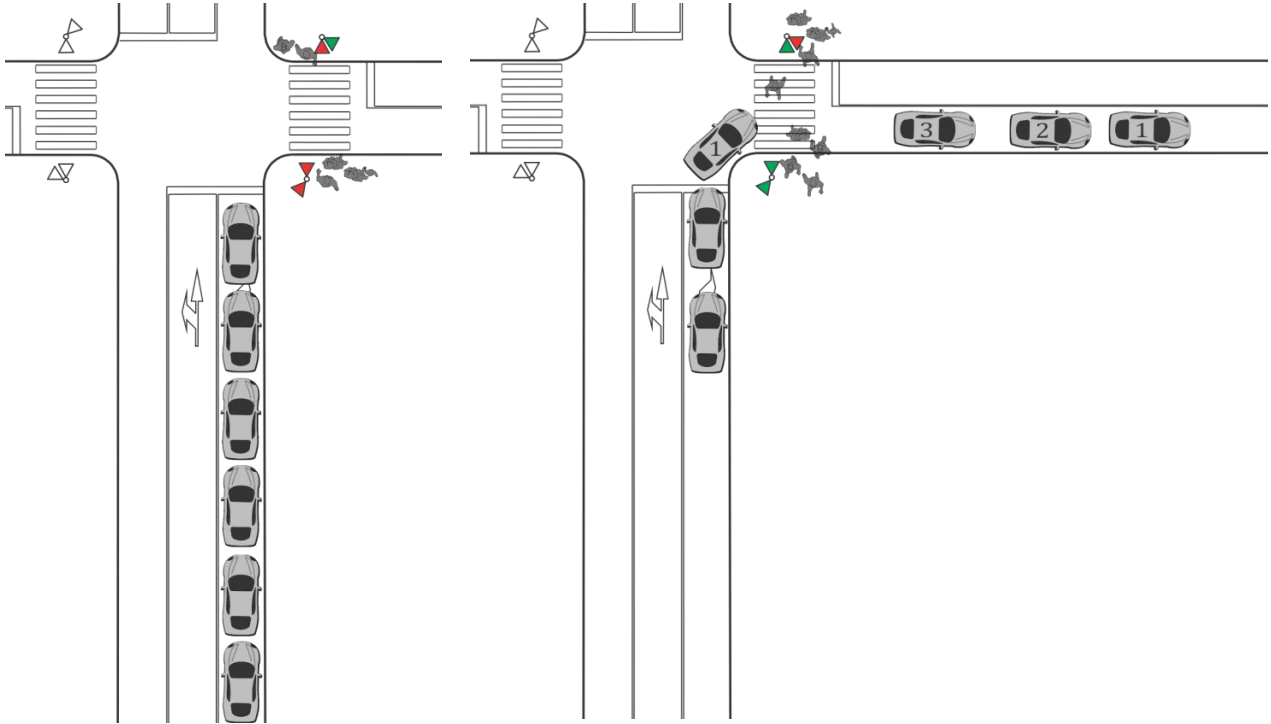


Слика 4.5. Опслуживање реда у скретању на сигналисаним укрштањима у форми једног плотуна

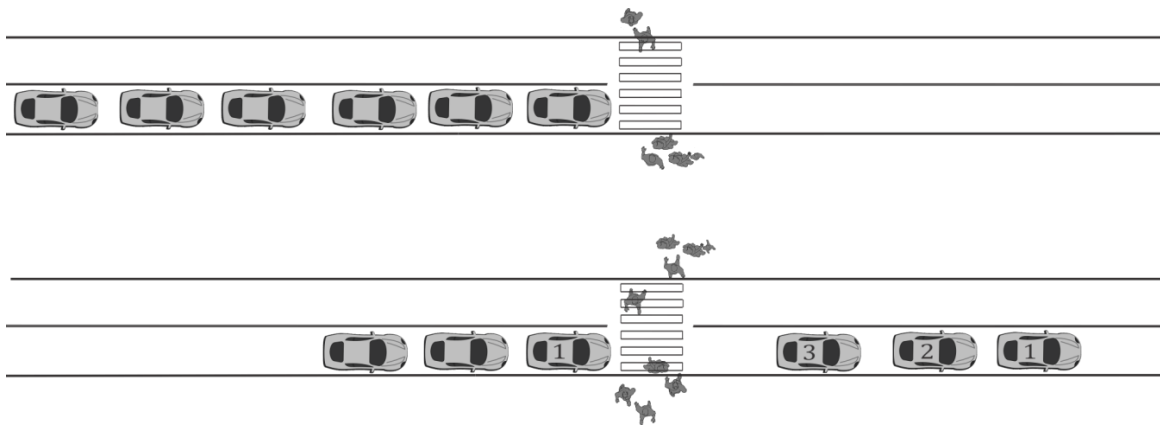


Слика 4.6. Опслуживање реда дуж деонице на несигналисаним укрштањима у форми једног плотуна

Такође, ред возила може се опслужити у форми више мањих плотуна, и то у периодима пре почетка опслуживања пешака (веома ретке ситуације), током опслуживања пешака (када се реализују интервали слеђења у пешачком току прихватљиви возачима) и на крају опслуживања пешака. Пример опслуживања возила у форми два плотуна у случају реализације једног прихватљивог интервала слеђења дат је на наредним сликама (Слика 4.7 и Слика 4.8).



Слика 4.7. Опслуживање реда у скретању на сигналисаним укрштањима у форми више плотуна



Слика 4.8. Опслуживање реда дуж деонице на несигналисаним укрштањима у форми више плотуна

У складу са описаним, плотун може бити сачињен од једног или више возила. Сваки од плотуна возила се, осим уколико се опслужи пре почетка опслуживања пешака, зауставља ради пропуштања пешака. Након заустављања, сваки плотун возила се понаша као нови саобраћајни ток, тј. покреће се остварујући одређену вредност временских губитака на старту, као и на почетку зеленог. Из тог разлога је редни број возила дефинисан у оквиру сваког појединачног плотуна, независно од реалног редног броја возила у реду који се опслужио током посматраног циклуса, односно периода (Слика 4.7 и Слика 4.8).

Даље је спроведена анализа интервала слеђења у зависности од редног броја возила у плотуну. Интервали слеђења првих возила у плотуну нису меродавни за утврђивање просечног интервала слеђења, те ова возила нису разматрана. Наиме, интервал слеђења првог возила у реду, тј. првог возила из првог плотуна, уколико се посматра у односу на почетак зеленог, обухвата време реакције, време путовања до пешачког прелаза и време блокирања од стране пешака. Интервал слеђења првог возила у сваком следећем плотуну, уколико се посматра у односу на тренутак позиционирања возила испред конфликтне зоне, обухвата време блокирања проласка од стране пешака.

Анализа интервала слеђења возила на сигналисаним укрштањима

Након спроведеног истраживања на седам локација сигналисаних укрштања формиран је укупан узорак од 1538 интервала слеђења возила, који је коришћен у даљој анализи. Дескриптивна статистика целог узорка интервала слеђења дата је у наредној табели (Табела 4.10).

Табела 4.10. Дескриптивна статистика интервала слеђења возила на сигналисаним укрштањима

t_{h_voz} [s]	
n	1538
min	0,85
max	6,35
просечна вредност	2,42
медијана	2,34
стандардно одступање	0,64
15‰	1,83
85‰	3,02

На графику испод (График 4.20) дато је поређење расподеле вредности интервала слеђења са одговарајућом нормалном расподелом ($\mu=2,42$, $\sigma=0,64$). Утврђена је просечна вредност интервала слеђења возила у скретању од 2,42 секунде (Табела 4.10), и приликом опслуживања се 60% возила следи интервалима слеђења до просечне вредности (График 4.21). Медијана од 2,34 секунде указује на најчешће реализоване вредности интервала слеђења возила у скретању, а уочава се да су минимална и максимална вредност 0,85 и 6,35 секунди, респективно. Интервали слеђења возила већи од 3,5 секунде реализују се у око 6% случајева, најчешће као последица дистракције возача (нпр. коришћење мобилног телефона) или неодлучности возача о пропуштању пешака.

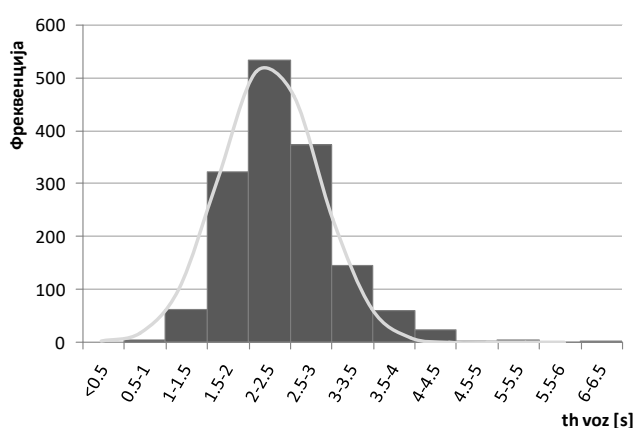


График 4.20. Фреквенција интервала слеђења возила на сигналисаним укрштањима

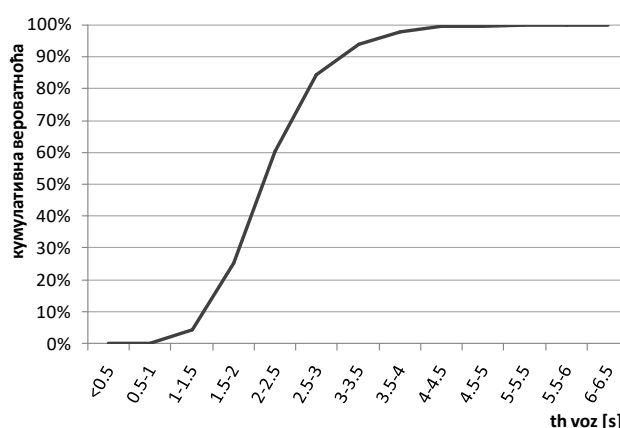


График 4.21. Расподела интервала слеђења возила на сигналисаним укрштањима

Даље су анализирани вредности интервала слеђења у зависности од редног броја возила у плотуну, у складу са претходно описаним начином посматрања плотуна (Табела 4.11, График 4.22). Возила са редним бројем 2 у плотуну имају нешто већу вредност интервала слеђења (за 0,1 сек \approx 60 возила на час), у односу на просечну вредност у укупном узорку, што је последица одређених губитака на старту. Вредности интервала слеђења возила са редним бројем од 3 до 5, па чак и до 9, су блиске просечној вредности интервала слеђења у укупном узорку, тачније у рангу су од 2,28 до 2,46 секунди. Иако је снимљен мали број возила (4%) са редним бројем од 10 до 16, уочава се да интервали слеђења имају тренд опадања (График 4.22), што се може повезати са бржим напуштањем раскрснице услед скорог завршетка зеленог сигналног појма за возила. Успостављена је линеарна зависност просечног интервала слеђења и позиције возила у плотуну ($R^2=0,651$).

Табела 4.11. Дескриптивна статистика интервала слеђења према редном броју возила у плотуну на сигналисаним укрштањима

t_{h_voz} [s]	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
n	411	317	242	176	132	93	62	43	26	14	9	7	4	1	1
min	0,85	1,19	1,00	1,17	1,09	1,22	1,33	0,88	1,41	1,64	1,83	1,86	1,92	1,80	1,98
max	5,84	6,06	4,70	6,35	4,43	5,33	5,28	4,35	3,24	3,77	3,10	2,57	2,14	1,80	1,98
просечна вредност	2,52	2,42	2,38	2,40	2,28	2,41	2,41	2,46	2,21	2,48	2,22	2,13	2,03	1,80	1,98
медијана	2,44	2,34	2,35	2,32	2,27	2,38	2,31	2,36	2,27	2,46	2,11	2,08	2,03	1,80	1,98
стандардно одступање	0,67	0,64	0,62	0,72	0,54	0,59	0,65	0,67	0,46	0,60	0,40	0,26	0,09	-	-
15%	1,93	1,80	1,75	1,73	1,81	1,92	1,81	1,95	1,79	1,80	1,93	1,90	1,95	1,80	1,98
85%	3,18	3,06	2,96	3,04	2,73	2,93	2,97	3,04	2,59	2,79	2,54	2,34	2,10	1,80	1,98

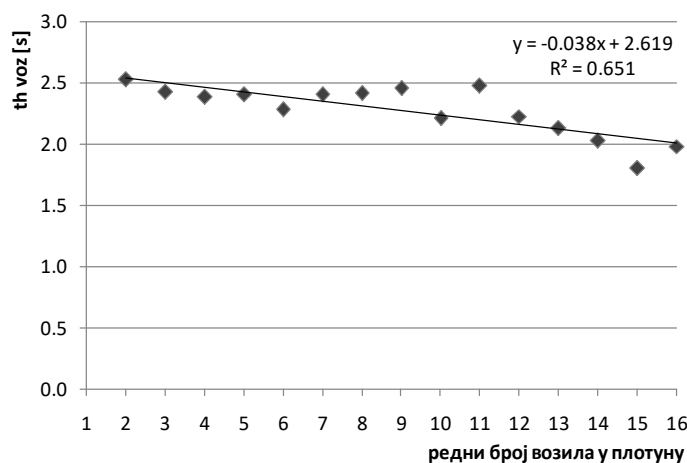


График 4.22. Зависност просечног интервала слеђења од редног броја возила у плотуну на сигналисаним укрштањима

Анализа зависности интервала слеђења од редног броја возила у плотуну

Просечан интервал слеђења возила на сигналисаним раскрсницама представља основни параметар за утврђивање вредности засићеног саобраћајног тока. Ипак, бројна истраживања указују на то да првих неколико возила на почетку зеленог остварују веће интервале слеђења, што се сматра временским губицима на старту. Из тог разлога, релевантни приручници дефинишу изостављање интервала слеђења возила са почетка зеленог сигналног појма приликом утврђивања просечне вредности. На пример, HCM7 приручник дефинише да се из анализе изостављају интервали слеђења прва четири возила из иницијалног реда формираног током црвеног (Transportation Research Board,

2022). С друге стране, канадски приручник наводи да се интервали слеђења стабилизују након шестог или седмог возила из иницијалног реда (Terly и остали, 2008). Према аустралијском приручнику, у анализи се разматрају интервали слеђења реализовани након првих 10 секунди зеленог сигналног појма (Akcelik, 1981).

У складу са тим, разматрани су интервали слеђења возила до редног броја 4, 5 или 6, и за остала возила у плотуну (Табела 4.12). Уколико се из укупног узорка искључе прва четири возила, просечан интервал слеђења је мањи за 0,06 секунди у односу на укупан узорак, што на нивоу засићеног тока износи око 37 возила на час зеленог. Искључивањем првих пет возила, разлика у интервалу слеђења је 0,07 секунди (око 48 возила на час зеленог), а искључивањем првих шест возила, разлика је 0,04 секунде (око 28 возила на час). На основу ових резултата може се закључити да се искључивањем првих неколико возила из сваког плотуна неће постићи значајна разлика у посматраном случају опслуживања незаштићених скретања.

Табела 4.12. Просечне вредности интервала слеђења према редном броју возила у плотуну на сигналисаним укрштањима

N_{2-4}	t_{h_voz2-4}	$t_{h_voz5-16}$
970 (63%)	2,46	2,36
N_{2-5}	t_{h_voz2-5}	$t_{h_voz6-16}$
1146 (75%)	2,45	2,35
N_{2-6}	t_{h_voz2-6}	$t_{h_voz7-16}$
1278 (83%)	2,43	2,38

Такође, треба имати на уму да се у случају истраживаних незаштићених скретања у овој дисертацији чак 83% возила опслужи са редним бројем 2 до 6. Ситуације са 10 и више возила су ретке и догађају се када је интензитет пешачких токова врло мали или када зелени сигнални појам за возила траје дуго. Дакле, због специфичности опслуживања незаштићених скретања, величина плотуна је најчешће од једног до неколико возила, па би искључивањем првих неколико возила била искључена већина узорка. Претходни резултати подржавају одлуку да се не искључују интервали слеђења првих неколико возила при утврђивању просечне вредности интервала слеђења возила у скретању.

Анализа интервала слеђења возила на несигналисаним укрштањима

У спроведеној анализи коришћен је укупан узорак од 1661 интервала слеђења снимљених на две локације (четири саобраћајне траке) несигналисаних укрштања. Дескриптивна статистика целог узорка интервала слеђења дата је у наредној табели (Табела 4.13).

Табела 4.13. Дескриптивна статистика интервала слеђења возила на несигналисаним укрштањима

t_{h_voz} [s]	
n	1661
min	0,45
max	7,26
просечна вредност	2,40
медијана	2,32
стандардно одступање	0,67
15‰	1,77
85‰	3,04

Утврђено је да просечна вредност интервала слеђења износи 2,40 секунди (Табела 4.13), као и да се 62% возила дуж деонице следи интервалима слеђења до просечне вредности (График 4.24). На наредном графику (График 4.23) приказана је расподела интервала слеђења, као и њено поређење са одговарајућом нормалном расподелом ($\mu=2,40$, $\sigma=0,67$). Минимална и максимална вредност интервала слеђења су 0,45 и 7,26 секунди, респективно. Ипак, интервали слеђења већи од 3,5 секунде се реализују у око 5% ситуација, углавном као последица неодлучности и дистракције возача, као и на сигналисаним укрштањима.

На основу представљених резултата може се закључити да на несигналисаним укрштањима возила наилазе у плотуну, чиме је испуњен један од критеријума за избор локације у истраживању. Наилазак возила у плотуну, односно слеђење возила малим интервалима, не пружа могућност пешацима да прихвате неки интервал слеђења, што је био још један разлог због којег у анализи нису разматрани интервали слеђења возила који су прихватљиви пешацима.

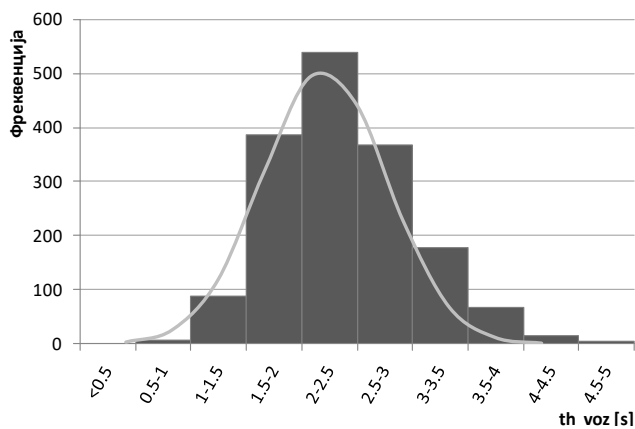


График 4.23. Фреквенција интервала слеђења возила на несигналисаним укрштањима

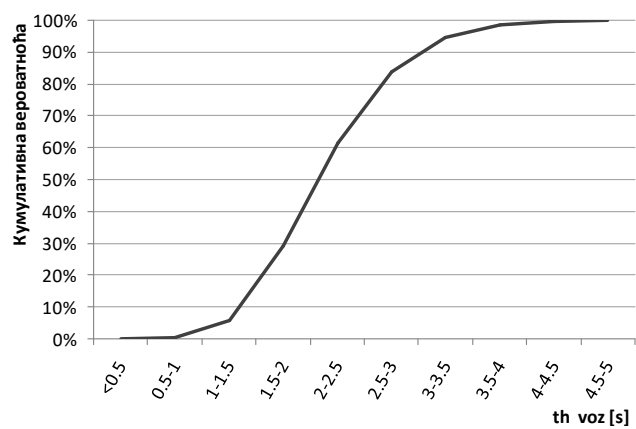


График 4.24. Расподела интервала слеђења возила на несигналисаним укрштањима

4.2.4. ПРИХВАТЉИВ ИНТЕРВАЛ СЛЕЂЕЊА

Прихватљив интервал слеђења у овој дисертацији представља интервал слеђења пешака који ће возачи прихватити како би се опслужили. Анализа прихватљивог интервала слеђења заснива се на прихваћеним и одбијеним интервалима слеђења пешака, у зависности од примењене методе. У литератури су дефинисане бројне методе утврђивања критичне вредности интервала слеђења прихватљивог неприоритетном току, а у дисертацији су примењене следеће:

- **Greenshields метода** подразумева утврђивање критичне вредности прихватљивог интервала слеђења на основу фреквенција прихваћених и одбијених интервала слеђења са кораком 0,50 секунди (Greenshields и остали, 1947). Критичан интервал слеђења, према овој методи, је онај који има једнак број прихватања и одбијања.
- **Raff метода** дефинише да је критична вредност прихватљивог интервала слеђења она вредност за коју је број прихваћених интервала слеђења мањих од ње једнак броју одбијених интервала слеђења већих од ње (Raff & Hart, 1950). Дакле, критичан интервал слеђења је онај који има једнаку вероватноћу прихватања и одбијања, што се утврђује на основу кумулативних вероватноћа одбијених и прихваћених интервала слеђења.
- **Siegloch метода** се заснива на анализи прихваћених интервала слеђења и броја возила (величине плотуна) који су тај интервал прихватили (Siegloch, 1973). Тачније, успоставља се линеарна зависност вредности прихваћеног интервала

слеђења и броја возила који тај интервал прихвате, на основу чега се даље утврђују критичан интервал слеђења и интервал слеђења возила у десном скретању, односно дуж деонице. Интервал слеђења возила t_{hvoz} представља нагиб утврђене регресионе праве, док се критичан интервал слеђења t_{krit} утврђује применом релације испод:

$$t_{krit} = t_0 + \frac{t_{hvoz}}{2} \quad (4-5)$$

Предуслов за примену Siegloch методе је постојање засићења у споредном току (десном скретању, односно току дуж деонице), што је испоштовано кроз критеријуме за избор локација.

- **Logit метода** заснива се на дефинисању модела за утврђивање вероватноће да ће возач прихватити интервал слеђења одређене дужине у конфликтном току (Cassidy, 1995). Иако у моделу могу бити уврштене и друге променљиве које утичу на одлуку о прихватању интервала слеђења, основна улазна променљива у овом моделу је вредност интервала слеђења. Резултат тако креираног модела је вероватноћа прихватања или одбијања дате вредности интервала слеђења, а критичан интервал слеђења је онај чија је вероватноћа једнака 0,50.
- **HCM** приручник дефинише да ће возачи одбити интервале слеђења мање од критичне вредности, и прихватити интервале веће или једнаке критичној вредности прихватљивог интервала слеђења (Transportation Research Board, 2022). Према овом приручнику, критична вредност прихватљивог интервала слеђења се може утврдити на основу највећег одбијеног интервала слеђења и најмањег прихваћеног интервала слеђења.

Потребно је нагласити да у анализи нису разматрани интервали слеђења пешака реализовани пре позиционирања возила испред конфликтне зоне, с обзиром да они немају утицај на понашање возача. У случају сигналисаних укрштања то подразумева изузимање интервала слеђења пешака реализованих у периоду у ком је првом возилу у реду потребно да дође до пешачког прелаза. Овај приступ утиче на величину узорка прихваћених интервала слеђења на сигналисаним укрштањима, јер постоје циклуси у којима се пешаци у потпуности опслуже пре наилаaska првог возила у скретању.

Анализа прихватљивог интервала слеђења на сигналисаним укрштањима

У спроведеној анализи прихватљивог интервала слеђења на сигналисаним укрштањима коришћен је узорак од 227 прихваћених и 1083 одбијена интервала слеђења између пешака (Табела 4.14).

Табела 4.14. Дескриптивна статистика прихваћених и одбијених интервала слеђења на сигналисаним укрштањима

	t_{h_prih} [s]	t_{h_odb} [s]
n	227	1083
min	2,12	0,00
max	37,49	8,03
просечна вредност	10,73	1,29
медијана	9,25	0,78
стандардно одступање	6,31	1,47
15‰	5,11	0,01
85‰	16,66	2,79

Утврђена просечна вредност прихваћеног интервала слеђења од 10,73 секунди указује на утицај већих вредности интервала слеђења који су прихваћени од стране плотуна возила. Наиме, максимална вредност прихваћеног интервала слеђења је 37,49 секунди, што је омогућило пролазак плотуна од 14 возила. Минимална вредност прихваћеног интервала слеђења је 2,12 секунди, али је највећи број, тачније 60% прихваћених интервала слеђења, у опсегу од 4 до 12 секунди (График 4.25).

Уколико посматрамо одбијене интервале слеђења, уочавамо да је максимална вредност одбијеног интервала слеђења 8,03 секунде (Табела 4.14), што се догодило само у једној ситуацији. Вероватноћа одбијања интервала слеђења већих од 5,00 секунди је око 3%. С друге стране, минимална вредност одбијеног интервала слеђења је 0,00 секунди и највећи број одбијених интервала слеђења (45%) има вредност до 1,00 секунде (График 4.26). Овај резултат је очекиван с обзиром на то да пешаци на сигналисаним укрштањима реализују веома мале вредности интервала слеђења, као последица паралелног кретања и мимоилажења. Опслуживање пешака на описан начин доприноси малој вероватноћи појаве прихватљивог интервала слеђења (17%). Штавише, број прихваћених интервала додатно опада са повећањем броја пешака по циклусу (График 4.27), и уочава се да је вероватноћа појаве прихватљивог интервала слеђења око 25% или мања.

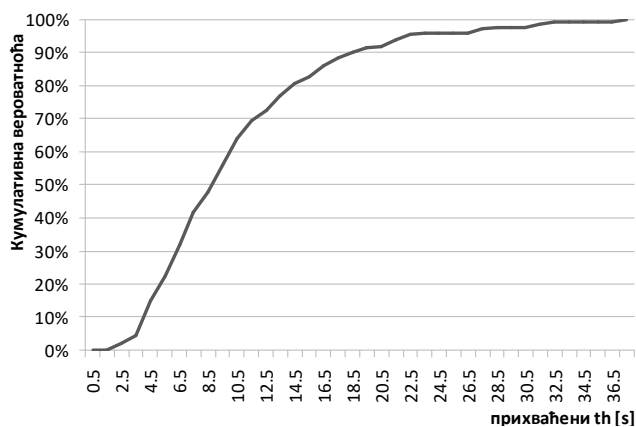


График 4.25. Распредела прихваћених интервала слеђења на сигналисаним укрштањима

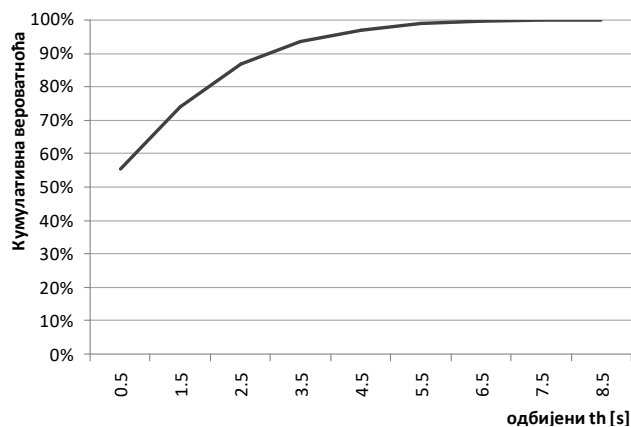


График 4.26. Распредела одбијених интервала слеђења на сигналисаним укрштањима

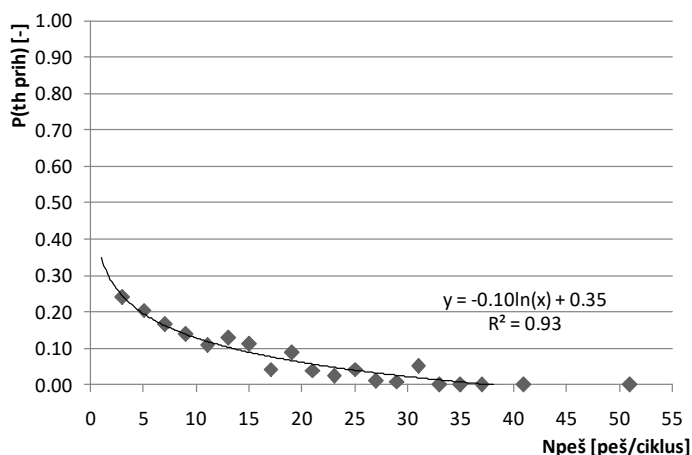


График 4.27. Вероватноћа појаве прихватљивог интервала слеђења у зависности од броја пешака по циклусу на сигналисаним укрштањима

У даљем тексту дати су резултати примене претходно наведених метода за утврђивање критичне вредности прихватљивог интервала слеђења.

Greenshields методом је, на основу фреквенција прихваћених и одбијених интервала слеђења (График 4.28), утврђено да критичан интервал слеђења припада класи од 5,50 до 6,00 секунди, која има једнак број прихватања и одбијања. У складу са тим, критична вредност прихватљивог интервала слеђења према овој методи је средина класе, тачније 5,75 секунди.

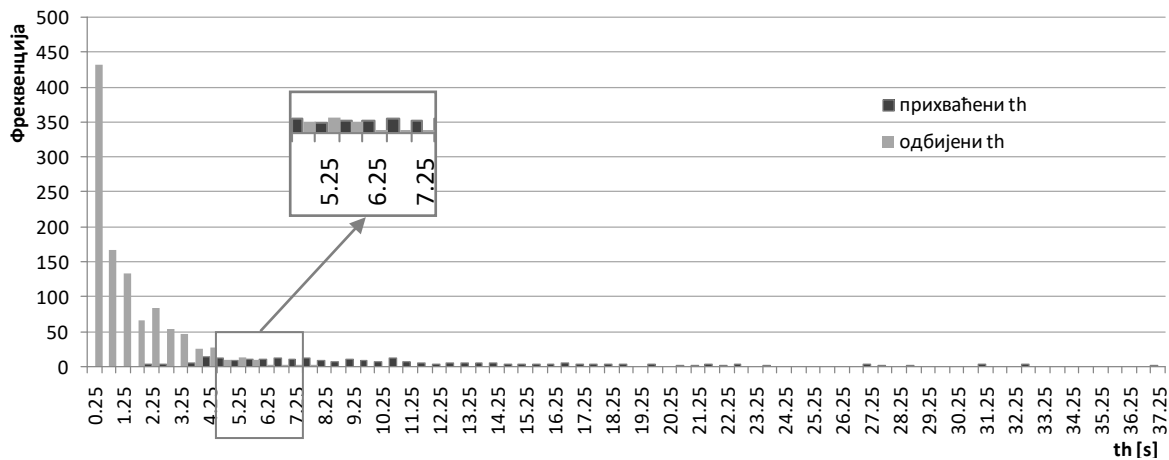


График 4.28. Greenshields метода утврђивања критичне вредности прихватљивог интервала слеђења на сигналисаним укрштањима

Raff методом утврђен је критичан интервал слеђења од 3,60 секунди када су посматрани сви прихваћени и одбијени интервали слеђења, (График 4.29). Међутим, проценат прихватања овог интервала слеђења је око 6%, те је промењен приступ у анализи одбијених интервала слеђења, тј. из анализе су искључени:

- интервали слеђења пешака који улицу прелазе паралелно ($t_{h_peš} \approx 0,00$), јер не постоји вероватноћа прихватања ових интервала слеђења,
- интервали слеђења пешака чија је вероватноћа прихватања једнака 0 ($t_{h_peš} < 2,00$ секунде).

Искључивањем $t_{h_peš} \approx 0,00$ није постигнута значајна разлика у вредности критичног интервала слеђења. Наиме, утврђена је вредност од 3,75 секунди, чија је вероватноћа прихватања и даље ниска, и износи око 7%. Искључивањем интервала слеђења мањих од 2,00 секунде, утврђен је критичан интервал слеђења од око 4,40 секунди. Вероватноћа прихватања овог интервала слеђења је око 14%. Треба имати на уму да су ови резултати последица чињенице да се пешаци углавном следе интервалима слеђења до просечне вредности од 2,42 секунде (График 4.5), који су у више од 80% случајева одбијени (График 4.26).

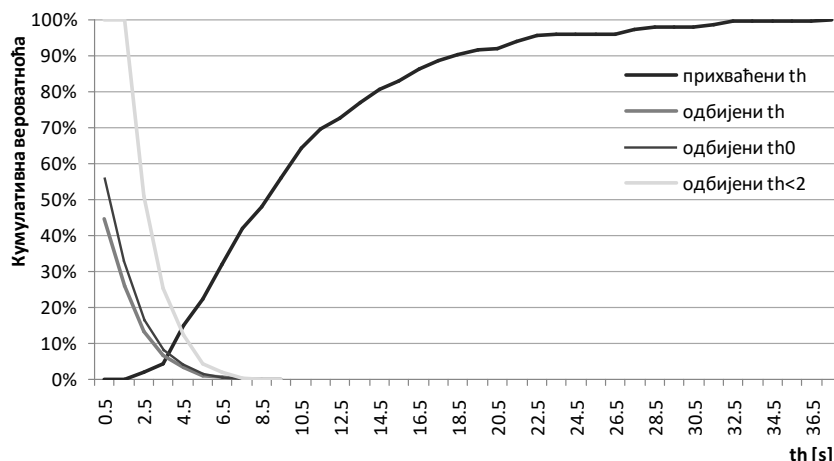


График 4.29. Raff метода утврђивања критичне вредности прихватљивог интервала слеђења на сигналисаним укрштањима

Siegloch методом је утврђено да је интервал слеђења возила у десном скретању 2,43 секунде, на основу успостављене линеарне зависности величине прихваћеног интервала слеђења и броја возила који тај интервал прихвате (График 4.30). Ова вредност је блиска просечној вредности интервала слеђења возила у скретању на нивоу целог узорка, која износи 2,42 секунде (Табела 4.10). Критичан интервал слеђења је 5,04 секунде, а утврђен је применом једначине (4-5):

$$t_{krit} = t_0 + \frac{t_{hvoz}}{2} = 3,82 + \frac{2,43}{2} = 3,82 + 1,22 = 5,04 \text{ s}$$

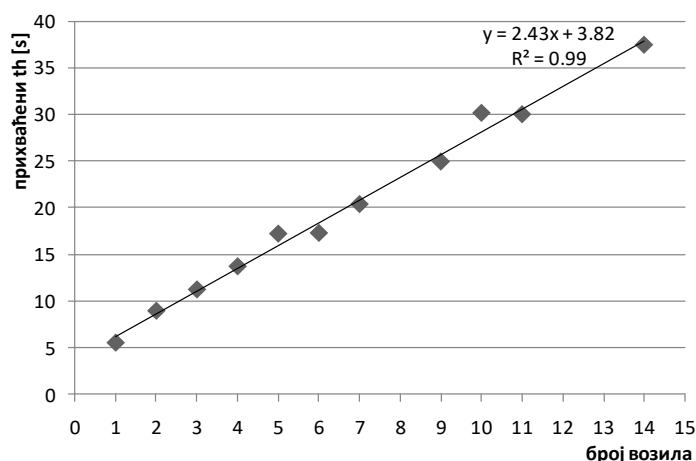
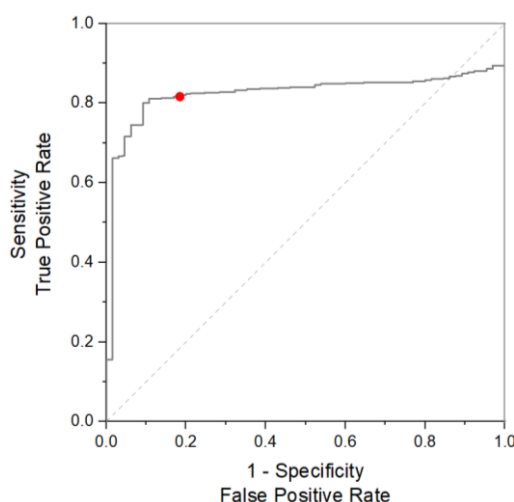


График 4.30. Siegloch метода утврђивања критичне вредности прихватљивог интервала слеђења на сигналисаним укрштањима

Примена **Logit** методе заснива се на формирању модела за утврђивање вероватноће да ће возач прихватити интервал слеђења одређене дужине у пешачком току, при чему је његова математичка формулација следећа:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1 \cdot t_{h_pes})}} = \frac{1}{1 + e^{-(-6,36 + 1,17 \cdot t_{h_pes})}} \quad (4-6)$$



Слика 4.9. ROC крива за проверу поузданости Logit модела на сигналисаним укрштањима

Модел је развијен у оквиру MS Excel-а коришћењем Solver-а и једина улазна променљива је вредност интервала слеђења. Тачност формираног модела је 95%, при чему је тачност одлуке о одбијању одређене вредности интервала слеђења 98%, а одлуке о прихватању одређене вредности 81%. Критичан интервал слеђења је утврђен заменом вредности вероватноће са 0,50 и износи 5,46 секунди. Прецизност Logit модела

при процени одбијања и прихватања одређене вредности интервала слеђења је потврђена и на основу ROC (*Receiver Operating Characteristic*) криве и вредности AUC (*Area Under the ROC Curve*) применом OriginLab 2023b софтвера (Слика 4.9). Вредност AUC је 0,8236, што указује на одлично раздвајање, тј. велику прецизност модела.

Према **НСМ приручнику**, критичан интервал слеђења налази се између најмањег прихваћеног интервала слеђења (2,12 секунди) и највећег одбијеног интервала слеђења (8,03 секунде) (Табела 4.14).

Упоредни приказ критичне вредности прихватљивог интервала слеђења показује да примена различитих метода доводи до различитих резултата (Табела 4.15). Наиме, највећа вредност утврђена је применом Greenshields методе, док најмању вредност даје Raff метода када се посматрају сви интервали слеђења, али уз веома малу вероватноћу прихватања (око 6%). Без обзира на приступ, критични интервали слеђења добијени Raff методом имају малу вероватноћу прихватања, значајно мању од 50% што се, на пример, подразумева у Logit методи. Ипак, добијене вредности прихватљивих интервала слеђења за возила у десном скретању блиске су вредностима утврђеним у ранијим истраживањима: 3,60 секунди (Trafikverket, 2014; Bang и остали, 2016), 4,00 секунде (Chen и остали, 2014) или 4,20 секунди (Bang, 1978). С друге стране, према НСМ приручнику дефинисан је распон вредности између најмањег прихваћеног и највећег одбијеног интервала слеђења.

Табела 4.15. Упоредни приказ критичне вредности прихватљивог интервала слеђења утврђених различитим методама на сигналисаним укрштањима

		t_{h_prih} [s]					
Greenshields метода	Raff метода сви $t_{h_peš}$	Raff метода $t_{h_peš} > 0$	Raff метода $t_{h_peš} > 2$ сек	Siegloch метода	Logit метода	НСМ метода	
5,75	3,60	3,75	4,40	5,04	5,46	2,12 - 8,03	

Анализа прихватљивог интервала слеђења на несигналисаним укрштањима

У спроведеном истраживању на несигналисаним укрштањима формиран је узорак од 241 прихваћеног и 617 одбијених интервала слеђења, чија је дескриптивна статистика дата у наредној табели (Табела 4.16).

Табела 4.16. Дескриптивна статистика прихваћених и одбијених интервала слеђења на несигналисаним укрштањима

	t_{h_prih} [s]	t_{h_odb} [s]
n	241	617
min	2,64	0,00
max	39,00	15,29
просечна вредност	13,93	1,62
медијана	11,62	1,13
стандардно одступање	7,63	1,80
15‰	7,21	0,01
85‰	21,70	3,54

Истраживањем је утврђено да просечна вредност прихваћеног интервала слеђења износи 13,93 секунде (Табела 4.16), што указује на утицај већих вредности интервала слеђења који су прихваћени од стране плотуна возила. На пример, максимална вредност прихваћеног интервала слеђења је 39,00 секунди, што је омогућило пролазак плотуна од 11 возила. Веће вредности прихваћених интервала слеђења последица су

реализације већих интервала слеђења пешака на несигналисаним укрштањима. Расподела вероватноћа прихваћених интервала слеђења дата је на наредном графику (График 4.31).

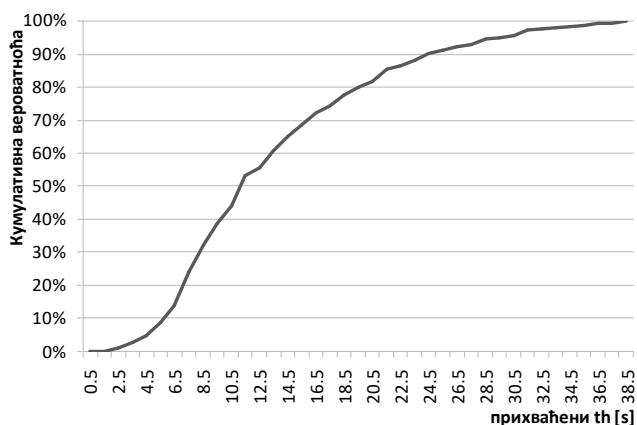


График 4.31. Расподела прихваћених интервала слеђења на несигналисаним укрштањима

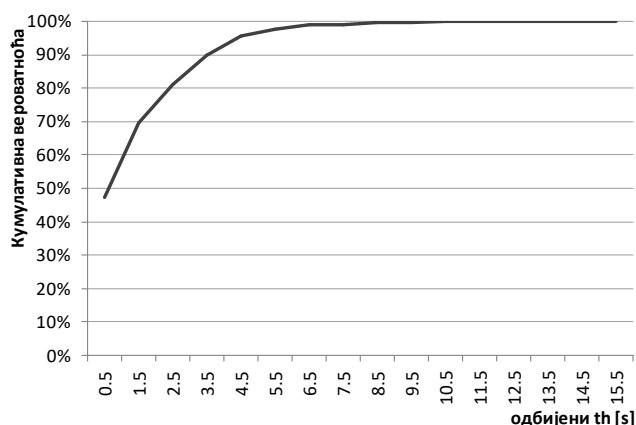


График 4.32. Расподела одбијених интервала слеђења на несигналисаним укрштањима

Што се тиче одбијених интервала слеђења, утврђено је да минимална вредност износи 0,00 секунди (Табела 4.16) и реализује се у ситуацијама истовременог преласка два или више пешака преко конфликтног пресека (паралелан прелазак, мимоилажење). Највећи број одбијених интервала слеђења (47%) има вредност до 1,00 секунде. Максимална вредност одбијеног интервала слеђења је 15,29 секунди, што се догодило само у једној ситуацији и може бити последица дистракције или неодлучности возача. Важно је напоменути да вероватноћа одбијања интервала слеђења већих од 5 секунди износи око 4,5% (График 4.32).

Утврђено је да је, у просеку, вероватноћа појаве прихватљивог интервала слеђења на несигналисаним укрштањима 28%. Ипак, вероватноћа појаве прихватљивог интервала слеђења опада са повећањем броја пешака по периоду (График 4.33), те је 50% или мања.

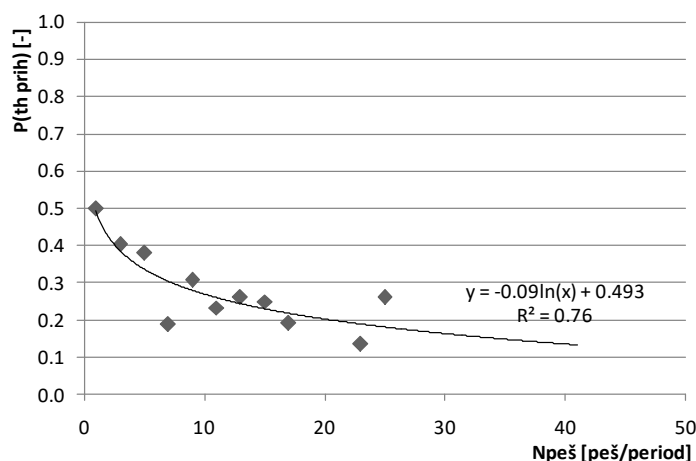


График 4.33. Вероватноћа појаве прихватљивог интервала слеђења у зависности од броја пешака по периоду на несигналисаним укрштањима

Резултати примене претходно наведених метода за утврђивање критичне вредности прихватљивог интервала слеђења дати су у даљем тексту.

Greenshields методом је утврђено да критична вредност прихватљивог интервала слеђења износи 6,25 секунди. Наиме, на основу фреквенција прихваћених и одбијених интервала слеђења (График 4.34), показало се да класа интервала слеђења од 6,00 до 6,50 секунди има једнак број прихватања и одбијања.

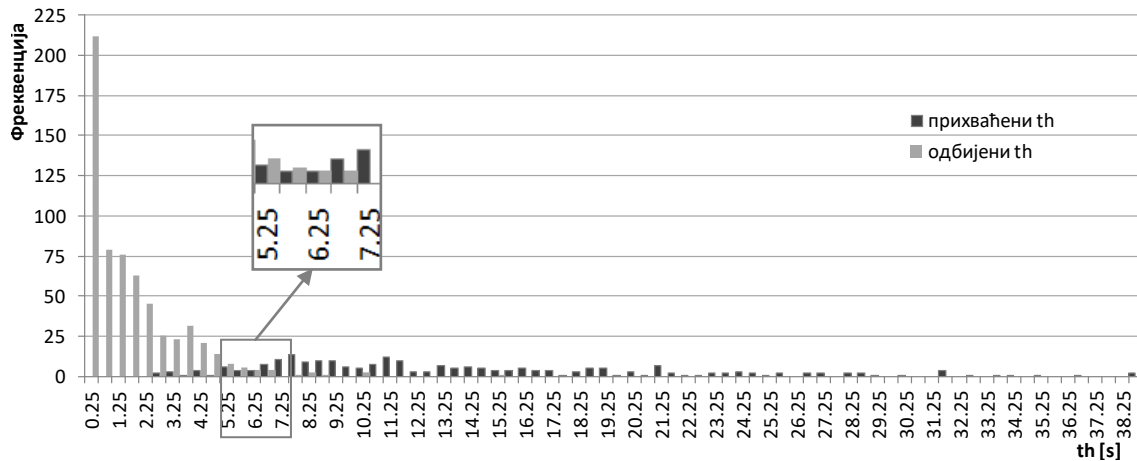


График 4.34. Greenshields метода утврђивања критичне вредности прихватљивог интервала слеђења на несигналисаним укрштањима

Применом **Raff методе**, а на основу свих прихваћених и одбијених интервала слеђења, утврђена је критична вредност прихватљивог интервала слеђења од 4,50 секунде (График 4.35). Ова вредност прихватљивог интервала слеђења има вероватноћу прихватања око 4,5%. С обзиром да је мала вероватноћа прихватања утврђене вредности критичног интервала слеђења, промењен је приступ у анализи одбијених интервала слеђења (График 4.35), те су из анализе искључени:

- интервали слеђења пешака који улицу прелазе паралелно ($t_{h_peš} \approx 0,00$), јер не постоји вероватноћа прихватања ових интервала слеђења,
- интервали слеђења пешака чија је вероватноћа прихватања једнака 0 ($t_{h_peš} < 2,00$ секунде).

Критична вредност прихватљивог интервала слеђења је 4,60 секунди када се искључе $t_{h_peš} \approx 0,00$, а вероватноћа прихватања ове вредности интервала слеђења је и даље мала (5%). Искључивањем интервала слеђења мањих од 2,00 секунде утврђен је критичан интервал слеђења од око 5,40 секунди, чија је вероватноћа прихватања око 8%. Дакле, ни на овај начин није постигнута значајна разлика у вероватноћи прихватања критичног интервала слеђења.

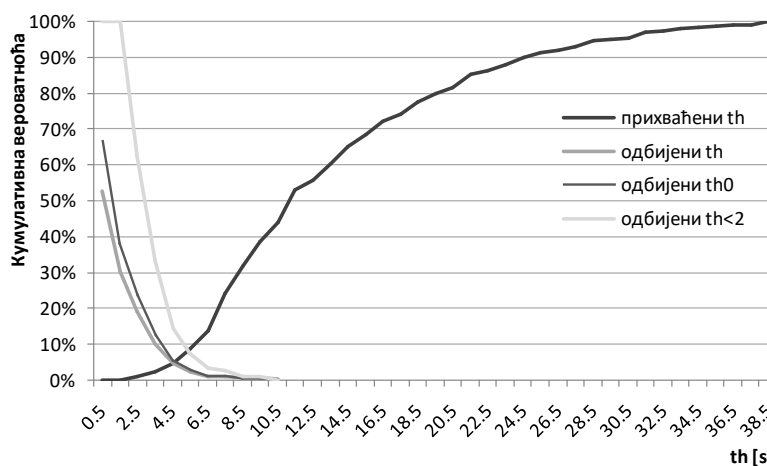


График 4.35. Raff метода утврђивања критичне вредности прихватљивог интервала слеђења на несигналисаним укрштањима

У поступку примене **Siegloch методе** успостављена је линеарна зависност вредности прихваћеног интервала слеђења и броја возила који тај интервал прихвате (График 4.36). Интервал слеђења возила дуж деонице представља нагиб успостављене

регресионе праве и износи 2,45 секунди, што је блиско просечној вредности интервала слеђења на нивоу целог узорка која износи 2,40 секунди (Табела 4.13). Критичан интервал слеђења је 5,76 секунди, а утврђен је применом релације (4-5), на следећи начин:

$$t_{krit} = t_0 + \frac{t_{hvoz}}{2} = 4,53 + \frac{2,45}{2} = 4,53 + 1,23 = 5,76 \text{ s}$$

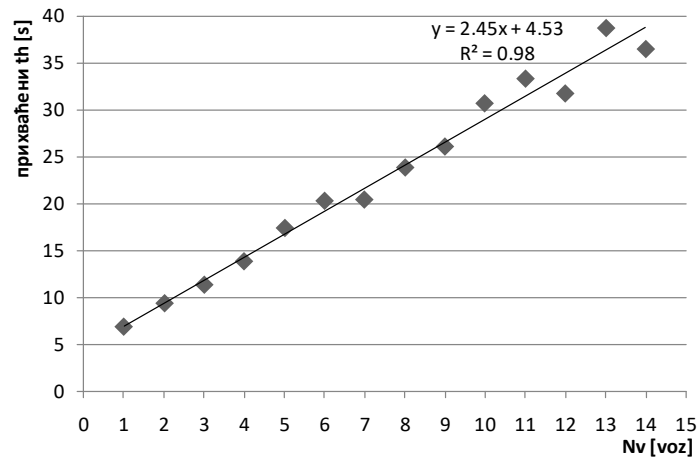
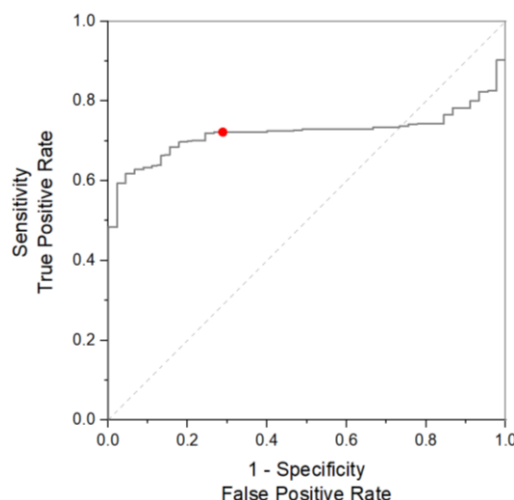


График 4.36. Siegloch метода утврђивања критичне вредности прихватљивог интервала слеђења на несигналисаним укрштањима

Logit метода се заснива на моделу за утврђивање вероватноће да ће возач прихватити интервал слеђења одређене дужине у конфликтном току, који је формиран у оквиру MS Excel-а коришћењем Solver-а. Једина улазна променљива у овом моделу је вредност интервала слеђења, а математичка формулација формираног модела је следећа:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1 \cdot t_{h_pe\check{s}})}} = \frac{1}{1 + e^{-(-4,67 + 0,98 \cdot t_{h_pe\check{s}})}} \quad (4-7)$$

Тачност развијеног модела за несигналисана укрштања је 95%, и при одлучивању о прихватању и при одлучивању о одбијању интервала слеђења. Критичан интервал слеђења је 4,77 секунди, а утврђен је заменом вредности вероватноће са 0,50. ROC крива дата је на слици испод (Слика 4.10), а вредност AUC од 0,7205 указује на прихватљиво раздвајање, тј. добру прецизност модела.



Слика 4.10. ROC крива за проверу поузданости Logit модела – несигналисана укрштања

Према **НСМ приручнику** критичан интервал слеђења је између најмањег прихваћеног интервала слеђења, тј. 2,64 секунде и највећег одбијеног интервала слеђења, тј. 15,29 секунди (Табела 4.16).

Као и на сигналисаним укрштањима, упоредни приказ критичне вредности прихватљивог интервала слеђења указује да примена различитих метода резултира различитим вредностима (Табела 4.17). Највећа вредност критичног интервала слеђења утврђена је применом Greenshields методе, док најмању вредност даје Raff метода када се посматрају сви интервали слеђења. С друге стране, према приручнику НСМ критичан интервал слеђења дефинисан је као распон вредности између најмањег прихваћеног и највећег одбијеног интервала слеђења.

Табела 4.17. Упоредни приказ критичне вредности прихватљивог интервала слеђења утврђених различитим методама на несигналисаним укрштањима

		t_{h_prih} [s]					
Greenshields метода	Raff метода сви $t_{h_peš}$	Raff метода $t_{h_peš} > 0$	Raff метода $t_{h_peš} > 2$ сек	Siegloch метода	Logit метода	НСМ метода	
6,25	4,50	4,60	5,40	5,76	4,77	2,64 - 15,29	

У овом истраживању су први пут утврђене вредности интервала слеђења пешака које су прихватљиве возачима на сигналисаним и несигналисаним укрштањима. Ове вредности налазе практичну примену у поступку калибрације микросимулационих модела, с обзиром на то да је прихватљив интервал слеђења најзначајнији улазни параметар приликом моделирања интеракције приоритетног и неприоритетног тока.

4.2.5. ВЕЛИЧИНА КОНФЛИКТНЕ ЗОНЕ

Конфликтна зона представља површину за коју се такмиче међусобно конфликтни токови (Transportation Research Board, 2022). У случају пешачких и возачких токова конфликтна зона је део раскрснице, типично на пешачком прелазу (Milazzo и остали, 1998). Величина конфликтне зоне дефинисана је ширином и дужином, а у литератури се наводи да је ширина конфликтне зоне возила и пешака једнака ефективној ширини пешачког прелаза (Milazzo и остали, 1998), без јасно дефинисане вредности те ширине. Резултати овог истраживања, представљени у поглављу „Ефективна ширина пешачког прелаза“, доказали су да је ефективна ширина пешачког прелаза знатно већа од реалне ширине прелаза и на сигналисаним и на несигналисаним укрштањима (График 4.2 и График 4.3). Такође, резултати истраживања су показали и да ефективна ширина пешачког прелаза, а самим тим и ширина конфликтне зоне, варира међу локацијама у зависности од интензитета пешачког тока и понашања пешака приликом преласка.

Литература, даље, наводи да је дужина конфликтне зоне једнака ширини саобраћајне траке (саобраћајних трака) за кретање у посматраном смеру (Milazzo и остали, 1998). Међутим, не може се априори усвојити да је дужина конфликтне зоне једнака ширини саобраћајне траке (саобраћајних трака), већ зависи од понашања возача у интеракцији са пешацима. Из тог разлога приступило се анализи понашања возача при заустављању испред првог пешака који улази у конфликтну зону и проласку иза последњег пешака који напушта конфликтну зону. Наиме, сматра се да се дужина конфликтне зоне заснива на:

- **растојању уласка у конфликтну зону** - растојању на коме се налази пешак (или први пешак из групе, уколико их је више) у односу на конфликтни пресек у тренутку када се возило заустави да би пропустило једног или више пешака (Слика 4.11). Растојање уласка у конфликтну зону утврђено је на основу брзине

пешака пре конфликтног пресека и времена које је потребно пешаку да стигне до конфликтног пресека од тренутне позиције у тренутку заустављања возила, применом релације (4-8). У овом случају разматране су само ситуације када се возило заустави пре него што пешак дође до конфликтног пресека, јер ситуације када су пешаци већ прешли конфликтни пресек пре заустављања возила нису релевантне за анализу.

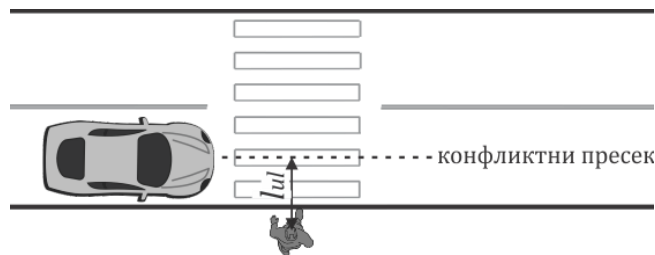
$$l_{ul} = V_{ul} \cdot t_{ul} \quad (4-8)$$

где је:

l_{ul} - растојање уласка у конфликтну зону [m],

V_{ul} - брзина уласка пешака у конфликтну зону, тј. брзина пешака пре конфликтног пресека [m/s],

t_{ul} - време уласка у конфликтну зону, тј. време потребно пешаку да стигне до конфликтног пресека од тренутне позиције у тренутку заустављања возила [s].



Слика 4.11. Дефинисање растојања уласка у конфликтну зону

- **растојању изласка из конфликтне зоне** - растојању на коме се налази пешак (или последњи пешак у групи, уколико их је више) у односу на конфликтни пресек у тренутку када возило прође иза њега (Слика 4.12). Растојање изласка из конфликтне зоне утврђено је на основу брзине пешака након конфликтног пресека и времена које је потребно пешаку да дође до те позиције у тренутку проласка возила иза њега, применом наредне релације:

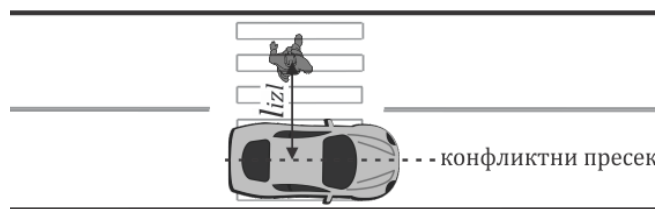
$$l_{izl} = V_{izl} \cdot t_{izl} \quad (4-9)$$

где је:

l_{izl} - растојање изласка из конфликтне зоне [m],

V_{izl} - брзина изласка пешака из конфликтне зоне, тј. брзина пешака након конфликтног пресека [m/s],

t_{izl} - време изласка из конфликтне зоне, тј. време потребно пешаку да дође до позиције у тренутку проласка возила иза њега [s].



Слика 4.12. Дефинисање растојања изласка из конфликтне зоне

Утврђивање дужине конфликтне зоне на сигналисаним укрштањима

У спроведеној анализи на сигналисаним укрштањима коришћен је узорак од 260 растојања улазака у конфликтну зону (Табела 4.18) и 464 растојања излазака из конфликтне зоне (Табела 4.19).

Утврђена минимална вредност растојања уласка у конфликтну зону је приближно 0 метара (Табела 4.18) и указује на ситуације када се возило зауставља готово у тренутку када пешак прелази конфликтни пресек. Ове ситуације су последица успоравања возача како би имали што мање временске губитке услед пропуштања пешака, што је потврђено за прво возило у реду, на основу утврђене брзине (поглавље 4.2.2). Уочава се да је максимална вредност растојања уласка у конфликтну зону преко 11 метара, али утврђено је да је вероватноћа заустављања возила када је пешак на растојању већем од 7 метара око 4%.

Табела 4.18. Дескриптивна статистика растојања уласка у конфликтну зону зависно од смера првог пешака на сигнализаним укрштањима

l_{ul} [m]	сви	растојање уласка у конфликтну зону када први пешак улази у смеру	
		1	2
n	260	120	140
min	0,02	0,02	0,04
max	11,14	8,04	11,14
просечна вредност	2,98	2,66	3,26
медијана	2,72	2,32	3,15
стандардно одступање	1,95	1,80	2,03
15‰	1,19	0,91	1,72
85‰	4,84	4,49	5,10

Резултати показују да је просечна вредност растојања уласка у конфликтну зону око 3 метра. То значи да возачи заустављају возило и док је пешак још увек на тротоару, уколико се разматрају ближи пешаци, у смеру 1, и ако је једна саобраћајна трака ширине 3 метра на излазном краку. Ипак, утврђено је да се вредности растојања уласка у конфликтну зону разликују за приближно 0,60 метара у зависности од тога да ли први пешак улази у конфликтну зону у смеру 1 или 2 (Табела 4.18). Применом Манн-Whitney теста утврђено је да је ова разлика статистички значајна ($p=0,0108 < 0,05$). Из тог разлога су дефинисане одвојене расподеле вредности растојања уласка у конфликтну зону (График 4.37).

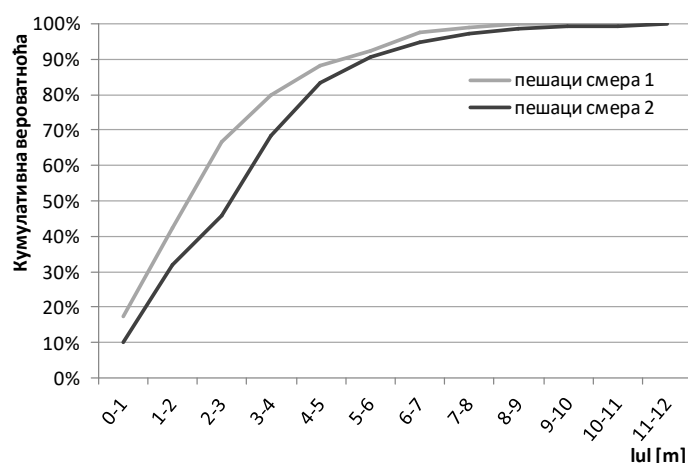


График 4.37. Расподела растојања уласка пешака у конфликтну зону зависно од смера првог пешака на сигнализаним укрштањима

Дакле, возачи пропуштају пешаке у смеру 1 када су они на мањој удаљености, и то се може објаснити чињеницом да возачи у скретању имају лошију прегледност ових пешака када се зауставе испред пешачког прелаза. Насупрот томе, возачи имају бољу

прегледност пешака у смеру 2, те се заустављају када су они на већој удаљености. Овај резултат је у складу са резултатима наведеним у литератури (Alhajyaseen и остали, 2013). Важно је напоменути да је током анализе уочено да возачи поштују саобраћајне прописе и увек пропуштају пешаке. Наиме, није забележена ниједна ситуација да је пешак морао да промени брзину или правац кретања како би избегао возило.

Што се тиче растојања изласка из конфликтне зоне на сигналисаним укрштањима, утврђена је просечна вредност од око 4,00 метра, без обзира на смер кретања пешака (Табела 4.19). Овај резултат указује да возачи пролазе иза пешака тек када они напусте пешачки прелаз, нпр. уколико посматрамо пешаке у смеру 2 на раскрсници са једном саобраћајном траком ширине 3 метра на излазном краку.

Табела 4.19. Дескриптивна статистика растојања изласка из конфликтне зоне зависно од смера првог пешака на сигналисаним укрштањима

l_{izl} [m]	сви	растојање изласка из конфликтне зоне када први пешак излази у смеру	
		1	2
n	464	202	262
min	0,18	0,56	0,18
max	12,00	12,00	9,92
просечна вредност	4,02	4,05	4,00
медијана	3,75	3,76	3,73
стандардно одступање	1,71	1,82	1,62
15‰	2,57	2,37	2,63
85‰	5,64	5,71	5,56

Минимална утврђена вредност растојања изласка износи 0,18 метара, што је последица нестрпљивости појединих возача приликом проласка. Ипак, случајеви у којима је растојање изласка мање од 1,00 метра ретко се јављају, са вероватноћом око 3% (График 4.38). С друге стране, максимално забележено растојање изласка је 12,00 метара, али вредности веће од 7 метара имају вероватноћу реализације око 5%. Ове екстремне вредности су углавном последица већих брзина пешака приликом претрчавања, као и спорије реакције возача при доношењу одлуке о проласку иза последњег пешака. Уочено је да возачи имају дуже време реакције након проласка последњег пешака услед различитих дистракција, као што су коришћење мобилног телефона, разговор са сапутником или краткотрајна непажња.

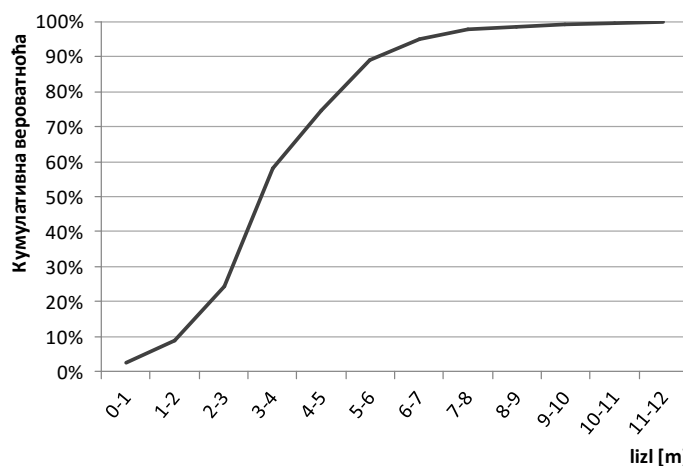


График 4.38. Расподела растојања изласка пешака из конфликтне зоне на сигналисаним укрштањима

На основу изнетих резултата, може се закључити да је конфликтна зона у просеку дужине око 7 метара, али и да се разликује у зависности од смера првог пешака који улази у конфликтну зону. Дакле, потврђена је претпоставка да се дужина конфликтне зоне не може априори изједначити са ширином саобраћајне траке (саобраћајних трака) на излазу. Ово представља значајан резултат који може имати практичну примену у дефинисању конфликтне зоне у микросимулационим моделима.

Утврђивање дужине конфликтне зоне на несигналисаним укрштањима

Спроведена анализа на несигналисаним укрштањима заснивала се на узорку од 389 растојања улаза у конфликтну зону (Табела 4.20) и 407 растојања излаза из конфликтне зоне (Табела 4.21).

Резултати показују да је просечна вредност растојања уласка у конфликтну зону 4,79 метара (Табела 4.20), што указује да се возила заустављају и када је пешак још увек на тротоару (уколико, на пример, посматрамо ближе пешаке, у смеру 1 и саобраћајну траку уз тротоар ширине 3 метра). Ипак, утврђено је да се вредности растојања уласка у конфликтну зону разликују за око 0,88 метара у зависности од тога да ли први пешак улази у конфликтну зону у смеру 1 или 2. Наиме, возачи пропуштају даље пешаке, у смеру 2, када су они на већем растојању, у поређењу са пешацима у смеру 1. Ова разлика је статистички значајна на основу резултата Mann-Whitney теста ($p=0,0026 < 0,05$), те су дефинисане одвојене расподеле растојања уласка у конфликтну зону (График 4.39).

Табела 4.20. Дескриптивна статистика растојања уласка у конфликтну зону зависно од смера првог пешака на несигналисаним укрштањима

l_{ul} [m]	сви	растојање уласка у конфликтну зону када први пешак улази у смеру	
		1	2
n	389	150	239
min	0,01	0,02	0,01
max	16,14	16,14	14,81
просечна вредност	4,79	4,25	5,13
медијана	4,66	3,94	4,98
стандардно одступање	2,98	3,10	2,86
15‰	1,59	0,97	2,92
85‰	7,69	7,20	7,88

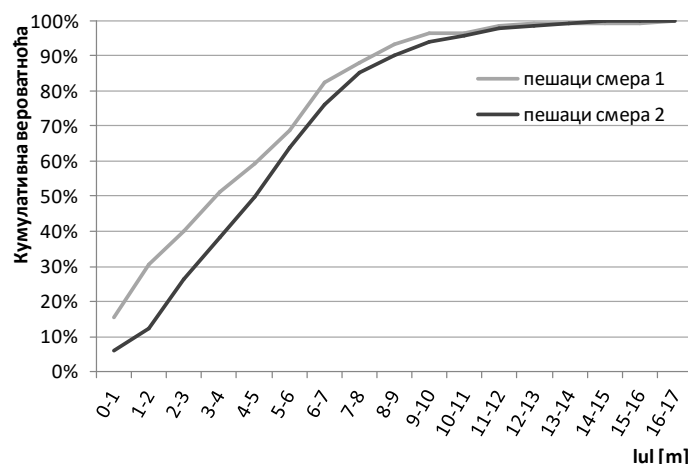


График 4.39. Расподела растојања уласка пешака у конфликтну зону зависно од смера првог пешака на несигналисаним укрштањима

Минимална вредност растојања уласка у конфликтну зону је око 0 метара, што се догађа у ситуацијама када се возило зауставља готово у тренутку преласка пешака преко конфликтног пресека. Ове ситуације су последица успоравања возача пре доласка до пешачког прелаза како би имали што мање временске губитке услед пропуштања пешака. Утврђена је максимална вредност од преко 16 метара, а вероватноћа заустављања возила када је пешак на растојању преко 10 метара је око 5%. Овако велике вредности растојања уласка су последица заустављања возила док се пешаци још увек налазе на тротоару, што је очекивано имајући у виду веће ширине улица на локацијама истраживања.

Наведени резултати су додатно потврдили да возачи поштују саобраћајне прописе и увек пропуштају пешаке чим су показали намеру или започели прелазак. Такође, није забележена ниједна ситуација да је пешак морао да промени брзину или правац кретања како би избегао возило.

Растојање изласка из конфликтне зоне, према резултатима истраживања (Табела 4.21), има просечну вредност од 4,68 метара. Овај резултат указује да се може догодити да возачи пролазе иза пешака тек када они напусте пешачки прелаз, нпр. уколико посматрамо даље пешаке, у смеру 2, и саобраћајна трака је ширине 3 метра. Просечне вредности овог растојања се статистички значајно разликују (0,57 метара) уколико последњи пешак излази из конфликтне зоне у смеру 1 или 2, на основу резултата Манн-Whitney теста ($p=0,03236 < 0,05$). Стога су дефинисане одвојене расподеле вероватноћа растојања изласка из конфликтне зоне (График 4.40).

Табела 4.21. Дескриптивна статистика растојања изласка из конфликтне зоне зависно од смера првог пешака на несигналисаним укрштањима

l_{izl} [m]	сви	растојање изласка из конфликтне зоне када први пешак излази у смеру	
		1	2
n	407	132	275
min	0,37	0,51	0,37
max	13,96	13,96	10,70
просечна вредност	4,68	5,07	4,50
медијана	4,36	4,55	4,28
стандардно одступање	1,86	2,09	1,72
15‰	3,13	3,50	2,92
85‰	6,43	6,80	6,30

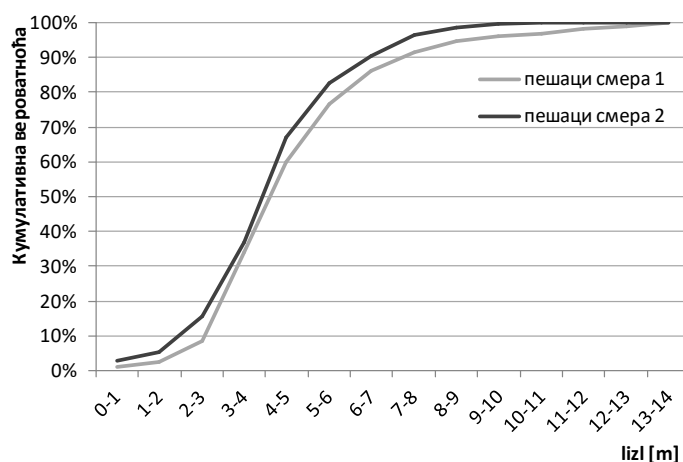


График 4.40. Распада растојања изласка пешака из конфликтне зоне зависно од смера последњег пешака на несигналисаним укрштањима

Утврђена минимална вредност растојања изласка из конфликтне зоне од 0,37 метара је последица нестрпљивости возача приликом проласка, али су ситуације са растојањима изласка мањим од 1 метра ретке (2%). Максимална вредност је скоро 14 метара, а утврђено је да вредности растојања изласка преко 7 метара имају вероватноћу реализације око 11%. Ипак, показало се да су екстремне вредности растојања изласка из конфликтне зоне последица већих брзина пешака приликом претрчавања и спорије реакције возача при доношењу одлуке о проласку иза пешака, као и на сигналисаним укрштањима.

Може се закључити да је конфликтна зона у просеку дужине око 9,5 метара, али и да се разликује у зависности од смера пешака који први улази и последњи излази из конфликтне зоне. Дакле, потврђена је претпоставка да је конфликтна зона дужа од ширине саобраћајне траке на деоници. Утврђена величина конфликтне зоне може имати значајну практичну примену у микросимулационим моделима.

4.2.6. ПОРЕЂЕЊЕ КАРАКТЕРИСТИКА ВОЗАЧКИХ ТОКОВА НА СИГНАЛИСАНИМ И НЕСИГНАЛИСАНИМ УКРШТАЊИМА

Поређење карактеристика возачких токова на сигналисаним и несигналисаним укрштањима подразумева поређење интервала слеђења пешака који су прихватљиви за возаче и поређење дужине конфликтне зоне.

Критични интервали слеђења су већи на несигналисаним него на сигналисаним укрштањима, осим вредности утврђених применом Logit методе (Табела 4.22). Добијени резултат може бити последица узорка интервала слеђења пешака, с обзиром на то да се пешаци на несигналисаним укрштањима следе већим интервалима слеђења (обрађено у поглављу 4.1.3). С друге стране, може се закључити да утврђене вредности прихватљивих интервала слеђења на несигналисаним укрштањима указују на већу обазривост возача према пешацима на овим укрштањима.

Табела 4.22. Упоредни приказ критичних вредности прихватљивих интервала слеђења на сигналисаним и несигналисаним укрштањима

t_{h_prih} [s]	Greenshields метода	Raff метода сви $t_{h_peš}$	Raff метода $t_{h_peš} > 0$	Raff метода $t_{h_peš} > 2$ сек	Siegloch метода	Logit метода	HCM метода
Сигналисана укрштања	5,75	3,60	3,75	4,40	5,04	5,46	2,12 - 8,03
Несигналисана укрштања	6,25	4,50	4,60	5,40	5,76	4,77	2,64 - 15,29

Дужина конфликтне зоне се разликује у зависности од начина регулисања саобраћаја на укрштањима, имајући у виду да је дужина конфликтне зоне на несигналисаним укрштањима 9,5 метара, док је на сигналисаним око 7 метара. Међутим, може се поставити питање да ли на дужину конфликтне зоне утиче и дужина пешачког прелаза. Зато је утврђена дужина конфликтне зоне за пешачке прелазе истих дужина на сигналисаним и несигналисаним укрштањима. Дужина пешачког прелаза на оба посматрана несигналисана укрштања је 12 метара, па су издвојени подаци са сигналисаних укрштања P2 и P5 са истом дужином пешачког прелаза. Резултати ове накнадне анализе показали су да је на сигналисаним укрштањима са дужином пешачког прелаза 12 метара дужина конфликтне зоне око 7 метара, тачније 6,9 метара. Дакле, може се поуздано закључити да већа дужина конфликтне зоне на несигналисаним укрштањима није последица веће дужине пешачког прелаза, него веће обазривости возача према пешацима.

5. ФОРМИРАЊЕ И ТЕСТИРАЊЕ МОДЕЛА

Поступак моделирања утицаја пешачких токова на саобраћајни процес на сигнализаним и несигнализаним укрштањима заснива се на подацима са седам сигнализаних укрштања (P1 – P7) и два несигнализана укрштања (П1 и П2). Обим спроведених истраживања на овим локацијама дат је у поглављу 3.5 (Табела 3.5 и Табела 3.6), а на нивоу сваког циклуса, односно периода посматрања, прикупљене су величине које су неопходне за формирање модела. Формирање модела и анализе су спроведени применом софтверског пакета OriginPro 2023b и тај поступак резултирао је развојем два модела утицаја пешачких токова на саобраћајни процес, и то:

- на сигнализаним укрштањима – **модела за утврђивање засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања**, и
- на несигнализаним укрштањима – **модела за утврђивање капацитета саобраћајне траке у зони несигнализованог пешачког прелаза на деоници**.

Након приказа поступка формирања сваког модела, дати су и резултати његовог тестирања. Тестирање модела подразумевало је поређење излазних вредности модела са реалним подацима добијеним истраживањем на четири независне локације сигнализаних укрштања (P8 – P11) и једној независној локацији несигнализаних укрштања (П3). Поред поређења са реалним подацима, модел за прорачун засићеног тока додатно је верификован и упоређивањем са релевантним постојећим моделима за прорачун засићеног тока незаштићеног десног скретања. С друге стране, у случају модела за прорачун капацитета саобраћајне траке на деоници, није спроведено поређење са другим моделима, будући да у доступној литератури не постоје методе за утврђивање капацитета саобраћајне траке које би биле упоредиве са формираним моделом.

Квалитет формираних, као и релевантних модела из литературе, оцењен је на основу вредности корена средње квадратне грешке RMSE (*Root-Mean-Square Error*) и средње апсолутне грешке MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*), које се утврђују применом наредних релација:

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{ist} - X_{mod_i})^2}{N}} \quad (5-1)$$

$$MAPE_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{ist} - X_{mod_i}}{X_{ist}} \right| \quad (5-2)$$

где је:

$RMSE_i$ - корен средње квадратне грешке за модел i [voz/h zelenog], односно [voz/h],

$MAPE_i$ - средња апсолутна грешка за модел i [%]

X_{ist} - засићен саобраћајни ток [voz/h zelenog], односно капацитет [voz/h] утврђен истраживањем,

X_{mod_i} - засићен саобраћајни ток [voz/h zelenog], односно капацитет [voz/h] утврђен моделом i ,

N - број циклуса, односно периода посматрања [-].

5.1. ФОРМИРАЊЕ МОДЕЛА ЗА ПРОРАЧУН ЗАСИЋЕНОГ САОБРАЋАЈНОГ ТОКА НЕЗАШТИЋЕНОГ СКРЕТАЊА

Формирање модела за прорачун засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања заснива се на узорку од 295 циклуса са седам локација (Табела 3.5). Предуслов за

формирање овог модела представља прикупљање следећих величина, на нивоу сваког циклуса:

- број возила у скретању који представља укупан број возила у скретању, без обзира на број плотуна у којима се возила опслужују,
- број пешака у оба смера, који представља укупан број пешака, без обзира на број плотуна у којима се пешаци опслужују; Плотун пешака представља пешаке у оба смера који се опслуже:
 - од почетка опслуживања пешака до првог прихваћеног интервала слеђења,
 - између два прихваћена интервала слеђења, и
 - од последњег прихваћеног интервала слеђења до краја опслуживања пешака,
- време окупирања конфликтне зоне од стране пешака, које се утврђује на основу тренутака уласка првог и изласка последњег пешака у плотуну у/из конфликтне зоне; у случају да се пешаци опслужују у више плотуна, време окупирања представља збир времена окупирања сваког плотуна пешака,
- време блокирања проласка возила у скретању, које се утврђује на основу тренутка заустављања возила испред конфликтне зоне (ближе ивице пешачког прелаза) и тренутка изласка возила из конфликтне зоне (даље ивице пешачког прелаза); уколико се возила опслужују у више плотуна, време блокирања представља збир времена блокирања сваког плотуна возила,
- време путовања возила од линије заустављања до пешачког прелаза, које се утврђује на основу тренутка позиционирања возила испред конфликтне зоне (ближе ивице пешачког прелаза) у односу на тренутак почетка опслуживања возила у скретању (проласка задње осовине возила преко линије заустављања),
- ефективно зелено време, које је утврђено на основу почетних и завршних тренутака на нивоу сваког циклуса, дефинисаних методологијом,
- временски период између почетака зелених сигналних појмова пешачког и возачког тока, што подразумева ранији или каснији почетак зеленог за пешаке у односу на зелено за возила.

Засићен саобраћајни ток незаштићеног скретања представља максималан број возила који може скренути лево или десно, уколико постоји константан саобраћајни захтев, а зелени сигнални појам траје један час. Дакле, засићен саобраћајни ток се посматра на часовном нивоу и неопходно је вредности утврђене на нивоу циклуса експандирати на часовни ниво. Најчешћи приступ у експандирању података на часовни ниво је на основу дужине циклуса, тј. броја циклуса у току једног часа. Међутим, полазећи од основне дефиниције засићеног тока - да зелени сигнални појам траје један час - усвојен је приступ експандирања на основу дужине ефективног зеленог времена. На овај начин индиректно се инкорпорира преостало расположиво време за опслуживање возила у скретању, а не захтева познавање експлицитних вредности параметара рада светлосних сигнала. У складу са тим, за сваки циклус су вредности експандиране на часовни ниво, применом наредних релација:

$$S_{l/d} = N_{l/d} \cdot \frac{3600}{Z_e} \quad (5-3)$$

где је:

$S_{l/d}$ - засићен саобраћајни ток незаштићеног левог или десног скретања [voz/h zelenog],

$N_{l/d}$ - број возила у левом или десном скретању на нивоу циклуса [voz/ciklus],

Z_e - ефективно зелено време [s],

$$Q_{peš} = N_{peš} \cdot \frac{3600}{Z_e} \quad (5-4)$$

где је:

$Q_{peš}$ - експандиран интензитет пешачког тока у оба смера [peš/h zelenog],

$N_{peš}$ - број пешака у оба смера на нивоу циклуса [peš/ciklus],

$$T_{okup} = t_{okup} \cdot \frac{3600}{Z_e} \quad (5-5)$$

где је:

T_{okup} - експандирано време окупирања конфликтне зоне од стране пешака на часовном нивоу [s],

t_{okup} - време окупирања конфликтне зоне од стране пешака на нивоу циклуса [s],

$$T_{put} = t_{put} \cdot \frac{3600}{Z_e} \quad (5-6)$$

где је:

T_{put} - експандирано време путовања возила од линије заустављања до конфликтног пресека на часовном нивоу [s],

t_{put} - време путовања возила од линије заустављања до конфликтног пресека на нивоу циклуса [s], које се рачуна применом релације:

$$t_{put} = \frac{L_{put}}{V_{1.voz}} = \frac{L_{lz-pp} - 5}{V_{1.voz}} \quad (5-7)$$

$$T_{blok} = t_{blok} \cdot \frac{3600}{Z_e} \quad (5-8)$$

где је:

T_{blok} - експандирано време блокирања проласка возила на часовном нивоу [s],

t_{blok} - време блокирања проласка возила током једног циклуса [s],

$$T_a = Z_a \cdot \frac{3600}{Z_e} \quad (5-9)$$

где је:

T_a - експандиран временски период између почетака зелених сигналних појмова пешачког и возачког тока на часовном нивоу [s],

Z_a - временски период између почетака зелених сигналних појмова пешачког и возачког тока [s].

На основу утврђених величина прво је анализирана зависност експандираног времена блокирања проласка возила од експандираног времена окупирања конфликтне зоне (График 5.1). Уочава се да експандирано време блокирања варира између две екстремне ситуације – експандирано време блокирања једнако нули и експандирано време блокирања једнако експандираном времену окупирања. Тачније, могућа је реализација следећих ситуација:

- експандирано време блокирања је једнако нули $T_{blok} = 0$ - подразумева ситуације када нема пешака на пешачком прелазу или се пешаци у потпуности опслуже пре доласка возила до конфликтне зоне. Овакве ситуације се најчешће догађају на раскрсницама са дужом трајекторијом путовања возила од линије заустављања до пешачког прелаза и/или са дефинисаним ранијим почетком зеленог за пешаке у односу на зелено за возачки ток.
- експандирано време блокирања је једнако експандираном времену окупирања $T_{blok} = T_{okup}$ - подразумева ситуације када пешаци започну прелазак у тренутку доласка или након доласка возила до конфликтне зоне. Овакве ситуације

најчешће се јављају на раскрсницама на којима зелено за пешаке почиње касније у односу на зелено за возачки ток.

- експандирано време блокирања је мање од експандираног времена окупирања $T_{blok} < T_{okup}$ - подразумева ситуације када је време окупирања дуже од времена путовања и ранијег започињања зеленог за пешаке, уколико је оно дефинисано.

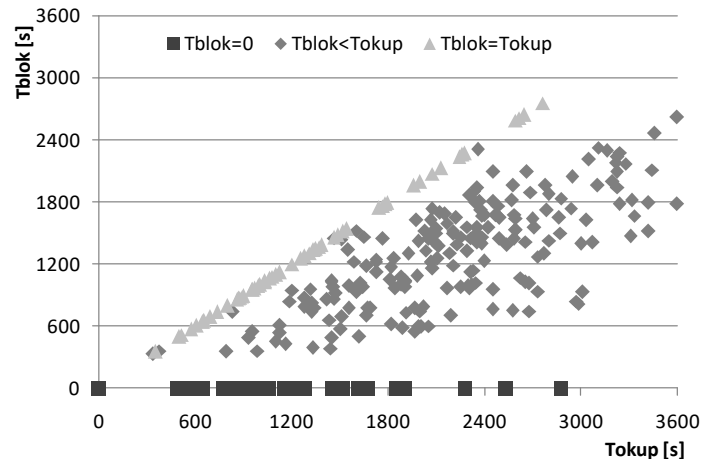


График 5.1. Зависност експандираног времена блокирања и експандираног времена окупирања на сигналисаним укрштањима

На основу описане зависности закључује се да се не може априори прихватити да је време блокирања проласка возила од стране пешака једнако времену окупирања конфликтне зоне. Тачније, време блокирања не зависи само од карактеристика пешачког тока, као што је дефинисано у немачком приручнику (FGSV, 2015), већ зависи и од начина опслуживања возачких и пешачких токова, као и од геометријских карактеристика раскрснице. У складу са тим, експандирано време блокирања интегрише више фактора који утичу на карактеристике опслуживања незаштићених скретања и може се утврдити применом наредне релације:

$$T_{blok} = T_{okup} - T_{put} - T_a \quad (5-10)$$

Експандирано време путовања првог возила од линије заустављања до конфликтне зоне T_{put} квантификује утицај геометрије раскрснице, тачније утицај дужине трајекторије од линије заустављања до конфликтне зоне. Овај утицај на опслуживање токова у скретању препознат је и у литератури (Соеуманс & Herrera, 2003).

Експандиран временски период између почетака зелених сигналних појмова пешачког и возачког тока T_a квантификује утицај начина опслуживања возачких и пешачких токова, у смислу ранијег или каснијег почетка зеленог за пешаке. Утицај ранијег почетка зеленог сигналног појма за пешачке токове документован је у литератури (Vejdirektoratet, 2010; FGSV, 2015; Vejdirektoratet, 2019), међутим претходно је објашњено да и каснији почетак зеленог за пешаке може утицати на експандирано време блокирања проласка возила.

Експандирано време окупирања конфликтне зоне од стране пешака T_{okup} у највећој мери утиче на експандирано време блокирања и квантификује утицај карактеристика пешачког тока. Утврђена је зависност експандираног времена окупирања од експандираног интензитета пешачког тока (График 5.2). За сваку класу експандираног интензитета пешачког тока, од 0 до 5300 пешака на час, са кораком од 100 пешака на час, утврђена је просечна вредност експандираног времена окупирања. Уочава се да експандирано време окупирања нагло расте до вредности експандираног интензитета

пешачког тока 1000 пешака на час, након чега је раст умеренији. Овај тренд је последица зависности интервала слеђења и броја пешака која је утврђена у поглављу 4.1.3. Наиме, интервали слеђења су већи при малим интензитетима пешачког тока, након чега опадају до минималне вредности око 0,45 секунди, што утиче на блажи раст вредности времена окупирања.

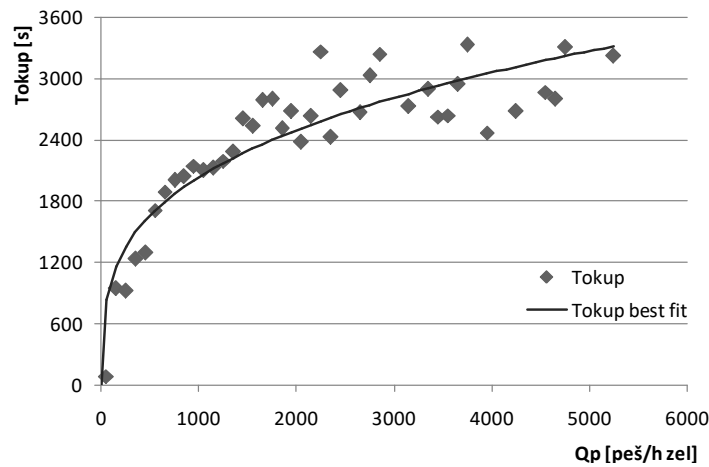


График 5.2. Зависност експандираног времена окупирања конфликтне зоне од експандираног интензитета пешачког тока на сигналисаним укрштањима

Функција која најбоље описује зависност експандираног времена окупирања од експандираног интензитета пешачког тока означена је са $T_{okup\ best\ fit}$ на претходном графику (График 5.2) и дата је наредном једначином:

$$T_{okup} = 264,5470 \cdot Q_{peš}^{0,2952} \quad (5-11)$$

где је:

$Q_{peš}$ експандирани интензитет пешачког тока у оба смера [peš/h zelenog].

Коефицијенти утврђене зависности експандираног времена окупирања конфликтне зоне од експандираног интензитета пешачког тока статистички су значајни и различити од нуле, имајући у виду резултате t -теста (Табела 5.1). Коефицијент детерминације $R^2=0,8184$ показује да утврђена степена функција (5-11) веома добро описује ову зависност. Такође, утврђена функција је значајно боља у односу на алтернативну хипотезу да је $T_{okup} = 0$, с обзиром на резултате ANOVA анализе ($p < 0,0001 < 0,05$).

Табела 5.1. Статистика добијене зависности експандираног времена окупирања конфликтне зоне и експандираног интензитета пешачког тока

Коефицијент	Вредност	Стандардно одступање	t-value	Prob> t	Зависност
a	264,5470	58,7643	4,5018	0,0001	0,9922
b	0,2952	0,0285	10,3617	0,0000	0,9922

С обзиром на то да експандирано време блокирања обухвата факторе који утичу на карактеристике опслуживања незаштићених скретања, анализирана је зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од експандираног времена блокирања проласка возила у скретању (График 5.3). За сваку класу експандираног времена блокирања од 0 до 2700 секунди, са кораком од 100 секунди, утврђена је просечна вредност засићеног саобраћајног тока. Уочава се да је вредност засићеног тока око 1630 возила на час зеленог у ситуацијама без пешака ($Q_{peš} = 0$), док у ситуацијама када има пешака, али је експандирано време блокирања једнако нули ($Q_{peš} > 0$ и $T_{blok} = 0$), вредност засићеног тока је око 1100 возила на час зеленог. Дакле,

може се закључити да присуство пешака утиче на возила у скретању, односно на вредност засићеног тока, чак иако је $T_{blok} = 0$. У складу са тим, може се усвојити да је базна вредност засићеног тока незаштићеног скретања, без утицаја пешака ($Q_{peš} = 0$) око 1630 возила на час. Треба имати на уму да ова базна вредност обухвата утицај радијуса скретања, али је узорак сувише мали да би била спроведена детаљна анализа утицаја величине радијуса на базну вредност засићеног тока. Утврђена базна вредност одговара просечној вредности засићеног тока заштићеног левог скретања утврђеној у ранијим истраживањима у локалним условима (Коцић и остали, 2018), и блиска је базној вредности датој у финском приручнику (Väylävirasto, 2022). Ипак, утврђена базна вредност засићеног тока већа је од вредности предложене домаћим препорукама (Станић, 1991).

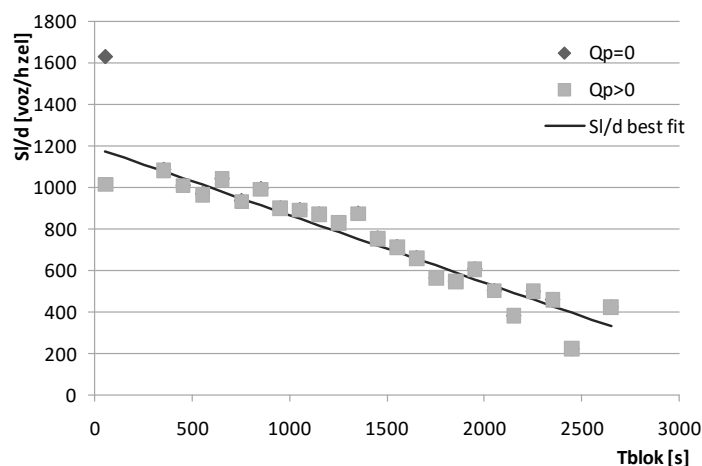


График 5.3. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од експандираног времена блокирања

За ситуације када има пешака ($Q_{peš} > 0$), утврђено је да линеарна функција најбоље описује зависност засићеног тока од експандираног времена блокирања. Утврђена функција означена је са $S_{l/d \text{ best fit}}$ на претходном графику (График 5.3) и дата је једначином:

$$S_{l/d} = 1188,6807 - 0,3221 \cdot T_{blok}, \quad \text{за } Q_{peš} > 0 \quad (5-12)$$

На основу резултата t -теста (Табела 5.2) може се закључити да је утврђени нагиб функције статистички значајно различит од нуле, што је потврђено и резултатима ANOVA анализе ($p < 0,0001 < 0,05$). Коефицијент детерминације $R^2 = 0,9111$ показује да утврђена линеарна једначина (5-12) одлично описује ову зависност.

Табела 5.2. Статистика добијене зависности засићеног тока незаштићеног скретања и експандираног времена блокирања

Коефицијент	Вредност	Стандардно одступање	t -value	Prob> t
пресек у-осе	1188,6807	33,6365	35,3390	0,0000
нагиб	-0,3221	0,0215	-15,0150	0,0000

Вредност засићеног саобраћајног тока утврђена на претходно дефинисан начин представља укупан засићен саобраћајни ток током ефективног зеленог времена. Дакле, нема потребе за утврђивањем засићеног тока који је последица опслуживања возила током заштитних времена, што је предвиђено у појединим моделима (Akcelik, 1981; Teply, 1990; Bang, 1978; Trafikverket, 2014; Bang и остали, 2016; FGSV, 2015; Vejdirektoratet, 2010; Vejdirektoratet, 2019).

5.2. ТЕСТИРАЊЕ И ПОРЕЂЕЊЕ МОДЕЛА ЗАСИЋЕНОГ САОБРАЋАЈНОГ ТОКА НЕЗАШТИЋЕНОГ СКРЕТАЊА

Након формирања модела за прорачун засићеног саобраћајног тока приступљено је његовом тестирању и поређењу са релевантним моделима. Тестирање је подразумевало да се засићен саобраћајни ток незаштићеног скретања утврди применом формираног модела и упореди са засићеним током утврђеним истраживањем на локацијама P8 – P11 (карактеристике локација дате су у Табела 3.2). Дакле, тестирање модела спроведено је на узорку од 108 циклуса са ове четири локације, а примена формираног модела подразумевала је утврђивање следећих улазних података:

- експандирани интензитет пешачког тока,
- дужина трајекторије путовања од линије заустављања до пешачког прелаза, и
- експандиран временски период између почетака зелених сигналних појмова пешачког и возачког тока.

Формирани модел је, даље, упоређен са CCG3 и HCM7 моделом, који се сматрају релевантним, с обзиром на то да је у овим моделима интензитет пешачког тока експандиран на исти начин као у формираном моделу. Међутим, ови релевантни модели су намењени за прорачун засићеног тока десног скретања, те је поређење извршено само на подацима са P8, P10 и P11. При томе су примењене релације и вредности дефинисане у поглављима 2.1.2 и 2.1.5, уз напомену да је усвојено да два возила могу проћи током заштитних времена у CCG3 моделу. Такође, на локацијама P8 и P11 где постоје две траке на излазу, утврђено је да возила углавном користе само ближу траку, што је значајно у примени HCM7 модела.

На наредном графику (График 5.4) дато је поређење вредности засићеног тока утврђених формираним моделом (означене на графику са $S_{l/d}$), са реалним вредностима засићеног тока утврђеним истраживањем на терену (означене на графику са S_{real}), као и поређење са вредностима утврђеним применом CCG3 и HCM7 модела.

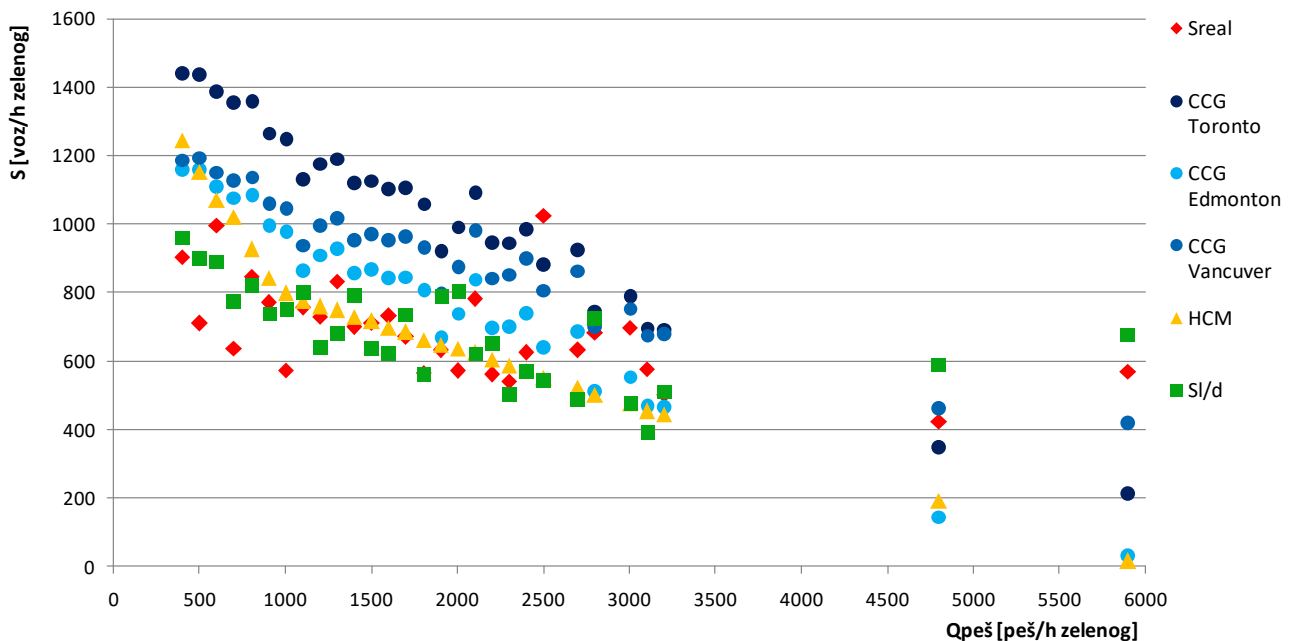


График 5.4. Поређење вредности засићеног тока утврђених формираним моделом, као и CCG3 и HCM7 моделима са реалним подацима са P8, P10 и P11

Уочава се да вредности утврђене формираним моделом прате тренд зависности реалних вредности засићеног тока од експандираног интензитета пешачког тока, за разлику од осталих модела. При томе, вредности засићеног саобраћајног тока незаштићеног десног скретања утврђене формираним моделом су блиске реалним вредностима засићеног тока, без обзира на интензитет конфликтног пешачког тока.

Даље се уочава да HCM7 и сва три CCG3 модела не прате тренд зависности реалних вредности засићеног тока од експандираног интензитета пешачког тока, што је последица дефинисане линеарне зависности ових величина у наведеним моделима. Наиме, сва три CCG3 модела прецењују реалне вредности засићеног тока за експандирани интензитет пешачког тока до 3000 пешака на час зеленог, при чему су одступања CCG Едмонтон модела најмања. За експандирани интензитет пешачког тока већи од 3000 пешака на час зеленог, уочава се да ови модели утврђују вредности засићеног тока мање од реалних.

Од свих релевантних модела, HCM7 модел утврђује вредности засићеног тока најприближније реалним вредностима, али се и код овог модела уочавају одступања. За експандирани интензитет до 1000 пешака на час зеленог, реалне вредности засићеног тока су прецењене, што указује да модел који се примењује у овом домену експандираног интензитета пешачког тока, дат релацијом (2-9), не одговара локалним условима. Насупрот томе, HCM7 модел утврђује вредности засићеног тока мање од реалних када је експандирани интензитет пешачког тока већи од 2500 пешака на час зеленог.

Квалитет формираног и релевантних модела процењен је на основу вредности RMSE и MAPE (Табела 5.3). На основу добијених резултата може се закључити да предложени модел процењује вредности засићеног тока са најмањим одступањима у односу на остале моделе. Поред тога, HCM7 модел показује мања одступања у поређењу са осталим разматраним моделима из литературе. Ипак, треба нагласити да овај модел није применљив за експандирани интензитет пешачког тока већи од 5000 пешака на час, јер у том домену утврђује негативне вредности засићеног тока.

CCG3 модели имају већа одступања од реалних вредности, при чему CCG3 Едмонтон модел најмање одступа од ова три модела (Табела 5.3). Међутим, важно је напоменути да овај канадски модел није применљив за експандирани интензитет пешачког тока већи од 4100 пешака на час зеленог, с обзиром да у том домену утврђује негативне вредности засићеног тока. Значајна одступања CCG3 модела од реалних вредности могу бити последица тога што ови модели разматрају оба дела засићеног тока десног скретања –током зеленог сигналног појма и током заштитних времена. Наиме, разматрањем оба дела засићеног тока добија се вредност која у већој мери одступа од реалних, али је само тако утврђена вредност засићеног тока упоредива са формираним моделом, који утврђује укупан засићени ток.

Табела 5.3. Вредности RMSE и MAPE по моделима

	CCG3 Toronto модел	CCG3 Edmonton модел	CCG3 Vancouver модел	HCM7 модел	Формирани модел
RMSE [voz/h zelenog]	444	244	297	211	203
MAPE [%]	63,65	32,52	42,60	25,45	25,33

Иако узорак у домену експандираног интензитета пешачког тока већем од 3000 пешака на час зеленог није довољно бројан да би се извели поуздани закључци, јасно је да

релевантни модели имају ограничења у погледу максималних вредности експандираног интензитета пешачког тока за које су применљиви. Имајући у виду трансформације урбаних транспортних система, услед којих пешачки токови постају све интензивнији, оправдано је довести у питање применљивост постојећих модела у условима великих интензитета пешачких токова. Насупрот томе, формиран модел нема ограничења у погледу максималног експандираног интензитета пешачког тока за који се може применити.

С обзиром на то да је у дисертацији модел за прорачун засићеног тока формиран као универзалан у примени и за лева и за десна скретања која имају конфликт са пешацима, резултати модела су упоређени и са реалним подацима са локације Р9. Утврђено је да формиран модел има RMSE 180 возила на час зеленог и MAPE 19,50% када се упореди са реалним подацима на овој раскрсници. На основу тога се закључује да се формиран модел може применити и у случају незаштићених левих скретања која имају конфликт искључиво са пешацима. Дакле, модел нема ограничења у примени само за десно скретање, што је случај са осталим моделима. Ипак, предлажу се даља истраживања ради тестирања модела на већем узорку.

5.3. ФОРМИРАЊЕ МОДЕЛА ЗА УТВРЂИВАЊЕ КАПАЦИТЕТА САОБРАЋАЈНЕ ТРАКЕ У ЗОНИ НЕСИГНАЛИСАНОГ ПЕШАЧКОГ ПРЕЛАЗА НА ДЕОНИЦИ

Формирање модела за прорачун капацитета саобраћајне траке у зони несигналисаног пешачког прелаза заснива се на узорку од 183 периода са две локације (Табела 3.6), при чему су на нивоу сваког периода посматрања прикупљене следеће величине:

- број возила која се крећу право дуж деонице, у једној саобраћајној траци, који представља укупан број возила, без обзира на број плотуна у којима се возила опслужују,
- број пешака у оба смера, који представља укупан број пешака, без обзира на број плотуна у којима се пешаци опслужују,
- време окупирања конфликтне зоне од стране пешака, које се утврђује на основу тренутака уласка првог и изласка последњег пешака у плотуну у/из конфликтне зоне; у случају да се пешаци опслужују у више плотуна, време окупирања представља суму времена окупирања сваког плотуна пешака,
- време блокирања проласка возила дуж деонице, које се утврђује на основу тренутака заустављања возила испред конфликтне зоне (ближе ивице пешачког прелаза) и изласка возила из конфликтне зоне (даље ивице пешачког прелаза); уколико се возила опслужују у више плотуна, време блокирања представља суму времена блокирања сваког плотуна возила,
- ефективно трајање периода, које је утврђено на основу почетних и завршних тренутака на нивоу сваког периода, дефинисаних методологијом.

Капацитет деонице представља максималан број возила који може проћи том деоницом током једног часа, и зависи од броја саобраћајних трака и примењеног начина регулисања и управљања саобраћајем (Челар и остали, 2021). С обзиром да се капацитет посматра на часовном нивоу, све вредности утврђене на нивоу периода су експандиране на часовни ниво. Вредности за сваки период су експандиране на основу броја периода те дужине у току једног часа, тј. на основу ефективног трајања периода, применом релација (5-13) - (5-16).

$$K_{pravo} = N_{pravo} \cdot \frac{3600}{T_e} \quad (5-13)$$

где је:

K_{pravo} - капацитет саобраћајне траке право на деоници [voz/h/traci],

N_{pravo} - број возила која се крећу право дуж деонице [voz/period/traci],

T_e - ефективно трајање периода [s],

$$Q_{peš} = N_{peš} \cdot \frac{3600}{T_e} \quad (5-14)$$

где је:

$Q_{peš}$ - експандиран интензитет пешачког тока у оба смера [peš/h],

$N_{peš}$ - број пешака у оба смера на нивоу периода [peš/ period],

$$T_{okup} = t_{okup} \cdot \frac{3600}{T_e} \quad (5-15)$$

где је:

T_{okup} - експандирано време окупирања конфликтне зоне од стране пешака на часовном нивоу [s],

t_{okup} - време окупирања конфликтне зоне од стране пешака на нивоу периода [s],

$$T_{blok} = t_{blok} \cdot \frac{3600}{T_e} \quad (5-16)$$

где је:

T_{blok} експандирано време блокирања проласка возила на часовном нивоу [s],

t_{blok} време блокирања проласка возила на нивоу периода [s].

Прво је анализирана зависност експандираног времена блокирања проласка возила од експандираног времена окупирања конфликтне зоне од стране пешака (График 5.5). Уочава се да је на несигналисаним укрштањима, експандирано време блокирања скоро увек једнако експандираном времену окупирања конфликтне зоне. Од овог тренда одступа неколико ситуација у којима су пешаци започели опслуживање пре доласка возила до конфликтне зоне, што је, заправо, последица успоравања возила када уоче пешаке на пешачком прелазу. У складу са тим, може се усвојити да за несигналисана укрштања важи следећа релација:

$$T_{blok} \approx T_{okup} \quad (5-17)$$

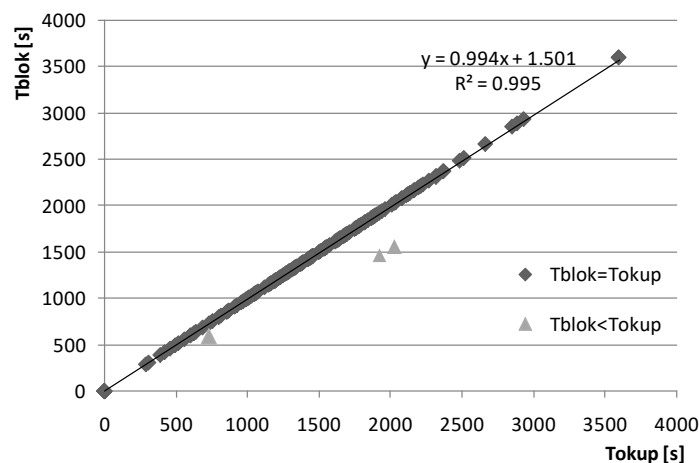


График 5.5. Зависност експандираног времена блокирања и експандираног времена окупирања на несигналисаним укрштањима

Даље је анализирана зависност експандираног времена окупирања конфликтне зоне од експандираног интензитета пешачког тока на несигналисаним укрштањима (График 5.6). Просечна вредност експандираног времена окупирања је утврђена за сваку класу експандираног интензитета пешачког тока, од 0 до 1350 пешака на час са кораком од 50 пешака на час. Очекивано, експандирано време окупирања је нула када нема пешака на пешачком прелазу ($Q_{peš} = 0$), а са порастом експандираног интензитета пешака и експандирано време окупирања нагло расте.

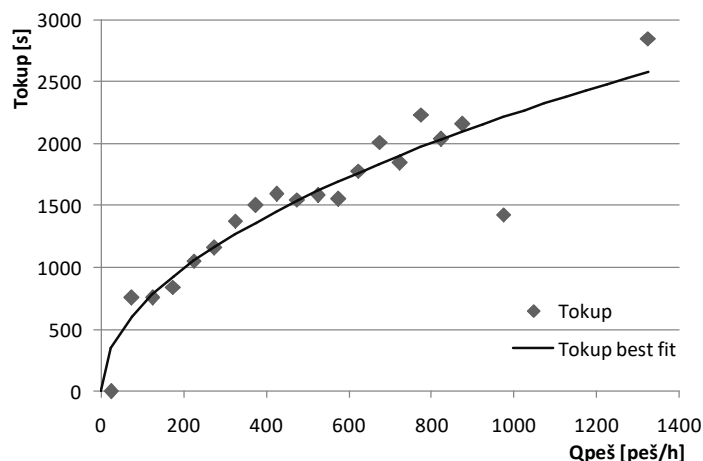


График 5.6. Зависност експандираног времена окупирања конфликтне зоне од експандираног интензитета пешачког тока на несигналисаним укрштањима

Зависност експандираног времена окупирања конфликтне зоне од експандираног интензитета пешачког тока најбоље описује степена функција која је означена са $T_{okup\ best\ fit}$ на претходном графику (График 5.6), а дата је наредном једначином:

$$T_{okup} = 67,8120 \cdot Q_{peš}^{0,5065} \quad (5-18)$$

где је:

$Q_{peš}$ - експандирани интензитет пешачког тока у оба смера [peš/h].

На основу резултата t -теста (Табела 5.4) може се закључити да су коефицијенти утврђене зависности експандираног времена окупирања и експандираног интензитета пешачког тока статистички значајни и различити од нуле. Коефицијент детерминације $R^2 = 0,8678$ показује да утврђена степена функција (5-18) веома добро описује ову зависност. Резултати $ANOVA$ анализе ($p < 0,0001 < 0,05$) указују да је утврђена функција значајно боља у односу на алтернативну хипотезу, да је $T_{okup} = 0$.

Табела 5.4. Статистика добијене зависности експандираног времена окупирања конфликтне зоне и експандираног интензитета пешачког тока на несигналисаним укрштањима

Коефицијент	Вредност	Стандардно одступање	t -value	Prob> t	Зависност
a	67,8120	26,6466	2,5449	0,0203	0,9930
b	0,5065	0,0605	8,3732	0,0000	0,9930

Следећи корак подразумева анализу зависности капацитета саобраћајне траке право на деоници и експандираног времена блокирања проласка возила (График 5.7). За сваку класу експандираног времена блокирања, од 0 до 2900 секунди са кораком од 100 секунди, утврђена је просечна вредност капацитета.

Уочава се да са порастом експандираног времена блокирања, капацитет саобраћајне траке линеарно опада (График 5.7). Такође се уочава да је вредност капацитета 1830

возила на час по траци када нема пешака на пешачком прелазу ($Q_{pe\check{s}} = 0$), као и да при малим интензитетима пешачког тока нагло опада до вредности око 1350 возила на час по траци. У складу са тим, може се усвојити да је базна вредност капацитета саобраћајне траке на деоници, без утицаја пешака, 1830 возила на час по траци. Базна вредност утврђена овим истраживањем је веома блиска резултату ранијег истраживања у Индији, где је утврђено 1838 возила на час по траци (Kadali и остали, 2015).

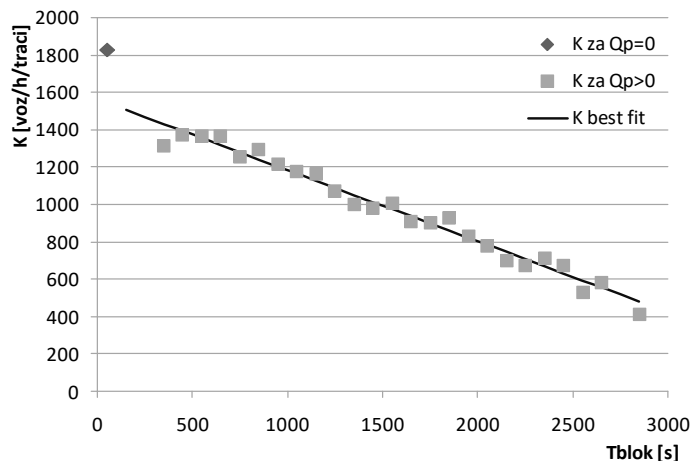


График 5.7. Зависност капацитета саобраћајне траке право на деоници од експандираног времена блокирања

За ситуације када има пешака на деоници ($Q_{pe\check{s}} > 0$), тј. када је $T_{blok} > 0$, дефинисана је линеарна зависност капацитета од експандираног времена блокирања, а функција која најбоље описује ову зависност означена је са $K_{best\ fit}$ на претходном графику (График 5.7) и дата је једначином:

$$K_{pravo} = 1563,2220 - 0,3806 \cdot T_{blok}, \quad \text{за } Q_{pe\check{s}} > 0 \quad (5-19)$$

Коефицијент детерминације $R^2 = 0,9764$ показује да утврђена линеарна једначина (5-19) одлично описује зависност капацитета саобраћајне траке од експандираног времена блокирања. Резултати t -теста (Табела 5.5) показују да је утврђени нагиб функције статистички значајно различит од нуле, што је потврђено и $ANOVA$ анализом ($p < 0,0001 < 0,05$).

Табела 5.5. Статистика добијене зависности капацитета саобраћајне траке и експандираног времена блокирања на несигналисаним укрштањима

Коефицијент	Вредност	Стандардно одступање	t -value	Prob> t
пресек у-осе	1563,2220	21,1899	73,7721	0,0000
нагиб	-0,3806	0,0124	-30,8232	0,0000

5.4. ТЕСТИРАЊЕ МОДЕЛА ЗА УТВРЂИВАЊЕ КАПАЦИТЕТА САОБРАЋАЈНЕ ТРАКЕ У ЗОНИ НЕСИГНАЛИСАНОГ ПЕШАЧКОГ ПРЕЛАЗА НА ДЕОНИЦИ

Модел за прорачун капацитета саобраћајне траке у зони несигналисаног пешачког прелазу је тестиран на узорку од 41 периода са локације ПЗ (карактеристике локације дате су у Табела 3.4). Тестирање је подразумевало поређење капацитета утврђеног формираним моделом са капацитетом утврђеним емпиријским истраживањем на овој локацији. При томе, основни улазни податак за примену формираног модела је експандирани интензитет пешачког тока који је утврђен на основу података прикупљених на истој локацији.

На наредном графику (График 5.8) приказане су вредности капацитета утврђене применом формираног модела (означене на графику са K_{model}) и реалне вредности капацитета са локације ПЗ (означене на графику са K_{real}). Уочава се да формиран модел процењује вредности капацитета веома блиске реалним. Ипак, може се приметити да модел потцењује базну вредност капацитета у односу на вредност добијену истраживањем на ПЗ, што може бити последица ограниченог узорка. Наиме, базна вредност капацитета већа од 2000 на час у подацима за формирање модела (локације П1 и П2) реализована је у мање од 30% свих базних вредности.

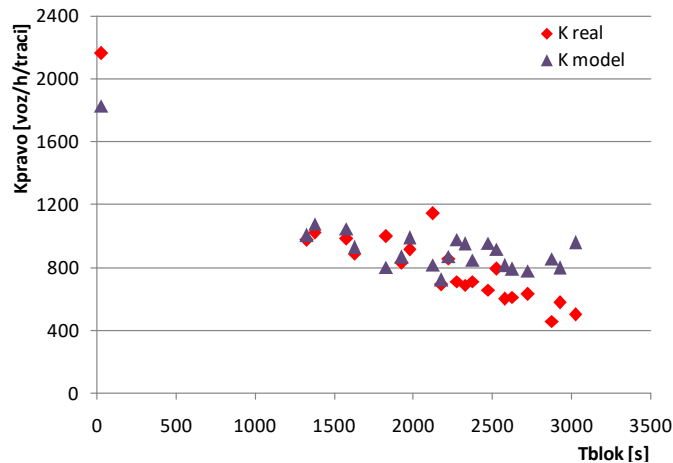


График 5.8. Поређење вредности капацитета утврђене формираним моделом са реалним подацима са ПЗ

Даље се може уочити и да, за експандирано време блокирања преко 2200 секунди, формиран модел прецењује реалне вредности капацитета. Узрок оваквог резултата је потцењивање реалних вредности експандираног времена блокирања. Међутим, реални подаци са ПЗ нису у складу са датим интензитетом пешачког тока и не одсликавају просечне ситуације, већ су последица неуобичајених понашања возача. Тачније, утврђено је да велики део узорка са временима блокирања дужим од 2200 секунди чине периоди у којима је забележено неприхватање интервала слеђења између пешака већих од 5 секунди, заустављање возача знатно пре него што пешак ступи на коловоз, као и отежано или споро кретање пешака.

Квалитет модела оцењен је на основу вредности RMSE и MAPE, које се утврђују применом релација (5-1) и (5-2). Формирани модел има RMSE од 222 возила на час и MAPE од 24,87% када се упореди са реалним подацима на локацији ПЗ. На основу тога закључује се да се формиран модел може применити за прорачун капацитета саобраћајне траке право у зони несигналисаних укрштања.

Важно је осврнути се и на формиран модел за прорачун времена блокирања, који има одступање од око 21% у односу на реалне вредности (MAPE = 20,85%). Време блокирања утврђено применом формираног модела (5-18), заправо, представља временске губитке возила услед пропуштања пешака на несигналисаном пешачком прелазу на пресеку деонице. Временски губици утврђени на овај начин могу представљати улазни податак у HCM методологији за утврђивање нивоа услуге на деоници између сигналисаних раскрсница.

На основу наведених резултата тестирања модела, уочена су одређена одступања од реалних података. У складу са тим, може се закључити да су неопходна даља истраживања како би модел био калибрисан и тестиран на већем узорку.

6. ПРЕПОРУКЕ ЗА ПРАКТИЧНУ ПРИМЕНУ

У овом поглављу приказана је поједностављена процедура за практичну примену модела за прорачун засићеног тока незаштићеног скретања, као и предлог алтернативног третмана скретања у плану фаза, са циљем смањења утицаја конфликтног пешачког тока.

6.1. ПРАКТИЧНА ПРИМЕНА МОДЕЛА ЗА ПРОРАЧУН ЗАСИЋЕНОГ ТОКА

Ради једноставније практичне примене модела, формирана је зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока на сат, који је познати параметар у поступку оптимизације, за разлику од фиктивне вредности експандираног интензитета пешачког тока на сат зеленог, која фигурише у моделу. Експандирани интензитет пешачког тока на сат зеленог је коришћен за развој модела за прорачун засићеног тока, јер инкорпорира утицај ефективног зеленог времена, а при том не захтева се експлицитно познавање параметара рада светлосних сигнала.

Графици формираних зависности су груписани према познатој геометријској карактеристици раскрснице - дужини трајекторије скретања од линије заустављања до пешачког прелаза, и дати су у прилогу (График П.1 - График П.9). Дефинисане су варијанте дужине трајекторије скретања од линије заустављања до пешачког прелаза, од 10 до 50 метара са кораком од 5 метара.

Утицај ефективног зеленог је у практичној примени модела, ипак, узет у обзир кроз удео ефективног зеленог у циклусу. У складу са тим, за вредност циклуса од 100 секунди дефинисане су вредности удела зеленог у циклусу од 0,2 до 0,5 са кораком 0,1. Важно је напоменути да се, за различите вредности удела зеленог у циклусу, разликују максималне вредности интензитета пешачког тока што је последица максималне вредности експандираног интензитета пешачког тока на сат зеленог која је утврђена истраживањем (6000 пешака на сат зеленог).

Утицај ранијег почетка зеленог за пешаке је узет у обзир дефинисањем варијанте да зелени сигнални појмови за пешачки и возачки ток почињу у истом тренутку ($Z_a = 0$), као и варијанти ранијег почетка зеленог за пешаке од 2 до 10 секунди за кораком од 2 секунде. Важно је напоменути да нису све вредности ранијег почетка зеленог за пешаке применљиве за све дужине ефективног зеленог. На пример, уколико у ефективном зеленом од 20 секунди пешаци користе 10 секунди ранијег почетка зеленог, а време путовања за дужину трајекторије од 35 метара је преко 6 секунди, зелени сигнални појам за возила траје тек неколико секунди. Та вредност је краћа од препорученог минимума од 6 секунди (Акселик, 1981). Из тог разлога, вредности ранијег почетка зеленог од 10 секунди нису приказане на графицима за дужину трајекторије 45 метара и више, и за удео ефективног зеленог у циклусу 0,2, јер нису применљиве чак ни за максималну дужину циклуса од 120 секунди.

На крају, практична примена модела захтева познавање само интензитета пешачког тока на часовном нивоу и дужине трајекторије возила у скретању од зауставне линије до пешачког прелаза. Поступак практичне примене састоји се из наредних корака:

Корак 1. Утврђивање дужине трајекторије возила у скретању на предметној раскрсници (нпр. 20 метара),

Корак 2. Одређивање одговарајуће групе графика (за дати пример График П.3),

- Корак 3.** Утврђивање интензитета пешачког тока на посматраном пешачком прелазу (нпр. 500 пешака на час),
- Корак 4.** Анализирање утицаја утврђеног интензитета пешачког тока на засићени ток при различитим уделима зеленог у циклусу и ранијег почетка зеленог за пешаке (за дати пример уочава се да је вредност засићеног тока већа са повећањем удела зеленог у циклусу и вредности ранијег почетка зеленог)
- Корак 5.** Усвајање вредности засићеног саобраћајног тока скретања за дате саобраћајне и геометријске услове,
- Корак 6.** Примена усвојене вредности засићеног саобраћајног тока у поступку оптимизације параметара рада светлосних сигнала.

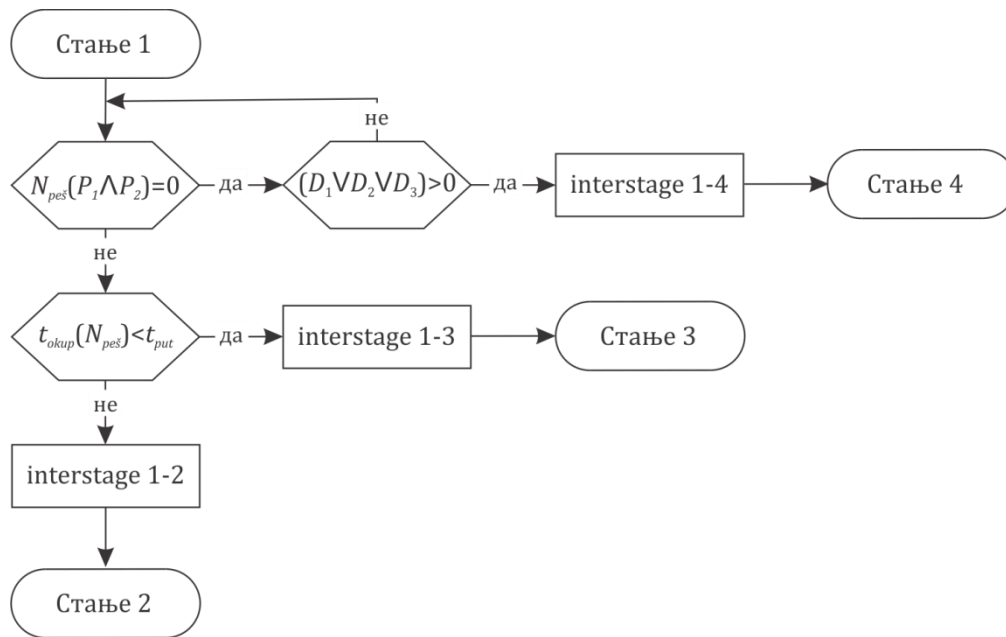
Утврђивање засићеног саобраћајног тока левог или десног скретања применом предложеног модела захтева итеративно понављање корака 4 – 6. Треба напоменути да се усвојена вредност засићеног тока реализује при одређеним вредностима удела зеленог у циклусу и ранијег почетка зеленог за пешаке, што указује на потребу дефинисања ранијег почетка зеленог за пешаке у поступку оптимизације параметара рада светлосних сигнала.

6.2. АЛТЕРНАТИВНИ ТРЕТМАН СКРЕТАЊА КОЈА ИМАЈУ КОНФЛИКТ СА ПЕШАЦИМА

Незаштићено опслуживање левог или десног скретања које има конфликт само са пешацима је уобичајена инжењерска пракса. Ипак, уколико се пешаци константно опслужују током читавог зеленог сигналног појма, возила могу скренути тек током заштитних времена. У том случају су неминовне негативне последице на ефикасност и безбедност свих саобраћајних токова на раскрсници и постоји потреба за заштићеним опслуживањем скретања. Међутим, свака промена у плану фаза која би подразумевала заштићено опслуживање токова у скретању може допринети значајним негативним ефектима за све остале токове на раскрсници, што је посебно изражено на раскрсницама које функционишу на граници капацитета.

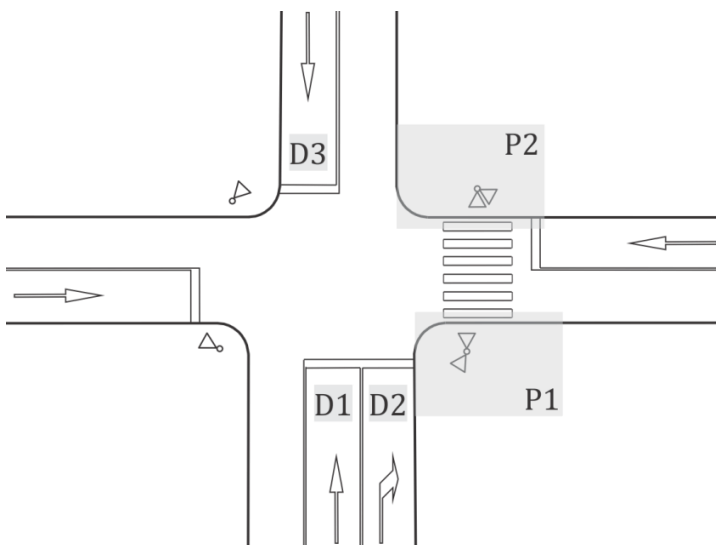
Алтернативни третман заштићеном опслуживању може бити ранији почетак зеленог сигналног појма за пешаке, јер се на тај начин пешачки ток опслужи делимично или потпуно пре него што возила у скретању започну опслуживање. У том случају постиже се већа ефикасност токова у скретању, јер се омогућава остваривање веће вредности засићеног тока. Поред тога, у литератури је потврђен позитиван утицај ранијег почетка зеленог за пешаке на безбедност пешака (Gitelman и остали, 2020). Наводи се да се уобичајено примењује од 3 до 7 секунди ранијег почетка зеленог за пешачки ток у односу на зелено за возачки ток у скретању (Reynolds и остали, 2025).

У фиксном режиму рада светлосних сигнала дефинисање ранијег почетка зеленог за пешаке подразумева да у сваком циклусу зелено за пешачки ток почиње раније у односу на зелено за возачки ток. Ипак, у ситуацијама када нема накупљених пешака или је њихов број толики да ће се опслужити пре доласка возила до пешачког прелазу, претходно описан приступ може допринети повећању временских губитака свих токова, без већих бенефита за токове у скретању. Из тог разлога, предложен је алгоритам (Слика 6.1) за пример хипотетичке раскрснице (Слика 6.2), који на основу детектованог броја накупљених пешака и утврђеног времена окупирања конфликтне зоне процењује потребу за ранијим почетком зеленог сигналног појма за пешачке токове.

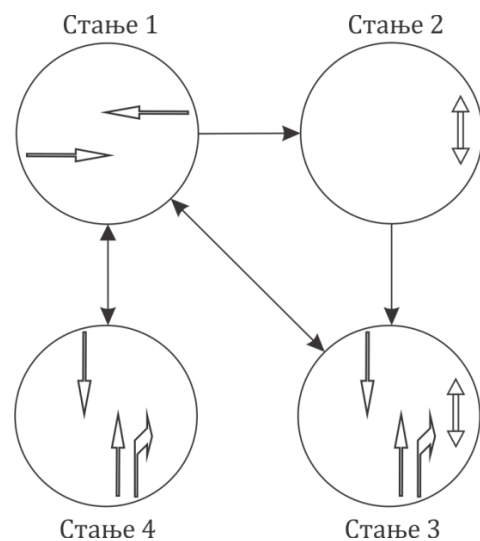


Слика 6.1. Предложени алгоритам одлучивања о ранијем почетку зеленог сигналног појма за пешачке токове

Идеја подразумева дефинисање више варијанти стања у којима се опслужује скретање које има конфликт са пешацима, што је дато дијаграмом стања (Слика 6.3). Креирано је стање 4 које започиње уколико детектори констатују да нема накупљених пешака ни са једне стране пешачког прелаза $N_{pes}(P_1 \wedge P_2) = 0$, али има возила у реду $(D_1 \vee D_2 \vee D_3) > 0$. Дакле, у овом стању се не опслужују пешачки токови, чиме се смањује изгубљено време током фазе, због краћих заштитних времена. Креирано је и стање 3 које започиње уколико је време окупирања конфликтне зоне од стране пешака краће од времена путовања возила у скретању од линије заустављања до пешачког прелаза $t_{окуп}(N_{pes}) < t_{пут}$. Ово стање подразумева стандардно незаштићено опслуживање возила у скретању, али је кроз алгоритам утврђено да ће утицај пешака бити минималан.



Слика 6.2. Хипотетичка раскрсница са потребним детекторима за примену предложеног алгоритма



Слика 6.3. Предложени дијаграм стања

Уколико су детектовани накупљени пешаци $N_{pes}(P_1 \wedge P_2) > 0$, а процењено време окупирања конфликтне зоне је дуже од времена путовања возила у скретању

$t_{okup}(N_{peš}) > t_{put}$, започиње стање 2, којим се заправо дефинише ранији почетак зеленог за пешаке. Након овог стања, увек започиње стање 3, тј. стандардно незаштићено опслуживање возила у скретању са смањеним или елиминисаним утицајем пешака. То значи да стање 2 може трајати од неколико секунди до $t_{okup} - t_{put}$. Ипак, одлука о трајању стања 2, тј. ранијем почетку зеленог за пешаке, би требало да се донесе на основу процене ефикасности токова у скретању, али разматрајући временске губитке осталих токова на раскрсници.

Важно је напоменути да се у дефинисаном алгоритму помиње време окупирања на нивоу циклуса, што се разликује од експандираног времена окупирања коришћеног приликом формирања модела. Из тог разлога, предложен је модел за утврђивање времена окупирања на нивоу циклуса, који се може применити у оквиру дефинисаног алгоритма. Зависност времена окупирања од броја пешака по циклусу, најбоље је описана степеном функцијом (6-1), која је означена са $t_{okup\ best\ fit}$ на наредном графику (График 6.1).

$$t_{okup} = 8,4150 \cdot N_{peš}^{0,3277} \quad (6-1)$$

где је:

$N_{peš}$ - број пешака по циклусу [peš/ciklus].

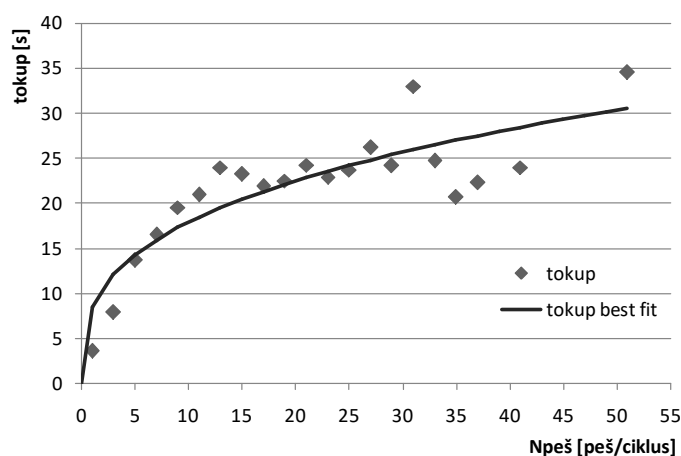


График 6.1. Зависност времена окупирања конфликтне зоне од броја пешака на нивоу циклуса на сигналисаним укрштањима

Коефицијенти утврђене зависности су статистички значајни и различити од нуле, имајући у виду резултате t -теста (Табела 6.1). Коефицијент детерминације $R^2=0,7508$ показује да утврђена степена функција (6-1) веома добро описује ову зависност. Такође, утврђена функција је значајно боља у односу на алтернативну хипотезу, да је $t_{okup} = 0$, с обзиром на резултате $ANOVA$ анализе ($p < 0,0001 < 0,05$).

Табела 6.1. Статистика добијене зависности времена окупирања конфликтне зоне и броја пешака на нивоу циклуса на сигналисаним укрштањима

Коефицијент	Вредност	Стандардно одступање	t -value	Prob> t	Зависност
a	8,4150	1,4939	5,6328	0,0000	0,9618
b	0,3277	0,0551	5,9529	0,0000	0,9618

Предложени модел за утврђивање времена окупирања на нивоу циклуса тестиран је на подацима са локација P8 – P11 и утврђена је RMSE од 4,8 секунди.

Примена претходно формираног модела за утврђивање времена блокирања захтева познавање тачног броја накупљених пешака. Међутим, пешачки тастери, као најчешће примењени пешачки детектори, немају могућност утврђивања броја накупљених пешака. Из тог разлога, дат је предлог детектора који омогућавају утврђивање броја накупљених пешака на тротоару (Табела 6.2).

Табела 6.2. Карактеристике детектора који се могу применити за утврђивање броја накупљених пешака (Lin и остали, 2019)

Врста детектора	Опис
Инфрацрвени детектори	Принцип рада заснива се на томе да се зона детекције покрива инфрацрвеним зрацима који се одбијају о објекат детекције, што се детектује детектором. На тај начин се детектује присуство пешака у зони детекције, а даљом обрадом података могуће је утврдити и број пешака. Ова врста детектора се може применити при различитим температурама и временским приликама.
Видео камере	Примена видео камера ради бројања пешака се заснива на примени софистицираних софтвера за обраду видео снимака и прикупљање неопходних података. Ипак, детектовање пешака при слабом осветљењу је непрецизно. Овај недостатак може бити отклоњен применом инфрацрвених сензора, неосетљивих на количину светлости, у комбинацији са видео камерама.
Термалне камере	Ова врста детектора подразумева комбинацију технологије инфрацрвених детектора и софтвера за обраду података са видео камера. Дакле, овим детекторима се број пешака утврђује применом софтвера који обрађују слике креиране на основу детекције одбијања инфрацрвених зрака и температуре тела. Примена ових детектора нема ограничења по питању осветљења и временских услова, те се могу применити и у потпуном мраку.

7. ЗАКЉУЧЦИ И ПРАВЦИ БУДУЋИХ ИСТРАЖИВАЊА

Укрштање пешачких и возачких токова на градским саобраћајницама представља неминовну појаву, која захтева адекватно просторно и функционално уређење места на којима се ови токови укрштају. Из тог разлога, на градским саобраћајницама и раскрсницама најчешће се изводе пешачки прелази, који су пешацима приступачнији у односу на денivelисане прелазе, као што су пешачке пасареле и подземни пролази. Функционално уређење ових укрштања подразумева дефинисање мера регулисања и управљања саобраћајним токовима. У складу са тим, укрштање пешачких и возачких токова може бити несигналисано, регулисано саобраћајним знаковима и правилима саобраћаја, или сигналисано, регулисано светлосним сигналимa. Како би регулисање и управљање саобраћајем омогућило ефикасно и безбедно опслуживање пешачких и возачких токова, неопходно је познавати њихове карактеристике, као и утицај пешачких токова на возачке.

На сигналисаним укрштањима ефикасно опслуживање возачких и пешачких токова ослања се на управљање саобраћајем применом светлосних сигнала. У поступку оптимизације параметара рада светлосних сигнала основна улазна величина је засићен саобраћајни ток, те је прецизно утврђивање његове вредности круцијалан корак у поступку оптимизације. Имајући у виду да се десна и лева скретања која имају конфликт искључиво са пешацима на сигналисаним раскрсницама углавном опслужују незаштићено, неопходно је квантификовати утицај пешачких токова на вредност засићеног тока.

У оквиру дисертације формиран је **модел за прорачун засићеног тока незаштићеног скретања које има конфликт са пешацима** на основу резултата експерименталних истраживања. Формирани модел представља зависност засићеног тока од експандираног времена блокирања проласка возила у скретању, које интегрише утицај свих идентификованих фактора на вредност засићеног саобраћајног тока. Основни улазни параметар у моделу јесте експандирани интензитет пешачког тока којим је исказан утицај карактеристика конфликтног пешачког тока, а индиректно и утицај параметара рада светлосних сигнала, на вредност засићеног тока. Такође, улазни параметар у моделу је и вредност ранијег или каснијег почетка зеленог за пешаке, којим је исказан утицај начина опслуживања предметних токова на вредност засићеног тока незаштићеног скретања. Још један улазни параметар у моделу је растојање путовања првог возила у реду од линије заустављања до пешачког прелаза, а њиме је исказан утицај геометрије раскрснице на вредност засићеног тока. Формирани модел има висок коефицијент детерминације $R^2 = 0,9111$, а верификацијом на реалним подацима утврђено је најмање одступање у односу на постојеће моделе који на исти начин третирају експандирани интензитет пешачког тока. У складу са изнетим, потврђена је прва хипотеза дисертације - да је могуће квантификовати утицаје карактеристика пешачких токова, начина опслуживања предметних токова и геометрије раскрснице на засићен саобраћајни ток незаштићеног скретања.

Систематизација постојећих модела за прорачун засићеног тока незаштићеног скретања показује да је ова проблематика била предмет бројних истраживања, што је резултирало формирањем великог броја модела. Утицај пешачких токова препознат је у свим истраживањима, међутим, у пионирским моделима тај утицај није био квантификован. Временом, интензитет пешачког тока постао је основна улазна величина у моделима за прорачун засићеног тока, иако се разматрају и друге променљиве, попут параметара рада светлосних сигнала, који у тренутку прорачуна

засићеног тока нису познати. То представља један од разлога због којих је примена релевантних модела у инжењерској пракси отежана.

Спроведена анализа постојећих модела и њихово поређење са формираним моделом указали су на додатне недостатке примене релевантних модела у локалним условима, што представља један од научних доприноса ове дисертације. Наиме, аналитички модели који се примењују у инжењерској пракси показали су ограничење у примени за вредности експандираних интензитета пешачких токова веће од 4000 или 5000 пешака на час зеленог, зависно од модела. Из тог разлога, доводи се у питање њихова применљивост у условима великих интензитета пешачких токова, који постају све заступљенији у градским подручјима услед фаворизовања пешачења као здравог и одрживог начина кретања. С друге стране, формирани модел **нема ограничење примене** у погледу максималног експандираног интензитета пешачког тока.

Посебно је значајно истаћи да су модели за прорачун засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања који се најчешће примењују у инжењерској пракси намењени искључиво за десна скретања. Стога они нису применљиви при утврђивању засићеног тока незаштићеног левог скретања које има конфликт са пешацима, будући да лева и десна скретања имају различите карактеристике опслуживања. Насупрот томе, формирани модел за прорачун засићеног тока је универзалан и **применљив за лева и десна скретања**, што је потврђено тестирањем на реалним подацима са три локације са десним скретањем и једне локације са левим скретањем. Дакле, потврђена је и друга хипотеза дисертације - да је могуће формирати универзалан модел за утврђивање засићеног саобраћајног тока незаштићеног левог и десног скретања.

Поред тога што формирани модел за прорачун засићеног тока представља научни допринос дисертације, неопходно је осврнути се на његову практичну примену у инжењерској пракси, посебно у поступку оптимизације. У циљу ефикасније практичне примене модела, дата је поједностављена процедура за примену која, као улазне податке, захтева само дужину трајекторије скретања и интензитет пешачког тока, који је директно мерљив, за разлику од фиктивне вредности експандираног интензитета. У том контексту, дефинисан је сет зависности засићеног тока од интензитета пешачког тока, за различите геометријске карактеристике раскрснице. На основу формираних графичких приказа, инжењери могу анализирати утицај пешачког тока задатог интензитета на вредност засићеног тока на посматраној раскрсници, при различитим параметарима рада сигнала и различитим вредностима ранијег почетка зеленог за пешаке. Осим утврђивања вредности засићеног тока, предложени поступак омогућава доношење одлуке о граничној вредности удела зеленог у циклусу, као и о потреби за ранијим почетком зеленог за пешаке при датим саобраћајним и геометријским карактеристикама.

Допринос дисертације огледа се и у предлогу **алтернативног третмана скретања које има конфликт са пешацима**, имајући у виду негативне последице заштићеног опслуживања скретања по остале токове на раскрсници. Алтернативни третман се заснива на процени утицаја тренутног броја накупљених пешака на конфликтном пешачком прелазу на ефикасност опслуживања тока у скретању. У ту сврху, формиран је алгоритам за доношење одлуке о примени ранијег почетка зеленог за пешаке у реалном времену. Овај алгоритам одређује време окупирања конфликтне зоне на нивоу циклуса применом модела формираног за ту сврху у оквиру дисертације, и упоређује га са временом потребним да прво возило у реду стигне од линије заустављања до конфликтног пешачког прелаза. На основу дефинисане логике, алгоритам доноси одлуку да ли је оправдано применити заштићено опслуживање скретања када нема

пешака, како би се смањило изгубљено време током циклуса, незаштићено опслуживање када је број пешака толики да ће њихов утицај бити занемарљив, или ранији почетак зеленог за пешаке, како би њихов утицај био смањен или елиминисан. Ипак, препоручује се да се коначна одлука о начину опслуживања скретања донесе на основу свеобухватне анализе бенефита свих токова на раскрсници.

На несигналисаним укрштањима, ефикасност опслуживања неприоритетних возачких токова заснива се на познавању утицаја пешачких токова на капацитет деонице. Међутим, систематизацијом досадашњих истраживања утврђено је да се, упркос евидентном утицају пешачког тока, овај аспект углавном не разматра на адекватан начин, те да постоји недостатак процедура за квантификовање утицаја пешачког тока на возачке токове у зони несигналисаних пешачких прелаза.

Спроведено експериментално истраживање резултирало је формирањем **модела за прорачун капацитета саобраћајне траке на деоници градске саобраћајнице**, који је показао висок коефицијент детерминације $R^2 = 0,9764$. Успостављена је зависност капацитета од експандираног времена окупирања конфликтне зоне, које квантификује утицај експандираног интензитета пешачког тока. Формирани модел је верификован на основу реалних података са једне локације, а добијени резултати потврђују трећу хипотезу дисертације - да је могуће квантификовати и моделирати утицај пешачког тока на возачке токове у зони несигнализованог пешачког прелаза на деоници.

Формирани модел може се применити у инжењерској пракси при прорачуну капацитета саобраћајне траке у зони несигнализованог пешачког прелаза на деоници. Осим тога, **моделом за прорачун временских губитака**, који представља саставни део наведеног модела, могу се утврдити временски губици који се затим могу користити као улазни параметар у процедури HCM7 за утврђивање нивоа услуге на деоници.

Утврђивање карактеристика пешачких и возачких токова у њиховој међусобној интеракцији представља један од специфичних научних циљева дисертације. **Карактеристике пешачких и возачких токова** на сигналисаним и несигналисаним укрштањима представљају значајан допринос дисертације имајући у виду њихову улогу у ефикасном и безбедном опслуживању пешака, а исказане су кроз дефинисане параметре:

- карактеристике пешачких токова:
 - **ефективна ширина пешачког прелаза на сигналисаним и несигналисаним укрштањима**
- **време реакције пешака на почетак зеленог за пешаке и 15. перцентил брзине пешака на сигналисаним укрштањима**

Утврђене вредности ових параметара имају посебан значај, имајући у виду да фигуришу у прорачуну минималних зелених и заштитних времена, а утврђено је да се разликују од општеприхваћених вредности. Иако литература указује да на брзину и време реакције пешака утичу бројни фактори, није практично разматрати све те утицајне факторе у практичној примени. Истраживање, међутим, указује да је у зонама са доминантним учешћем специфичних група

пешака (деца, старији, са тешкоћама у кретању) неопходно применити одговарајућу брзину и време реакције, како би се пешаци могли безбедно опслужити. Успостављене расподеле и утврђене вредности ових параметара налазе примену у поступку оптимизације параметара рада светлосних сигнала или калибрацији микросимулационих модела;

- **временски губици пешака на несигналисаним укрштањима**
Добијени резултати временских губитака представљају важан улазни параметар приликом утврђивања нивоа услуге пешачких токова на несигналисаним пешачким прелазима;
- карактеристике возачких токова:
 - **брзина првог возила у реду на сигналисаним укрштањима**
Утврђене вредности брзине првог возила у реду проналазе примену у формираном моделу приликом прорачуна времена путовања од зауставне линије до пешачког прелаза. Поред тога, резултати показују и то да возачи прилагођавају своју брзину када прилазе пешачком прелазу уколико су на њему присутни пешаци, што недвосмислено доказује утицај пешачких токова на возачке.
 - **интервали слеђења пешака који су прихватљиви возачима на сигналисаним и несигналисаним укрштањима**
Овај параметар је кључан приликом дефинисања конфликтне зоне у микросимулационим моделима. Утврђене критичне вредности прихватљивих интервала слеђења представљају значајан резултат овог истраживања, с обзиром на то да у литератури до сада нису анализирани интервали слеђења између пешака који су прихватљиви возачима;
 - **дужина конфликтне зоне на сигналисаним и несигналисаним укрштањима**
Утврђене дужине конфликтне зоне значајно одступају од вредности наведених у литератури, тачније, дужине утврђене у овом истраживању су веће. Како је овај параметар веома значајан приликом дефинисања конфликтне зоне у микросимулационим моделима, примена недовољно прецизних вредности дужине конфликтне зоне допринела би неадекватној процени утицаја пешака.

Резултати истраживања карактеристика возачких токова на сигналисаним и несигналисаним укрштањима **јасно указују на изражен утицај пешака на понашање возача**. Пре свега, утицај пешака огледа се у мањој вредности засићеног тока и капацитета услед реализације већих интервала слеђења. Осим тога, утицај пешака одражава се и кроз измену параметара опслуживања возачких токова у присуству пешака. Добијени резултати, такође, показују да се карактеристике пешачких токова разликују у зависности од начина регулисања саобраћаја на укрштањима, чиме се потврђује четврта хипотеза дисертације.

У оквиру дисертације развијена је **методологија експерименталних истраживања** карактеристика пешачких и возачких токова, као и параметара њиховог опслуживања у међусобној интеракцији на сигналисаним и несигналисаним укрштањима. Поред тога, развијена је и **методологија обраде података великог обима**. Развијене методологије су применљиве за незаштићена скретања и токове дуж деонице, без обзира на то да ли се ради о пешачком или возачком конфликтном току, као и за истраживање карактеристика ових токова без обзира на начин регулисања укрштања.

Правци даљих истраживања требало би да буду усмерени на анализу комбинованог утицаја пешачких и бициклических токова, имајући у виду да се бициклисти на градској мрежи често крећу упоредо са пешацима, како на пешачким, тако и на бициклическим прелазима. У оквиру овог истраживања утицај бициклических токова био је елиминисан. У случају левих скретања на сигналисаним раскрсницама, даља истраживања требало би усмерити на анализу комбинованог утицаја возачких и пешачких токова, с обзиром на то да у овом истраживању није разматран утицај конфликтног возачког тока.

Поред тога, неопходно је тестирати предложени алгоритам алтернативног третмана скретања при различитим саобраћајним и геометријским условима. Ово се може реализовати применом микросимулационих модела, који би, на основу резултата овог истраживања, могли бити калибрисани за локалне услове. На тај начин омогућило би се сагледавање показатеља ефикасности свих токова на раскрсници, а не само предметног тока у скретању, на основу чега би се прецизније оценила применљивост предложеног алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

- Агенција за безбедност саобраћаја. (2025). *Статистички извештај о стању безбедности саобраћаја у Републици Србији 2024*. Агенција за безбедност саобраћаја, Београд.
- Akcelik and Associates. (2001). *An Investigation of Pedestrian Movement Characteristics at Mid-Block Signalised Crossings*. Technical Report. Akcelik and Associates Pty Ltd, Melbourne, Australia.
- Akcelik and Associates. (2012). *SIDRA INTERSECTION User Guide*. Akcelik and Associates Pty Ltd, Melbourne, Australia
- Akcelik, R. (1981). *Traffic signals: Capacity and Timing Analysis*. Australian Road Research Board. Research Report ARR No. 123 (7th reprint:1998).
- Akçelik, R. (1990). *Calibrating SIDRA*. Report ARR 180, ARRB Transport Research, Vermont South, Victoria, Australia
- Alhajyaseen, W. K. M. (2015). Pedestrian speed at signalised crosswalks: analysis and influencing factors. *International Journal of Engineering Management and Economics, Inderscience Enterprises Ltd*, 5(3/4), pp. 258-272.
- Alhajyaseen, W. K. M., Asano, M., Nakamura, H. (2013). Left-turn gap acceptance models considering pedestrian movement characteristics. *Accident Analysis & Prevention*, 50, pp. 175-185, ISSN 0001-4575, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.04.006>
- Almodfer, R., Xiong, S., Kong, X., Duan, P. (2017). Pedestrian Crossing Speed Patterns and running frequency analysis at a non-signalized marked crosswalk: Quantitative and qualitative approaches. *Sustainable Cities and Society*, 34, pp. 183-192. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.07.003>
- Alomari, A. H., Khedaywi, T. S., Shdoo, H. I. (2023). Investigation of Pedestrian Crossing Behavior at Signalized Intersections in Jordan. *Advances in Transportation Studies*, 59, pp. 147-164.
- Amin, G., Khan, Z. H., Khattak, K. S., Khan, Z. A. (2021). Impact of pedestrians crossing road width on vehicles traffic flow at IJP road. *Pakistan Journal of Engineering and Technology PakJET*, 04(01), pp. 117-123
- Бажбић, Б. (2022). Брзина кретања пјешака на обиљеженим пјешачким прелазима. Пут и саобраћај, 68(1), стр. 53-61. <http://dx.doi.org/10.31075/PIS.68.02.08>
- Bak, R., Kiec, M. (2012). Influence of Midblock Pedestrian Crossings on Urban Street Capacity. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2316(1), pp. 76-83. <https://doi.org/10.3141/2316-09>
- Bang, K. L. (1978). Swedish capacity manual. Part 3. Capacity of signalized intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 667, pp. 11-21
- Bang, K., Wahlstedt, J., Linse, L. (2016). Methodology for Timing and Impact Analysis of Signalized Intersections. *Transportation Research Procedia*, 15, pp. 75-86. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.06.007>
- Bargegol, I., Najafi Moghaddam Gilani, V., Jamshidpour, F. (2017). Relationship between Pedestrians' Speed, Density and Flow Rate of Crossings through Urban Intersections (Case Study: Rasht Metropolis). *International Journal of Engineering - Transactions C: Aspects*, 30(12), pp. 1814-1821. doi: 10.5829/ije.2017.30.12c.01

- Bargegol, I., Najafi Moghaddam Gilani, V., Hosseinian, S. M., Habibzadeh, M. (2022). Pedestrians Crossing and Walking Speeds Analysis in Urban Areas under the Influence of Rain and Personality Characteristics. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1155/2022/7768160>
- Bennett, S., Felton, A., Akçelik, R. (2001). Pedestrian movement characteristics at signalised intersections. *Proceedings of the 23rd Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR 2001)*, Monash University, Melbourne, Australia, 10-12 December 2001
- Cassidy, M. J., Madanat, S. M., Wang, M. H., & Yang, F. (1995). Unsignalized intersection capacity and level of service: Revisiting critical gap. *Transportation Research Record*, (1484), pp. 16–23.
- ЦЕП (Центар за планирање урбаног развоја) & СеS.TRA д.о.о. (2020). *План урбане одрживе мобилности*. Завршни извештај, Град Београд, Градска управа града Београда, Секретаријат за саобраћај.
- Chandra, S., Bharti, A. K. (2013). Speed Distribution Curves for Pedestrians During Walking and Crossing, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, pp. 660-667. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.160>
- Chen, P., Nakamura, H., Asano, M. (2011). Saturation Flow Rate Analysis for Shared Left-turn Lane at igned Intersections in Japan. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 16, pp. 548-559. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.475>
- Chen, P., Qi, H., Sun J. (2014). Investigation of Saturation Flow on Shared Right-Turn Lane at Signalized Intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2461(1), pp. 66–75. <https://doi.org/10.3141/2461-09>
- Chen, X., Shao, C., Hao, Y. (2008). Influence of Pedestrian Traffic on Capacity of Right-Turning Movements at Signalized Intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2073(1), pp. 114-124. <https://doi.org/10.3141/2073-13>
- Coeymans A. J. E., Herrera M. J. C. (2003). Estimating Values for Traffic Parameters in Turning Lanes. *Transportation Research Record*, 1852(1), pp. 47–54. <https://doi.org/10.3141/1852-07>
- Cook, E., Koorey, G. (2013). A Study of Pedestrian Characteristics at Traffic Signals. *Proceedings of IPENZ Transportation Group Conference*, 14-16 April 2013, Dunedin, New Zealand
- Челар, Н. (2013). *Прилог анализи саобраћајног процеса на сигнализаној раскрсници*. Докторска дисертација, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет
- Челар, Н., Кајалић, Ј., Станковић, С. (2021). *Регулисање саобраћајних токова*. Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет. Београд
- Челар, Н., Станковић, С., Кајалић, Ј. (2018). *Основе управљања светлосним сигнаlima*. Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет. Београд
- Das, S., Mukherjee, D., Saha, P., Roy, S. K. (2018). Pedestrian Flow Characteristics at Signalized Intersections in Mixed Traffic Situations: A Case Study in Kolkata, India. *Procedia Computer Science* 130, pp. 150-156, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.024>
- Dhamaniya, A., Chandra, S. (2014). Influence of Undesignated Pedestrian Crossings on Midblock Capacity of Urban Roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2461, pp. 137-144. <https://doi.org/10.3141/2461-17>
- Efimov, A. D., Nefedov, V. V., Bessarabov, A. N. (2021) Influence of Positioning of Unregulated Pedestrian Crossings on Traffic Capacity of Urban Streets. *Proceedings of the IOP Conference*

Series: *Materials Science and Engineering*, 1079, Chapter 5, <http://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/6/062082>

Ellson, P. B. (1969). *Parking: Dynamic Capacities of Car Parks*. Road Research Laboratory, London. Report no. LR 221

FGSV. (2015a). *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2015)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.) (In German), FGSV Verlag GmbH.

FGSV. (2015b). *Guidelines for Traffic Signals (RiLSA)*. German Road and Transport Research Association, translation 2021.

FHWA. (2009). *Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD)*. Federal Highway Administration, Washington, D.C., 2009

Forde, A., Daniel, J. (2021). Pedestrian walking speed at un-signalized midblock crosswalk and its impact on urban street segment performance. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* (English Edition) 8(1), pp. 57 – 69. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.03.007>

Gates, T. J., Noyce, D. A., Bill, A. R., Van Ee, N. (2006). Recommended Walking Speeds for Timing of Pedestrian Clearance Intervals Based on Characteristics of the Pedestrian Population. *Transportation Research Record*, 1982(1), pp. 38–47. <https://doi.org/10.1177/0361198106198200106>

Gitelman, V., Carmel, R., Pesahov, F. (2020). Evaluating Impacts of a Leading Pedestrian Signal on Pedestrian Crossing Conditions at Signalized Urban Intersections: A Field Study. *Frontiers in Sustainable Cities*, 2(2020). <https://doi.org/10.3389/frsc.2020.00045>

Goh, B. H., Subramaniam, K., Wai, Y., Ali Mohamed, A. (2012). Pedestrian Crossing Speed: The Case of Malaysia. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 2, pp. 323-332. [https://doi.org/10.7708/ijtte.2012.2\(4\).03](https://doi.org/10.7708/ijtte.2012.2(4).03)

Golakiya, H.D., Patkar, M., Dhamaniya, A. (2019). Impact of Midblock Pedestrian Crossing on Speed Characteristics and Capacity of Urban Arterials. *Arabian Journal for Science and Engineering* 44, pp. 8675–8689. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03786-x>

Greenshields, B. D., Schapiro, D., Ericksen, E. L. (1947). *Traffic Performance at Urban Intersections*. Technical Report No. 1. Yale Bureau of Highway Traffic Engineering, Eno Foundation for Highway Traffic Control, Westport, Conn.

Hassouna, F. (2020). Evaluation of Pedestrian Walking Speed Change Patterns at Crosswalks in Palestine. *The Open Transportation Journal*, 14, pp. 44-49. <https://doi.org/10.2174/1874447802014010044>

Hediyeh, H. , Sayed, T., Zaki, M. H., Ismail K. (2014) Automated Analysis of Pedestrian Crossing Speed Behavior at Scramble-phase Signalized Intersections Using Computer Vision Techniques. *International Journal of Sustainable Transportation*, 8(5), pp. 382-397, <https://doi.org/10.1080/15568318.2012.708098>

Iryo-Asano, M., Alhajyaseen, W. (2017). Consideration of a Pedestrian Speed Change Model in the Pedestrian–Vehicle Safety Assessment of Signalized Crosswalks. *Transportation Research Procedia* 21, pp. 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.080>

Jiang, X., Wang, W., Bengler, K., Guo, W. (2015) Analyses of pedestrian behavior on mid-block unsignalized crosswalk comparing Chinese and German cases. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(11), pp. 1-7. <https://doi.org/10.1177/1687814015610468>

- Kadali, B. R., Chiranjeevi, T., Rajesh, R. (2015). Effect of pedestrians un-signalized mid-block crossing on vehicular speed. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 5(2): pp. 170–183. [http://dx.doi.org/10.7708/ijtte.2015.5\(2\).07](http://dx.doi.org/10.7708/ijtte.2015.5(2).07)
- Kadali, B.R., Vedagiri, P. (2020). Evaluation of pedestrian crossing speed change patterns at unprotected mid-block crosswalks in India. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(6), pp. 832-842. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.10.010>
- Кајалић, Ј. (2020). *Моделирање кретања плуна возила на градским артеријама*. Докторска дисертација, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет
- Кичић, З., Абазовић, М., Папић, А. (2023). Анализа брзине кретања пјешака на сигналисаним раскрсницама. *Пут и саобраћај*, 69(1), стр. 53-59. <https://doi.org/10.31075/PIS.69.01.07>
- Knoblauch, R. L., Pietrucha, M. T., Nitzburg, M. (1996). Field Studies of Pedestrian Walking Speed and Start-Up Time. *Transportation Research Record*, 1538(1), pp. 27-38. <https://doi.org/10.1177/0361198196153800104>
- Кноор, V. L., Daganzo, C. F. (2018). The Effect of Crosswalks on Traffic Flow. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 18(2), pp. 145-157. <https://doi.org/10.18757/ejtir.2018.18.2.3227>
- Коцић, А., Челар, Н., Станковић, С. (2018). Калибрација VISSIM-а за незаштићено лево скретање на сигналисаним раскрсницама у Београду. *Пут и саобраћај*, 64(4), стр. 49-53, <https://doi.org/10.31075/PIS.64.04.07>
- Коцић, А., Челар, Н., Кајалић, Ј., Станковић, С. (2018). Истраживање вредности засићеног саобраћајног тока на удвојеним тракама за лево скретање. *Техника*, 65(2), стр. 254-261. <https://doi.org/10.5937/tehnika1802254k>
- Kocić, A., Čelar, N., Kajalić, J., & Stanković, S. (2022). Simulation Modelling of Permitted Left-Turn Saturation Flow Rate Based on Opposing Through-Flow Degree of Saturation. *Promet - Traffic & Transportation*, 34(3), pp. 475–485. <https://doi.org/https://doi.org/10.7307/ptt.v34i3.3890>
- Коцић Стојановић, А. (2024). Брзина пешачких токова на сигналисаним раскрсницама – преглед литературе. *Зборник радова 2. научно стручног скупа Добра пракса у друмском саобраћају и транспорту*, 17. мај 2024, Београд, pp. 252 – 259
- Li, P., Bian, Y., Rong, J., Zhao, L., Shu, S. (2013). Pedestrian Crossing Behavior at Unsignalized Mid-block Crosswalks around the Primary School, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96, pp. 442-450. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.052>
- Lin, P., Kourtellis, A., Wang, Z., Chen, C. (2019). *Integration of a Robust Automated Pedestrian Detection System for Signalized Intersections*. Final Report, Project No. FDOT BDV25-977-44. Florida Department of Transportation
- Luttinen, T., Nevala, R. (2002). *Capacity and Level of Service of Finnish Signalized Intersections*. Finnish Road Administration (Finnra Reports No. 25).
- Milazzo, J. S., Roupail, N. M., Hummer, J. E., Allen, D. P. (1998). Effect of Pedestrians on Capacity of Signalized Intersections. *Transportation Research Record*, 1646(1), pp. 37–46. <https://doi.org/10.3141/1646-05>
- Milazzo, J. S., Roupail, N. M., Hummer, J. E., Allen, D. P. (1998). Effect of Pedestrians on Capacity of Signalized Intersections. *Transportation Research Record*, 1646 (1), pp. 37-46. <https://doi.org/10.3141/1646-05>

- Montufar, J., Arango, J., Porter, M., Nakagawa, S. (2007). Pedestrians' Normal Walking Speed and Speed When Crossing a Street. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2002(1), pp. 90–97. <http://dx.doi.org/10.3141/2002-12>
- Muley, D., Alhajyaseen, W., Kharbeche, M., Al-Salem, M. (2018). Pedestrians' Speed Analysis at Signalized Crosswalks, *Procedia Computer Science*, 130, pp. 567-574. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.102>
- Muley, D., Kharbeche, M., Alhajyaseen, W. K. M., Al-Salem, M. (2019). Empirical Study on Pedestrian Signal Design and Compliance in the State of Qatar. *International Journal of Civil Engineering* 17, pp. 1653–1666. <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00451-0>
- Niittymäki, J., Pursula, M. (1997). Saturation Flows at Signal-Group-Controlled Traffic Signals. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1572(1), pp. 24-32. <http://dx.doi.org/10.3141/1572-04>
- Nkurunziza, D., Kumaran, G. S., Tafahomi, R., Augustin, F. (2024). Pedestrian crossing: Analysis of habits and compliance through unsignalized crosswalk in the city of Kigali. *International Journal of ADVANCED AND APPLIED SCIENCES*, 11, pp. 63-72. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2024.02.009>
- Noh, B., Ka, D., Lee, D., Yeo, H. (2021). Analysis of Vehicle–Pedestrian Interactive Behaviors near Unsignalized Crosswalk. *Transportation Research Record*, 2675 (8), pp. 494-505. <https://doi.org/10.1177/0361198121999066>
- Nteziyaremye, P., Sinclair, M. (2013). Understanding pedestrian crossing behaviour: A case study in South Africa. *Proceedings of the 32nd Annual Southern African Transport Conference (SATC 2013) "Transport and Sustainable Infrastructure"*, July 2013, Pretoria, South Africa, pp. 485-495. ISBN: 978-1-920017-62-0
- OriginLab. (2023). *Origin User Guide 2023*. OriginLab. <https://www.originlab.com/doc/User-Guide>
- Особа, М., Вукановић, С., Станић, Б. (1999). *Управљање саобраћајем помоћу светлосних сигнала I део*. Саобраћајни факултет, Београд
- Poojari, Y., Prashanth, E., Divya, D., Kalyani, M. (2021). Modelling Pedestrian Crossing Behaviour at a Midblock Section. *Slovak Journal of Civil Engineering* 29 (3), pp. 15-21. <https://doi.org/10.2478/sjce-2021-0017>
- Raff, M. S., Hart, J. W. (1950). *A Volume Warrant for Urban Stop Signs*. The Eno Foundation for Highway Traffic Control, Westport, Conn.
- Ren, G., Zhou, Z., Wang, W., Zhang, Y., Wang, W. (2011). Crossing Behaviors of Pedestrians at Signalized Intersections Observational Study and Survey in China. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2264, pp. 65-73. <http://dx.doi.org/10.3141/2264-08>
- Rengarasu, T. M., Jayawansa, H. N., Perera, G. P. W. (2012) Estimation of Pedestrian walking speeds at controlled cross walks in Sri Lanka - a pilot study. *Proceedings of the International Symposium on Advances in Civil and Environmental Engineering Practices for Sustainable Development (ACEPS 2012)*, Galle, Sri Lanka, pp. 91-95
- Reynolds, I., Qi, Y., Machemehl, R. B., Neible, B. M. (2025). *Traffic Signal Operations Supporting All Users*. Report No. FHWA/TX-26/0-7209-1 Center for Transportation Research, University of Texas at Austin. <https://library.ctr.utexas.edu/ctr-publications/0-7209-1.pdf>
- Roshani, M., Bargegol, I. (2017). Effect of Pedestrians on the Saturation Flow Rate of Right Turn Movements at Signalized Intersection – Case Study from Rasht City. *Proceedings of the*

- IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 245(4).
<https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/245/4/042032>
- Rouphail, N. M., Eads, B. S. (1997). Pedestrian Impedance of Turning-Movement Saturation Flow Rates: Comparison of Simulation, Analytical, and Field Observations. *Transportation Research Record*, 1578(1), pp. 56–63. <https://doi.org/10.3141/1578-08>
- Samarakoon, G., Sivakumar, T. (2021). Influence of Pedestrian Characteristics, Land Use, Location and Time on Pedestrian Crosswalk Speed. *Proceedings of the 114th Annual Sessions of Institute of Engineers*, August 2021, Colombo, Sri Lanka.
- Siegloch, W. (1973). *Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*. Report 154. Bundesminister fuer Verkehr, Bonn, Germany.
- Stanić, B., Tubić, V., Čelar, N. (2011). Straight lane saturation flow and its rate in Serbian cities. *Transport*, 26(3), pp. 329–334. <https://doi.org/10.3846/16484142.2011.623762>
- Станић, Б. (1991). *Истраживање ефеката сигналног плана при засићеном току*. Докторска дисертација, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет
- Станковић, С. (2023). *Моделирање засићеног саобраћајног тока незаштићеног левог скретања*. Докторска дисертација, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет
- Tarawneh, M.S. (2001). Evaluation of pedestrian speed in Jordan with investigation of some contributing factors. *Journal of Safety Research*, 32(2), pp. 229-236, [https://doi.org/10.1016/S0022-4375\(01\)00046-9](https://doi.org/10.1016/S0022-4375(01)00046-9)
- Teply, S. (1990). Combined Effect of Radius and Pedestrians on Right-Turn Saturation Flow at Signalized Intersections. *Transportation Research Record* 1287(1), Transportation Research Board, Washington, D.C. pp. 82-95.
- Teply, S., Allingham, D. I., Richardson, D. B., Stephenson, B. W. (2008). *Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections* (3rd edition). Institute of Transportation Engineers District 7.
- Thakur, S., Chaurasia, N., Gautam, A., Katoch, B., Biswas, S. (2021). Impact of Pedestrian Movements on Capacity of Undivided Streets: A Case Study. *Proceedings of the Advances in Sustainable Construction Materials 2020*, Volume 124, pp. 77-86. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-33-4590-4_9
- Trafikverket. (2014). *TRVMB Kapacitet och framkomlighetseffekter, Trafikverkets metodbeskrivning för beräkning av kapacitet och framkomlighetseffekter i vägtrafikanläggningar* (In Swedish). Trafikverket
- Transportation Research Board. (2016). *HCM 2016: Highway Capacity Manual* (6th edition). Transportation Research Board. Washington, D.C
- Transportation Research Board. (2022). *HCM 2022: Highway Capacity Manual* (7th edition). Transportation Research Board. Washington, D.C
- Трпковић, А. (2017). *Утицај демографске промене старења становништва на саобраћајно пројектовање урбаног саобраћајног система*. Докторска дисертација, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет
- Väylävirasto (2022). *Maanteiden liikennevalojen suunnitteluohje LIVASU 2022* (In Finnish). Väylävirasto, Helsinki (Väyläviraston ohjeita 17/2022)
- Vejdirektoratet. (2010). Capacity and Service level. Vejdirektoratet
- Vejdirektoratet. (2019). *Håndbog Kapacitet og Serviceniveau* (In Danish). Vejdirektoratet

- Webster, F. V. (1964) Experiment on saturation flow of right-turning vehicles at traffic signals. *Traffic Engineering Control*, 11, pp. 427-434.
- Webster, F. V., Cobbe, B. M. (1966). *Traffic Signals*. Her Majesty's Stationery Office, London
- Wu, J., Zhang, S., Singh, A.K., Wang, Q. (2017). Pedestrian Walking Speed Characteristics at Signalized Intersections in New Urban District Communities. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*. pp. 453-461. <https://doi.org/10.12783/DTETR%2FICTIM2016%2F5526>
- Wu, N. (2015). Traffic Quality Assessment at Signalized Intersections-Procedures in the New German Highway Capacity Manual (HBS 2015). *Proceedings of the 15th COTA International Conference of Transportation Professionals*, pp. 2474-2485. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784479292.228>
- Zafri, N.M., Rony, A.I., Adri, N. (2019). Analysis of Pedestrian Crossing Speed and Waiting Time at Intersections in Dhaka. *Infrastructures*, 4(39). <https://doi.org/10.3390/infrastructures4030039>
- Zhang, X., Alhajyaseen, W. K., Asano, M., Nakamura, H. (2011). The impacts of signal timing and crosswalk length upon pedestrian speeds at signalized crosswalks. *Proceedings of Infrastructure Planning* (Vol. 43), Japan Society of Civil Engineers, Tsukuba, Japan
- Zhang, X., Nakamura, H., Iryo-Asano, M., Chen, P. (2014). Modeling pedestrian speed at signalized crosswalks considering crosswalk length and pedestrian signal timing. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management), 70, http://dx.doi.org/10.2208/jscejipm.70.I_1031
- Zhao, J., Odawa, J., Wu, J., Ma, R. (2020). Modeling the interaction between vehicle yielding and pedestrian crossing behavior at unsignalized midblock crosswalks. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 73, pp. 222-235. ISSN 1369-8478, <http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2020.06.019>
- Zhao, Y., Chen, Q., Qin, J., Xue, X. (2016). Survey of pedestrians' crossing time at non-signalized mid-block street crossing. *Journal of Advanced Transportation*, 50(8), pp. 2193-2208. <https://doi.org/10.1002/atr.1454>
- Zhu, H., Yang, X. (2019). Analysis of Pedestrian-Crossing Speed Characteristics at Traffic Intersections. *Proceedings of the 19th COTA International Conference of Transportation Professionals*, July 2019. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784482292.027>

ПРИЛОЗИ

Прилог 1. ПРАКТИЧНА ПРИМЕНА МОДЕЛА ЗАСИЋЕНОГ САОБРАЋАЈНОГ ТОКА НЕЗАШТИЋЕНОГ СКРЕТАЊА

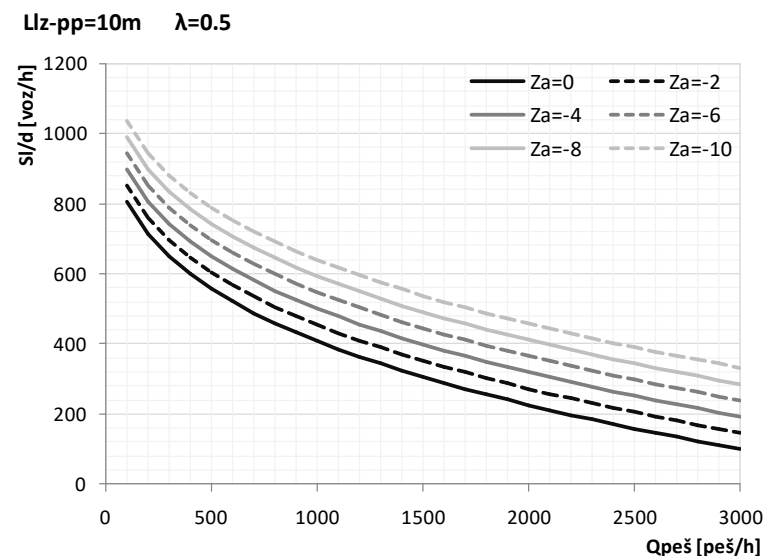
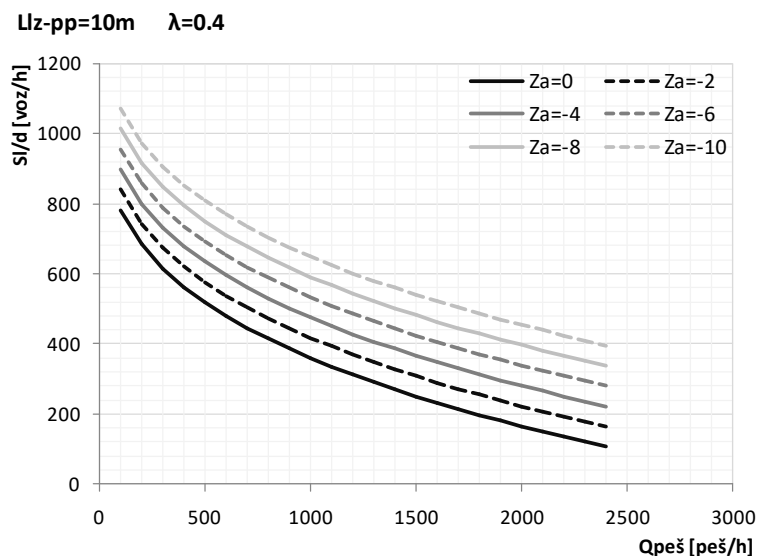
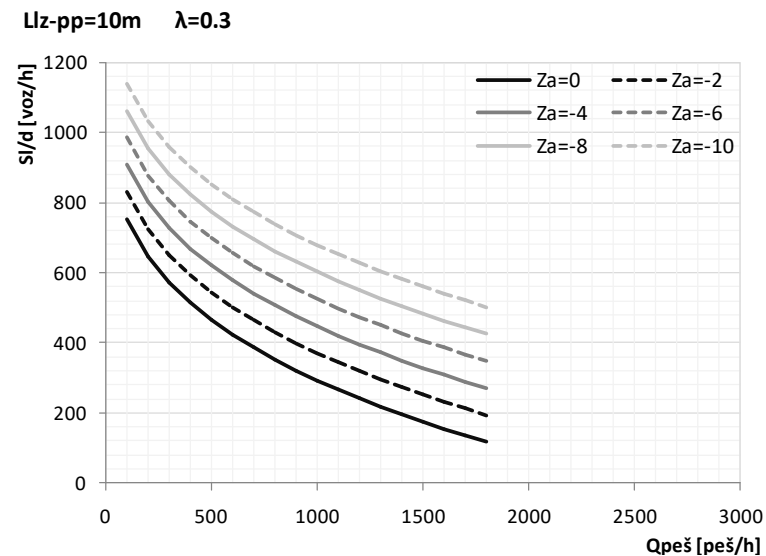
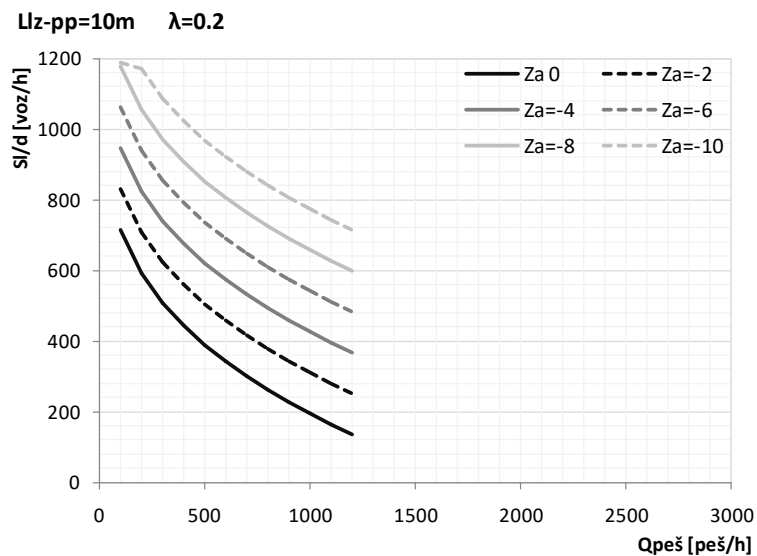
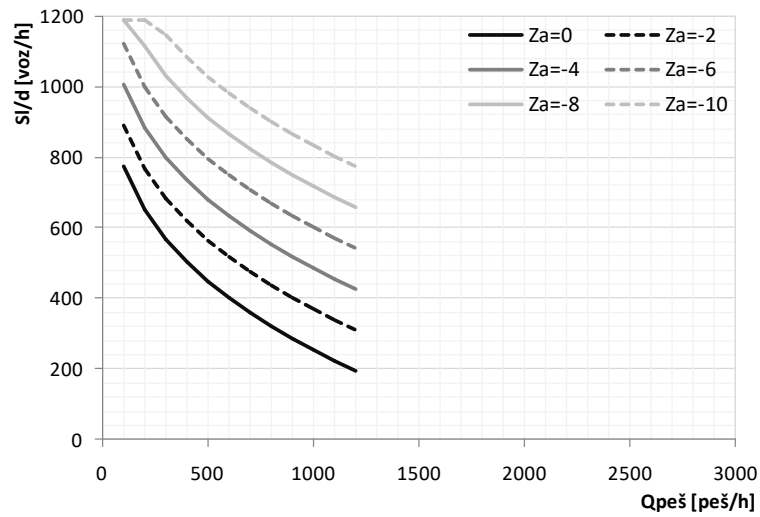
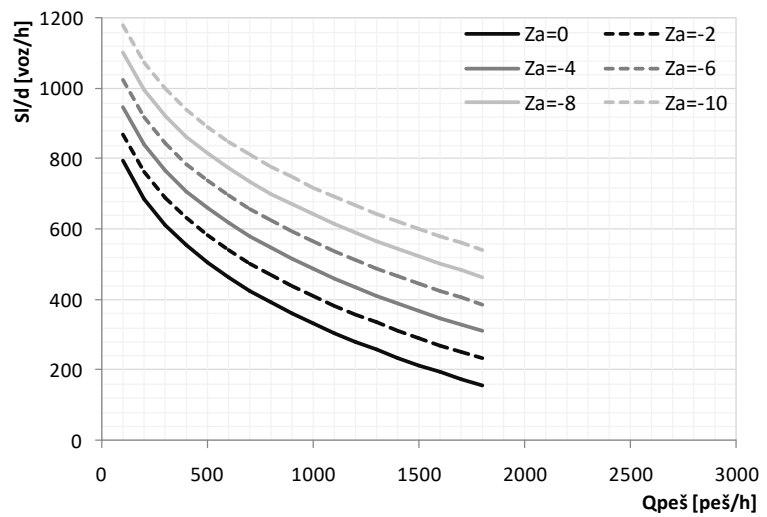


График П.1. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 10 m

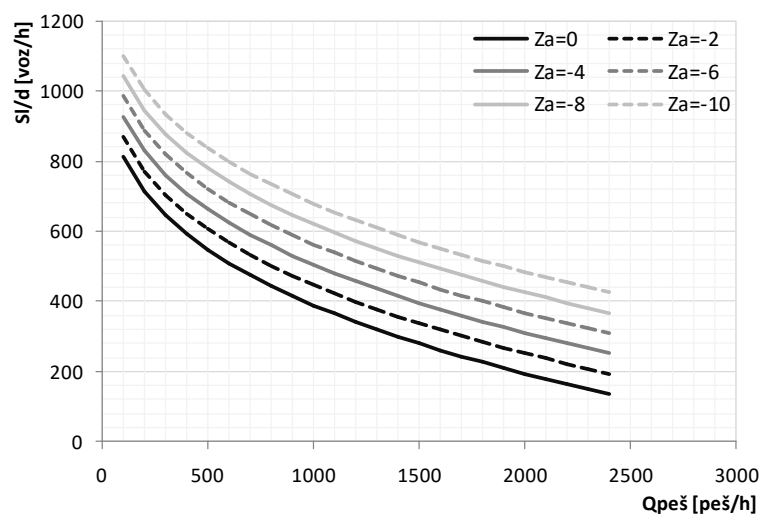
l_z-pp=15m λ=0.2



l_z-pp=15m λ=0.3



l_z-pp=15m λ=0.4



l_z-pp=15m λ=0.5

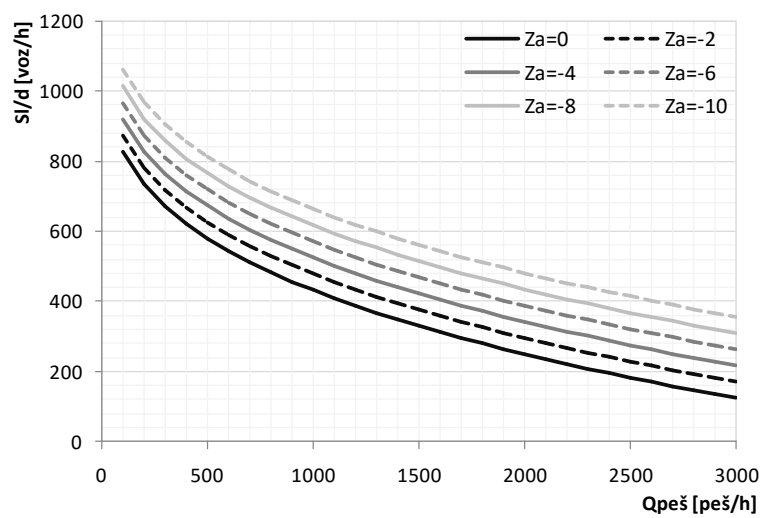
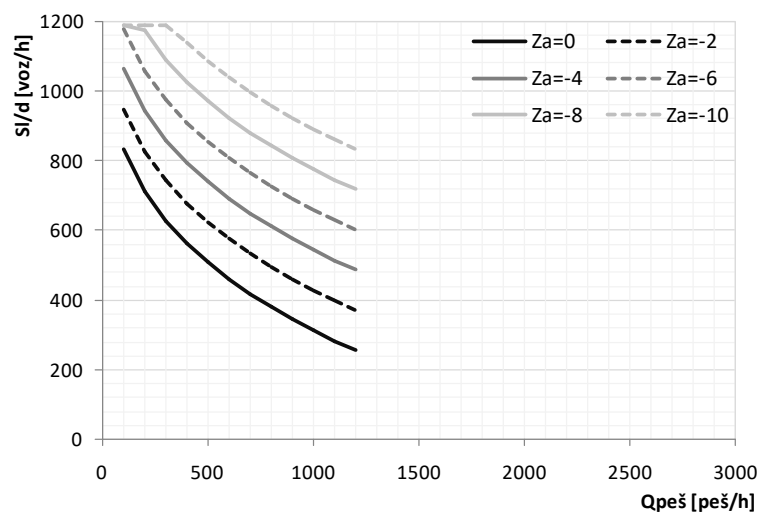
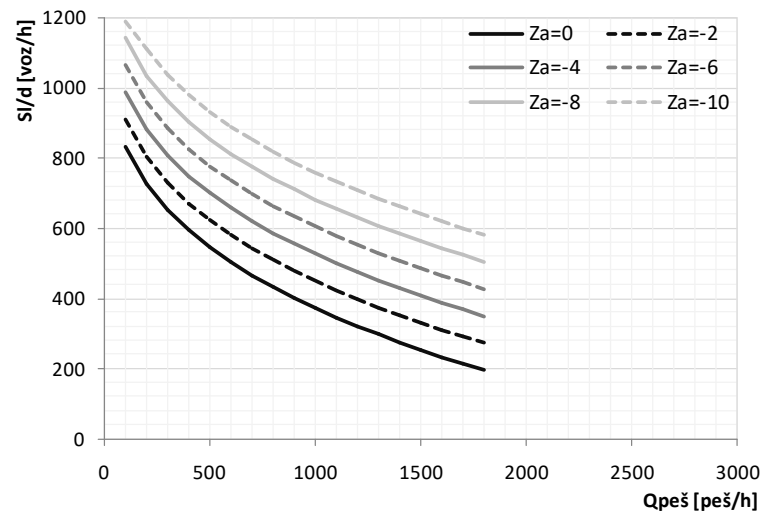


График П.2. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 15 m

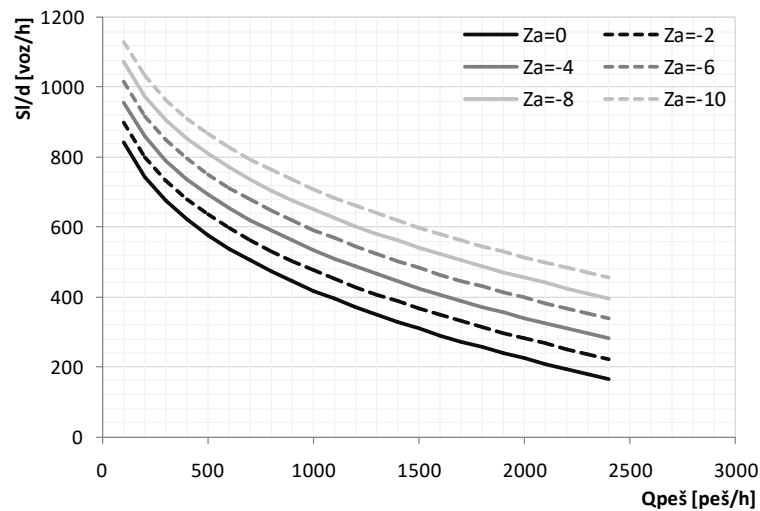
$l_{lz-pp}=20m$ $\lambda=0.2$



$l_{lz-pp}=20m$ $\lambda=0.3$



$l_{lz-pp}=20m$ $\lambda=0.4$



$l_{lz-pp}=20m$ $\lambda=0.5$

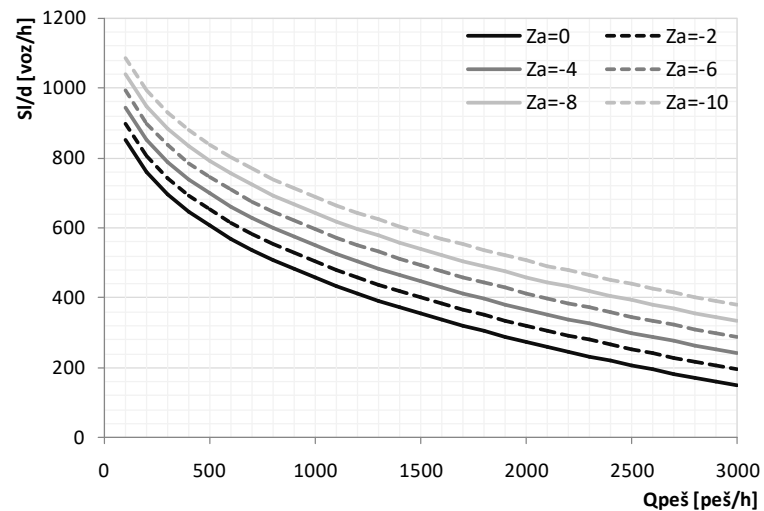
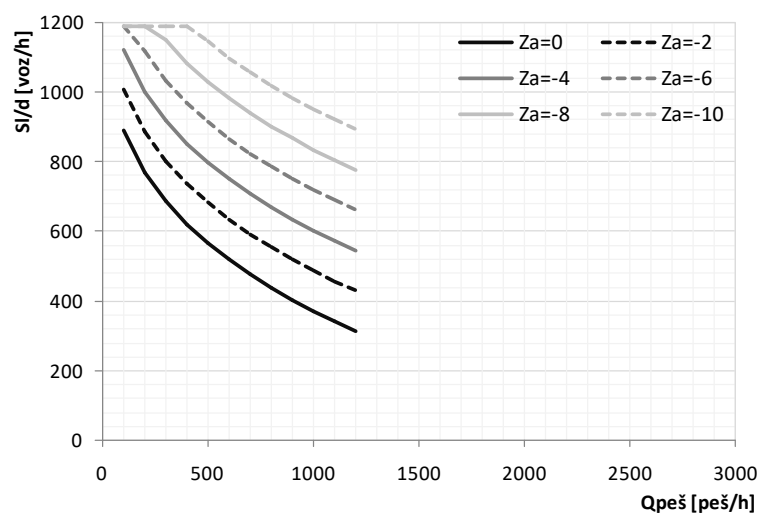
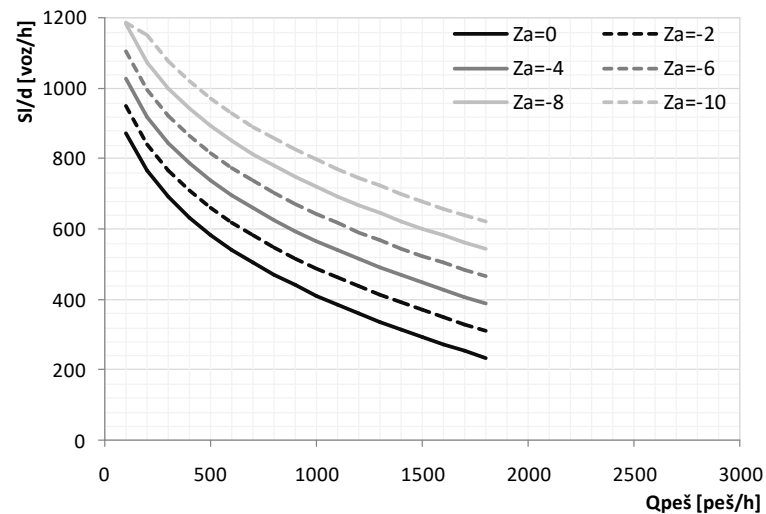


График П.3. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 20 m

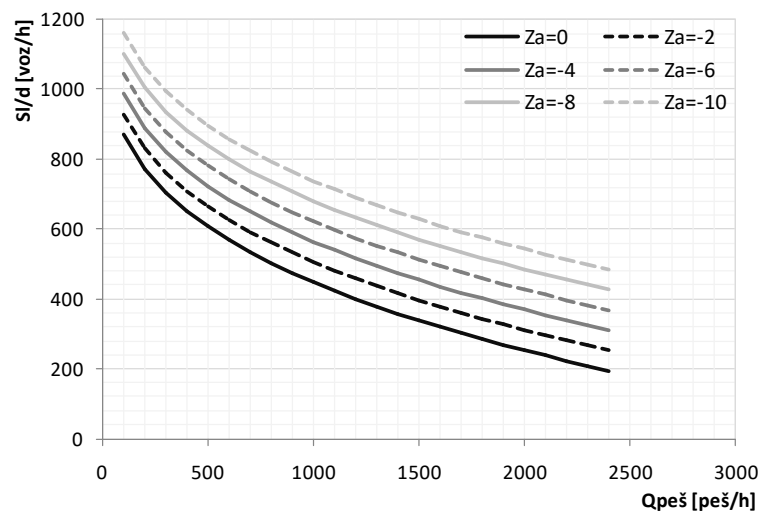
l_{lz}-pp=25m λ=0.2



l_{lz}-pp=25m λ=0.3



l_{lz}-pp=25m λ=0.4



l_{lz}-pp=25m λ=0.5

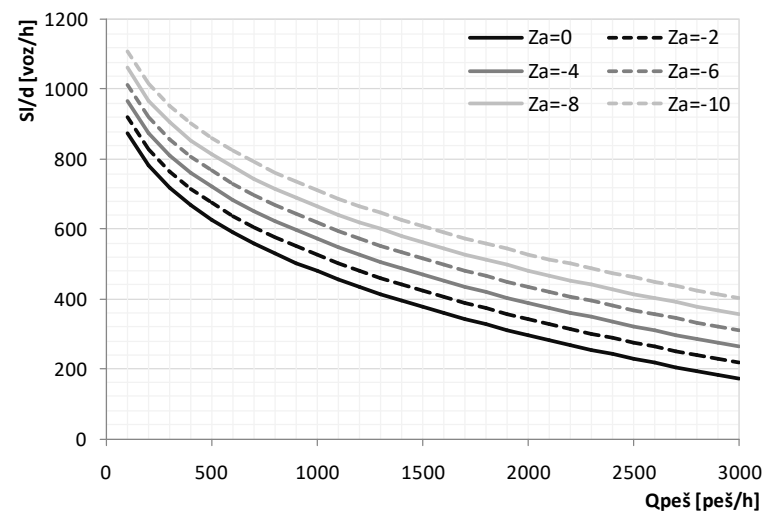
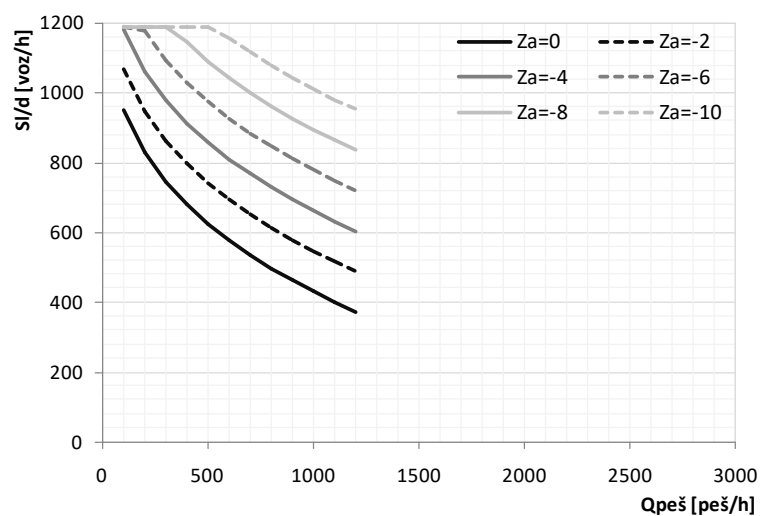
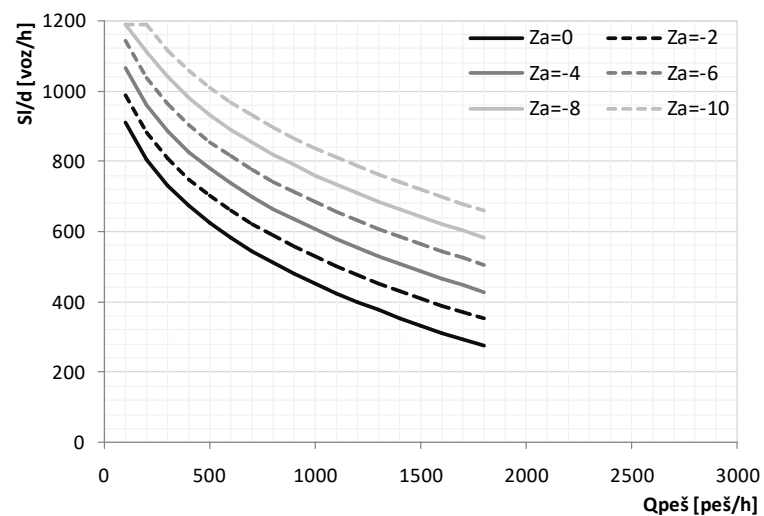


График П.4. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 25 m

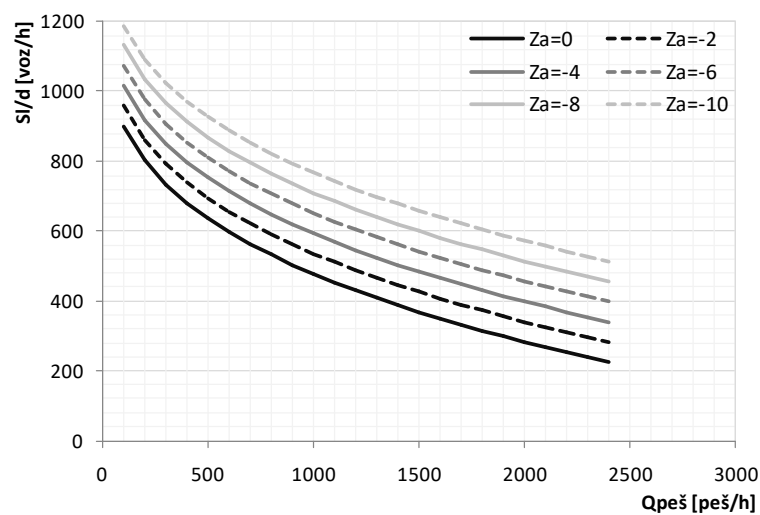
$L_{lz-pp}=30m$ $\lambda=0.2$



$L_{lz-pp}=30m$ $\lambda=0.3$



$L_{lz-pp}=30m$ $\lambda=0.4$



$L_{lz-pp}=30m$ $\lambda=0.5$

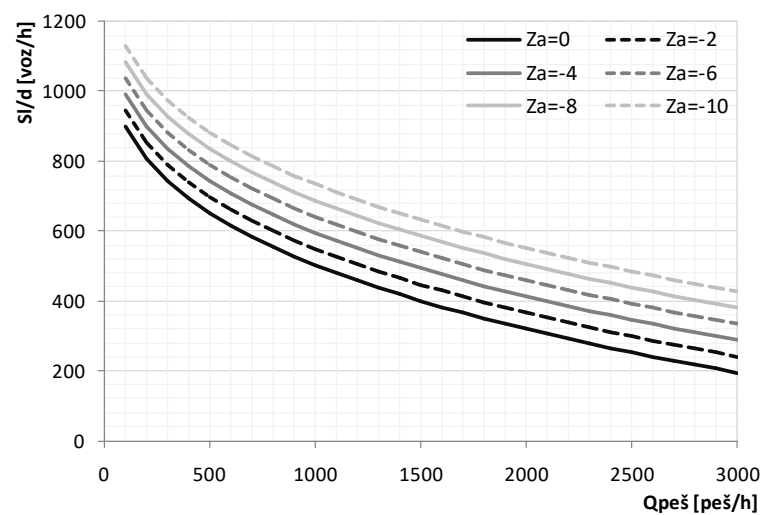
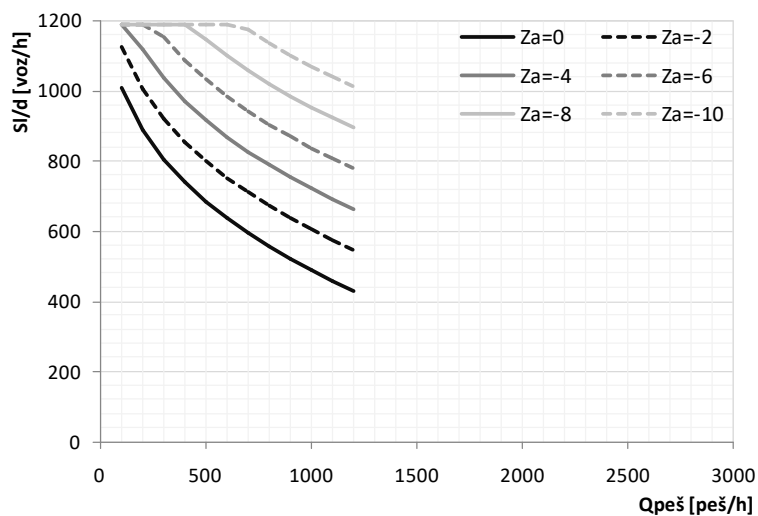
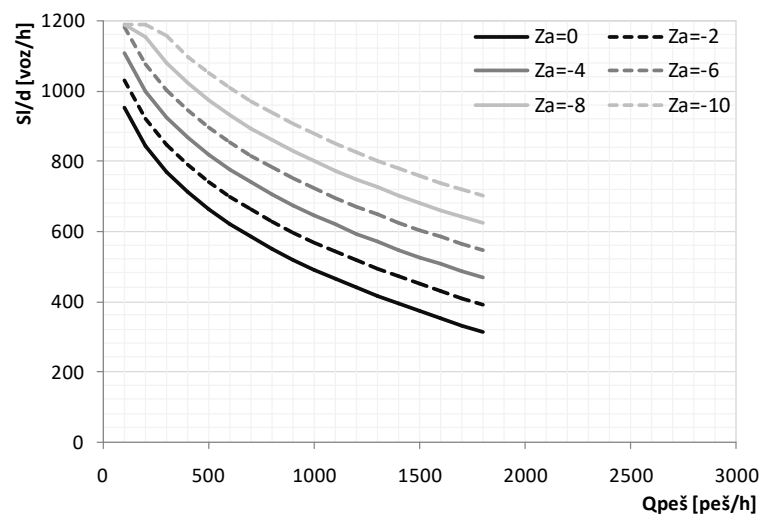


График П.5. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 30 m

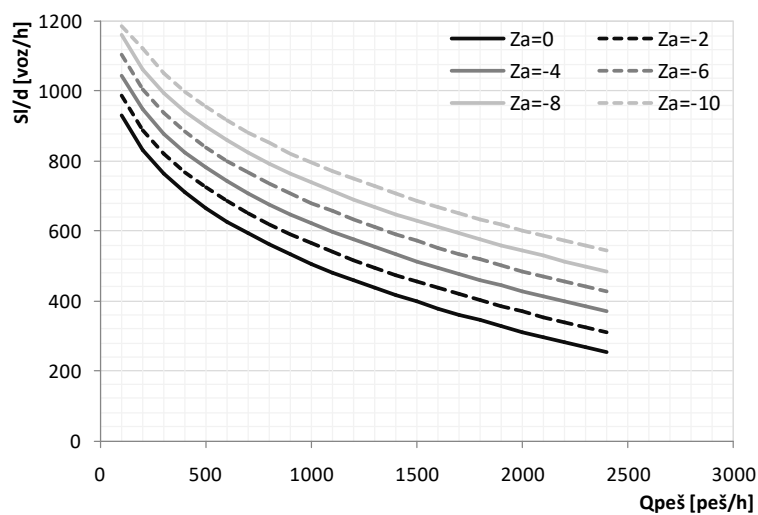
Llz-pp=35m $\lambda=0.2$



Llz-pp=35m $\lambda=0.3$



Llz-pp=35m $\lambda=0.4$



Llz-pp=35m $\lambda=0.5$

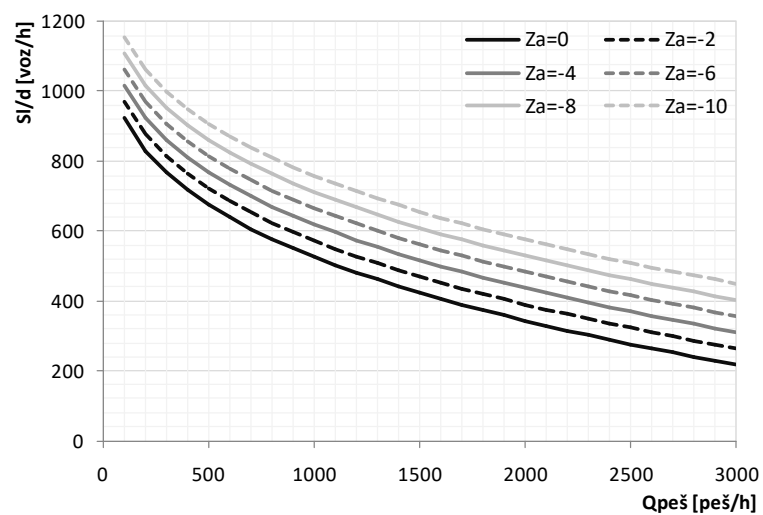
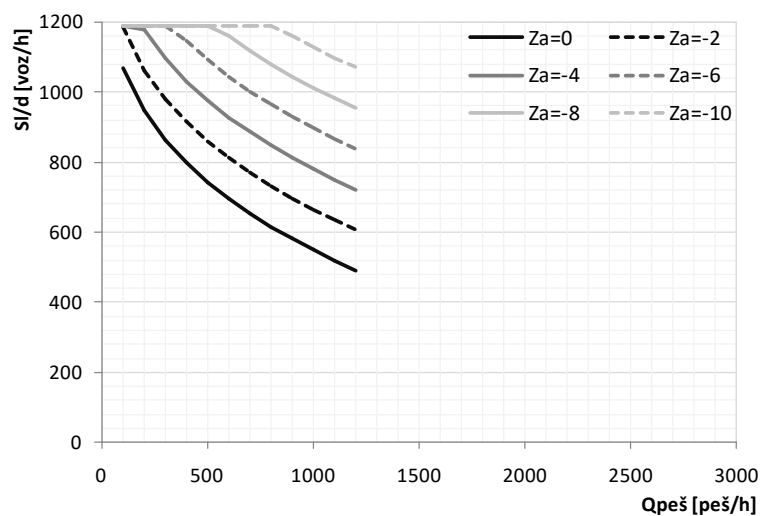
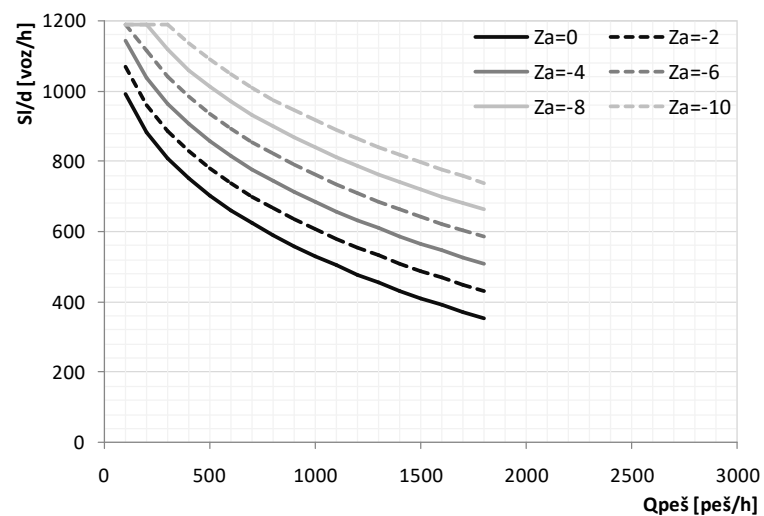


График П.6. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 35 m

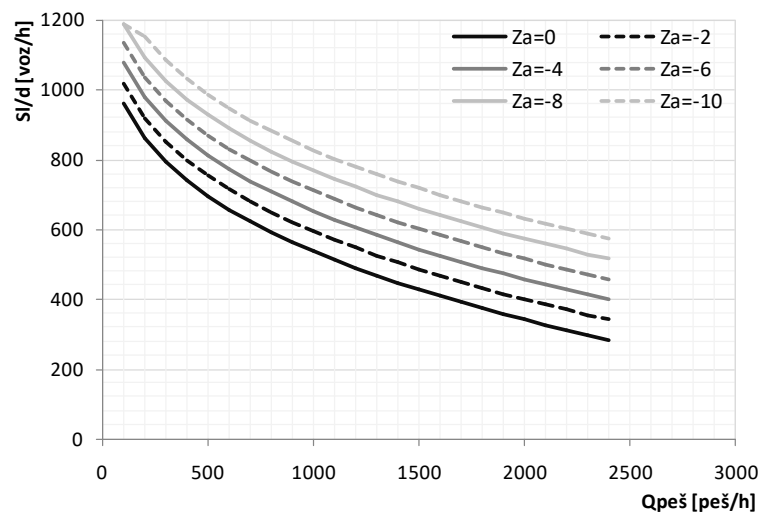
l_z-pp=40m λ=0.2



l_z-pp=40m λ=0.3



l_z-pp=40m λ=0.4



l_z-pp=40m λ=0.5

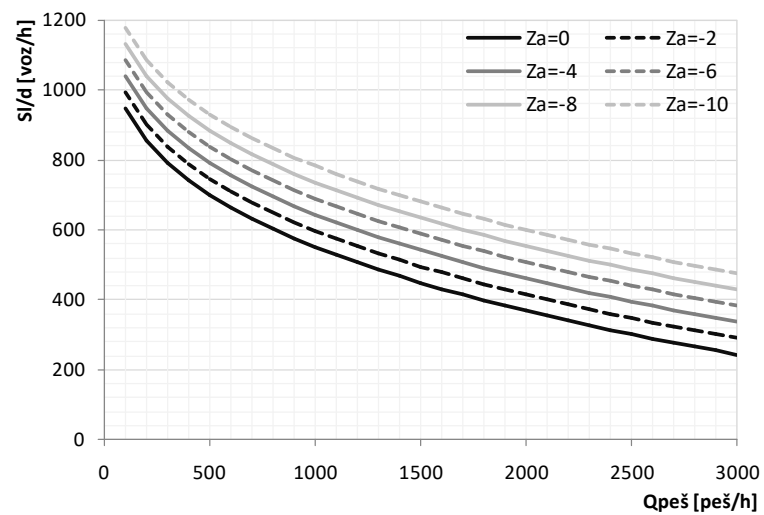
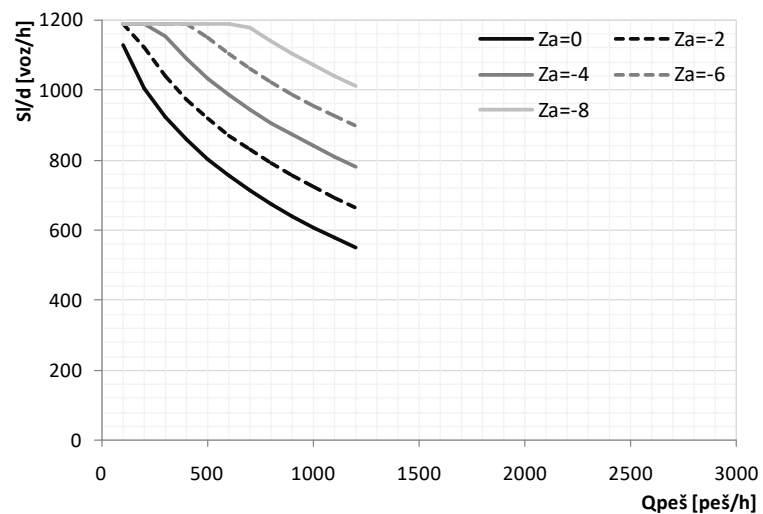
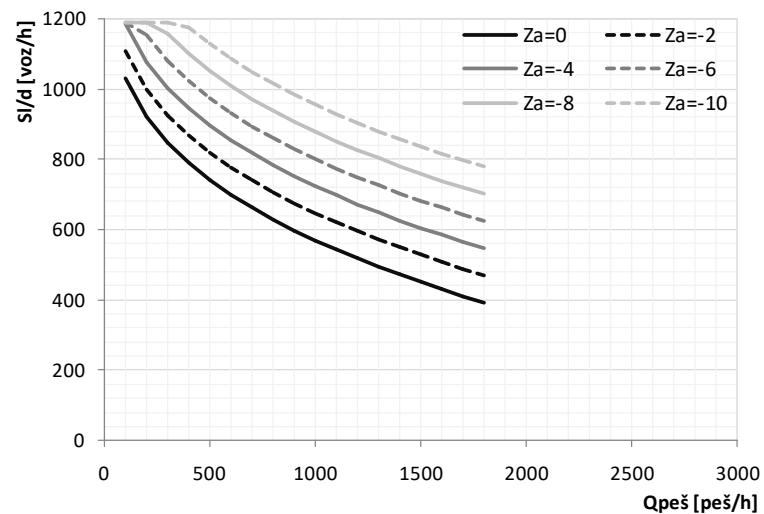


График П.7. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 40 m

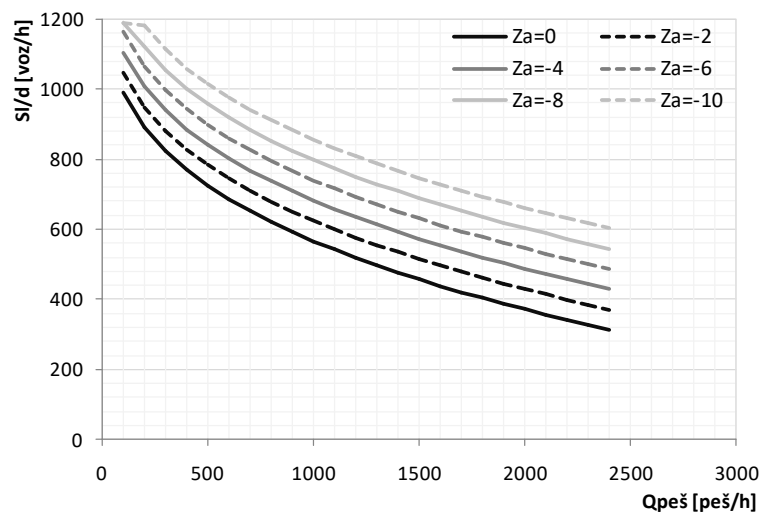
l_z-pp=45m λ=0.2



l_z-pp=45m λ=0.3



l_z-pp=45m λ=0.4



l_z-pp=45m λ=0.5

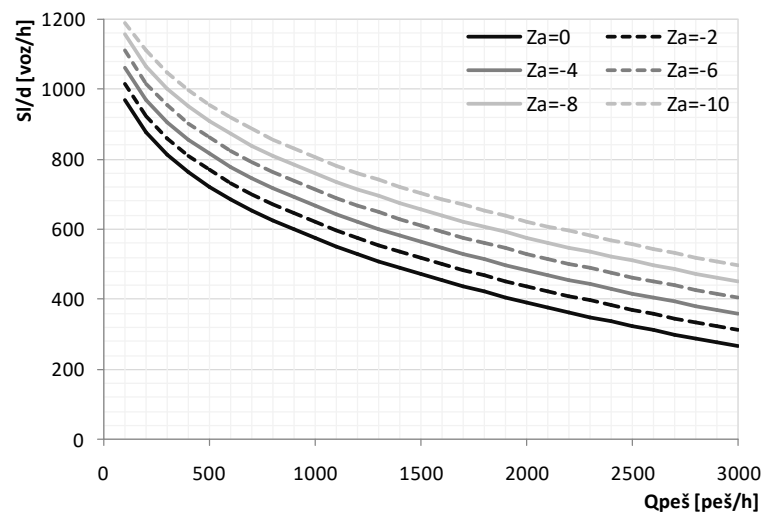


График П.8. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 45 m

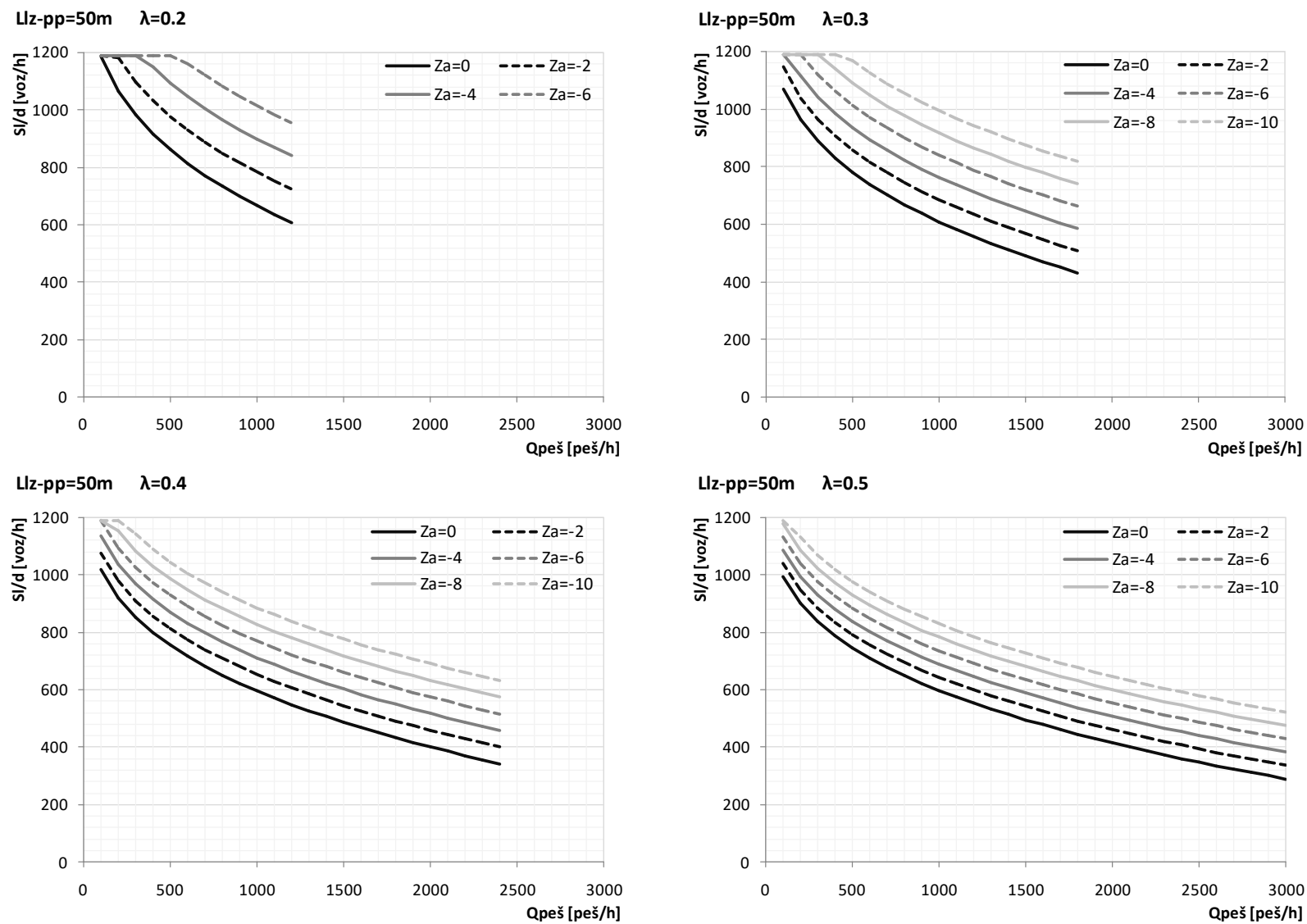


График П.9. Зависност засићеног саобраћајног тока незаштићеног скретања од интензитета пешачког тока за дужину трајекторије скретања 50 m

Прилог 2. Код МАСРО-А КРЕИРАНОГ ЗА ПОТРЕБЕ ИСТРАЖИВАЊА

Sub ТасноVremeuMilisec ()

Dim currentTime As Double

Dim milliseconds As Double

Dim formattedTime As String

currentTime = CDbI(Now)

milliseconds = CDbI(Timer)

formattedTime = Format(currentTime, "yyyy-mm-dd hh:mm:ss") & "." & Right("000" & CStr(Round(milliseconds, 3) * 1000), 3)

ActiveCell.Value = formattedTime

ActiveCell.Offset(0, 1).Select

End Sub

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Аница Коцић Стојановић, мастер инж. саобраћаја, рођена је 14.04.1994. године у Смедереву, где је завршила основну школу „Бранислав Нушић“ и средњу Техничку школу, обе са одличним успехом, као ученик генерације и носилац дипломе „Вук Караџић“.

На Саобраћајном факултету Универзитета у Београду школске 2013/2014. године уписала је **основне академске студије**, првог степена, обима 240 (двеста четрдесет) ЕСПБ, на модулу Друмски и градски саобраћај и транспорт, смер Саобраћајни. Основне академске студије завршила је 07.09.2017. године, са просечном оценом 9,94 (девет и 94/100). Завршни рад на тему „Истраживање вредности засићеног саобраћајног тока удвојених трака за лево скретање“, под менторством проф. др Николе Челара, одбранила је са оценом 10 (десет) и тиме стекла звање **Дипломирани инжењер саобраћаја**.

Школске 2017/2018. године је, на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду, уписала **мастер академске студије**, другог степена, обима 60 (шездесет) ЕСПБ, на модулу Саобраћајно инжењерство. Дана 21.06.2018. године је завршила мастер академске студије са просечном оценом 10 (десет). Мастер рад на тему „Модел за утврђивање засићеног саобраћајног тока незаштићених левих скретања“, под менторством проф. др Николе Челара, одбранила је са оценом 10 (десет) и тиме стекла звање **Мастер инжењер саобраћаја**.

Докторске академске студије, на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду, на студијском програму Саобраћај, уписала је школске 2018/2019. године. До сада је положила све испите са просечном оценом 10 и испунила све обавезе предвиђене Наставним планом и програмом за докторске академске студије.

На основу успеха на претходним нивоима студија била је прималац стипендије Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије током школске 2014/2015. и 2015/2016. године, као и стипендије Министарства омладине и спорта „Фонд за младе таленте - Доситеја“ током школске 2016/2017. и 2017/2018. године. Добитница је дипломе од стране Саобраћајног факултета Универзитета у Београду за остварен изузетан успех у другој, трећој и четвртој години основних академских студија и изузетан успех у првој години мастер академских студија.

Од марта 2019. године до августа 2020. године била је запослена на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду као истраживач-приправник, када је била ангажована на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја под називом „Утицај глобалних изазова на планирање саобраћаја и управљање саобраћајем у градовима“. Од августа 2020. године је запослена у Техничкој школи у Смедереву, на месту наставника саобраћајне групе предмета.

Учествовала је у изради 28 научних радова, као аутор или коаутор, од којих је један научни рад објављен у научном часопису међународног значаја (М23). Током запослења на Факултету учествовала је у изради пет пројеката и студија.

Удата је и мајка једног детета.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Име и презиме аутора **Аница Коцић Стојановић**

Број индекса **ДС18Д005**

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

МОДЕЛИРАЊЕ УТИЦАЈА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА НА САОБРАЋАЈНИ ПРОЦЕС НА УКРШТАЊИМА

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршила ауторска права и користила интелектуалну својину других лица.

У Београду, _____

Потпис аутора

ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ ДОКТОРСКОГ РАДА

Име и презиме аутора **Аница Коцић Стојановић**
Број индекса **ДС18Д005**
Студијски програм **Саобраћај**
Наслов рада **Моделирање утицаја пешачких токова на саобраћајни процес на укрштањима**
Ментор **др Никола Челар, редовни професор
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет**

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предала ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, _____

Потпис аутора

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

МОДЕЛИРАЊЕ УТИЦАЈА ПЕШАЧКИХ ТОКОВА НА САОБРАЋАЈНИ ПРОЦЕС НА УКРШТАЊИМА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучила.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду, _____

Потпис аутора

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.