

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

САОБРАЋАЈНИ ФАКУЛТЕТ

Немања А. Степановић

**МОДЕЛ ЗА АНАЛИЗУ БРЗИНЕ СЛОБОДНОГ ТОКА У
ФУНКЦИЈИ КЛАСЕ ДВОТРАЧНОГ ПУТА**

Докторска дисертација

Београд, 2023

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC
ENGINEERING

Nemanja A. Stepanović

**A MODEL FOR THE FREE-FLOW SPEED ANALYSIS AS
A FUNCTION OF THE TWO-LANE ROAD CLASS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023

Ментор

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

Чланови комисије

др Драженко Главић, редовни професор
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет

др Никола Челар, ванредни професор
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет

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

Датум одбране: _____

МОДЕЛ ЗА АНАЛИЗУ БРЗИНЕ СЛОБОДНОГ ТОКА У ФУНКЦИЈИ КЛАСЕ ДВОТРАЧНОГ ПУТА

Сажетак: Слободна брзина тока има велики значај у саобраћајном инжењерству као један од кључних улазних параметара за прорачун капацитета и нивоа услуге, пројектовање путева, планирање и управљање саобраћајем и израду студија оправданости. Препоруке бројних приручника говоре о потребама мерења слободне брзине на терену, али такође предлажу аналитичке моделе у ситуацијама када мерење није могуће. Специфични услови у саобраћајном току узрокују највише потешкоћа приликом одређивања слободне брзине на ванградским двотрачним путевима. Разлог за то може се пронаћи у чињеници да постојећи модели не узимају у обзир разлику у функцији коју двотрачни путеви имају у мрежи, већ нуде јединствени модел за прорачун слободне брзине. Поставља се теоријски осетљиво питање одређивања границе слободног и нормалног (стабилног) тока, односно где пораст интеракције између возила изазива прелазак слободне у брзину стабилног тока. Како би се испитала граница слободног тока на двотрачним путевима различите функције у мрежи, одабран је параметар интервала слеђења возила у току. Истраживање је обухватило две класе деоница ванградских двотрачних путева опремљених аутоматским бројачима саобраћаја, а обрађени су подаци за преко 190.000 возила. Добијени резултати од 6,3 s за путеве I класе и 8,4 s за путеве II класе показују постојање разлике у условима у саобраћајном току који владају на различитим класама ванградских двотрачних путева. С обзиром на потврђене разлике у условима у саобраћајном току, приступило се креирању оригиналних аналитичких модела за прорачун слободне брзине ванградских двотрачних путева наведених класа. Моделима развијеним применом постепене (*Stepwise*) методе линеарне регресије потврђен је утицај ограничења брзине, радијуса хоризонталне кривине и ширине банке на слободну брзину.

Ограничење брзине, постављено у складу са геометријским карактеристикама пута и окружења, значајно доприноси поузданости аналитичких модела за анализу слободне брзине. Међутим, у случају када то није испуњено, односно када постављено ограничење није одговарајуће или кредибилно, може представљати отежавајући фактор при прорачуну слободне брзине због значајног одступања од реалних услова у саобраћајном току. Такође, слободна брзина је један од кључних индикатора кредибилитета ограничења брзина јер представља директан показатељ конзистентности пројектних елемената пута. Наиме, велика разлика између слободне и ограничене брзине доводи до значајног повећања прекорачења брзина и ремети хармонизацију брзина возила у току, погоршавајући тиме капацитет и ниво услуге, али и безбедност саобраћаја. Због тога је у оквиру ове дисертације спроведено истраживање на хомогеним одсецима деоница двотрачних путева I реда опремљених аутоматским бројачима саобраћаја, са циљем да се испита заједнички утицај разлике слободне и ограничене брзине, процента прекорачења брзине, дисперзије брзине, експлоатационе брзине, просечног годишњег дневног саобраћаја (ПГДС) и удела теретних возила на настанак саобраћајних незгода. Применом генерализованих линеарних модела развијена су три негативна биномна регресиона модела са *ln link* функцијом за укупан број саобраћајних незгода, за незгоде са материјалном штетом и незгоде са настрадалим лицима. Резултати потврђују да пораст разлике слободне и ограничене брзине доводи до раста броја саобраћајних незгода са адекватном статистичком значајношћу, чиме се овај показатељ истиче као подобан за оцену кредибилитета ограничења брзине. Истоветни закључци односе се и на дисперзију брзине и ПГДС. Удео тешких возила у саобраћајном току има статистички значајан позитиван утицај код незгода са настрадалим лицима и укупног броја саобраћајних незгода.

Појавом критичних вредности геометријских елемената пута погоршавају се услови у саобраћајном току, а посебно изазовна карактеристика је критични уздужни нагиб. Повећањем вредности и дужине нагиба долази до раста одступања брзина возила и захтева за претицањем, посебно ако су у току присутна теретна возила и аутобуси. Узимајући у обзир утицај уздужног нагиба, уочена је потреба за анализом одступања брзине слободног тока од ограничене брзине на деоницама двотрачних путева са различитим вредностима успона и пада. Резултати добијени развијеним детерминистичким математичким моделима показују да са растом уздужног нагиба долази до повећања одступања слободне од ограничене брзине, као и да се одступање разликује у зависности од категорије возила. Такође, показује се да је разлика од 10 km/h одговарајућа великој већини возача у току, што може представљати оријентациони оквир приликом анализе кредибилитета ограничења брзина. Добијене вредности прекорачења брзине приближне су вредностима 85. перцентила одступања на анализираним одсечима.

Кључне речи: слободна брзина, ванградски двотрачни путеви, интервал слеђења возила, ограничење брзине, кредибилитет ограничења брзине, уздужни нагиб

Научна област: Саобраћајно инжењерство

Ужа научна област: Теорија саобраћајног тока, капацитет и вредновање друмских саобраћајница

УДК број:

MODEL FOR THE FREE-FLOW SPEED ANALYSIS AS A FUNCTION OF THE TWO-LANE ROAD CLASS

Abstract: Free-flow speed has a major significance in traffic engineering as one of the central input parameters for calculating the capacity and level of service, road design, traffic planning and traffic management, as well as writing feasibility studies. Various manuals recommend field measurements of free-flow speed, but they also suggest analytical models in the cases when measurements cannot be conducted. Specific conditions in the traffic flow cause the largest number of difficulties in determining free-flow speed on two-lane rural roads. This can be explained by the fact that the existing models do not consider different functions of two-lane roads in the network. On the contrary, they offer a single model for free-flow speed calculation. This raises the theoretically sensitive issue of determining the threshold of the free and normal (stable) flow, i.e. defining at which point the increase in vehicle interaction transforms free-flow speed into stable flow speed. The parameter of vehicle time headway in the flow was selected for examining the free flow threshold on two-lane roads with different functions in the network. The research included sections belonging to two classes of two-lane rural roads equipped with automatic traffic counters. The data for more than 190,000 vehicles were processed. The obtained results (6.3 s for Class I roads and 8.4 s for Class II roads) indicated that there were differences in the traffic flow conditions on different classes of two-lane rural roads. Bearing in mind the established different conditions in the traffic flow, the author started creating analytical models for calculating free-flow speed on Class I and Class II two-lane rural roads. The models developed by applying the stepwise method of linear regression confirmed the impact of speed limit, horizontal curve radius and shoulder width on free-flow speed.

Speed limit, posted in concordance with the geometric characteristics of the road and environment, contributes substantially to the accuracy of analytical models for analysing free-flow speed. However, in the situations when the above-mentioned is not realised, i.e. when the posted speed limit is not suitable or credible, it might be difficult to calculate free-flow speed due to notable deviations from the actual traffic flow conditions. In addition, free-flow speed is one of the main indicators of speed limit credibility since it directly shows the consistency of the road design elements. Namely, large differences between free-flow speed and speed limit significantly increase exceeding the speed limit and disrupt speed harmonisation in the flow, thus deteriorating the capacity and level of service as well as traffic safety. Therefore, this dissertation includes the research on homogeneous segments of the sections of Class I two-lane roads equipped with automatic counters, with the aim of examining the mutual impact of the difference between free-flow speed and speed limit, percentage of exceeding the speed limit, speed variance, operating speed, average annual daily traffic (AADT) and share of heavy vehicles on traffic accident occurrence. Applying generalised linear models, three negative binomial regression models with an ln link function were developed for the total traffic accident number, property damage only accidents and accidents with injuries and fatalities. The results indicate that the rise of the difference between free-flow speed and speed limit leads to the increased traffic accident number with appropriate statistical significance. Consequently, this indicator is suitable for estimating speed limit credibility. The same conclusions were reached for speed variance and AADT. The share of heavy vehicles in the traffic flow has a statistically significant positive impact on traffic accidents with injuries and fatalities and on the total traffic accident number.

The emergence of critical values of road geometric characteristics degrades the conditions in the traffic flow. Critical longitudinal grade represents a particularly challenging feature. The increase in the grade's value and length leads to greater deviations of vehicle speeds and overtaking requirements, particularly if heavy vehicles and buses are present in the flow. Bearing in mind the impact of longitudinal grade, the author concluded that it was required to analyse the deviation of free-flow speed from the speed limit on the sections of two-lane roads with different upgrade and

downgrade values. The results obtained in the developed deterministic mathematical models show that the rise of longitudinal grade leads to greater free-flow speed deviations from the speed limit, and that the deviations differ depending on the vehicle category. In addition, the 10 km/h difference was proved to be suitable for the majority of drivers in the flow, which can represent a starting point when analysing speed limit credibility. The obtained values of exceeding the speed limit are close to the 85th percentile of deviations on the analysed segments.

Key words: free-flow speed, rural two-lane roads, time headway, speed limit, speed limit credibility, longitudinal grade

Scientific field: Traffic Engineering

Scientific subfield: Traffic flow theory, capacity and valuation of roads

UDC number:

Садржај

1. Увод	1
1.1. Мотив за избор теме	1
1.2. Предмет и научни циљ истраживања.....	2
1.3. Основне хипотезе.....	3
1.4. Научне методе истраживања	3
1.5. Приказ садржаја докторске дисертације.....	4
2. Историјски развој брзине као параметра саобраћајног тока	6
2.1. Преглед почетних истраживања.....	6
2.2. Амерички Приручник за капацитет путева (НСМ, 1950)	8
2.3. Амерички Приручник за капацитет путева (НСМ, 1965)	12
2.4. Амерички Приручник за капацитет путева (НСМ, 1985)	16
2.5. Допуњено издање америчког Приручника за капацитет путева (НСМ, 1994)	19
2.6. Амерички Приручник за капацитет путева (НСМ, 2000)	20
2.7. Амерички Приручник за капацитет путева (НСМ, 2010)	24
2.8. Амерички Приручник за капацитет путева (НСМ, 2016)	25
3. Развој модела за одређивање слободне брзине тока	28
3.1. Дефинисање слободне брзине и опис проблема при прорачуну.....	28
3.2. Функционална класификација и категоризација државних путева	31
3.3. Утврђивање слободне брзине на двотрачним путевима	36
3.3. Преглед литературе.....	38
3.3.1. Анализа граничне вредности слободног тока	38
3.3.2. Анализа утицајних фактора на брзину слободног тока	40
3.3.3. Рекапитулација закључака досадашњих истраживања о брзини слободног тока...	43
3.4. Методологија истраживања	44
3.4.1. Методологија прикупљања података.....	44
3.4.2. Анализа граничне вредности слободног тока	47
3.4.3. Анализа утицајних фактора на брзину слободног тока	48
3.5. Анализа и синтеза резултата.....	49
3.5.1. Анализа граничне вредности слободног тока	49
3.5.2. Анализа утицајних фактора на брзину слободног тока	51
3.5.3. Валидација модела за одређивање брзине слободног тока.....	52
3.6. Дискусија добијених резултата	54
3.6.1. Анализа граничне вредности слободног тока	54
3.6.2. Анализа утицајних фактора на брзину слободног тока	55

4. Испитивање кредибилитета ограничења брзине на основу брзине слободног тока	57
4.1 Дефинисање кредибилитета ограничења брзине и утицаја на услове у саобраћајном току.....	57
4.2 Методологија истраживања	61
4.2.1. Методологија прикупљања података.....	61
4.2.2. Статистичка анализа.....	63
4.3 Анализа и синтеза резултата.....	64
4.3.1. Укупан број саобраћајних незгода.....	64
4.3.2. Незгоде са материјалном штетом.....	65
4.3.3. Незгоде са настрадалима.....	66
4.4 Дискусија добијених резултата	67
5. Испитивање кредибилитета ограничења брзине на деоницама двотрачног пута са уздужним нагибом.....	69
5.1. Специфичност услова у саобраћајном току на двотрачним путевима са уздужним нагибом	69
5.2. Дефинисање проблема одступања слободне од ограничене брзине на одсечима са уздужним нагибом	72
5.3. Методологија истраживања	73
5.4. Анализа и синтеза резултата.....	77
5.5. Валидација (поређење) резултата модела.....	81
5.6. Дискусија добијених резултата	83
6. Закључна разматрања и правци будућих истраживања.....	85
Литература	90
Биографија аутора	96

Списак табела

Табела 3.1. Опсег вредности основних геометријских карактеристика анализираних утицајних зона АБС	45
Табела 3.2. Резултати теста мултиколинеарности	48
Табела 3.3. Коefицијенти корелације брзина узастопних возила по дефинисаним групама временских интервала слеђења на ванградским двотрачним путевима I и II класе	49
Табела 3.4. Модели линеарне регресије повезаности слободне брзине и геометријских карактеристика деонице	51
Табела 4.1. Опсег вредности основних геометријских карактеристика анализираних утицајних зона АБС	62
Табела 4.2. Дескриптивна статистика зависних променљивих	63
Табела 4.3. Оцена параметара модела укупног броја саобраћајних незгода за анализирани временски период	64
Табела 4.4. Оцена параметара модела саобраћајних незгода са материјалном штетом за анализирани временски период	65
Табела 4.5. Оцена параметара модела саобраћајних незгода са настрадалима за анализирани временски период	66
Табела 5.1. Основне карактеристике истраживања	74
Табела 5.2. Процент прекорачења брзине у функцији разлике слободне и ограничене брзине	75
Табела 5.3. Вредности K и U за одређени ниво поузданости	76
Табела 5.4. Потребна и довољна величина узорка за прихватљиву вредност одступања од $e=1 \text{ km/h}$	76
Табела 5.5. Потребна и довољна величина узорка за прихватљиву вредност одступања од $e=1 \text{ km/h}$	76
Табела 5.6. Емпиријски математички модели функционалне зависности одступања брзине од уздужног нагиба	79
Табела 5.7. Аналитички модел 15%, 50% и 85% одступања слободне од ограничене брзине на двотрачним путевима	81

Списак слика

Слика 2.1. Слика са истраживања: употреба камере Simplex 16 mm (Greenshields et al., 1935)	6
Слика 2.2. Однос брзине и „густине“ у возилима на час (протока) на двотрачним путевима (Greenshields et al., 1935)	7
Слика 2.3. Однос брзине (миља на час) и густине на двотрачним путевима (Greenshields et al., 1935)	7
Слика 2.4. Дистрибуција брзине возила (миља на час) у слободном току на деоницама двотрачних путева на равном терену у правцу (НСМ, 1950)	9
Слика 2.5. Просечне брзине возила у току (миља на час) на деоницама двотрачних путева на равном терену у правцу (НСМ, 1950)	9
Слика 2.6. Дистрибуција брзина возила у току (миља на час) при различитим вредностима часовног протока на деоницама двотрачних путева на равном терену у правцу (НСМ, 1950)	10
Слика 2.7. Зависност брзине и разлике у брзинама возила у току при различитим вредностима часовног протока по смеру четворотрачног пута са разделним острвом (НСМ, 1950)	11
Слика 2.8. Промена карактеристика брзине возила у току при различитим вредностима интервала слеђења на двотрачним путевима (НСМ, 1950)	12
Слика 2.9. Однос протока и брзине у једној траци ауто-пута при идеалним условима у саобраћајном току (НСМ, 1965)	13
Слика 2.10. Однос протока и брзине у једној траци ванградског вишетрачног пута при идеалним условима у саобраћајном току (НСМ, 1965)	13
Слика 2.11. Однос протока и брзине у оба смера ванградског двотрачног пута при идеалним условима у саобраћајном току (НСМ, 1965)	14
Слика 2.12. Зависност односа протока и капацитета (q/C) и брзине у посматраном смеру ауто-пута при условима непрекинутог тока (НСМ, 1965)	15
Слика 2.13. Зависност односа протока и капацитета (q/C) и брзине у оба смера двотрачног пута са просечном слободном брзином од 70 mi/h (113 km/h) при условима непрекинутог тока (НСМ, 1965)	15
Слика 2.14. Зависност односа протока и капацитета (q/C) и брзине у оба смера двотрачног пута са просечном слободном брзином од 35 mi/h (56 km/h) при условима непрекинутог тока (НСМ, 1965)	16
Слика 2.15. Зависност брзине од протока на основном одсеку ауто-пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 1985)	17
Слика 2.16. Зависност густине од протока на основном одсеку ауто-пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 1985)	17
Слика 2.17. Зависност брзине од протока на основном одсеку двотрачног пута при условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 1985)	18
Слика 2.18. Зависност брзине од протока на основном одсеку ауто-пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 1994)	19
Слика 2.19. Зависност брзине од протока на основном одсеку ауто-пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2000)	21
Слика 2.20. Зависност брзине од односа протока и капацитета на основном одсеку ауто-пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2000)	21
Слика 2.21. Зависност брзине од протока на основном одсеку вишетрачног пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2000)	22
Слика 2.22. Зависност брзине од протока у посматраном смеру основног одсека двотрачног пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2000)	23

Слика 2.23. Зависност процента временских застоја од протока у посматраном и супротном смеру основног одсека двотрачног пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2000)	24
Слика 2.24. Зависност брзине од протока на основном одсеку ауто-пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2010)	25
Слика 2.25. Зависност брзине од протока на основном одсеку ауто-пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2016)	26
Слика 2.26. Зависност брзине од протока на основном одсеку вишетрачног пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2016).....	26
Слика 2.27. Зависност брзине од протока у посматраном смеру основног одсека двотрачног пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2016)	27
Слика 3.1. Врсте и типови путева према функционалној класификацији (Tubić & Maletin, 2008)	32
Слика 3.2. Веза категорије путева према административној и функционалној класификацији (Tubić & Maletin, 2008)	33
Слика 3.3. Основне планерске карактеристике функционалних типова ванградских путева (Tubić & Maletin, 2008).....	33
Слика 3.4. Саобраћајна тежишта и саобраћајне функције на територији Србије (Maletin & Tubić, 2012).....	34
Слика 3.5. Предлог мреже државних путева I реда Републике Србије, без АП КиМ (Maletin & Tubić, 2012).....	35
Слика 3.6. Пример података са АБС-а који показују: редни број возила по смеру, датум, време наиласка возила, смер кретања, категорију возила, брзину [km/h] и дужину возила [cm]	44
Слика 3.7. Пример утицајне зоне АБС: АБС 1222 (зелена тачка) на деоници државног пута IБ реда са бројем 02305 (Stepanović et al., 2023).....	45
Слика 3.8. Пример положаја АБС на деоници ванградског двотрачног пута I класе (Google Maps)	46
Слика 3.9. Пример положаја АБС на деоници ванградског двотрачног пута II класе (Google Maps)	46
Слика 3.10. Расподела брзина свих возила измерених аутоматским бројачима саобраћаја на ванградским двотрачним путевима I и II класе (Stepanović et al., 2023).....	47
Слика 3.11. Вредности корелације за сваку дефинисану групу временског интервала слеђења (Stepanović et al., 2023)	49
Слика 3.12. Регресионе криве вредности корелације за дефинисане групе возила са интервалима слеђења испод и изнад граничне вредности на двотрачним путевима I класе (Stepanović et al., 2023)	50
Слика 3.13. Регресионе криве вредности корелације за дефинисане групе возила са интервалима слеђења испод и изнад граничне вредности на двотрачним путевима II класе (Stepanović et al., 2023)	50
Слика 3.14. Боксплотови (енгл. <i>boxplot</i>) утврђивања слободне брзине различитим методама на двотрачним путевима I класе (Stepanović et al., 2023).....	53
Слика 3.15. Боксплотови (енгл. <i>boxplot</i>) утврђивања слободне брзине различитим методама на двотрачним путевима II класе (Stepanović et al., 2023)	53
Слика 4.1. Просторна расподела саобраћајних незгода (црвене тачке) у утицајној зони АБС-а 1122 (зелена тачка) на деоници државног пут IБ реда 02211	63
Слика 5.1. Просечна брзина путничких возила на деоници двотрачног пута класе успона 2 (HBS, 2015)	70

Слика 5.2. Просечна брзина путничких возила на деоници двотрачног пута класе успона 4 (HBS, 2015).....	70
Слика 5.3. Промена брзине меродавног теретног возила у функцији уздужног нагиба (Кои & Срасек, 2005).....	71
Слика 5.4. Промена брзине меродавног теретног возила у функцији уздужног нагиба (НСМ, 2010).....	71
Слика 5.5. Локација мерних одсека (Subotić et al., 2022).....	74
Слика 5.6. Пример релативне фреквенције добијених вредности одступања слободне од ограничене брзине свих возила у саобраћајном току (Subotić et al., 2022).....	78
Слика 5.7. Пример кумулативне релативне фреквенције добијених вредности одступања брзина од ограничене за сва возила у саобраћајном току (Subotić et al., 2022).....	78
Слика 5.8. Одступање брзина саобраћајног тока у функцији уздужног нагиба (Subotić et al., 2022).....	80
Слика 5.9. 15-и, 50-и и 85-и перцентил одступања слободних брзина у функцији уздужног нагиба (Subotić et al., 2022).....	80
Слика 5.10. Упоредни приказ одступања слободне од ограничене брзине за путничке аутомобиле у Србији и БиХ (Subotić et al., 2022).....	81
Слика 5.11. Упоредни приказ одступања слободне од ограничене брзине за тешка возила у Србији и БиХ (Subotić et al., 2022).....	82

1. Увод

1.1. Мотив за избор теме

Од настанка теорије саобраћајног тока као научне дисциплине тридесетих година прошлог века, брзина је основни параметар и саставни део математичких модела за описивање услова у саобраћајном току. Због неизоставног присуства у свим анализама које се тичу саобраћајног тока, брзина од најранијих дана стиче статус једног од базних параметара саобраћајног тока, што траје до данашњих дана. Константним порастом броја возила на мрежи, квантитативном и квалитативном напретку у научним истраживањима, усавршавањем начина прикупљања и доступношћу велике количине података долази до развоја знања о овом параметру. Тако су се карактеристичне вредности брзине, врста зависности између осталих параметара, употреба у бројним моделима мењали са развојем теорије саобраћајног тока, али је значај брзине перманентно растао. Изузетан теоријски свакако прати и практични значај брзине, који се огледа, кроз анализе капацитета и нивоа услуге свих елемената инфраструктуре, у планирању и пројектовању путева и улица, изради студија оправданости, управљању саобраћајем, анализама безбедности саобраћаја итд. Због тога данас постоје различити аспекти брзине, чија примена зависи од потреба које изискују специфичне анализе. Тако се за потребе теоријских истраживања често користе средња просторна и средња временска брзина, слободна брзина и брзина засићеног тока, док се при емпиријским истраживањима мере односно анализирају реална слободна брзина, експлоатациона брзина путничких аутомобила или целог тока, брзина при капацитету, 85. перцентил брзине, рачунска и пројектна брзина итд.

Као што се из претходног може уочити, брзина слободног тока има велики значај приликом теоријских и практичних анализа у саобраћајном инжењерству, било да је реч о базној или реалној слободној брзини. Не постоји јединствена дефиниција слободне брзине, али се она у теоријском смислу може дефинисати као средња просторна брзина возила на деоници пута када густина и проток теже нули (НСМ, 2016). Другим речима, слободна брзина представља средњу вредност брзине возила у слободном току, која је условљена пре свега геометријским карактеристикама пута, али и карактеристикама возила, возача и окружења, без међусобне интеракције између возила. Веома осетљиво питање које утиче на одређивање границе слободног тока је пораст интеракције између возила и прелазак слободне у брзину стабилног тока. Наиме, ради прецизног утврђивања слободне брзине неопходно је егзактно дефинисање граничне вредности између слободног и нормалног (стабилног) саобраћајног тока. У првим истраживањима (Greenshields et al., 1935) параметар протока возила детектован је као одговарајући за тако нешто, док су каснија истраживања (НСМ, 1950) увидела могућност примене временског интервала слеђења возила. С обзиром на високу осетљивост граничних вредности протока слободног тока на временску неравномерност наиласка возила, као најпогоднији параметар за дефинисање ове границе издвојио се временски интервал слеђења возила. Међутим, као отворено питање у досадашњим истраживањима остала је чињеница да није дефинисана јединствена гранична вредност интервала слеђења, већ постоји велики распон у препорученим вредностима овог параметра. Непрецизне граничне вредности интервала слеђења знатно отежавају прорачун слободних брзина, што представља проблем приликом анализе услова у саобраћајном току. Наиме, слободна брзина је незаобилазни део свих постојећих модела за анализу експлоатационих (реалних) брзина, односно представља полазну основу за прорачун капацитета и нивоа услуге путева.

Највећи проблем за одређивање границе слободног тока и егзистирања слободне брзине јавља се на ванградским двотрачним путевима, као резултат специфичних услова у току који

владају на овом типу путева. Посебно се наведени проблем повећава са маневром претицања, који се код двотрачних путева обавља у траци намењеној за кретање возила у супротном смеру. Однос захтева и могућности за претицањем директно зависи од величине и односа протока по смеровима, што усложњава претходно наведено утврђивање граничног интервала слеђења возила у слободном току и слободне брзине. Управо због тога је у претходном периоду, као резултат бројних научних истраживања, развијен знатан број модела за прорачун слободне брзине, међу којима се посебно истиче модел интегрисан у најкоришћенијем приручнику за анализу капацитета и нивоа услуге – НСМ (*Highway Capacity Manual*). Овај модел предвиђа прорачун реалне слободне брзине на основу базне слободне брзине, коју поистовећује са пројектном брзином деонице. У случају недостатка података о пројектној брзини, препорука се односи на додавање фиксне вредности брзине на вредност ограничене брзине на анализираној деоници, без обзира на класу пута којој та деоница припада. Овакав униформни приступ за прорачун слободне брзине, који не узима у обзир функцију пута у мрежи, односно разлике које се могу јавити по различитим класама путева, доприноси непрецизностима у прорачуну капацитета и експлоатационе брзине тока. На овај начин се кумулантом мањих непрецизности могу генерисати значајне грешке у прорачунима, а самим тим и у неадекватним мерама у управљању саобраћајем, развоју и експлоатацији путева. Сходно томе, јасна је потреба за развојем нових модела за прорачун слободне брзине који ће узети у обзир функционалне специфичности различитих класа ванградских двотрачних путева, геометријске карактеристике деонице и вредности ограничења брзина.

Претходно наведени проблеми постају још израженији када постављена ограничења брзине нису у корелацији са слободном брзином тока. Ради обезбеђивања ефикасне мобилности становништва, транспорта робе, оптималне потрошње горива и емисије издувних гасова, као и безбедности саобраћаја, ограничења брзине морају одговарати геометријским карактеристикама пута, категорији и функцији пута у мрежи, односно морају бити кредибилна. У случају некредибилних ограничења брзине возачи их у великој мери неће поштовати и могу изгубити поверење у целокупан систем управљања брзинама (Goldenbeld & Van Schagen, 2007). Слободна брзина је један од кључних показатеља кредибилитета ограничења брзина, јер представља директан показатељ конзистентности пројектних елемената пута. Наиме, велика разлика између слободне и ограничене брзине доводи до значајног повећања прекорачења брзина и ремети хармонизацију брзина возила у току, погоршавајући тиме капацитет и ниво услуге, али и безбедност саобраћаја. То се посебно може истаћи за одсеке ванградских двотрачних путева са специфичним геометријским карактеристикама, попут критичног уздужног нагиба. У случајевима значајнијег присуства теретних возила различитих категорија и аутобуса на оваквим одсечима, пре свега због својих специфичности у погледу димензија и лошијих возно-динамичких карактеристика, долази до пада брзине целог тока, али и до раста дисперзије брзине и захтева за претицањем. Због тога утицај ограничених брзина исказан кроз слободну брзину и одступање од исте може имати велике последице по услове у саобраћајном току. На основу свега наведеног, може се закључити да је неопходно развити модел који ће квантификовати утицај слободне брзине на кредибилитет ограничених брзина.

1.2. Предмет и научни циљ истраживања

Брзина као параметар саобраћајног тока, а пре свега слободна брзина, има велики значај у савременим анализама услова у саобраћајном току, методолошким основама студија оправданости, анализама кредибилитета ограничења брзина и саобраћајном инжењерству уопште. Иако представља један од параметара који је до сада највише истраживан, у

литератури не постоје примери прецизних модела за прорачун слободних брзина у функцији класе двотрачног пута, као ни за анализу утицаја слободне на ограничену брзину.

У складу са тим, предмет ове дисертације чине:

- анализа брзине као параметра саобраћајног тока;
- анализа граничних вредности слободног тока на основу интервала слеђења возила у току;
- преглед актуелних модела за прорачун слободних брзина на ванградским двотрачним путевима ради сагледавања постојећих проблема и проналажења начина за унапређење истих;
- утврђивање утицаја односа слободне и ограничене брзине ради испитивања кредибилитета ограничене брзине на деоницама ванградских двотрачних путева;
- анализа кредибилитета брзина на деоницама са критичним уздужним нагибима, као и дисперзије брзина по различитим категоријама возила.

Научни циљеви дисертације су:

- квантификовање граничних вредности интервала слеђења слободног тока у функцији класе ванградског двотрачног пута;
- развој модела за прорачун слободних брзина различитих класа ванградских двотрачних путева како би се омогућио прецизнији прорачун експлоатационих брзина, а тиме и капацитета и нивоа услуге и осталих анализа у саобраћајном инжењерству;
- утврђивање утицаја слободне брзине на ограничену брзину на ванградским двотрачним путевима;
- развој модела за испитивање одступања слободне брзине различитих категорија возила у функцији уздужног нагиба ради дефинисања кредибилних ограничене брзине.

1.3. Основне хипотезе

Докторска дисертација заступа полазну хипотезу да **различите класе ванградског двотрачног пута имају различит утицај на слободну брзину тока**. Помоћне хипотезе ове докторске дисертације су да:

- гранична вредност интервала слеђења слободног тока на ванградским двотрачним путевима зависи од класе којој пут припада;
- промена вредности уздужног нагиба доводи до различитог одступања брзине различитих категорија возила у току у односу на вредност ограничене брзине;
- већа разлика између слободне и ограничене брзине, као и већа дисперзија брзина у току узрокује раст броја инцидентних ситуација.

1.4. Научне методе истраживања

С обзиром на то да је тема дисертације везана за параметар слободне брзине тока и временских интервала слеђења, ради добијања валидних закључака неопходно је прикупљање и обрада великог броја података. Оптималан начин за прикупљање података такве врсте на ванградској мрежи јесу аутоматски бројачи саобраћаја (АБС), који осим што снимају параметре саобраћајног тока континуално целе године, немају утицај на промену понашања код возача из страха од репресивних мера. Због тога су за истраживања у дисертацији коришћени управо подаци са ових уређаја, а на местима где то није могуће –

ручни радар. Коришћене су бројне базе података попут базе података о бројању саобраћаја, базе података о карактеристикама путне мреже, базе података о обележјима безбедности саобраћаја итд. За обраду овако велике количине података коришћени су програмски пакети SQL и Microsoft Excel, а за статистичку анализу SPSS и TableCurve.

За анализу података и развој модела који су наведени као основни циљеви истраживања у оквиру ове докторске дисертације коришћене су методе аналитичке и дескриптивне статистике, попут генерализованих линеарних модела, линеарне регресије – тзв. *Stepwise* методе, али и вишестепених математичких модела.

1.5. Приказ садржаја докторске дисертације

Докторска дисертација садржи следећа поглавља, у складу са дефинисаним циљевима:

1. **Увод** – дефинисање проблема и образложење мотива за избор теме, предмета и циљева истраживања; објашњење основних хипотеза.
2. **Историјски развој брзине као параметра саобраћајног тока** – преглед значаја брзине као параметра саобраћајног тока, од првих истраживања до данашњих дана, са акцентом на ретроспективу развоја овог параметра у најкоришћенијим моделима за прорачун капацитета и нивоа услуге путева на којима су присутни непрекинути и неометени саобраћајни токови; овим прегледом омогућава се схватање важности овог параметра и начин на који промене његове перцепције у анализама утичу на резултате анализа услова у саобраћајном току; на основу сагледавања промена које су се догодиле и појединих ограничења током тих промена, омогућавају се закључци о смерницама даљег развоја параметра брзине тока.
3. **Развој модела за одређивање слободне брзине тока** – дефинисање брзине слободног тока и постојећих проблема који подстичу потребу за развојем нових модела за прорачун слободне брзине ванградских двотрачних путева; преглед досадашњих истраживања параметара за одређивање граничних вредности слободног тока, пре свега везаних за временски интервал слеђења возила, као теоријског предуслова за одређивање брзине слободног тока, али и постојећих модела за прорачун слободне брзине; дефинисање метода прикупљања података, узорка и математичких алата за анализу граничних вредности интервала слеђења слободног тока и модела за прорачун слободних брзина; приказ резултата емпиријских истраживања на основу којих су развијени модели за прорачун брзине слободног тока; упоређивање резултата са постојећим моделима ради валидације развијених модела.
4. **Испитивање кредибилитета ограничења брзине на основу брзине слободног тока** – објашњење појма кредибилитета ограничене брзине и могућности за испитивање на основу слободне брзине кроз приказ начела за постављање ограничења брзине, актуелних истраживања прекорачења и утицаја ограничења брзине на настанак саобраћајних незгода; дефинисање методологије истраживања са посебним акцентом на прикупљање података о карактеристикама саобраћајног тока са аутоматских бројача саобраћаја и саобраћајних незгода у утицајним зонама бројача; развој модела за предикцију незгода са различитим последицама на основу адекватних статистичких метода и алата; упоређивање резултата са резултатима досадашњих истраживања.
5. **Испитивање одступања слободне од ограничене брзине на деоницама двотрачног пута са уздужним нагибом** – дефинисање утицаја уздужног нагиба на услове у саобраћајном току и потребе за испитивањем кредибилитета ограничених брзина на овом типу пута на основу брзине слободног тока; приказ методологије

истраживања на деоницама ванградских двотрачних путева са уздужним нагибом и алата за развој детерминистичких модела за испитивање функционалне зависности одступања слободне од ограничене брзине у функцији уздужног нагиба; приказ и анализа добијених резултата.

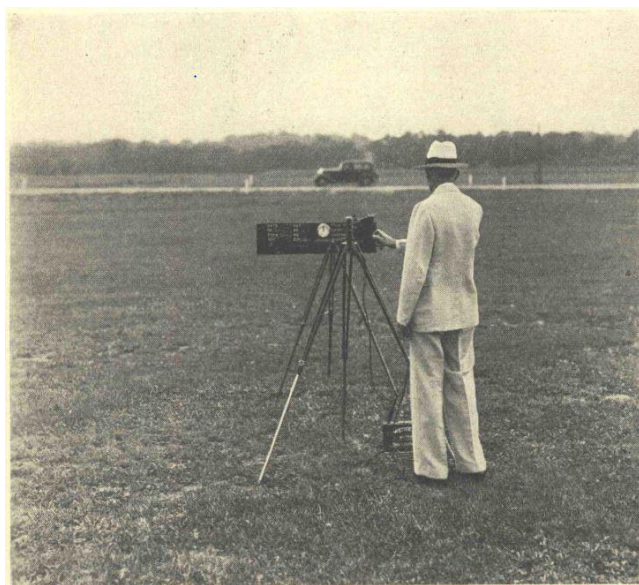
б. **Закључна разматрања и правци будућих истраживања** – рекапитулација најбитнијих резултата спроведених истраживања; образложење испуњености полазних хипотеза и циљева дисертације; отворена питања као правци за будућа истраживања.

2. Историјски развој брзине као параметра саобраћајног тока

2.1. Преглед почетних истраживања

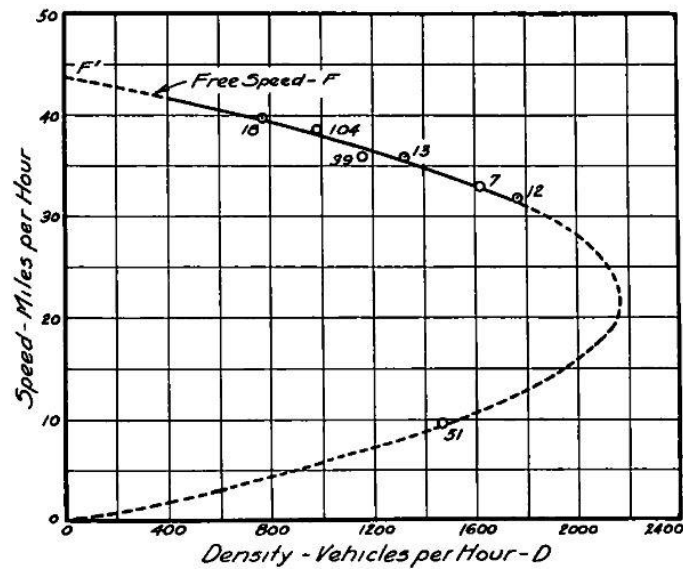
Развој брзине као параметра саобраћајног тока прати настанак и експанзију теорије саобраћајног тока као научне дисциплине. Проблеми приликом процеса транспорта људи и добара путевима постојали су и пре појаве масовне производње аутомобила, али је управо овај историјски догађај, везан за производњу Фордовог модела Т, допринео рапидном ширењу тих проблема. Наиме, они су пре овог догађаја били углавном ретка и изолована појава, па нису изазивали потребу за проналажењем начина за њихово решавање. Међутим, нагло увећавање броја аутомобила на улицама и путевима убрзало је и значајно проширило проблеме у саобраћају, тако да је до 50-их година XX века већ значајна пажња привучена покушајима решавања истих. Прва истраживања научника из различитих научних области била су везана за покушај моделовања кретања возила у саобраћајном току са крајњим циљем проналажења начина за ублажавање проблема (Gazis, 2002).

Једно од првих значајних научних истраживања спровео је Greenshields 1934. године, а тицало се проналажења приближне густине тока при капацитету, односно вредности густине при којој долази до загушења или смањења брзине тока, али и односа брзине и протока (Greenshields et al., 1935). Greenshields је још тада, спроводећи фотографску методу праћења понашања саобраћаја (Greenshields et al., 1933), свој фокус истраживања ставио на брзину, као параметар који се лако може утврђивати на терену и који има изузетан значај за описивање услова у току (Слика 2.1).

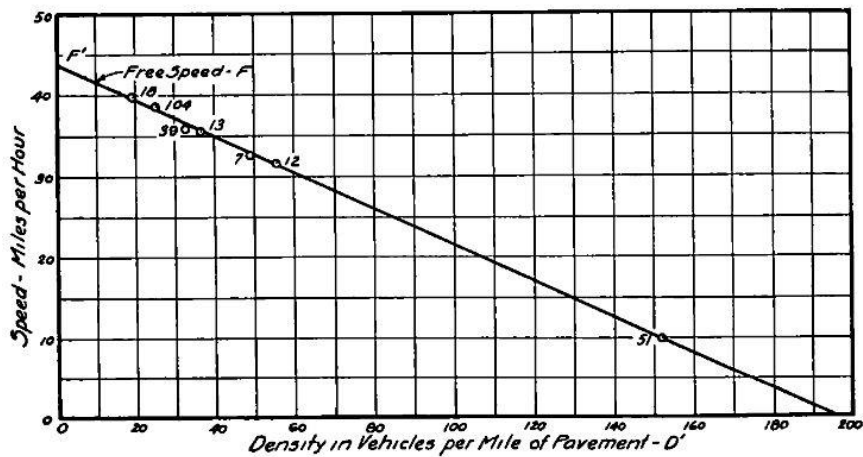


Слика 2.1. Слика са истраживања: употреба камере Simplex 16 mm (Greenshields et al., 1935)

Истраживањем су добијене добро познате релације односа брзина-проток, а на основу тога и релације брзина-густина, које су касније стекле статус основног дијаграма саобраћајног тока (Слика 2.2 и 2.3). Значај брзине је потврђен приликом испитивања претходно наведених односа, јер је још тада дефинисан параметар густине као изведена вредност односа протока и брзине. Наиме, како се у истраживању наводи, „згодно је извести густину D' у возилима по миљи, на основу густине D у возилима на час и просечне брзине у миљама на час“ (Greenshields et al., 1935).



Слика 2.2. Однос брзине и „густине“ у возилима на час (протока) на двотрачним путевима (Greenshields et al., 1935)



Слика 2.3. Однос брзине (миља на час) и густине на двотрачним путевима (Greenshields et al., 1935)

Поред уопштеног значаја брзине, посебно се истиче значај брзине слободног тока у наведеном истраживању (Greenshields et al., 1935). Наиме, на дијаграмима приказаним на Слици 2.2 и 2.3 може се приметити термин *Free Speed*. Овај термин подразумева брзину возила у слободном току, односно брзину која није под утицајем протока и густине. Greenshields et al. (1935) као неопходне податке за добијање вредности капацитета двотрачних путева наводе прорачун просечних слободних брзина и вредност смањења просечне слободне брзине узрокован порастом протока. Граница при којој настаје смањење слободне брзине још тада постаје изузетно осетљиво питање. Greenshields et al. (1935) су у истраживању приметили да када проток на двотрачним путевима достигне вредност од око 400 до 600 возила на сат, просечна брзина возила у току почиње да опада, што је означено испрекиданим линијама на дијаграму приказаном на Слици 2.2. Иако је брзина, као један од кључних параметара за утврђивање капацитета путева, испитивана и у ранијим малобројним истраживањима, нпр. Hazen et. al (1914), слободна брзина тока добија нови значај тек од истраживања Greenshields et al. (1935).

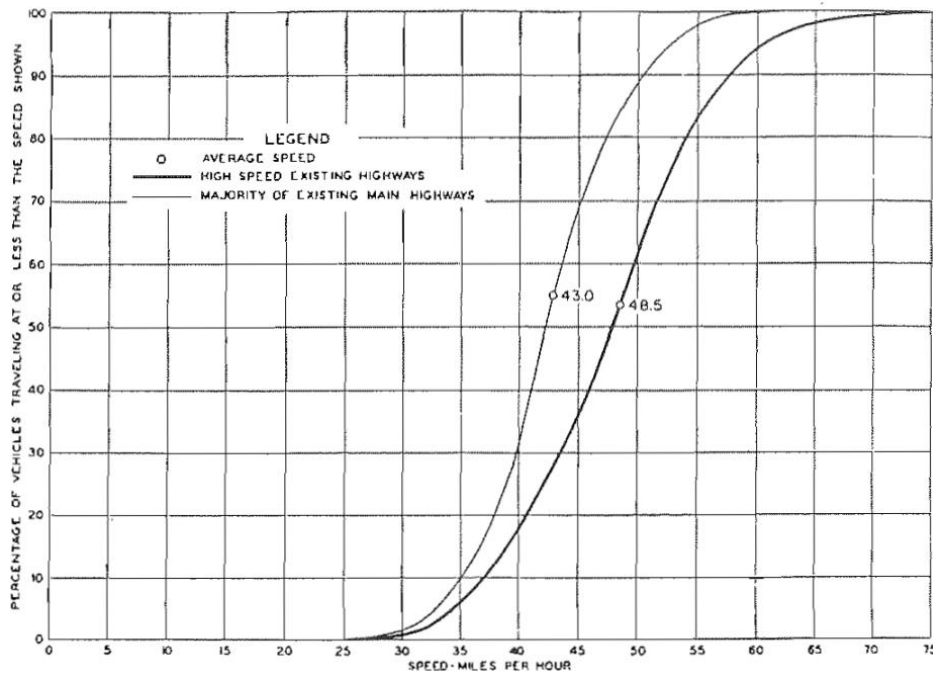
Услед избијања Другог светског рата није уочен значајнији прогрес у теорији саобраћајног тока, па самим тим ни у значају параметра брзине све до већ споменутих 50-их година XX

века (Kuzović, 1987). Од 1950. године, према ретроспективи развоја теорије саобраћајног тока (Gazis, 2002), креће значајан број истраживања. Тада настају добро позната истраживања на развоју микроскопских модела слеђења возила (Reuschel, 1950 и Pipes, 1953), развоју макроскопских модела на бази законитости континуума који се јавља у флуидима (Lighthill и Whitham, 1955), креирању математичких основа модела следи вођу (Chandler et al., 1958), конверзији микроскопских у макроскопске моделе (Gazis et al., 1959, 1961), стварању модела оптерећења мреже (Wardrop, 1952), оптимизацији рада светлосних сигнала (Webster, 1958) итд. У већини наведених, као и у сличним истраживањима која су спроведена у каснијим годинама, брзина представља једну од кључних компоненти и параметара у развијеним моделима.

Резултати наведених научних радова, који су публиковани у бројним престижним часописима или саопштени на великим међународним конференцијама, направили су велики искорак у разумевању законитости кретања возила у саобраћајном току, не само на научном (теоријском), већ и на инжењерском (практичном) плану. Тако су утврђене међузависности и релације, финални математички модели, реперне вредности различитих параметара, оптимизационе процедуре итд., експлицитно или имплицитно пронашли место у бројним светским инжењерским приручницима и уџбеницима, што је на крају и био првобитни циљ свих истраживања. Један од најкоришћенијих светских приручника за анализу капацитета и нивоа услуге, са несумњиво највећом традицијом, јесте *Highway Capacity Manual* – HCM. Овај приручник издаје TRB (*Transportation Research Board*), чија је претеча HRB (*Highway Research Board*) основан још 1920. године и као део Националне академије наука (*National Academy of Science*) задужен за истраживања везана за путеве. Управо је HRB, у блиској сарадњи са Предузећем за јавне путеве (*Bureau for Public Roads*) и великим бројем инжењера запосленим у разним предузећима, заслужан за прво издање HCM-а из 1950. године, објављено крајем 1949. године (HCM, 1950). Циљ овог приручника био је да омогући униформне, рационалне и практичне методе за утврђивање капацитета путева и улица, утемељене на бројним истраживањима, ради омогућавања егзактног дефинисања потреба за изградњом нове и унапређењем постојеће инфраструктуре. Употребна вредност овог приручника огледала се у представљеним моделима заснованим на вишегодишњим теренским истраживањима и великој количини по први пут континуално сниманих података о параметрима саобраћајног тока.

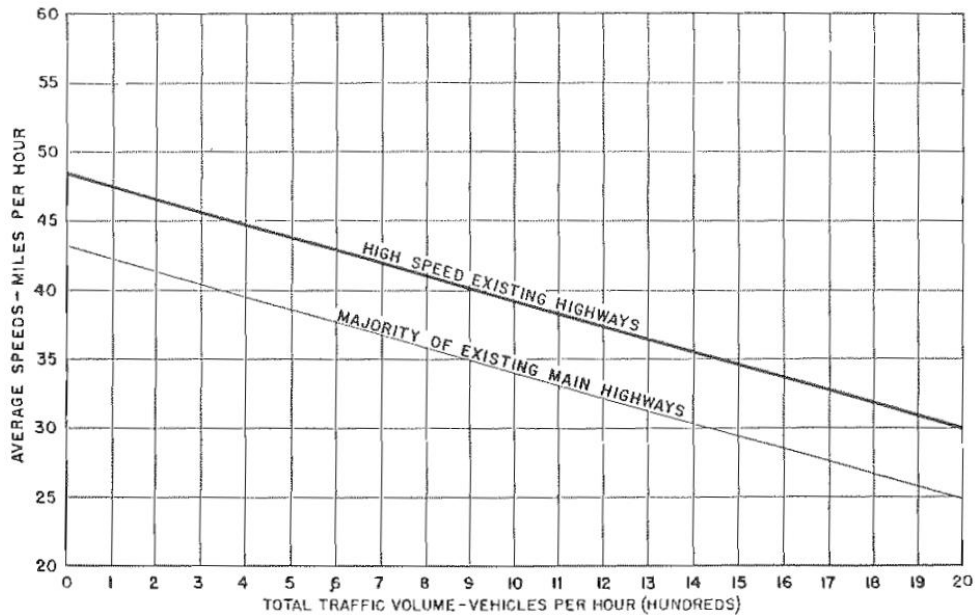
2.2. Амерички Приручник за капацитет путева (HCM, 1950)

У америчком Приручнику за капацитет путева (HCM, 1950) брзина је имала изузетно важно место. Наиме, прорачун капацитета различитих типова инфраструктуре директно је зависио од брзине, која је била предмет обимних истраживања. На основу резултата утврђено је да просечна брзина слободног тока, коју још називају жељеном брзином возача (*drivers' desired speed*) на двотрачним путевима ретко прелази 50 mi/h (80 km/h). Иако су забележене и нешто веће вредности на појединим путевима, до 58 mi/h (93 km/h), дистрибуција брзина је увек имала облик приказан на Слици 2.4.

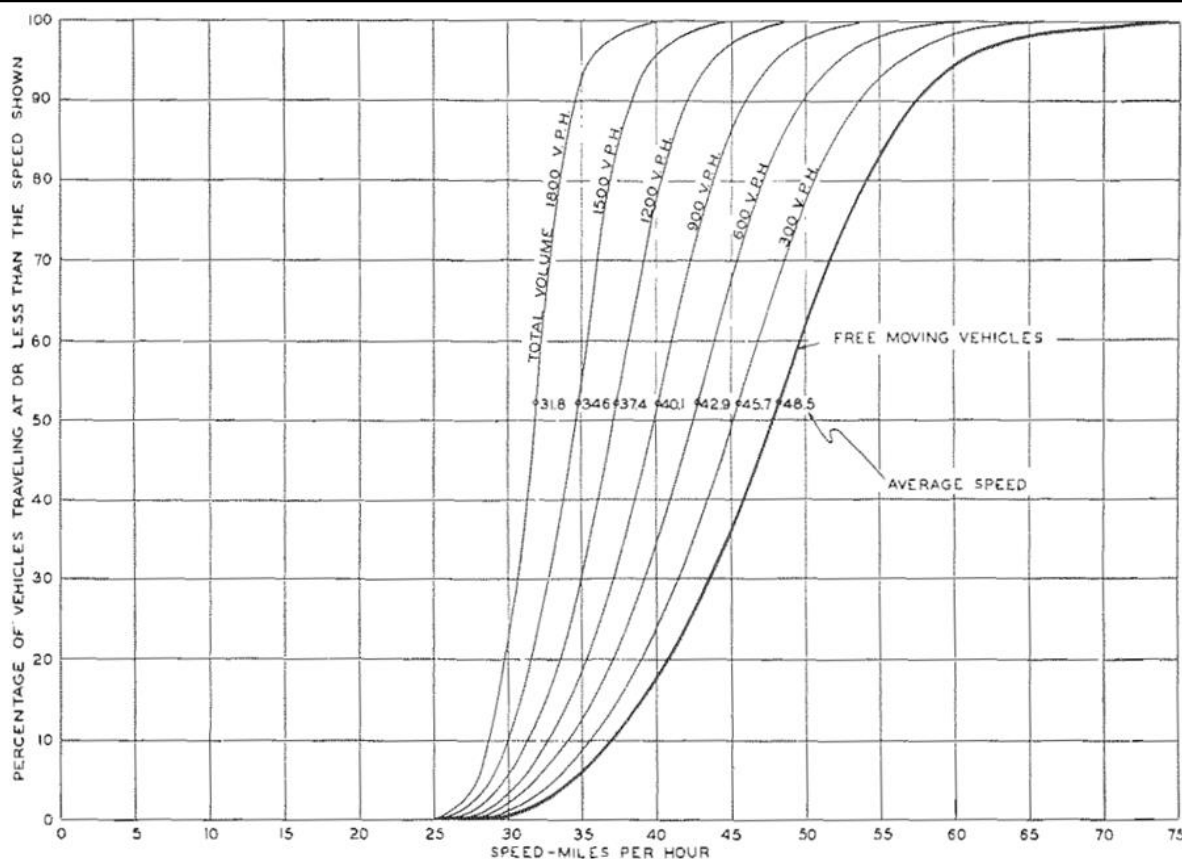


Слика 2.4. Дистрибуција брзине возила (миља на час) у слободном току на деоницама двотрачних путева на равном терену у правцу (НСМ, 1950)

Утврђено је да са растом протока долази до линеарног пада просечне брзине тока због раста интеракције између возила (Слика 2.5), али и да долази до промене дистрибуције брзина (Слика 2.6). На основу промене дистрибуције брзина и просечних брзина тока за одређене вредности протока могуће је поуздано предвидети дистрибуцију брзина и за друге вредности просечне брзине.

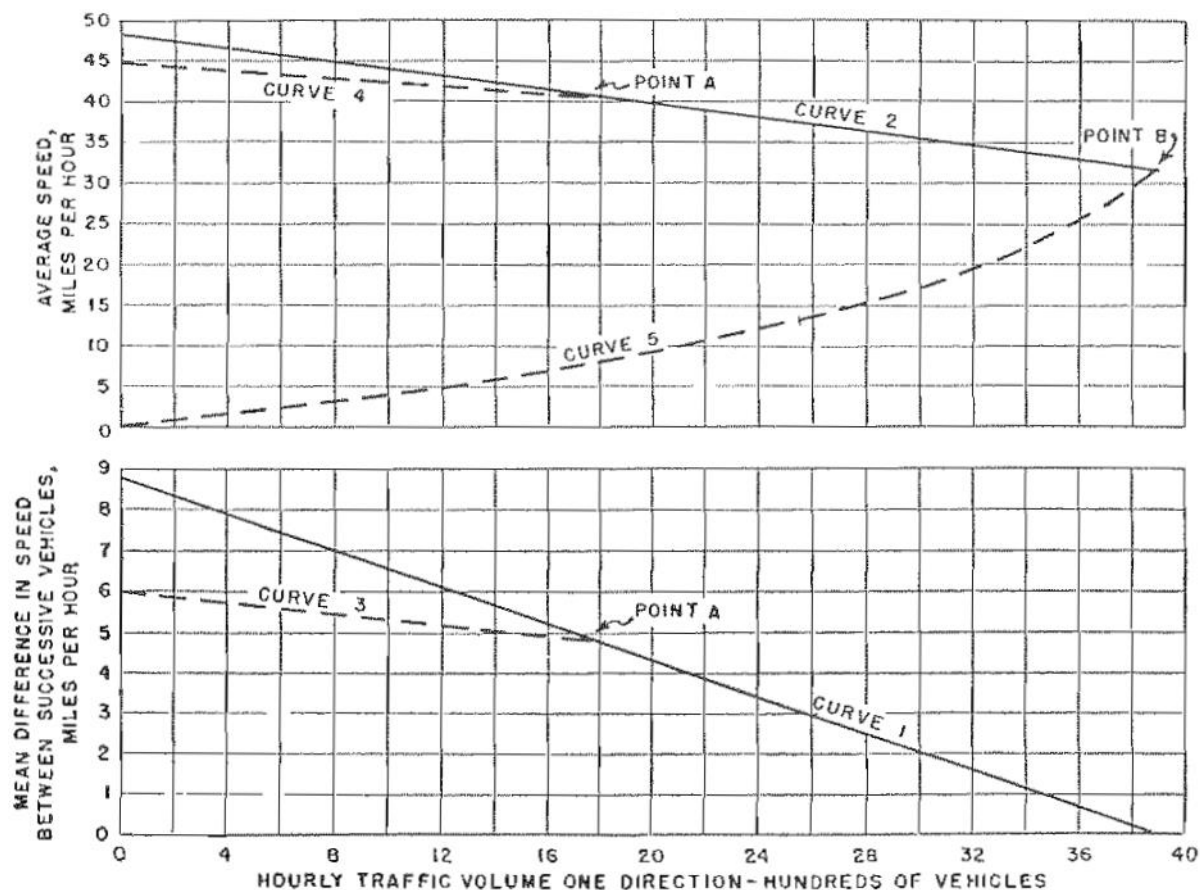


Слика 2.5. Просечне брзине возила у току (миља на час) на деоницама двотрачних путева на равном терену у правцу (НСМ, 1950)



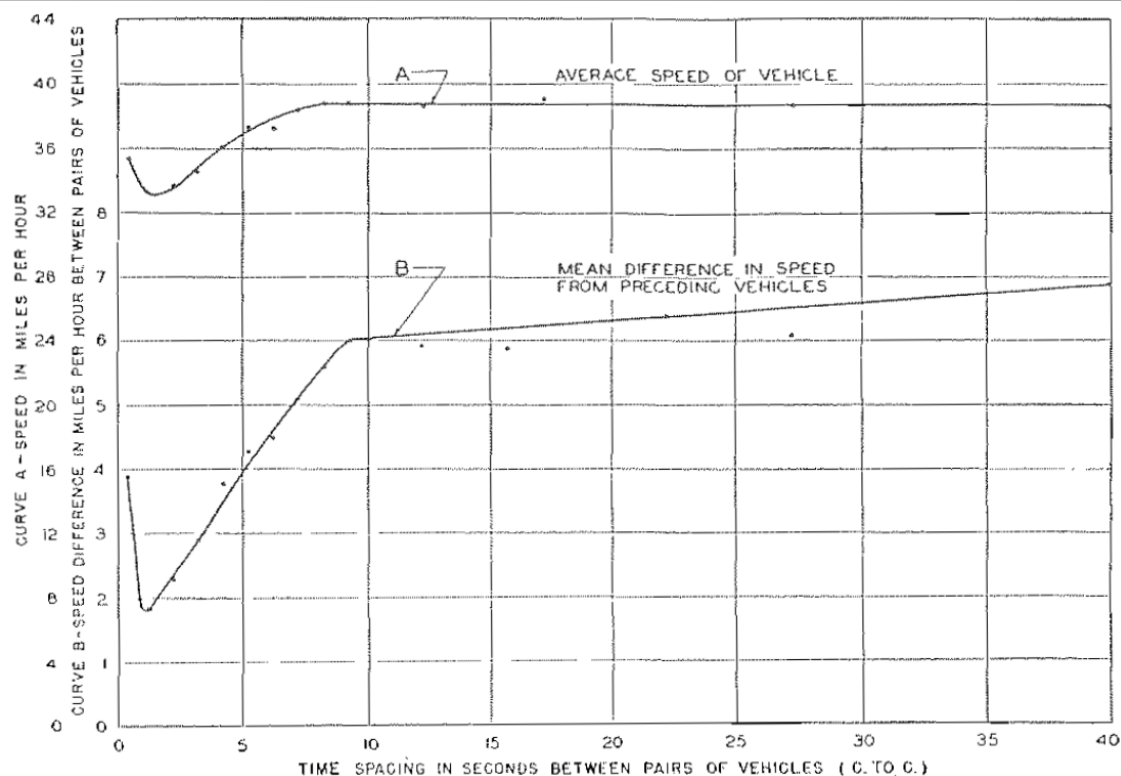
Слика 2.6. Дистрибуција брзина возила у току (миља на час) при различитим вредностима часовног протока на деоницама двотрачних путева на равном терену у правцу (НСМ, 1950)

Велика пажња посвећена је и брзини засићеног саобраћајног тока и самој вредности базног (идеалног) капацитета. Добијена вредност базног (идеалног) капацитета једне траке износила је 2.000 ПА/час/траци, док су капацитет пута и брзина при капацитету зависили од типа пута. Тако је, рецимо, базна вредност капацитета двотрачног пута била ограничена на 2.000 ПА/час/траци, без обзира на расподелу протока по смеровима, која је могла да утиче само на капацитет по тракама, док је брзина при капацитету износила између 25 mi/h (40 km/h) и 30 mi/h (48 km/h), што се може видети на Слици 2.5. Код вишетрачних путева су добијене вредности базног капацитета пута са две траке по смеру и одвојеним коловозима износиле од 3.900 до 4.000 возила/час/смеру, при брзини од 32 mi/h (51 km/h), што је приказано на Слици 2.7. Са друге стране, најнеповољније практичне вредности капацитета биле су доста ниже, што су показала и поједина истраживања на постојећим путевима. Тако су добијене вредности практичних капацитета на ванградским путевима са идеалним карактеристикама износиле око 900 возила/оба смера код двотрачних путева, 1.500 возила/час/оба смера код тротрачних (тзв. 2+1) путева и око 2.000 возила/час/смеру за вишетрачне саобраћајнице, код којих је уочена мања осетљивост вредности практичног у односу на базни капацитет.



Слика 2.7. Зависност брзине и разлике у брзинама возила у току при различитим вредностима часовног протока по смеру четворотрачног пута са разделним острвом (НСМ, 1950)

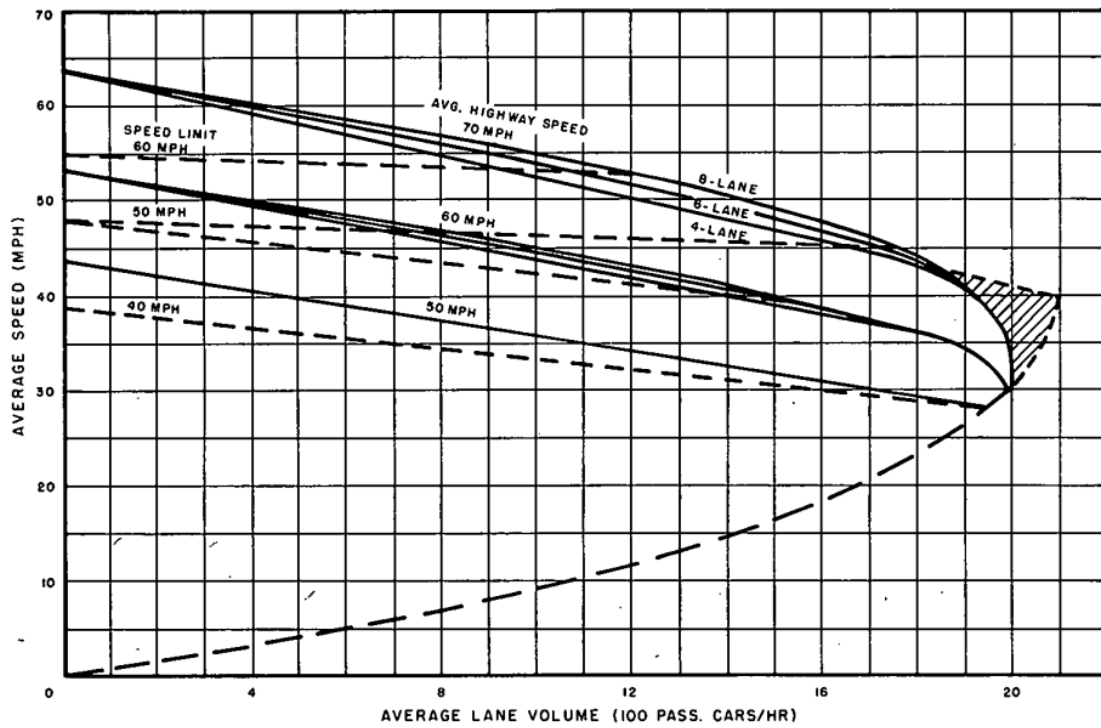
Испитивање границе између слободног и стабилног тока на двотрачним путевима, односно почетка утицаја међусобне интеракције између возила на основу временског интервала слеђења било је предмет истраживања још од првог издања НСМ-а (1950), као један од најосетљивијих показатеља загушења. На дијаграму приказаном на Слици 2.8 уочава се да са падом интервала слеђења између возила нема значајне промене у просечној брзини тока нити у разлици брзина возила која се следе, док вредност овог показатеља не достигне 9. секунду. Са даљим падом вредности интервала слеђења возила јавља се утицај на возаче узрокован присуством возила испред, који расте како се смањује вредност интервала слеђења. Другим речима, гранична вредност интервала слеђења слободног тока износила је 9 секунди.



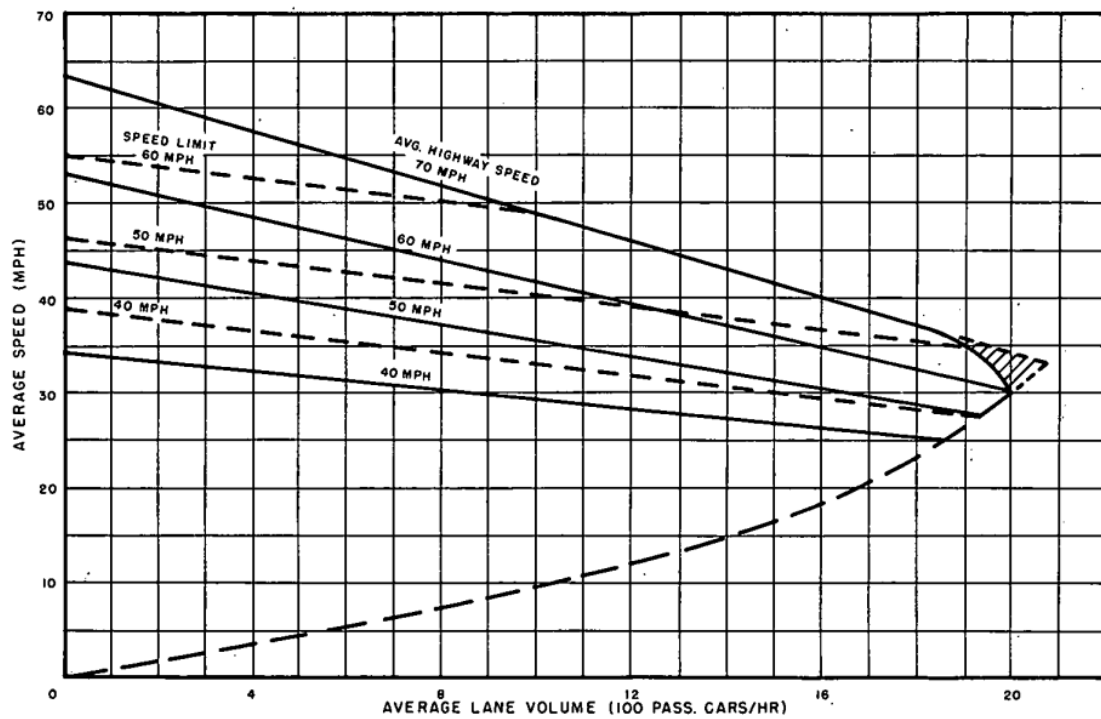
Слика 2.8. Промена карактеристика брзине возила у току при различитим вредностима интервала слеђења на двотрачним путевима (НСМ, 1950)

2.3. Амерички Приручник за капацитет путева (НСМ, 1965)

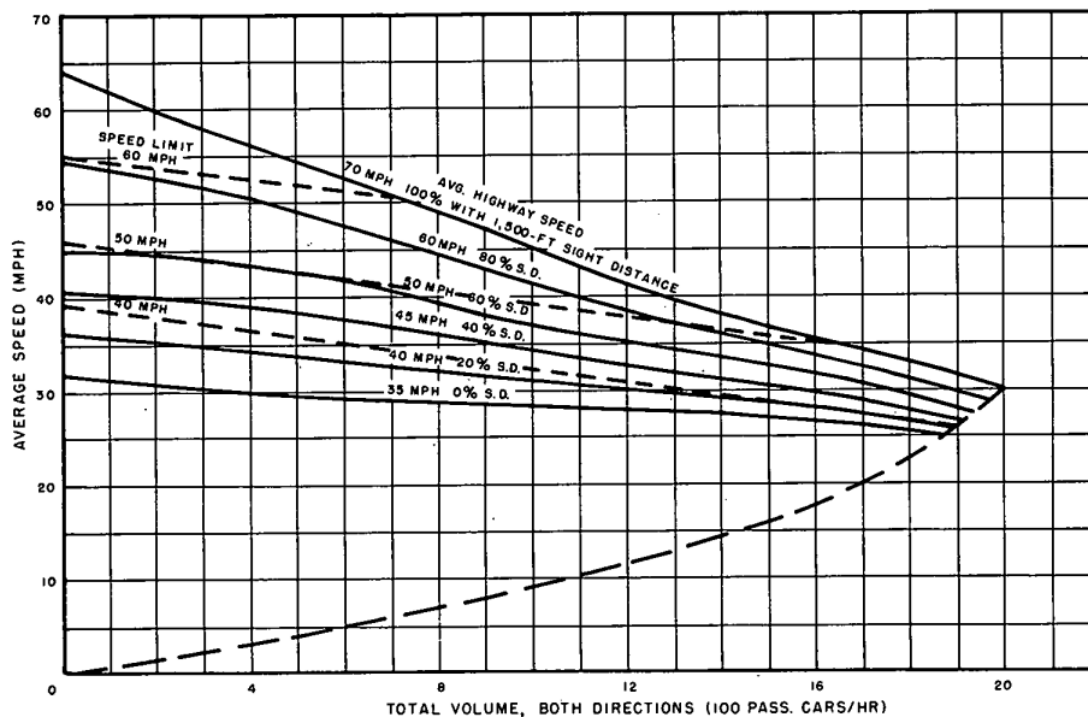
Друго издање Приручника излази 1965. године, са доста унапређења у методологији као последицом резултата бројних научних и практичних истраживања. Једна од најзначајнијих новина у новом приручнику јесте увођење нивоа услуге са вишестепеном скалом (А–F) ради прецизније квантификације услова у саобраћајном току (НСМ, 1965). Увођењем овог квалитативног показатеља услова у току значај брзине доводи се на још виши ниво. Наиме, управо је брзина проглашена за примарни критеријум нивоа услуге за непрекинуте токове, који су присутни на основним одсесима ауто-путева, вишетрачних путева и двотрачних путева. Секундарни критеријум нивоа услуге односио се на однос захтеваног протока и капацитета (q/C). На Сликама 2.9, 2.10 и 2.11 приказан је однос брзине и протока на деоницама ауто-пута, вишетрачног пута и двотрачног пута са идеалним условима, респективно. Може се приметити увођење неколико крива односа брзина-проток у зависности од геометријских карактеристика саобраћајнице, односно различитих слободних брзина које се могу јавити на одређеном типу пута. Уочава се и да базни капацитет једне траке ауто-пута и вишетрачног пута у идеалним условима и даље износи 2.000 путничких аутомобила/часу, али и да је у кратким временским интервалима у одређеним тракама (најчешће крајњим левим тракама у смеру кретања) могуће достићи и нешто веће вредности. Брзина засићеног тока износила је 30 mi/h (48 km/h), што су вредности сличне онима из претходног издања Приручника (НСМ, 1950). Слични резултати као у претходном издању добијени су и за двотрачне путеве, где је базни капацитет износио 2.000 путничких аутомобила/часу у оба смера (НСМ, 1965).



Слика 2.9. Однос протока и брзине у једној траци ауто-пута при идеалним условима у саобраћајном току (HCM, 1965)



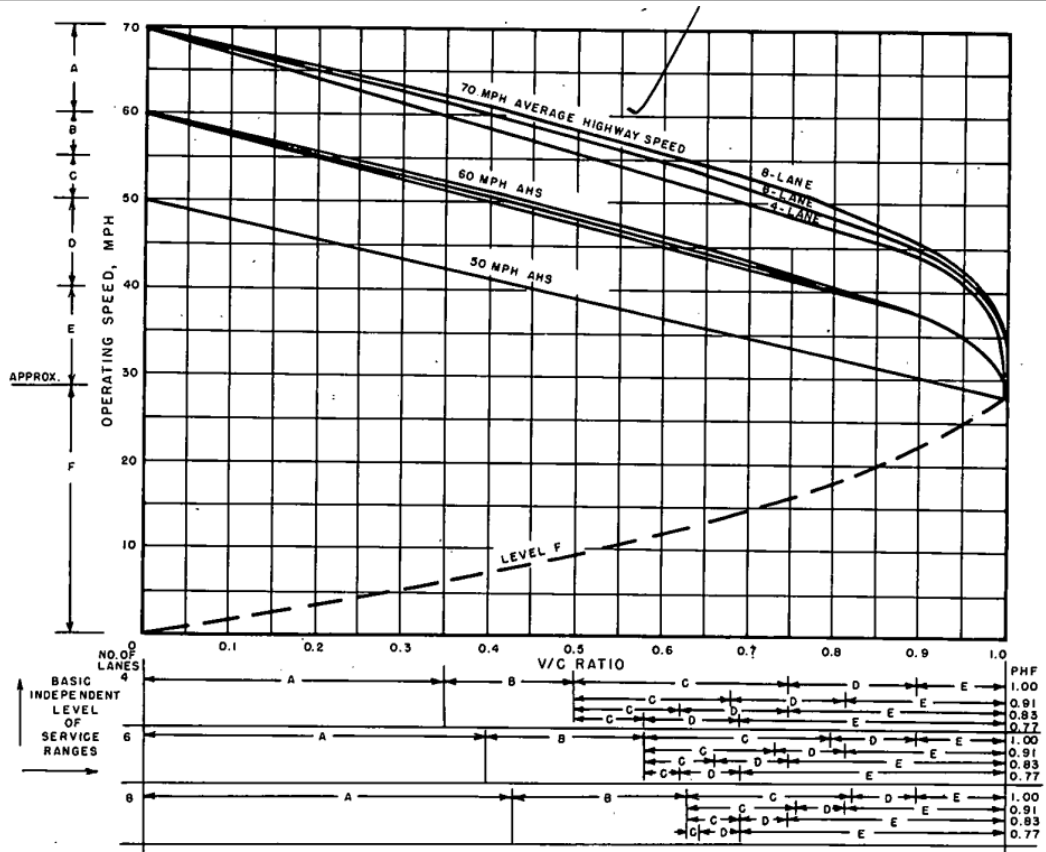
Слика 2.10. Однос протока и брзине у једној траци ванградског вишетрачног пута при идеалним условима у саобраћајном току (HCM, 1965)



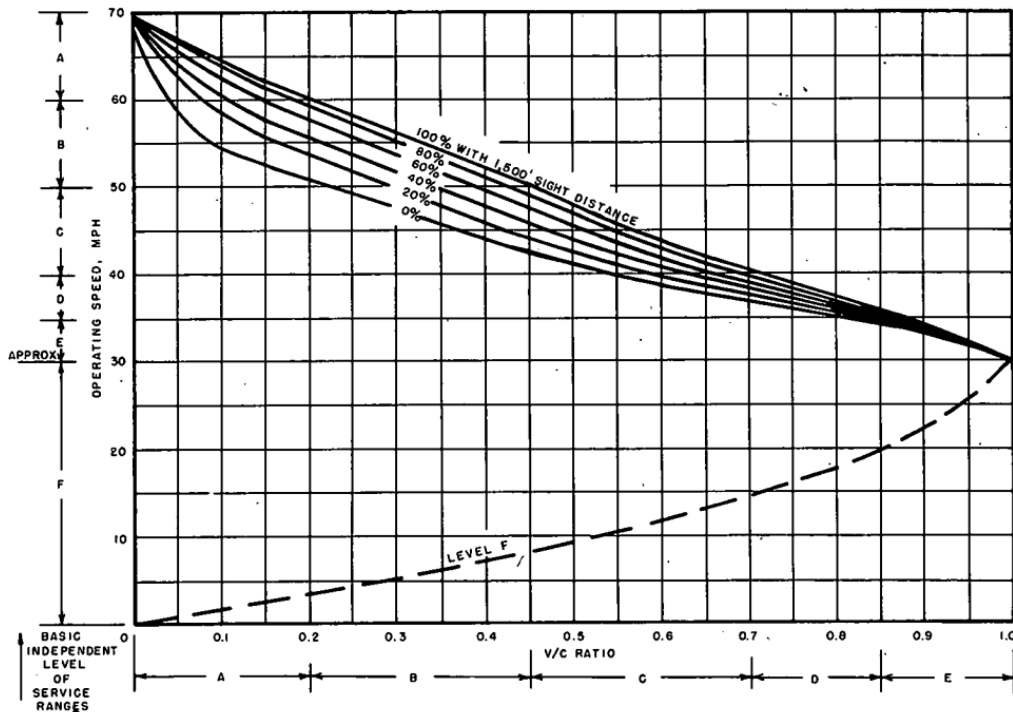
Слика 2.11. Однос протока и брзине у оба смера ванградског двотрачног пута при идеалним условима у саобраћајном току (НСМ, 1965)

Највеће утврђене вредности брзине у идеалним условима и при изузетно ниским вредностима протока на ауто-путевима су износиле 70 mi/h (113 km/h). Слободним током (ниво услуге А) се на ауто-путевима сматрао ток са брзином већом од 60 mi/h (97 km/h) и односом протока и капацитета мањим од 0,43 до 0,35, у зависности од броја саобраћајних трака у попречном профилу пута. Утврђено је да при повећању наведених односа протока и капацитета (q/C), односно протоку који је већи од 700 путничких аутомобила/час/траци, почиње значајан утицај на брзину тока. Са даљим растом односа протока и капацитета долази до пада брзине (Слика 2.12), па је тако при односу q/C блиском 1, односно при капацитету (ниво услуге Е), брзина тока износила између 30 и 35 mi/h (48–56 km/h).

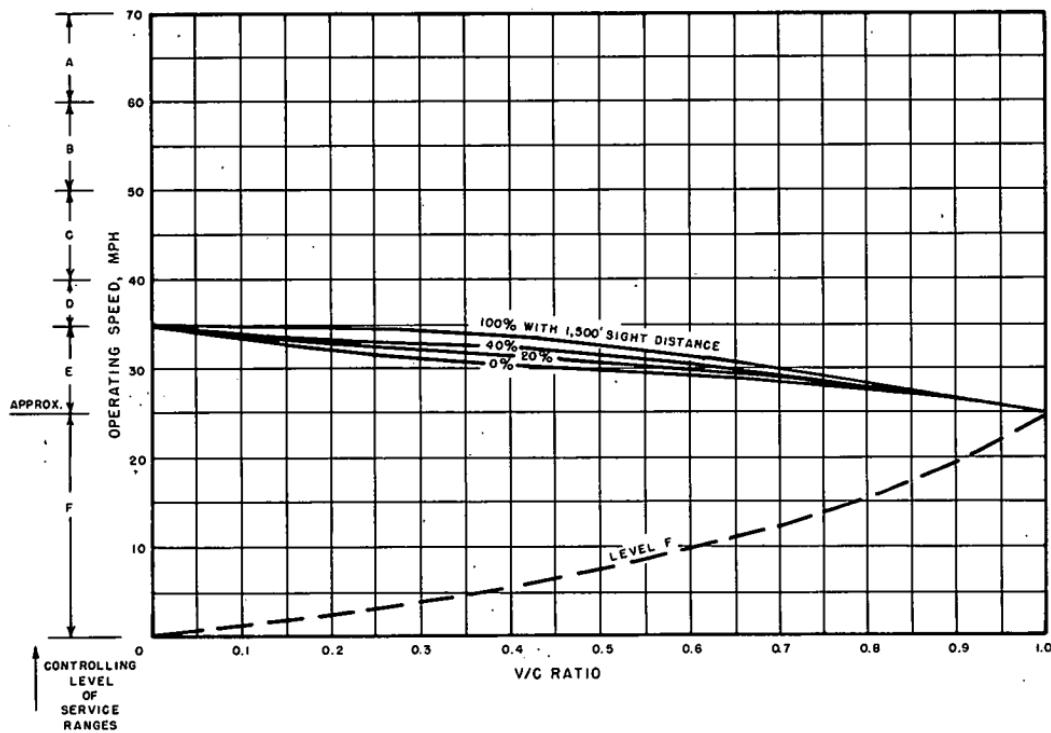
Слична зависност брзине и односа протока и капацитета (q/C) присутан је и код вишестрачног пута, док у случају двотрачног пута велики утицај има и претицајна прегледност, због маневра претицања. У случају адекватне претицајне прегледности дуж целе деонице и осталим идеалним карактеристикама, слободан ток (ниво услуге А) присутан је до величине протока од 400 путничких аутомобила/час у оба смера, са брзином већом од 60 mi/h (97 km/h), док се ток при капацитету ($q/C=1$) реализује при 30 mi/h (48 km/h). Ове вредности оствариве су само на двотрачним путевима са одличним карактеристикама и високим вредностима брзина слободног тока при ниским вредностима протока (Слика 2.13). С обзиром на то да карактеристике двотрачног пута у мрежи јако варирају, и ова зависност може да варира. Тако је на Слици 2.14 приказана зависност брзине и односа протока и капацитета за двотрачни пут лоших карактеристика, односно са максималном просечном брзином од 35 mi/h (56 km/h). С обзиром на то да је брзина на овом путу ограничена лошим карактеристикама деонице и да не постоје прави услови слободног тока, пад брзине је доста блажи, све до 25 mi/h (40 km/h) при односу протока и капацитета блиском јединици (НСМ, 1965).



Слика 2.12. Зависност односа протока и капацитета (q/C) и брзине у посматраном смеру ауто-пута при условима непрекинутог тока (HCM, 1965)



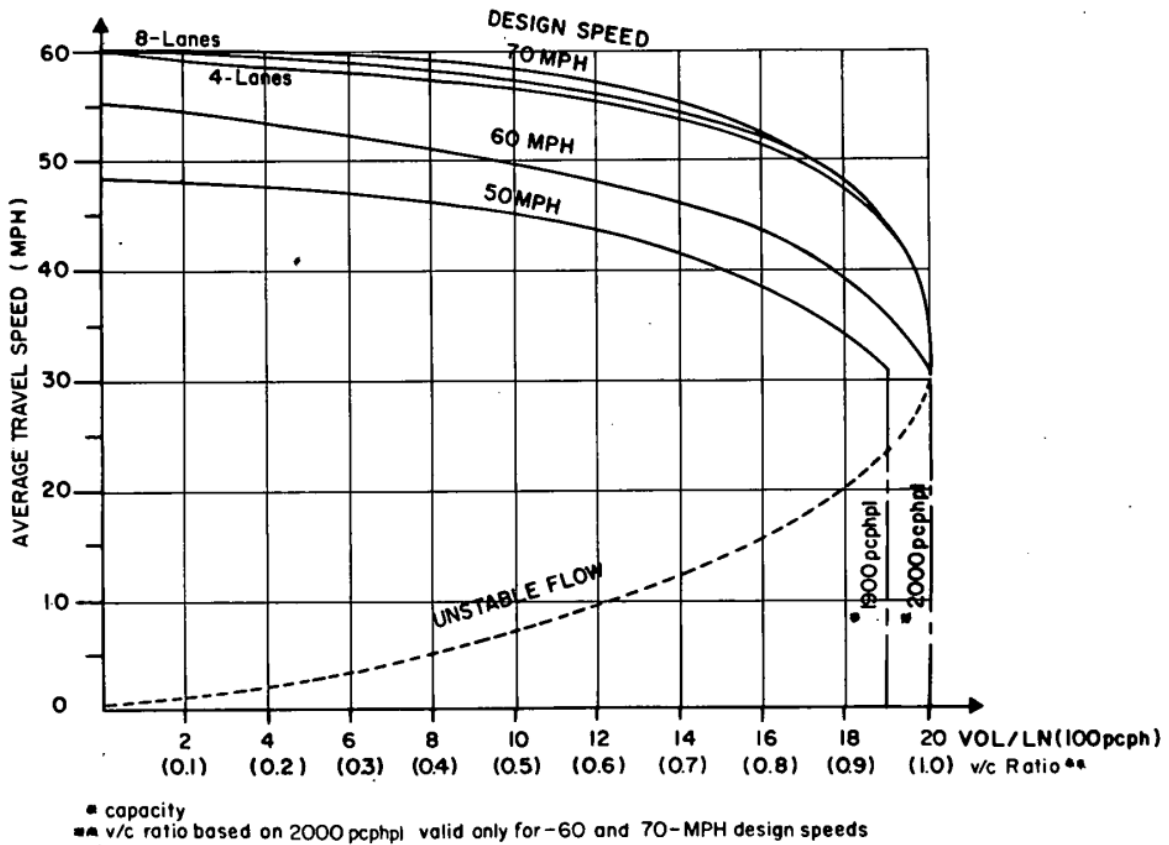
Слика 2.13. Зависност односа протока и капацитета (q/C) и брзине у оба смера двотрачног пута са просечном слободном брзином од 70 mi/h (113 km/h) при условима непрекинутог тока (HCM, 1965)



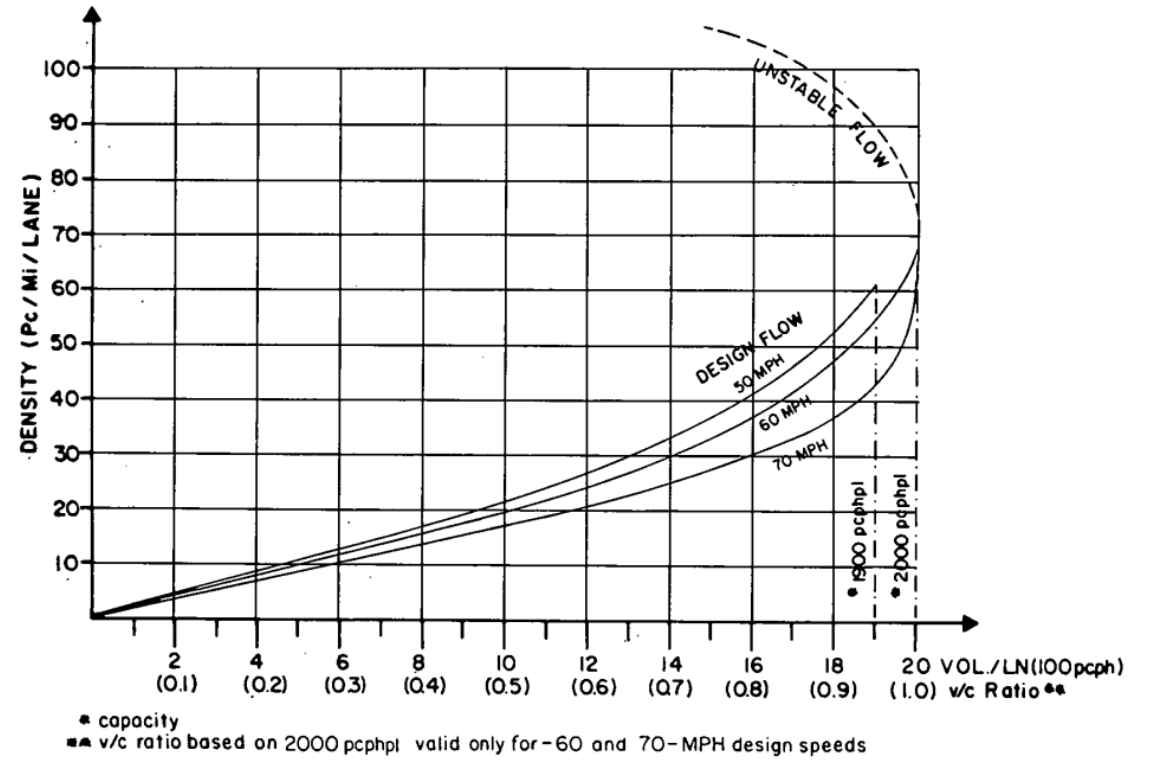
Слика 2.14. Зависност односа протока и капацитета (q/C) и брзине у оба смера двотрачног пута са просечном слободном брзином од 35 mi/h (56 km/h) при условима непрекинутог тока (HCM, 1965)

2.4. Амерички Приручник за капацитет путева (HCM, 1985)

Треће издање Приручника доноси значајно унапређење методологија прорачуна капацитета и нивоа услуге, али и реорганизацију садржаја Приручника и увођење новина по питању инкорпорирања методологије за анализу пешачке и бицикличке инфраструктуре (HCM, 1985). Упркос променама у критеријумима за прорачун нивоа услуге, брзина остаје незаобилазни параметар у свим анализама. Тако је од трећег издања Приручника густина дефинисана као примарни критеријум за одређивање нивоа услуге код ауто-путева и вишетрачних путева, како би се квантификовала слобода маневрисања и близина других возила, док су брзина и однос протока и капацитета (q/C) проглашени за секундарне критеријуме. Вредност капацитета једне траке ауто-пута у идеалним условима и у овом издању Приручника износи 2.000 путничких аутомобила/часу за ауто-путеве са рачунском брзином изнад 60 mi/h (97 km/h), док за ретке типове ауто-пута са рачунском брзином од 50 mi/h (80 km/h) износи 1.900 аутомобила/часу (HCM, 1985). Однос брзине и протока у идеалним условима основног одсека ауто-пута приказан је на Слици 2.15. Може се уочити да је брзина при капацитету остала непромењена – 30 mi/h (48 km/h), уз нешто нижу вредност за ауто-путеве са пројектним елементима који одговарају рачунској брзини од 50 mi/h (80 km/h), на којима износи 28 mi/h (45 km/h).



Слика 2.15. Зависност брзине од протока на основном одсеку ауто-пута у условима идеалног саобраћајног тока (HCM, 1985)

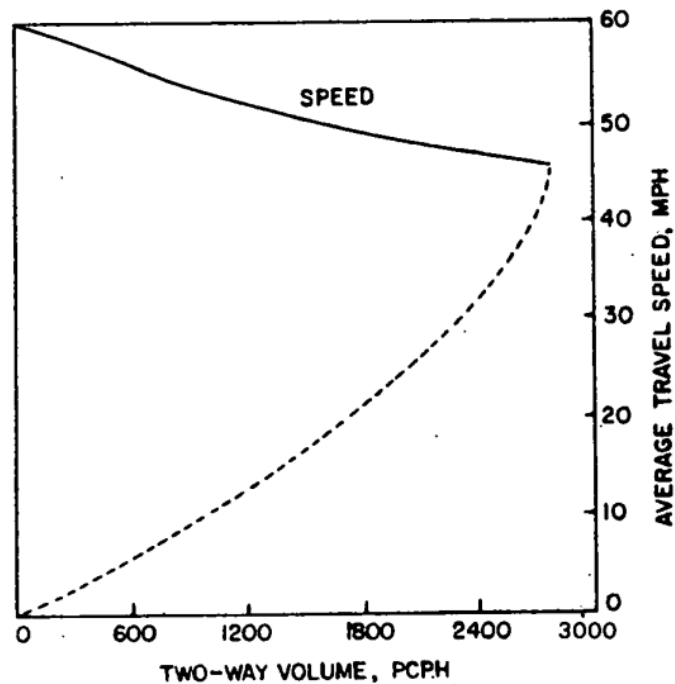


Слика 2.16. Зависност густине од протока на основном одсеку ауто-пута у условима идеалног саобраћајног тока (HCM, 1985)

Идентична зависност брзине од протока и густине од протока при идеалним условима (Слике 2.15 и 2.16) важи и за основни одсек вишестрачне саобраћајнице, односно исте су

вредности базног капацитета и брзина при капацитету у зависности од рачунске брзине пута. Такође, примарни критеријум за одређивање нивоа услуге је густина, са истим граничним вредностима као код ауто-пута, док су секундарни критеријуми брзина и однос протока и капацитета (q/C).

Код ванградских двотрачних путева је у трећем издању америчког Приручника за капацитет путева направљена значајна промена у методологији прорачуна капацитета и нивоа услуге у односу на претходна издања (НСМ, 1985). Вредност капацитета у идеалним условима добијена новим истраживањима износила је 2.800 путничких аутомобила/часу у оба смера, у случају равномерне расподеле протока по смеровима (50/50), док је у случају расподеле протока 100/0 максимална вредност једне траке остала на 2.000 путничких аутомобила/часу (Слика 2.17).

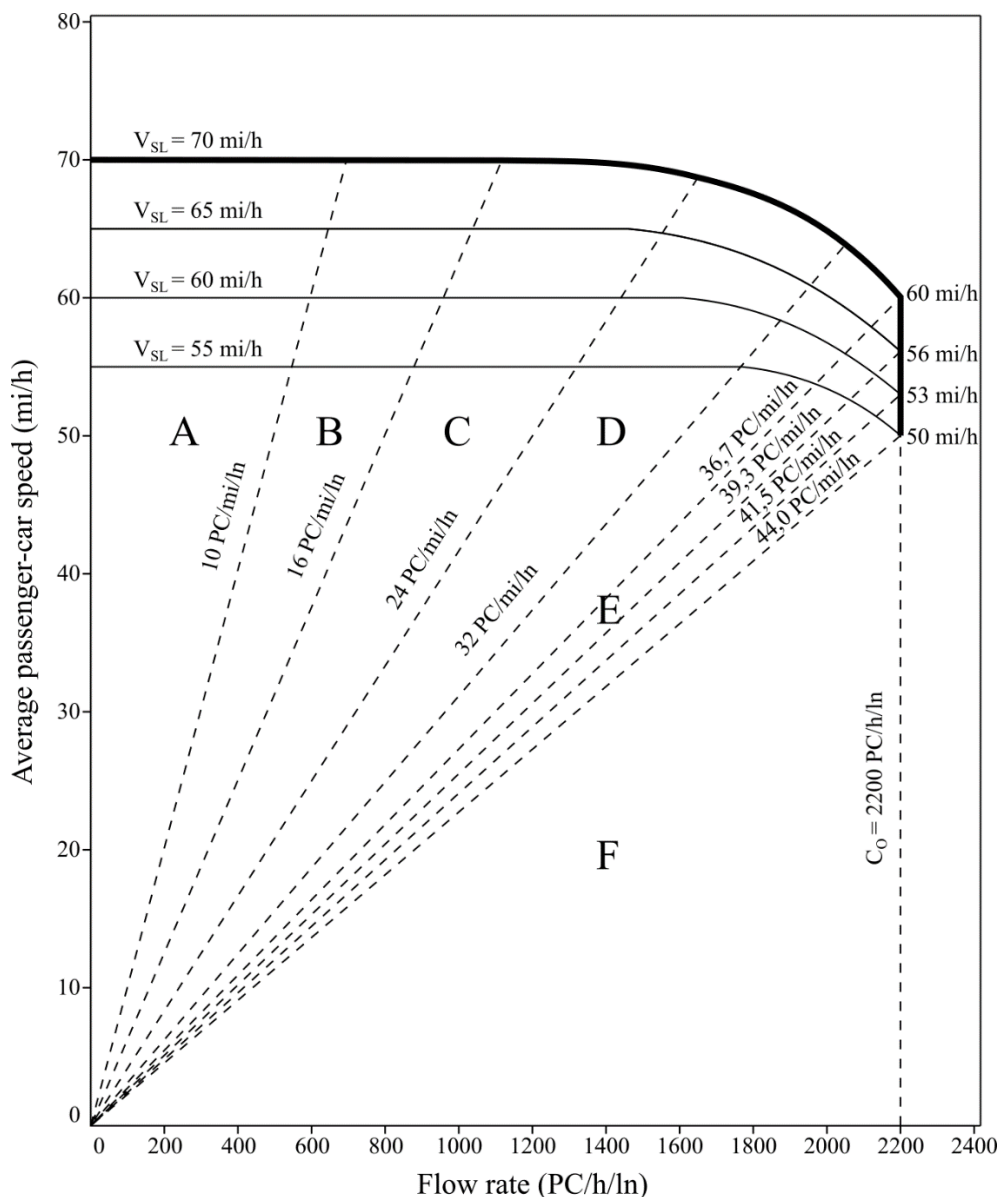


Слика 2.17. Зависност брзине од протока на основном одсеку двотрачног пута при условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 1985)

Највећа промена односи се на квантификацију нивоа услуге, односно критеријуме на основу којих се исказује. Поред просечне брзине тока и искоришћења капацитета (односа протока и капацитета), уводи се нови критеријум, који постаје примаран у процесу одређивања нивоа услуге – проценат временских застоја. Овај критеријум се дефинише као просечан проценат времена које изгубе возила крећући се у плотуну услед немогућности да изврше маневар претицања. Иако је овај параметар тешко измерљив на терену, дефинисано је да су возила у немогућности да претекну ако се крећу мањом од жељене брзине у колони, при интервалу слеђења мањем од 5 секунди, па би се могао поистоветити са процентом возила у колони при интервалу слеђења мањем од 5 секунди (НСМ, 1985). Другим речима, утицај на брзину се јавља при интервалима слеђења мањим од 5 секунди, што представља граничну вредност слободног тока. То представља смањење од 4 секунде у односу на прво издање Приручника (НСМ, 1950). Овај критеријум је дефинисан као примарни због перцепције корисника саобраћајнице. Наиме, иако брзине у условима засићеног тока могу бити релативно високе, немогућност претицања изазива фрустрацију код возача ако такви услови потрају.

2.5. Допуњено издање америчког Приручника за капацитет путева (НСМ, 1994)

Треће издање америчког Приручника за капацитет путева иновирано је и допуњено два пута – 1994. и 1997. године, а у овим издањима дошло је до значајних промена у методологијама појединих поглавља. Најзначајније промене у односу на изворни облик трећег издања Приручника догодиле су се код ауто-путева у издању за 1994. годину (НСМ, 1994). Код овог типа пута, по први пут од првог издања Приручника, дошло је до пораста капацитета у идеалним условима за 10%, тако да је вредност износила 2.200 путничких аутомобила/час/траци (Слика 18). Као разлог за повећање вредности капацитета у идеалним условима наводи се унапређење возно-динамичких карактеристика возила и могућности возача (НСМ, 1994; Мау, 1994). Допуњено издање из 1994. године доноси и велики скок у вредностима брзине засићеног тока (НСМ, 1994). У овој верзији Приручника брзина засићеног тока са до тада коришћених 30 mi/h (48 km/h) расте на вредности између 50 mi/h (80 km/h) и 60 mi/h (97 km/h), у зависности од слободне брзине тока на конкретној деоници (Слика 2.18).



Слика 2.18. Зависност брзине од протока на основном одсеку ауто-пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 1994)

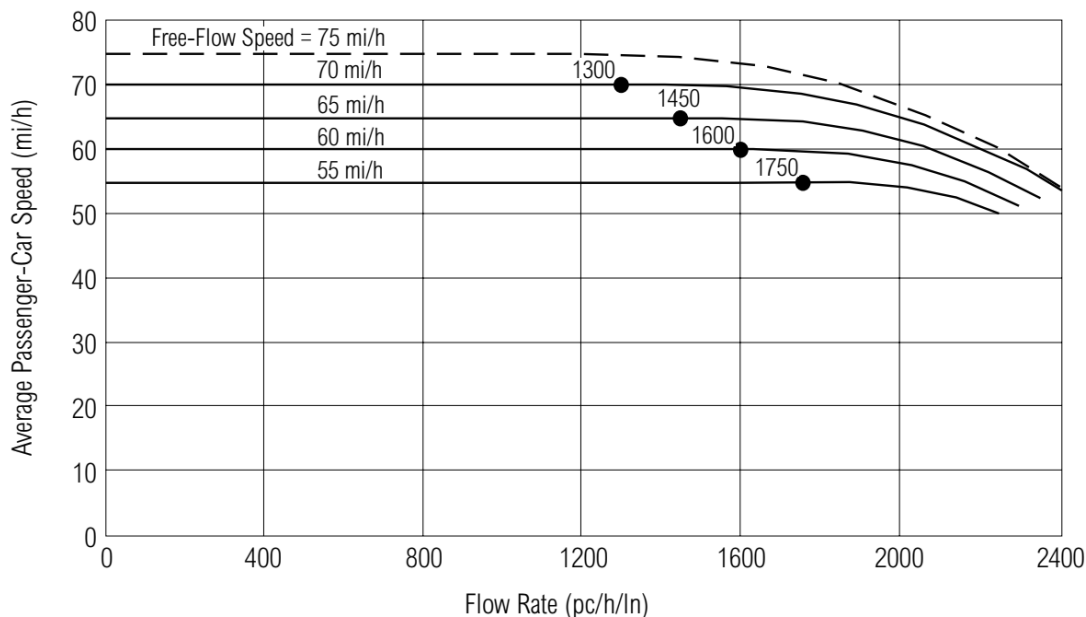
Значајна новина у допуњеном издању из 1994. године везана је и за саму зависност протока и брзине, односно увођење вишережимске зависности за разлику од пређашњих параболичних зависности (Мау, 1994). Као што се може видети на Слици 2.18, по први пут постоје три карактеристична режима:

- режим слободног тока у коме је брзина неосетљива на промену протока,
- режим смањења брзине до брзине засићеног тока и
- режим форсираног тока.

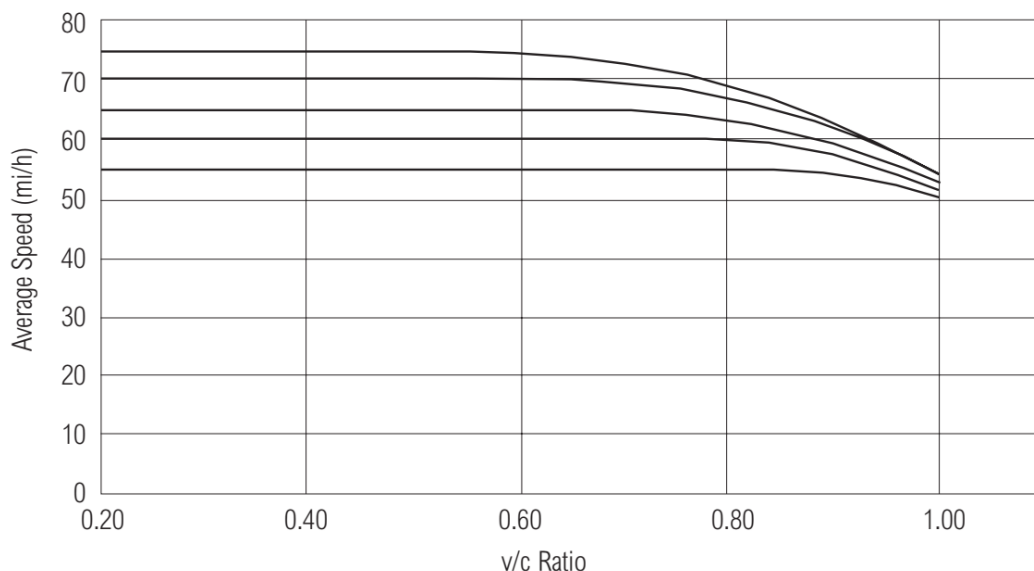
Код вишетрачних путева није било значајнијих промена у односу на оригинално треће издање Приручника (НСМ, 1985), док је код двотрачних путева поново омогућен адекватан прорачун нивоа услуге деоница са пројектним брзинама мањим од 60 mi/h (96 km/h). Ова допуна заснована је на резултатима истраживања пројекта спроведеног у Калифорнији, а по први пут се спомиње могућност поделе двотрачних путева у класе како би се прецизније утврђивао ниво услуге деоница са мањим пројектним брзинама (Мау, 1994).

2.6. Амерички Приручник за капацитет путева (НСМ, 2000)

Четврто издање Приручника објављено је 2000. године и у многим областима доноси велике промене (НСМ, 2000). Посматрајући основни одсек ауто-пута, примарни параметар за одређивање нивоа услуге и даље је густина, али се у овом издању она директно рачуна на основу протока и брзине тока. Капацитет у условима идеалног саобраћајног тока расте у односу на претходна издања, али доноси и прецизну варијацију вредности у односу на слободну брзину тока на испитиваној деоници, у опсегу од 2.250 до 2.400 путничких аутомобила/час/траци (Слика 2.19). Међутим, највећа промена односи се управо на параметар брзине. Наиме, већина новијих истраживања је показала неосетљивост брзине на раст протока до умерених вредности протока (Слика 2.19), односно примену и даље унапређење вишережимског приступа приказаног у допуњеној верзији трећег издања Приручника из 1994. године (НСМ, 1994). У четвртом издању америчког Приручника за капацитет путева, неосетљивост брзине, која директно зависи од слободне брзине, повећала се, односно није уочен утицај на брзине при већим вредностима протока у односу на ранија истраживања (Слика 19). Другим речима, утврђено је да брзина путничких аутомобила при идеалним условима није осетљива на промену протока до граница између 1.300 и 1.750 путничких аутомобила/часу/траци. Овакви резултати показали су да на основном одсеку ауто-пута при идеалним условима брзина није осетљива на промену односа протока и капацитета (q/C) до распона од 54% до 80% у зависности од слободне брзине тока на деоници (Слика 2.20). Велики скок у вредностима брзине засићеног тока у допуњеној верзији трећег издања из 1994. године (НСМ, 1994) је умањен, на основу резултата неколико истраживања која су спроведена у међувремену. Утврђено је да су претходно добијене вредности брзине превисоке, па је у четвртом издању (НСМ, 2000) опсег брзина путничких аутомобила при капацитету у идеалним условима спуштен на 50 mi/h (80 km/h) до 53 mi/h (85 km/h).



Слика 2.19. Зависност брзине од протока на основном одсеку ауто-пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2000)

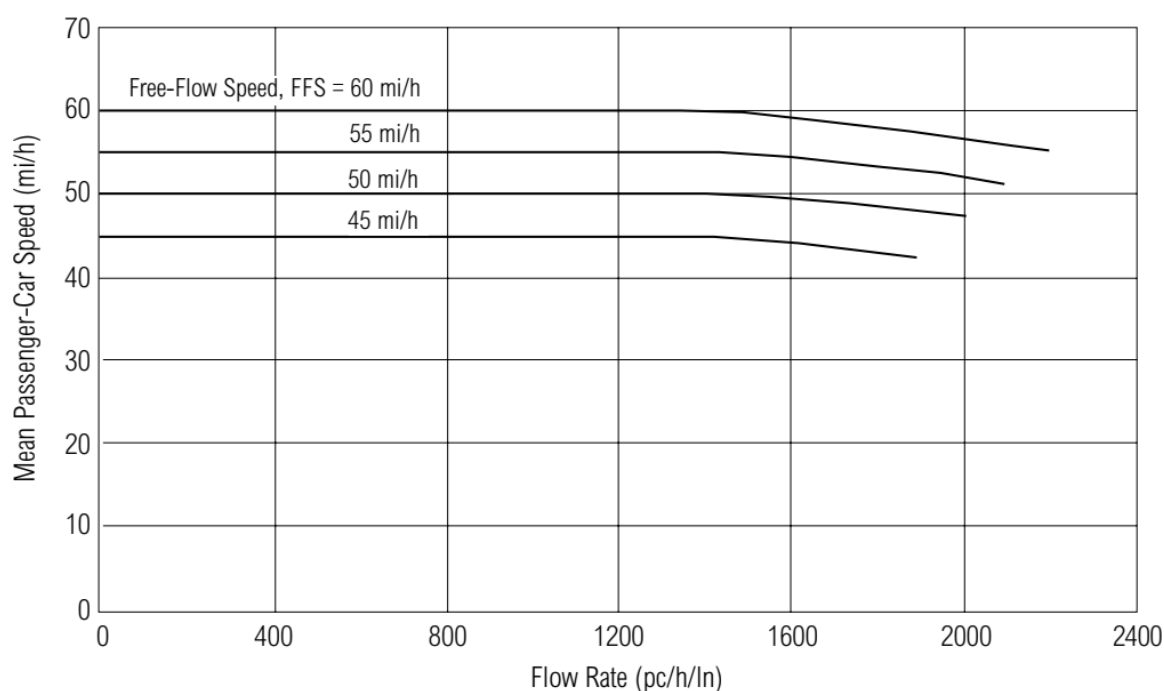


Слика 2.20. Зависност брзине од односа протока и капацитета на основном одсеку ауто-пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2000)

Оно што је главна промена у односу на ранија издања Приручника јесте управо слободна брзина тока. У ранијим издањима Приручника слободна брзина је често поистовећивана са највећом брзином којом се возила могу кретати у преовлађујућим условима тока (тзв. *Operating speed*) или пројектном брзином (тзв. *Design speed*). Критеријум брзине узимао је у обзир вредност протока и на основу дијаграма одређивао колико се пројектна брзина конкретне деонице смањује због раста оптерећења, односно колико се погоршава ниво услуге. Од четвртог издања америчког Приручника за капацитет путева (НСМ, 2000), слободна брзина тока се утврђује егзактно на основу карактеристика конкретне деонице, мерењем на терену или аналитичким прорачуном. Ова модификација методологије представља битну промену, јер је управо одређивање слободне брзине први корак на основу кога се директно прорачунава идеалан и реалан капацитет деонице, али и ниво услуге. Уз претходно наведено, истраживања су показала потребу за увођењем додатне криве слободне брзине од 75 mi/h (120 km/h) за ауто-путеве најбољих карактеристика због одустајања од

ограничења од 55 mi/h (88 km/h) у САД уведеном због нафтне кризе 70-их година прошлог века, односно због забележеног раста брзина у току на ауто-путским деоницама. На прорачун слободне брзине конкретне деонице утичу базна слободна брзина, ширина траке, удаљеност бочних сметњи, број трака и густина уливно-изливних рампи у утицајној зони деонице.

Промена у методологији, слична ауто-путској, забележена је и код вишетрачних путева. Густина је основни критеријум за прорачун нивоа услуге, а директно се рачуна на основу протока и брзине. Капацитет у условима идеалног саобраћајног тока достигао је опсег од 1.900 до 2.200 путничких аутомобила/час/траци, у зависности од слободне брзине тока (Слика 2.21). Неосетљивост брзине на промену протока је и код вишетрачног пута већа него раније, са границом од 1.400 путничких аутомобила/час/траци (Слика 2.21), док је неосетљивост брзине на промену односа протока и капацитета присутна до минимум 70%.



Слика 2.21. Зависност брзине од протока на основном одсеку вишетрачног пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2000)

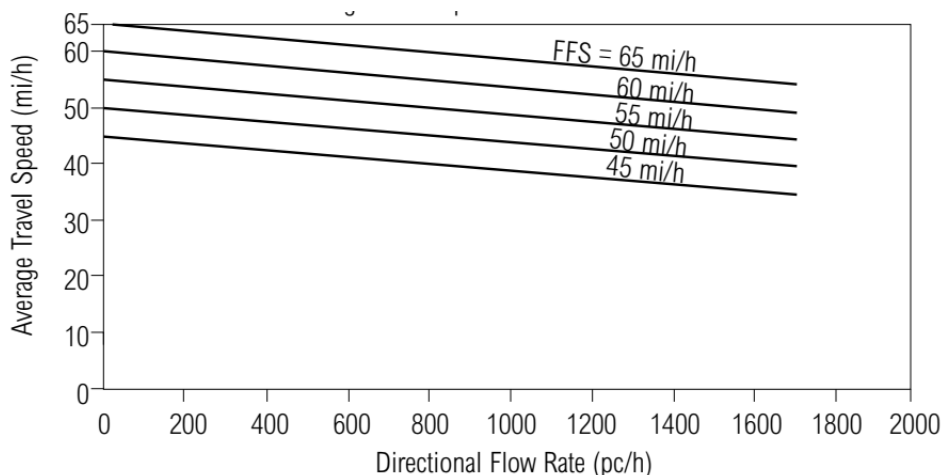
Као и код основног одсека ауто-пута, и код вишетрачног је уведен прецизни прорачун слободне брзине, у случају да није могуће мерење на терену, која директно утиче на прорачун капацитета и нивоа услуге. На прорачун слободне брзине вишетрачних путева утиче базна слободна брзина, ширина траке, број трака по смеру, удаљеност бочних сметњи, присуство разделног појаса и густина приступних тачака. На основу спроведених анализа утврђено је да брзине у слободном току код вишетрачног пута варирају између 45 mi/h (72 km/h) и 60 mi/h (97 km/h), у зависности од карактеристика конкретне деонице, док се при засићеном току редукују на 56 mi/h (90 km/h) и 42 mi/h (68 km/h), респективно.

Двотрачни путеви су и у овом издању Приручника (НСМ, 2000) били предмет највећих методолошких промена. Пре свега, први пут је спроведена прецизна класификација двотрачних путева према њиховој функцији у мрежи, што представља први корак у анализама. Наиме, од сврставања предметне деонице двотрачног пута у једну од две наведене класе зависи даља примена методологије анализе капацитета и нивоа услуге. Прва класа двотрачног пута, која подразумева деонице које опслужују даљинске токове, на којима

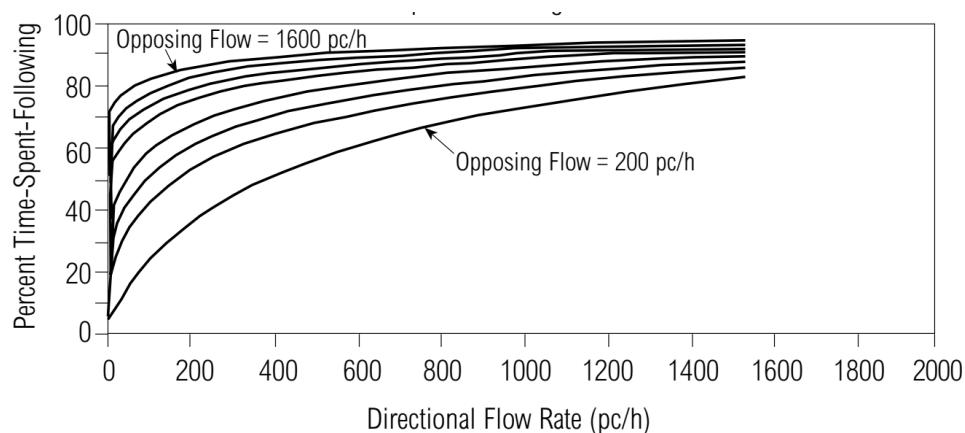
корисници очекују путовање високим брзинама, подразумева прорачун просечне брзине путовања и проценат временских застоја као параметара за прорачун нивоа услуге. Код путева друге класе, који обухватају приступне путеве, путеве који пролазе кроз захтеван терен или путеве који опслужују туристичке токове, критеријум за дефинисање нивоа услуге је искључиво проценат временских застоја. Посматрајући проценат временских застоја, новину представљају резултати истраживања који показују да су возила у немогућности да претекну ако се крећу мањом од жељене брзине у колони при интервалу слеђења мањем од 3 секунде. Процент временских застоја би се могао поистоветити са процентом возила у колони при интервалу слеђења мањем од 3 секунде (НСМ, 2000). Другим речима, утицај интервала слеђења на брзину тока почиње од 3 секунде, што је смањење за 2 секунде у односу на претходно издање Приручника (НСМ, 1985).

Оно што је карактеристично за обе класе двотрачних путева, а по први пут се у овом издању Приручника појављује и код осталих типова путева, јесте егзактно утврђивање слободне брзине. Такође је препоручено мерење слободне брзине на терену, а у случају да то није могуће, предвиђен је поступак за аналитички прорачун. Код двотрачних путева, због чињенице да је реч о типу пута који је најраспрострањенији у путној мрежи било које земље и да има доста различите функције у истој, специфична је велика разлика у карактеристикама деоница. Због тога је одлука о процени базне слободне брзине, која се редукује са факторима утицаја ширине траке, удаљености бочних сметњи и броја приступних тачака, остављена инжењерима, уз препоруку да за реперне вредности користе пројектну брзину или ограничење брзине. Анализама је утврђено (Слика 2.22) да слободна брзина на ванградском двотрачном путу варира између 45 mi/h (72 km/h) и 65 mi/h (105 km/h), што представља повећање у односу на претходно издање Приручника (НСМ, 1985).

Приметно је и повећање капацитета у идеалним условима на 3.200 путничких аутомобила/часу у оба смера, уз напомену да је максималан капацитет једног смера 1.700 путничких аутомобила/часу (Слика 2.22). С обзиром на то да код двотрачног пута параметри саобраћајног тока у једном смеру директно утичу на параметре из другог смера, наведено је да уколико се у једном смеру оствари проток од 1.700 путничких аутомобила/часу, у другом смеру неће моћи да прође више од 1.500 путничких аутомобила/часу. Анализа по смеровима је још једна новина четвртог издања Приручника (НСМ, 2000), где је остављена могућност истовременог аналитичког прорачуна капацитета и нивоа услуге за оба смера, али је препоручено да се анализа одвија засебно за сваки смер. Утицај протока у посматраном и супротном смеру на проценат временских застоја приказан је на Слици 2.23.



Слика 2.22. Зависност брзине од протока у посматраном смеру основног одсека двотрачног пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2000)

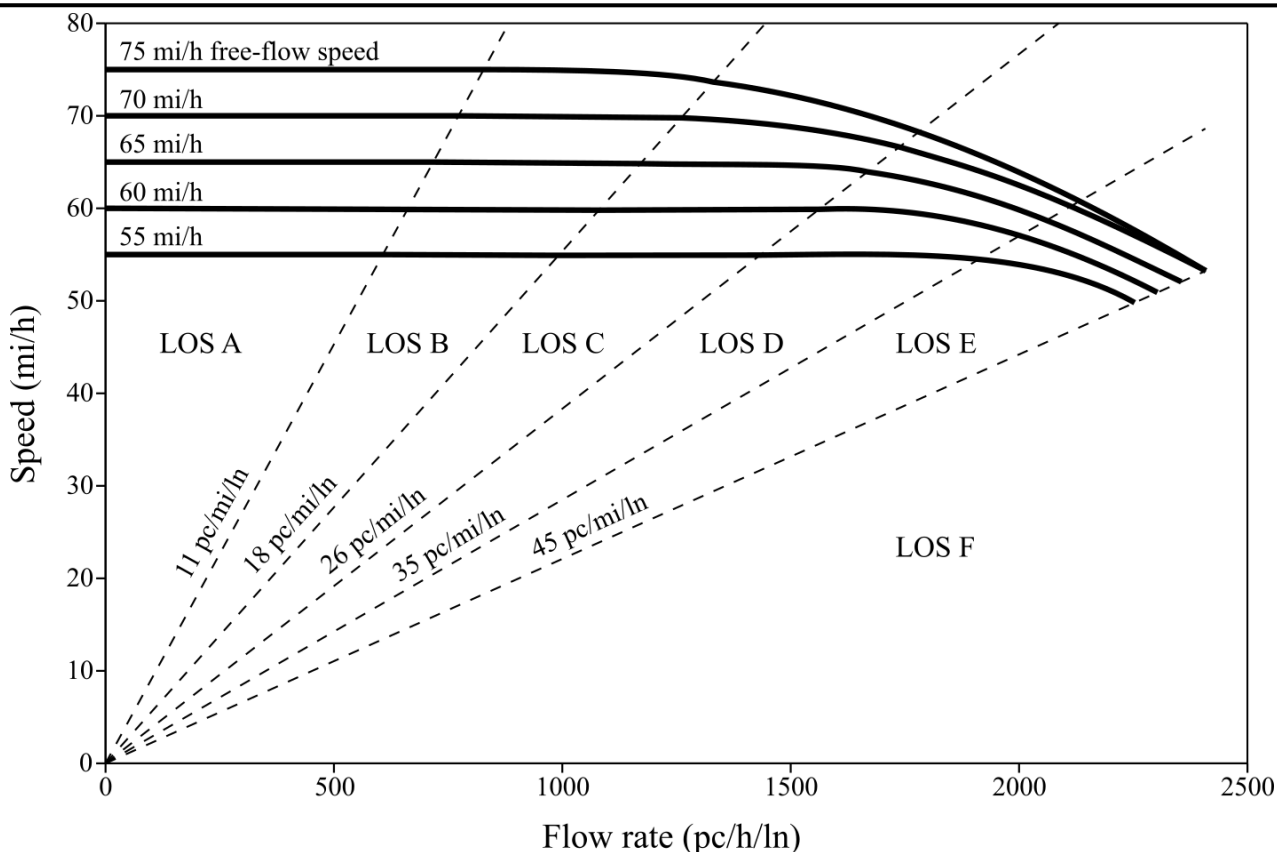


Слика 2.23. Зависност процента временских застоја од протока у посматраном и супротном смеру основног одсека двотрачног пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2000)

2.7. Амерички Приручник за капацитет путева (НСМ, 2010)

Пето издање Приручника објављено је 2010. године (НСМ, 2010) и не доноси велике промене по питању параметра брзине непрекиног тока у односу на претходно издање (НСМ, 2000). За основни одсек ауто-пута методологија за прорачун капацитета и нивоа услуге је веома слична методологији представљеној у претходном издању. У погледу аналитичког концепта, вредности брзина засићеног тока и капацитета при идеалним условима, није било никаквих промена (Слика 2.24), односно вредности капацитета су остале у опсегу од 2.250 до 2.400 путничких аутомобила/час/траци, док се опсег брзина путничких аутомобила при идеалном капацитету креће између 50 mi/h (80 km/h) и 53 mi/h (85 km/h). Ретке промене у петом издању Приручника односе се пре свега на слободну брзину. Тако се може приметити да је и званично усвојена крива за слободну брзину од 75 mi/h (121 km/h), док је код претходног издања она била присутна као експериментална крива, на основу прелиминарних резултата истраживања. У самој методологији то није довело до било каквих промена, осим што је за базну слободну брзину сада дефинисана вредност од 75,4 mi/h (121 km/h), као резултат наведених истраживања у САД на овом типу путева.

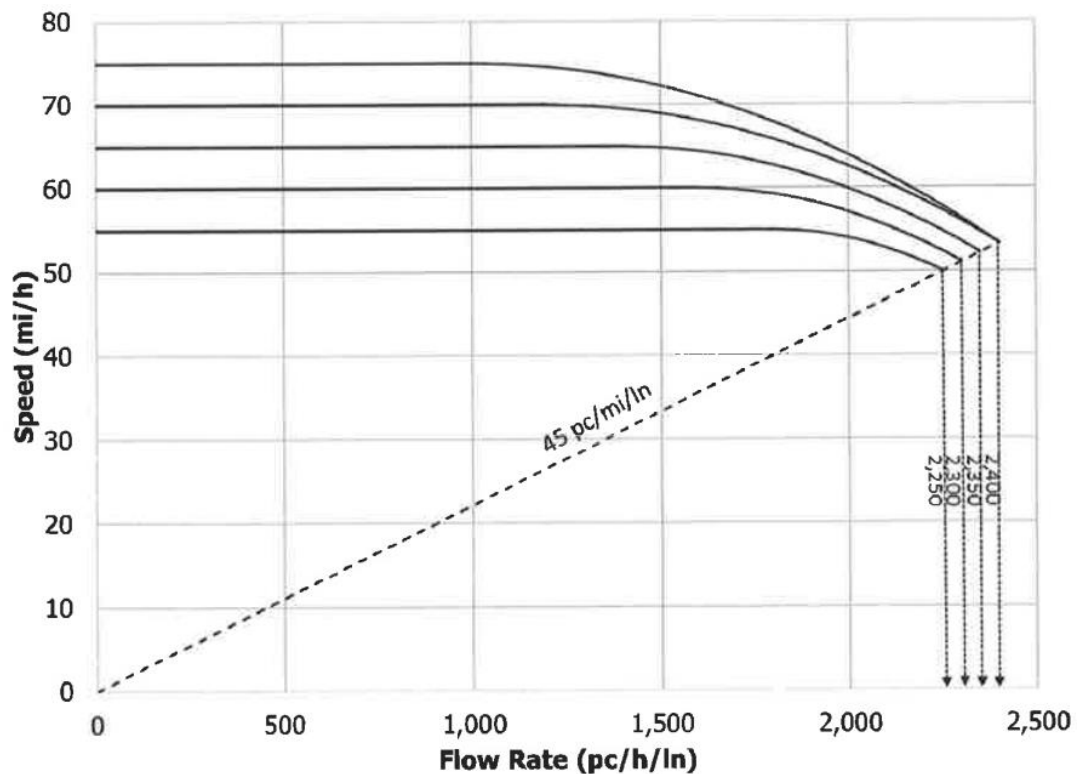
Методологија прорачуна капацитета и нивоа услуге вишестрачних путева у петом издању Приручника (НСМ, 2010) остаје идентична као у претходном издању (НСМ, 2000). Са друге стране, методологија двотрачних путева претрпела је значајније измене. Као резултат нових истраживања, уведена је нова класа двотрачних путева – класа III, која обухвата одсеке двотрачних путева који пролазе кроз насеља и зоне са повећаним степеном атракције у путном окружењу. Ово доводи до благе измене у методологији прорачуна нивоа услуге двотрачних путева ове класе и то благом модификацијом прорачуна просечне брзине путовања. Наиме, критеријум за прорачун нивоа услуге путева ове класе је проценат слободне брзине, односно могућност да се возила крећу блиским вредностима ограничене брзине у наведеним зонама. У прорачуну слободне брзине није било никаквих промена у односу на претходно издање, односно она остаје почетни корак у прорачуну нивоа услуге. Поред наведене промене везане за представљање нове класе двотрачних путева, усвојен је поступак комплетних прорачуна посебно за сваки смер кретања, док је избачена могућност прорачуна заједно за оба смера. Вредности капацитета, брзина и сви остали методолошки кораци и поступци су остали исти као у претходном издању Приручника (НСМ, 2000).



Слика 2.24. Зависност брзине од протока на основном одсеку ауто-пута у условима идеалног саобраћајног тока (HCM, 2010)

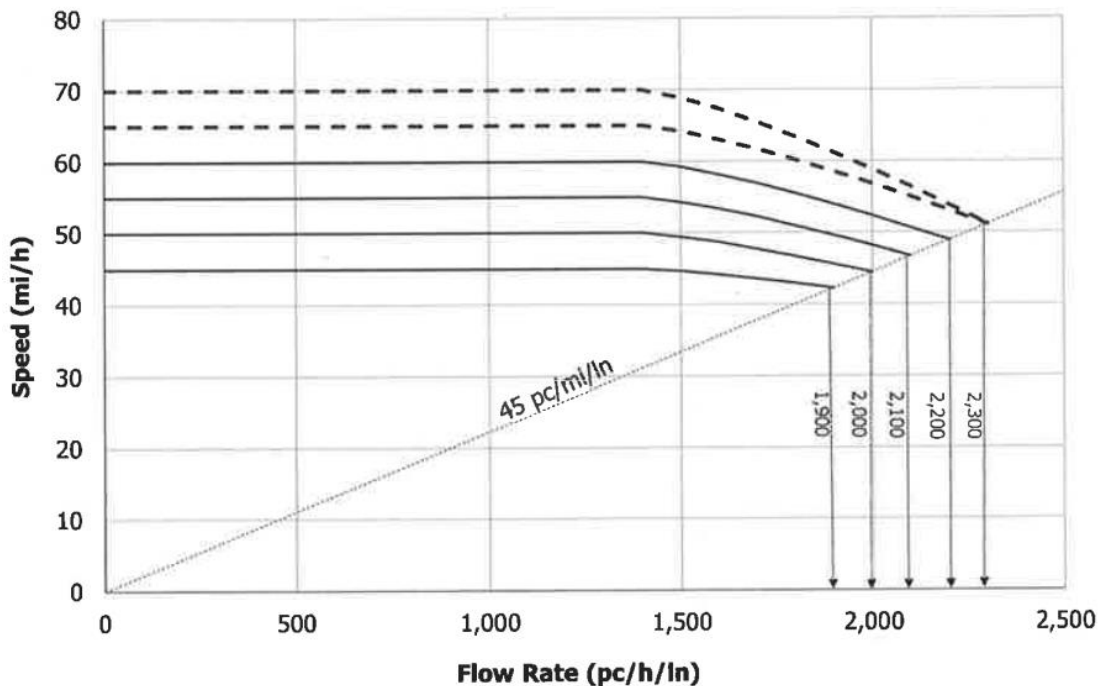
2.8. Амерички Приручник за капацитет путева (HCM, 2016)

Шесто издање Приручника (HCM, 2016) представља даље унапређење петог издања. Другим речима, карактерише га одсуство радикалних промена у основним концепцијама методологије, али су присутни нови алати који омогућавају ефикасније прилагођавање анализа реалним условима на деоници. Једна од новина овог издања Приручника (HCM, 2016) односи се на обједињено посматрање основног одсека ауто-пута и вишетрачног пута с обзиром на сличности у методологијама, уз посебан приказ специфичности које су везане за одређени тип пута. Посматрајући капацитет и брзину при капацитету у идеалним условима основног одсека ауто-пута, вредности су остале као у претходна два издања – у опсегу од 2.250 до 2.400 путничких аутомобила/час/траци, односно између 50 mi/h (80 km/h) и 53 mi/h (85 km/h), респективно (Слика 2.25). Такође, густина је и даље примарни показатељ нивоа услуге.



Слика 2.25. Зависност брзине од протока на основном одсеку ауто-пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2016)

Посматрајући вишетрачне путеве, уочава се да је на дијаграму зависности брзине од протока дат приказ две нове криве слободне брзине – 65 mi/h (105 km/h) и 70 mi/h (113 km/h), али да су ове криве приказане испрекиданом линијом (Слика 2.26). То је због тога што су те криве добијене методом екстраполације, а не на основу података са теренских истраживања, па се ове вредности морају узимати са опрезом (НСМ, 2016).

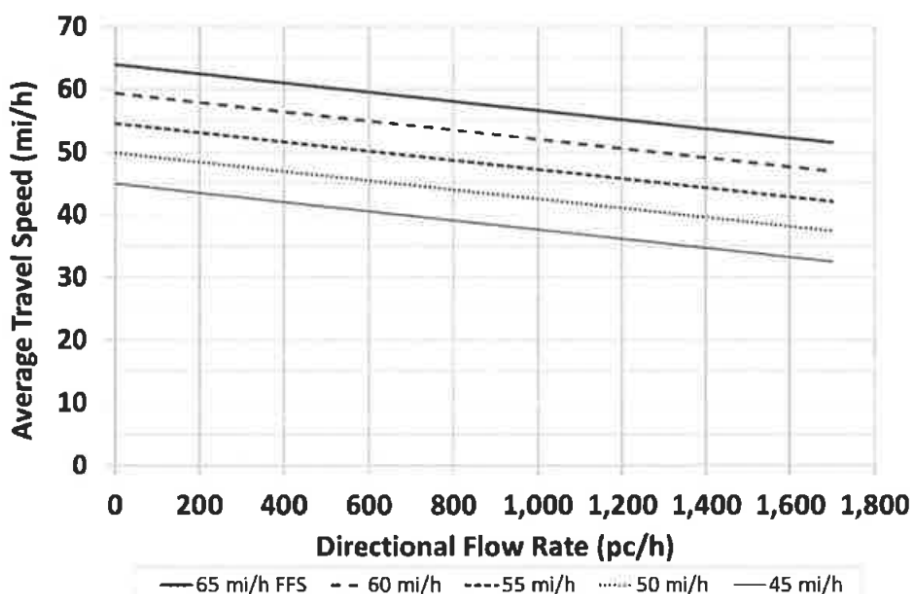


Слика 2.26. Зависност брзине од протока на основном одсеку вишетрачног пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2016)

Анализом претходног дијаграма уочава се пораст распона вредности капацитета и брзине при капацитету у идеалним условима – од 1.900 до 2.300 путничких аутомобила/час/траци, односно 42 mi/h (68 km/h) и 51 mi/h (82 km/h), респективно. Такође, усвојена је јединствена гранична вредност нивоа услуге при капацитету, која износи 45 путничких аутомобила/миљи/траци, у складу са вредностима код ауто-пута. Других измена у методологији прорачуна капацитета и нивоа услуге није било.

Упркос наизглед не тако великим променама, уведене су новине у анализе прорачуна капацитета и нивоа услуге кроз могућност специфичних анализа и калибрација конкретних деоница. Новине се пре свега односе на повећање значаја и могућности калибрације утицаја нерекурентних загушења на брзину и капацитет конкретне деонице кроз инкорпорирање у аналитички поступак утицаја радова на путу, временских неприлика, утицаја возача итд. Такође, омогућен је и прорачун капацитета на основу реалних података са бројних детектора на путевима, анализа утицаја управљајућих трака (HOV – *high-occupancy vehicle* и HOT – *high-occupancy toll*) и иновирани поступак за квантификовање утицаја теретних возила на капацитет и ниво услуге (НСМ, 2016).

Када су у питању двотрачни путеви, већих измена није било, па је поступак прорачуна капацитета и нивоа услуге остао готово идентичан као у петом издању америчког Приручника за капацитет путева (НСМ, 2010). Методологија подразумева спровођење посебне анализе по смеровима према функционалној класификацији деоница на три различите класе пута, критеријуми за дефинисање нивоа услуге остају исти, као и вредности опсега слободних брзина у идеалним условима, док вредност идеалног капацитета и даље износи 3.200 путничких аутомобила/сату у оба смера (Слика 2.27).



Слика 2.27. Зависност брзине од протока у посматраном смеру основног одсека двотрачног пута у условима идеалног саобраћајног тока (НСМ, 2016)

Једине новине се односе на додатна објашњења при коришћењу поступака прорачуна капацитета и нивоа услуге и омогућавања прорачуна додатних критеријума за дефинисање нивоа услуге, чак и ако нису неопходни за конкретну деоницу одређене класе пута (НСМ, 2016).

3. Развој модела за одређивање слободне брзине тока¹

3.1. Дефинисање слободне брзине и опис проблема при прорачуну

У претходном поглављу дат је кратак приказ пораста значаја брзине и развоја нових модела за њену анализу са унапређењем теоријских и практичних знања из области теорије саобраћајног тока. Може се уочити да брзина од најранијих дана настанка ове научне дисциплине има велики значај за идентификацију и разумевање услова у саобраћајном току, који се константно увећавао са усложњавањем саобраћајних проблема на мрежи путева и улица. Као што се могло видети, брзина је у теорији тока и саобраћајном инжењерству широк појам и подразумева бројне облике односно аспекте посматрања који на различит начин помажу при прецизнијим анализама за решавање различитих проблема. Тако су се у зависности од различитих потреба при теоријским и практичним истраживањима издвојили неки од следећих аспеката брзине:

- Средња просторна брзина (енгл. *space mean speed*) представља средњу вредност брзина свих возила у саобраћајном току на некој деоници пута у тренутку, односно просечна брзина добијена на основу просечног времена путовања које је потребно возилима да пређу одређену деоницу пута (НСМ, 2016);
- Средња временска брзина (енгл. *time mean speed*) представља средњу вредност брзина свих возила на пресеку пута у неком временском периоду (НСМ, 2016);
- Просечна брзина путовања (*average travel speed*) представља средњу вредност брзина свих возила добијену на основу просечног времена путовања и дужине деонице;
- Рачунска /пројектна брзина (енгл. *design speed*) представља теоријски одређену брзину за потребе пројектовања путева у смислу одређивања граничних хоризонталних и вертикалних геометријских елемената попут закривљености, нагиба и прегледности, односно највећу безбедну брзину кретања возила у слободном току у најоштријим условима пута (НСМ, 2016);
- Оперативна брзина (енгл. *operating speed*) представља највећу дозвољену брзину којом возач може да путује на деоници пута у добрим временским условима под преовлађујућим условима саобраћајног тока, а која је мања или једнака рачунској/пројектној брзини (ААШТО, 1994; НСМ, 1965). У новијој верзији ААШТО, тзв. Зелене књиге (*Green book*), долази до измене, па се оперативна брзина дефинише као брзина којом возачи возе у условима слободног тока, а најчешће се рачуна као 85-и перцентил брзине возила у току (ААШТО, 2001; Jiang et al., 2016).
- 85-и перцентил брзине представља вредност брзине коју прекорачује 15% возача у току (НСМ, 2016).

Један од аспеката који се издвојио још од првих истраживања, а чији утицај у последње две-три деценије убрзано расте, јесте слободна брзина. Слободна брзина представља директан показатељ конзистентности пројектних елемената пута и, као што је већ речено, не може се дефинисати на јединствен начин. У теоријском смислу, слободна брзина представља средњу просторну брзину возила на деоници пута када густина и проток теже нули (НСМ, 2016). Такође, наводи се и да је то просечна брзина возила на посматраном одсеку пута, измерена у условима ниског протока, када возачи возе жељеним брзинама и нису ограничени

¹ Део материјала приказаног у овом поглављу представљен је у резултатима публикованог рада: Stepanović, N., Tubić, V., & Zdravković, S. (2023). Determining free-flow speed on different classes of rural two-lane highways. *Promet – Traffic & Transportation*, 35(3), 315–330. <https://doi.org/https://doi.org/10.7307/ptt.v35i3.195>

присутвом других возила у току или режимским мерама (НСМ, 2016). Другим речима, слободна брзина представља средњу вредност брзине возила у слободном току, која је условљена пре свега геометријским карактеристикама пута, али и карактеристикама возила, возача и окружења, а не међусобном интеракцијом између возила. Често се поистовећује са данашњим значењем оперативне брзине, односно са 85-им перцентилом брзина возила у слободном току (AASHTO, 2004; Jiang et al., 2016; Lobo et al., 2011).

Док се до почетка XXI века слободна брзина у практичним прорачунима капацитета и нивоа услуге често поистовећивала са пројектном брзином (НСМ, 1950, 1965, 1985), а њено смањење у функцији протока читавало са дијаграма, од објављивања четвртог издања америчког Приручника за капацитет путева (НСМ, 2000) долази до радикалне промене методологије засноване на новим истраживањима. Наиме, слободна брзина постаје први и незаобилазни корак за одређивање капацитета и нивоа услуге свих типова путева на којима су присутни непрекинути и неометени токови. Због тога је нова методологија подразумевала детаљан поступак одређивања слободне брзине на један од два могућа начина: директним мерењем на терену или применом аналитичког поступка. Мерење на терену генерално подразумева мерење средње брзине путничких аутомобила одговарајућег узорка (барем 100 возила) у условима ниских вредности протока, коришћењем неке од метода за мерење брзина у саобраћајном инжењерству (НСМ, 2016). У случају да на конкретној деоници пута не постоје услови ниских вредности протока, могуће је мерење просечних брзина и при вишим вредностима протока уз каснију аналитичку калибрацију тако добијених вредности слободне брзине (НСМ, 2016). Последње се пре свега односи на деонице двотрачног пута јер је граница ниских вредности протока на овом типу пута (≤ 200 путничких аутомобила/часу у оба смера) осетно мања у односу на ауто-путеве и вишетрачне путеве (≤ 1.000 путничких аутомобила/часу/траци). Међутим, слободну брзину често није могуће измерити на терену, посебно ако је у питању пројектовање нове деонице пута, па је развијен аналитички поступак за деонице различитих типова пута на коме су присутни непрекинути и неометени токови. Основни концепт приказаног аналитичког поступка је исти за све типове, а предвиђа квантификацију различитих утицајних фактора и редукцију базне слободне брзине, као што је приказано у једначинама 3.1, 3.2 и 3.3 у наставку (НСМ, 2016):

- Слободна брзина на ауто-путевима:

$$V_{sl} = V_{slo} - F_{\xi T} - F_{BS} - 3,22TRD^{0,84} \quad [3.1]$$

где су:

V_{sl} – слободна брзина основног одсека ауто-пута;

V_{slo} – базна слободна брзина;

$F_{\xi T}$ – фактор утицаја ширине саобраћајне траке;

F_{BS} – фактор утицаја бочних сметњи;

TRD – густина уливно-изливних рампи у утицајној зони деонице.

- Слободна брзина на вишетрачним путевима:

$$V_{sl} = V_{slo} - F_{\xi T} - F_{BS} - F_{RP} - F_{GP} \quad [3.2]$$

где су:

V_{sl} – слободна брзина основног одсека вишетрачног пута;

V_{slo} – базна слободна брзина;

$F_{\xi T}$ – фактор утицаја ширине саобраћајне траке;

F_{BS} – фактор утицаја бочних сметњи;

F_{RP} – фактор утицаја типа разделног појаса;

F_{GP} – фактор утицаја густине приступа.

- Слободна брзина на двотрачним путевима:

$$V_{sl} = V_{slo} - F_{\dot{S}T/BS} - F_{GP} \quad [3.3]$$

где су:

V_{sl} – слободна брзина основног одсека двотрачног пута;

V_{slo} – базна слободна брзина;

$F_{\dot{S}T/BS}$ – фактор заједничког утицаја ширине саобраћајне траке и бочних сметњи;

F_{GP} – фактор утицаја густине приступа.

Приказани аналитички обрасци за сва три различита типа пута показују да слободна брзина на деоници највише зависи од тзв. базне слободне брзине. Базну слободну брзину није лако прецизно одредити и не постоје униформне препоруке за њено дефинисање. Једна од препорука се односи на одређивање базне слободне брзине на основу рачунске брзине деонице. Као објашњење за употребу рачунске брзине, уколико је доступна, НСМ (2016) наводи да је базна слободна брзина јако слична рачунској брзини, јер представља потенцијалну слободну брзину деонице примарно засновану на хоризонталним и вертикалним елементима закривљености, нагиба и прегледности, без утицаја додатних фактора као што су ширина траке, удаљеност бочних сметњи, броја приступних тачака итд. Другим речима, базна слободна брзина подразумева стандардне, односно практично идеалне вредности ширине траке, удаљености бочних сметњи и одсуство било каквих приступних тачака на деоници. Уколико податак о рачунској брзини деонице није познат, НСМ (2016) препоручује коришћење ограничења брзине тако што саветује додавање 5 mi/h (8 km/h) до 7 mi/h (11 km/h) на вредност ограничења брзине код вишетрачних путева, односно 10 mi/h (16 km/h) код двотрачних путева. Аутори Приручника (НСМ, 2016) наводе овај приступ као проблематичан пошто ограничења брзине често нису униформно постављена нити адекватно одражавају услове у саобраћајном току или очекивања возача. Због тога би аналитичари/инжењери требало добро да познају карактер саобраћајног тока и елементе деонице за коју примењују поступак прорачуна слободне брзине. Претходно наведено присутно је у готово неизмењеном облику у америчким приручницима за капацитет путева од увођења нове методологије за прорачун слободне брзине (НСМ, 2000; 2010; 2016).

Најмање непрецизности при прорачуну слободне брзине на основу наведених аналитичких поступака и базне слободне брзине има код основног одсека ауто-пута, с обзиром на доминантно униформне карактеристике елемената овог типа пута. Због тога се за базну слободну брзину препоручује 75,4 mi/h (121 km/h), што је добијено као резултат бројних истраживања. У петом издању Приручника (НСМ, 2010) је ова вредност чак стављена у образац уместо базне слободне брзине, што је онемогућило одабир неке друге вредности брзине. Код вишетрачних путева је ситуација мало сложенија, с обзиром на то да геометријски елементи пута и његова функција у мрежи могу донекле да варирају. Међутим, најизазовнија је примена аналитичког поступка прорачуна слободне брзине код двотрачних путева. Наиме, ванградски двотрачни путеви су најзаступљенији тип пута у путној мрежи свих земаља, а њихова функција и геометријски елементи су изузетно различити. Због тога амерички Приручник за капацитет путева (НСМ, 2016) обухвата двотрачне путеве са опсегом у слободној брзини од 45 mi/h (72 km/h) до 65 mi/h (105 km/h), са напоменом да постоје примери и деоница са 70 mi/h (113 km/h). Посебан проблем представља велика разлика у функцији коју ванградски двотрачни путеви имају у мрежи. Као што је већ речено, у четвртог издању овог приручника (НСМ, 2000) уведена је подела двотрачних путева на две

класе, а од петог издања (НСМ, 2010) додата је и трећа класа, где I и II класа подразумевају ванградске деонице двотрачних путева, док се III класа односи на деонице које пролазе кроз зоне са високим степеном атракција. Прецизније, I класу представљају главни међудржавни и међурегионални путеви, који опслужују даљинске токове, док II класа обухвата приступне путеве путевима I класе, деонице које опслужују туристичке токове, пролазе кроз захтеван терен или обезбеђују почетне и завршне делове путовања. Деонице путева III класе обухватају одсеке путева I и II класе које пролазе кроз насељена места или сличне урбанизоване просторне целине. Услед толико велике варијације у карактеру токова, функцији у мрежи и геометријским карактеристикама деоница, поставља се питање да ли је униформни приступ у одређивању слободне брзине подједнако примењив на свим двотрачним путевима.

Из наведених препорука за дефинисање базне слободне брзине и те како се може уочити утицај на прорачун слободне брзине, а самим тим и на резултате анализе капацитета и нивоа услуге различитих типова путева. То последично може утицати на резултате анализа у разним областима грађевинског и саобраћајног инжењерства – од пројектовања путева и улица, преко управљања саобраћајем, до израде студија оправданости на основу чијих резултата се доноси одлука да ли и када градити, односно који је одговарајући тип саобраћајне инфраструктуре. Овај проблем је посебно присутан при изради бројних студија и пројеката вишетрачних и двотрачних путева, где се због недостатка података о пројектној брзини постојећих путева често примењује препорука додавања одређене вредности брзине на вредност ограничене брзине без додатних детаљних анализа (Fazio et al., 2014; Stepanović et al., 2023). С обзиром на споменуто заступљеност у путној мрежи, али пре свега велику разлику у функцији коју двотрачни путеви имају у мрежи, у наставку рада ће фокус бити управно на овом типу пута. Наиме, функције вишетрачних путева у мрежи се могу разликовати, али је та разлика сведена на повезивање два већа насеља, увођење ванградских токова у урбанизована језгра или опслуживање високо оптерећених коридора (НСМ, 2010). То је утицало и на стандарде у погледу техничких елемената вишетрачних путева, који су доста уједначенији у односу на двотрачне путеве. Код двотрачних путева је разлика у функцији у мрежи драстично већа, што је, као што је већ речено, узроковало неопходност класификације двотрачних путева на три класе. Претходно наведено је директна последица специфичних услова у саобраћајном току, што све заједно двотрачне путеве чини најсложенијим типом пута за прецизно одређивање слободне брзине, односно капацитета и нивоа услуге. Због свега наведеног управо овај тип пута представља највећи изазов за инжењере и потребно је посветити му додатну пажњу како би се испитала могућност унапређења прецизности прорачуна слободних брзина.

3.2. Функционална класификација и категоризација државних путева

Категоризација путева је један од кључних задатака организоване државне управе који у себи обједињује низ различитих критеријума, почев од техничко-експлоатационих, преко управно-административних, до инвестиционих и развојно-политичких. Категоризацијом путева се јасно дефинишу права и обавезе у области планирања, пројектовања, градње и одржавања целокупне мреже. Категоризација путева се пре свега заснива на основној функцији путева, односно на задацима повезивања и опслуживања главних концентрација извора и циљева кретања људи и роба у простору те се индиректно, преко функционалне класификације, повезује са просторним развојем. С друге стране, категоризација путева је директно повезана са политичко-административном организацијом државе те одражава и специфичности исте (Tubić & Maletin, 2008).

Путна мрежа просторно и функционално мора бити сагласна степену просторне и временске концентрације изворних и циљних токова превоза људи и робе. Функција потеза путне мреже директно је условљена категоријама саобраћајних тежишта које повезује сагласно њиховом значају и интензитетима функције у простору (Tubić & Maletin, 2008). На основу претходно наведеног, може се уочити да врста или класа пута проистиче из основне функције, док је тип пута дефинисан према просторном нивоу основне функције коју опслужује (Maletin et al., 2015). Основе функције пута обухватају саобраћајне функције међусобног повезивања саобраћајних тежишта и саобраћајног опслуживања простора у непосредној околини пута, а у складу са тим се путеви деле се на (Tubić & Maletin, 2008):

- **Пристапне** – подразумевају обезбеђење приступа до/од појединачне локације и/или просторне целине (подручја), вођење саобраћајних токова до/од подручног тежишта или до/од деонице вишег функционалног нивоа путне мреже;
- **Сабирне** – имају функцију прикупљања појединачних саобраћајних токова са циљем да се обједињени воде до/од подручног и/или регионалног саобраћајног тежишта или до/од деонице вишег функционалног нивоа путне мреже;
- **Везне** – повезивање појединих подручних и/или регионалних саобраћајних тежишта подразумева функцију саобраћајног обједињавања урбаних насеља и/или других врста саобраћајних тежишта, као и њихово прикључивање на потезе (деонице) највишег функционалног нивоа путне мреже;
- **Даљинске** – обухватају повезивање регионалних и/или државних (макрорегионалних) саобраћајних тежишта и представљају највишу функцију пута, као последица повезивања на већим одстојањима међурегионалног, државног и међудржавног домета.

Када се узму у обзир наведене основне функције пута и просторне функције опслуживања приступачности, формира се осам функционаних типова путева (Слика 3.1). На основу дефинисаних функционалних типова, могу се издвојити четири различита нивоа значаја функције пута (Tubić & Maletin, 2008).



Слика 3.1. Врсте и типови путева према функционалној класификацији (Tubić & Maletin, 2008)

На основу приказаних функционалних врста и типова путева неопходно је дефинисање главне и споредне функције пута, што има за циљ очување минималног захтеваног нивоа услуге путева различитог значаја у мрежи. Када се све ово узме у обзир, стичу се услови за дефинисање административне класификације или категоризације ванградских путева у

мрежи, засновано на просторном развоју и развоју саобраћајних тежишта дефинисаних генералним планом развоја путне мреже (Слика 3.2).

ВРСТА ПУТА	ТИП ПУТА	ФУНКЦИЈА			
		ОПСЛУЖИВАЊЕ	САБИРАЊЕ ТОКОВА	ПОВЕЗИВАЊЕ	ДАЉИНСКО ПОВЕЗИВАЊЕ
ПРИСТУПНИ ПУТ (ПП)	ПП-л	●	○	○	
	ПП-п	●	○	○	
САБИРНИ ПУТ (СП)	СП-п	○	●	○	
	СП-р	○	●	○	
ВЕЗНИ ПУТ (ВП)	ВП-р	○	○	●	
	ВП-м	○	○	●	
ДАЉИНСКИ ПУТ (ДП)	ДП-м		○	○	●
	ДП-д		○	○	●

● ГЛАВНА ФУНКЦИЈА	○ СПОРЕДНА ФУНКЦИЈА	○ САМО ИЗУЗЕТНО
-------------------	---------------------	-----------------

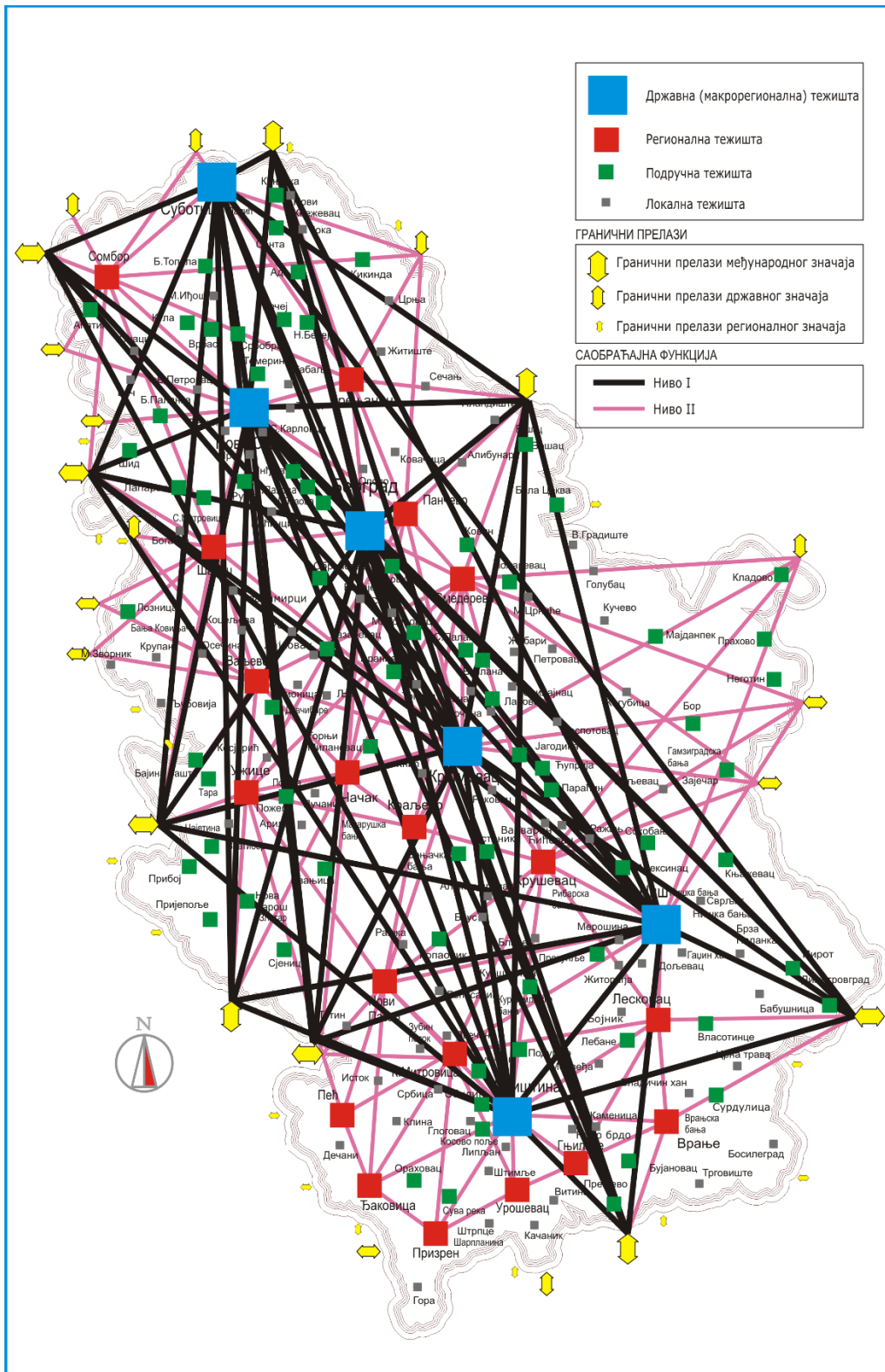
Слика 3.2. Веза категорије путева према административној и функционалној класификацији (Tubić & Maletin, 2008)

Из претходног наведеног проистичу основне планерске карактеристике функционалних класа путева, са генералним односом главних и споредних функција путева и учешћем посебних функција пута (Слика 3.3). Овим се дефинишу критеријуми приступа путевима и однос пута и насеља који пут различите класе треба да обезбеди.

врста пута	тип пута	функција	подебне функције	дужина путовања	проток	брзина	контрола приступа	густина раскрсница	дужина у мрежи
				↓	↓	↓	↓	↑	↑
ПРИСТУПНИ	ПП-л	опслуживање садржаја	подебне функције	↓	↓	↓	↓	↑	↑
	ПП-п			↓	↓	↓	↓	↑	↑
САБИРНИ	СП-п	сабирање токова	подебне функције	↓	↓	↓	↓	↑	↑
	СП-р			↓	↓	↓	↓	↑	↑
ВЕЗНИ	ВП-р	повезивање	подебне функције	↓	↓	↓	↓	↑	↑
	ВП-м			↓	↓	↓	↓	↑	↑
ДАЉИНСКИ	ДП-м	даљинско повезивање	подебне функције	↓	↓	↓	↓	↑	↑
	ДП-д			↓	↓	↓	↓	↑	↑

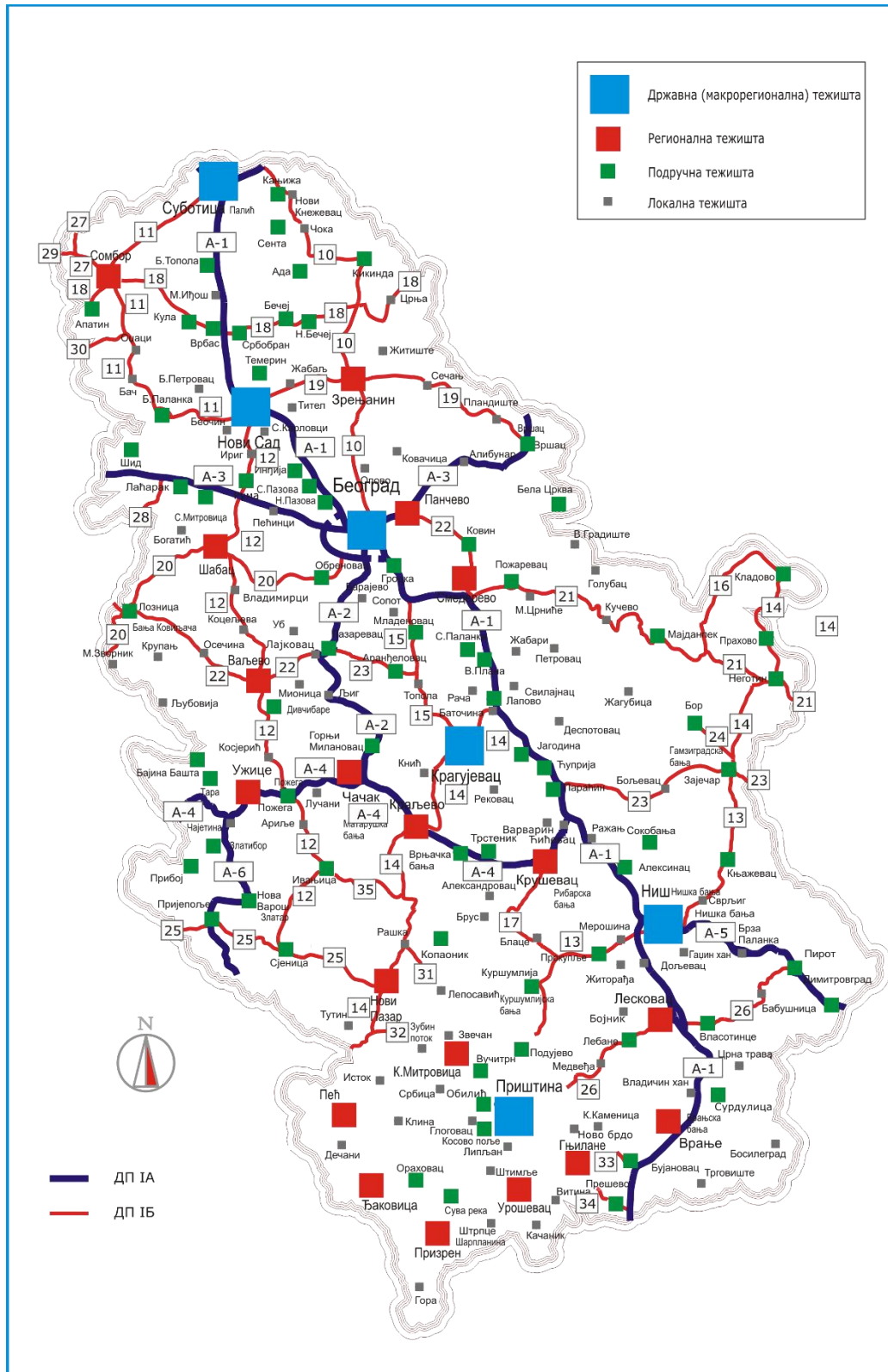
Слика 3.3. Основне планерске карактеристике функционалних типова ванградских путева (Tubić & Maletin, 2008)

На основу дефинисаних критеријума функционалне класификације путева спроведена су истраживања саобраћајних тежишта у Србији, важности граничних прелаза и саобраћајних функција, а на основу чега су дефинисане линије жеља, које су приказане на Слици 3.4 (Maletin & Tubić, 2012).



Слика 3..4. Саобраћајна тежишта и саобраћајне функције на територији Србије (Maletin & Tubić, 2012)

Анализом свих наведених критеријума функционалне класификације, саобраћајног оптерећења, степена опслуживања територије и становништва постојећим путевима и степена директности повезивања тежишта, добијен је предлог примарне мреже државних путева, односно државних путева I реда (Maletin & Tubić, 2012). Мрежа државних путева I реда приказана је на Слици 3.5.



Слика 3.5. Предлог мреже државних путева I реда Републике Србије, без АП КиМ (Maletin & Tubić, 2012)

На основу свеобухватне анализе добијена је коначна административна класификација, односно категоризација путева, у складу са функцијом коју исти имају у мрежи. Према актуелној административној класификацији, државни путеви у Републици Србији деле се на:

- државне путеве I реда, који се састоје из путева IA и IB реда и
- државне путеве II реда, који се састоје из путева IIA и IIB реда.

Упоредјујући са приказаном поделом ванградских путева на којима су присутни непрекинути и неометени саобраћајни токови према америчком Приручнику за капацитет путева (НСМ, 2016), могу се издвојити категорије путева и деонице које се подударају са приказаном класификацијом у Србији. Тако ауто-путеви недвосмислено спадају у државне путеве IA реда, а реч је о путевима који опслужују даљинске токове међурегионалног и међудржавног значаја. Малобројни вишетрачни путеви у Србији углавном имају значај повезивања региона, и то нарочито са великим саобраћајним и привредним тежиштима, па су категорисани као путеви IB реда. Највише варијација у функцији, а самим тим и у категорији саобраћајнице, може се уочити код двотрачних путева, што је наведено и у америчком Приручнику за капацитет путева (НСМ, 2016). Претходно објашњени двотрачни путеви I класе већински се могу упоредити са путевима IB реда у Србији, с обзиром на доминантну функцију даљинских опслуживања између региона и других држава, што одговара циљевима обезбеђивања високих брзина и ниских времена путовања дефинисаних и у америчком Приручнику за капацитет путева (НСМ, 2016). Путеви II класе доминантно одговарају деоницама IIA реда, због циљева повезивања региона и сабирања токова који углавном воде ка путевима IB реда. Свакако, деонице путева IB и IIA реда које пролазе кроз захтеван терен одговарају II класи путева на основу критеријума дефинисаних у америчком Приручнику за капацитет путева (НСМ, 2016), као и поједини путеви који се налазе у близини туристичких центара. Двотрачним путевима III класе одговарају деонице путева IB и IIA реда које пролазе кроз насеља, односно урбанизоване целине дуж путева. Овакве деонице су релативно честе у Србији на мрежи ванградских путева услед недостатка процеса адекватног урбанистичког планирања простора у мањим срединама и недостатка контроле спровођења основних пројектантских и планерских начела односа пута и насеља.

3.3. Утврђивање слободне брзине на двотрачним путевима

Специфични услови у саобраћајном току на двотрачним путевима у односу на остале типове путева последица су пре свега маневра претицања који се спроводи у траци намењеној за кретање у супротном смеру, односно директног утицаја који имају параметри саобраћајног тока једног смера на други. Маневар претицања је ограничен потребном за претицајном прегледношћу и прихватљивим интервалом слеђења возила из супротног смера. Како захтевани проток на деоници расте, тако се смањују прихватљиви интервали слеђења и могућности за претицање опадају. Ово узрокује стварање плотуна возила у току и пад брзине, односно повећање временских губитака. Из претходно наведеног може се уочити да однос захтева и могућности за претицање директно зависе од величине и расподеле тока по смеровима, а услови у току се нагло погоршавају при знатно мањим вредностима протока у односу на остале типове путева (НСМ, 2016). Све заједно, уз већ објашњену разлику у функцији коју имају у мрежи, јасно приказује комплексност анализе услова у саобраћајном току на двотрачним путевима.

С обзиром на то да је први корак у анализама услова у току увек прорачун слободне брзине, пре свега се поставља теоријски осетљиво питање одређивања границе слободног тока. Питање се односи на одређивање границе где престаје слободан а почиње нормалан (стабилан) ток, односно где пораст интеракције између возила изазива прелазак слободне у

брзину стабилног тока. Наиме, још од првих истраживања Greenshields et al. (1935), преко првог издања америчког Приручника за капацитет путева (НСМ, 1950), па све до многобројних данашњих истраживања, као нпр. Vogel (2002), Lobo et al. (2011) или Silvano et al. (2020), спроводе се анализе дефинисања граничне вредности између слободног и нормалног (стабилног) саобраћајног тока, али и параметра на основу ког се та гранична вредност одређује. У првим истраживањима Greenshields et al. (1935) проток је издвојен као параметар за дефинисање ове границе, па је тако за двотрачне путеве она износила 400 до 600 возила/час. Каснија истраживања закључују да је интервал слеђења још погоднији параметар за одређивање ове границе због релативно једноставног мерења и могућности за утврђивање зависности са слободном брзином, па се у првом издању америчког Приручника за капацитет путева (НСМ, 1950) спомиње 9. секунда као гранична вредност. Ова вредност се у великој мери подудара са истраживањима Greenshields et al. (1935) када се исказе кроз вредност протока. Наиме, када се узме у обзир средња вредност при временски равномерном наиласку возила, проистиче да гранична вредност слободног тока износи 400 возила/час. Из анализе генералних резултата граничних вредности слободног тока у условима временски равномерног тока произилази да услови слободног тока владају до 450 возила/час (Kuzović, 1987). Међутим, истраживања која су узела у обзир изразиту неравномерност саобраћајног тока у времену показала су да ова гранична вредност може бити и значајно нижа, чак до 100 возила/час/траци (Lobanov et al., 1970; Siljanov, 1977). Може се приметити и да амерички Приручник за прорачун капацитета (НСМ, 2016) наводи границу протока од 200 путничких аутомобила/час/оба смера као горњу границу за мерење вредности слободне брзине на терену, која се у великој мери поклапа са претходно наведеним резултатима. Управо се због бољег квантификовања неравномерности и погодности при мерењима на терену у данашњим истраживањима најчешће ова граница одређује на основу интервала слеђења, нпр. код Lobo et al. (2011), а понегде се употребљавају и проток и интервал слеђења, нпр. код америчког Приручника за капацитет путева (НСМ, 2016). Међутим, у досадашњим истраживањима може се уочити да није дефинисана јединствена гранична вредност интервала слеђења, већ је присутан велики распон у препорученим вредностима овог параметра. Непрецизне граничне вредности интервала слеђења знатно отежавају прорачун слободних брзина, посебно на двотрачним путевима, због наведених специфичности које се јављају на овом типу пута.

Како би се последице неусаглашености резултата ове теоријске дилеме умањиле, односно како би прорачун слободне брзине био унификован и олакшан за практичну примену саобраћајним инжењерима, знатан број истраживача, попут Fazio et al. (2014) или Hashim (2011), у својим радовима се бавио развојем модела за прорачун слободне брзине. Међу развијеним моделима по практичној примени се посебно истиче већ наведени модел интегрисан у најкоришћенијем приручнику за анализу капацитета и нивоа услуге – НСМ (НСМ, 2016). Према НСМ-овом моделу, прорачун слободне брзине се, као што је већ објашњено, спроводи на основу базне слободне брзине, за чије одређивање не постоје прецизне препоруке, већ је наведена употреба рачунске/пројектне брзине деонице или додавање фиксне вредности брзине (10 mi/h – 16 km/h) на вредност ограничене брзине. Из наведених препорука за утврђивање базне слободне брзине јасно се могу уочити проблеми и потенцијална непрецизност у прорачуну слободне брзине. С обзиром на веома различите функције двотрачних путева у мрежи, различите геометријске карактеристике и тип терена кроз који пролазе, поставља се питањ да ли коришћење јединствене препоручене вредности од 10 mi/h (16 km/h) и коначног облика модела за прорачун слободне брзине може проузроковати грешке у даљим анализама просечне брзине путовања, а последично и капацитета и нивоа услуге. Проблем јединствене препоручене вредности препознао је и сам НСМ (2016), али детаљније анализе по класама путева до сада нису спроведене. Потенцијалне непрецизности које услед овог настају утичу на доношење одлука о развоју путне мреже, усвајање адекватних управљачких мера итд. Један од примера најчешће употребе анализе слободне и просечне брзине тока је у процесу пројектовања ванградске

путне мреже, кроз израду студија оправданости, чија валидност управо зависи од наведених параметара. Наиме, брзина представља једну од кључних улазних вредности разних трошковних модела у *cost/benefit* анализама, а од њеног што прецизнијег утврђивања директно зависи и алгоритам трагања за рационалним решењима. Непрецизан прорачун слободне брзине, а самим тим и просечне брзине, може довести до великих грешака у прорачуну користи путне инфраструктуре и доношењу адекватне одлуке о развоју исте. На основу претходно наведеног, уочена је неопходност за дефинисањем прецизнијих аналитичких модела за прорачун слободне брзине по класама ванградских двотрачних путева (Stepanović et al., 2023). Наведени проблеми постају још израженији, а потреба за прецизнијим аналитичким моделима већа у случају када постављено ограничење брзине не одговара карактеристикама пута и окружења, односно када ограничења нису кредибилна (Goldenbeld & Van Schagen, 2007).

Имајући у виду наведене проблеме, један од основних циљева ове дисертације односи се на развој модела за предвиђање брзине слободног тока у функцији ограничења брзине и геометријских карактеристика пута за различите класе ванградских двотрачних путева. Да би се развили одговарајући модели, преваходно је било неопходно одредити граничне вредности временског интервала слеђења у условима слободног тока за различите класе ванградских двотрачних путева, што је такође један од теоријских доприноса истраживања. Дакле, главни допринос лежи у посебној анализи брзине слободног тока по класама ванградских двотрачних путева и у величини узорка на основу већег броја деоница на којима је спроведено истраживање. Развијени модели омогућавају прецизно аналитичко одређивање брзине слободног тока за различите класе ванградских двотрачних путева без теренских мерења, што значајно смањује време и трошкове анализе. Ово је посебно важно у процесу пројектовања нових путева, када теренска мерења нису могућа. Прецизно одређивање вредности брзине слободног протока по различитим класама ванградских двотрачних путева значајно је због веће тачности анализе капацитета и нивоа услуге, усвајања одговарајућих мера управљања саобраћајем, израде студија оправданости итд. (Stepanović et al., 2023).

3.3. Преглед литературе

У овој тачки дат је приказ досадашњих резултата истраживања теоријских и практичних проблема при одређивању брзине слободног тока ванградских двотрачних путева. У првом делу приказана је проблематика, различите методологије и резултати истраживања граничне вредности временског интервала слеђења слободног тока, а затим и фактора који утичу на брзину слободног тока.

3.3.1. Анализа граничне вредности слободног тока

Слободан саобраћајни ток представља ток у коме је брзина кретања возила условљена пре свега геометријским карактеристикама пута, али и карактеристикама возила, возача и окружења. Другим речима, на кретање возила у слободном току не утиче међусобна интеракција између возила (Tubić et al., 2022). Дефинисање граничне вредности слободног тока, односно вредности која јасно дефинише када интеракција између возила утиче на кретање а када не, било је предмет бројних досадашњих истраживања. Као најпогоднији параметар за дефинисање те границе показао се интервал слеђења возила у току, због релативно једноставног утврђивања и могућности за испитивање зависности са слободном брзином, нпр. код Lobo et al. (2011). Међутим, досадашња истраживања нису потврдила неку јединствену вредност интервала слеђења, већ се могу уочити бројне разлике. Гранична вредност интервала слеђења у условима слободног тока на двотрачним путевима наведена је још у првом издању америчког Приручника за капацитет путева (HCM, 1950), где је

износила 9 s, док је и трећем издању истог приручника (НСМ, 1985) наведена граница од 5 s приликом објашњавања једног од критеријума за дефинисање нивоа услуге двотрачних путева – процента временских застоја. Наиме, наглашено је да се испод наведене границе возила крећу у плотуну услед немогућности за претицање, односно под утицајем међусобне интеракције са осталим возилима у току. Новија издања овог приручника (НСМ, 2000, 2010, 2016) дефинишу ову границу на 3 s.

Homburger et al. (1996) препоручили су вредности од 4 s као минимални интервал слеђења за возила у слободном току, али су нагласили да је пожељно узети веће вредности (преко 7 s) уколико саобраћајни услови то дозволе. Вредност од 4 s користили су и Mahmud et al. (2021), али методологија за добијање ове вредности није објашњена.

Најчешће коришћена гранична вредност за услове у слободном току је 5 s, нпр. Fitzpatrick et al. (2000), Hashim (2011), Medina & Tarko (2005), Sekhar et al. (2016). Hashim (2011) је на пресецима 20 деоница ванградских двотрачних путева у Египту, са приближно хомогеним геометријским и саобраћајним карактеристикама, испитивао однос интервала слеђења и слободне брзине тока. На основу података добијених са аутоматских бројача саобраћаја, поредећи 85-ти перцентил брзина возила у току са интервалима слеђења, закључио је да при вредностима интервала слеђења већим од 5 s нема значајног одступања у брзинама, односно да је то граница слободног тока (Hashim, 2011). Поред овог истраживања, минимална вредност интервала слеђења од 5 s коришћена је и у другим студијама, попут Fitzpatrick et al. (2000), Medina & Tarko (2005), Sekhar et al. (2016), али у појединим радовима није објашњен нити наведен поступак утврђивања граничне вредности интервала слеђења.

Lobo et al. (2011) предложили су петостепени модел за утврђивање минималне граничне вредности интервала растојања између возила при којем брзина првог возила нема утицаја на брзину другог возила. Снимање уређајима који су базирани на Доплеровом ефекту изведено је на 4 пресека (два правца и две хоризонталне кривине) деонице ванградског двотрачног пута у Португалији, током добрих временских услова, у трајању од 12 узастопних часова у условима слободног тока. Добијени резултати базирани на укупно 32.933 снимљена возила показују да при вредностима интервала међурастојања између возила већим од 6 s нема утицаја на брзину кретања пратећег возила. Иста вредност интервала међурастојања од 6 s коришћена је и у Lamm et al. (1990), али без детаљнијег објашњења. Вредност интервала слеђења од 6 s добила је и Vogel (2002) применом развијене методологије базиране на снимању саобраћајних карактеристика више од 100.000 возила на четворокракој раскрсници у Шведској.

Како би осигурали да су приликом мерења брзина на различитим типовима саобраћајница присутни услови слободног тока, Fazio et al. (2014) користили су просечне вредности интервала слеђења веће од 7 s, позвавши се на резултате истраживања које су спровели Currin (2001), Homburger et al. (1996) и Robertson et al. (1994). Silvano et al. (2020) су приликом истраживања утицаја ограничења брзине и геометријских карактеристика градских саобраћајница на брзину слободног тока дошли до закључка да критична вредност интервала слеђења при коме ће се возила са вероватноћом од 50% наћи ван услова слободног тока износи око 7 s. Утврдили су и да вероватноћа драстично опада (<10%) приликом интервала слеђења већег од 10 s, што је гранична вредност коју је нпр. добио и Luttinen (1996) за двотрачне ванградске и градске саобраћајнице.

Поред наведених, у литератури се појављују и вредности интервала међурастојања веће од 8 s (Lin et al., 1996), при којима долази до стабилизације брзина, односно престанка утицаја осталих возила.

3.3.2. Анализа утицајних фактора на брзину слободног тока

У моделима који фигуришу у већ споменутом америчком Приручнику за капацитет путева (HCM, 2016) уочљив је потенцијални утицај ограничења брзине на слободну брзину, кроз препоруке за одређивање базне слободне брзине. Иако у овом моделу ограничење брзине није експлицитно наведено као утицајни фактор, поједина истраживања бавила су се директним испитивањем утицаја ограничене на слободну брзину тока. С обзиром на дефиницију слободне брзине, поставља се питање у којој мери ограничена брзина може утицати на „жељену брзину возача“, као и да ли је тај утицај последица геометријских карактеристика пута које би ограничење брзине требало да репрезентује или је последица потенцијалних казни које би возач могао да добије у случају прекорачења (Stepanović et al., 2023). Прегледом искустава бројних земаља издвојена су четири карактеристична принципа за постављање ограничења брзине (TRB, 1998):

- Инжењерска метода: одређивање 85-ог перцентила дистрибуције брзине слободног саобраћајног тока, како би се осигурало да ограничења буду прихватљива за већину возача;
- Ограничења брзине у складу са геометријским елементима пута (минимални радијуси хоризонталних и вертикалних кривина, узудужни нагиби, ширина коловоза, ширина банкина итд.), односно са рачунском брзином;
- Постављање ограничења брзине у складу са околином пута (стамбене и комерцијалне зоне, ванградска подручја);
- Постављање ограничења брзине са циљем минимизирања укупних друштвених трошкова (трошкови експлоатације, саобраћајних незгода, загађења, буке итд.).

Методe дефинисања ограничења брзине се у пракси заснивају на комбинацији наведених метода, а најчешће се употребљава рачунска брзина (Skszek, 2004) и 85-и перцентил брзина (Krammes et al., 1996; MUTCD, 2009). Бројни аутори су анализирали утицај ограничене брзине на брзину слободног тока, нпр. Fazio et al. (2014), Fitzpatrick et al. (2003). Nimes et al. (2013) су показали оправданост коришћења ограничења брзине у моделима за одређивање слободне брзине употребом приступа економетријског моделовања. Са друге стране, поједини истраживачи сматрају да се ограничење брзине не треба посматрати као независна променљива у моделима за одређивање слободне брзине заједно са рачунском брзином и геометријским карактеристикама пута, с обзиром на високу корелацију између ових променљивих (Wang et al., 2006).

Nashim (2011) је на основу утврђене граничне вредности интервала слеђења у слободном току од 5 s анализирао утицај ограничења брзине на брзину слободног тока. Анализа је обухватила 20 деоница ванградских двотрачних путева хомогених карактеристика са аутоматским бројачима саобраћаја, а на свима је било важеће опште ограничење брзине од 60 km/h. Анализе су показале да је 85-и перцентил брзина варирао од 51,1 km/h до 88,6 km/h, те да би уместо општег ограничења брзина требало поставити посебна ограничења брзина за сваку деоницу на основу инжењерске студије. Nashim (2011) даље наводи да би ограничења брзина морала да буду приближна 85-ом перцентилу слободних брзина возила како би возачи поштовали иста, с обзиром на то да се проценат прекорачења кретао од 4% до 75% на посматраним деоницама.

Fazio et al. (2014) су испитивали утицај ограничења брзине на слободну брзину возила на 10 деоница са различитим ограничењем брзине – од 30 km/h до 120 km/h, од којих су пет градске, три вишетрачне а све аутопутске деонице. Брзине, протоци и интервали слеђења мерени су три радна дана у условима дневне светлости и сувог коловоза, а како би се обезбедили услови слободног тока, разматране су брзине путничких аутомобила прикупљене при вредностима протока мањим од 500 возила/часу и интервалима слеђења већим од 7 s.

Брзине су мерене радаром за барем 100 путничких аутомобила, а укупно је забележено 1.668 брзина на свим деоницама, након чега је на основу стандардног одступања извршено претварање у средњу просторну брзину. Добијени модел применом линеарне регресије карактерише изузетно висок коефицијент корелације од 0,99. Испитана је и зависност утицаја ограничења брзине на слободну брзину у случајевима различитих типова пута, а резултати линеарне регресије су показали статистички значајан утицај и висок степен корелације у оквиру сваке од посматраних категорија (Fazio et al., 2014).

Ye et al. (2001) су развили модел за утврђивање слободне брзине возила који је укључио ограничење брзине, број трака, намену земљишта у околини пута (градска или ванградска) и тип пута (аутопутска деоница или деоница другог типа). С обзиром на различите утицаје, посебно су развијени модели за путничке аутомобиле и теретна возила, као и за дневне и ноћне услове вожње. С обзиром на нормалну расподелу брзина у слободном току, коришћен је линеарни модел уз калибрацију методом најмањег квадрата. Истраживања су спроведена на репрезентативним деоницама даљинских путева државе Индијане опремљених аутоматским бројачима саобраћаја, а за брзине слободног су одабране брзине у условима протока мањег од 1.000 возила/час за деонице са две, односно 1.500 возила/час за деонице са три саобраћајне траке. Резултати су, између осталог, показали да са повећањем ограничења брзине долази до раста слободне брзине путничких аутомобила и теретних возила, осим у условима ноћне вожње, када није уочен значајан утицај ограничења брзине на брзину путничких аутомобила.

Mahmud et al. (2021) испитивали су на ванградским двотрачним путевима у Мичигену утицај промене општег ограничења брзине са 55 mi/h (88 km/h) на 65 mi/h (105 km/h) на промену брзине саобраћајног тока. Истраживање је обухватило снимање брзина слободног тока – минимум 100 путничких аутомобила и 10 теретних возила по смеру, са минималним интервалом слеђења од 4 s, пре и након промене ограничења брзине које се догодило 2017. године. Такође, мерења су спроведена и на контролним деоницама, на којима је ограничење остало непромењено, са циљем испитивања евентуалног преливања ефекта повећаног ограничења брзине. Мерења брзина на укупно 46.162 возила у слободном саобраћајном току извршена су употребом видео камера или радара базираних на технологији ласерског скенирања – LiDAR (енгл. *Light Detection and Ranging*), и то на укупно 67 деоница на којима је дошло до промене ограничења, као и на 28 контролних деоница. Већина обухваћених деоница подразумевала је идеалне карактеристике (прав пут, одсуство нагиба итд.), али је укључена и група деоница са малим вредностима радијуса хоризонталних кривина са препорученом брзином мањом од 55 mi/h (88 km/h), јер је на њима забележен висок број саобраћајних незгода као последица брзине. Коришћењем квантилне регресије добијени су резултати који показују да је са повећањем ограничене брзине дошло до повећања просечне брзине тока у распону од 3,8 mi/h до 4,5 mi/h (6,1 km/h – 7,2 km/h), док су 85-и перцентили брзина возила повећани у распону од 4,0 mi/h до 5,0 mi/h (6,4 km/h – 8,0 km/h), уз пораст стандардне девијације брзина возила. На контролним деоницама брзина је остала непромењена или су забележене ниже вредности, што показује да није забележен ефекат преливања са суседних деоница на којима је ограничење брзине повећано. Такође, утврђено је да степен утицаја промене брзине у току зависи од геометријских карактеристика пута, па је тако показано да на деоницама са повољним карактеристикама агресивни возачи више повећавају брзину у односу на пасивне и возаче средњих карактеристика (Mahmud et al., 2021).

Silvano et al. (2020) истраживали су утицај промене ограничења брзине и карактеристика градских саобраћајница на слободну брзину возила у току применом латентне параметарске вероватноће (енгл. *parametric probabilistic latent approach*). Подаци су добијени мерењем брзина и интервала слеђења, са укупним узорком од око 67.000 возила, пре и након промене

ограничења брзина са 50 km/h на 40 km/h на 32 градске деонице у Шведској. Све локације на којима је извршено мерење су биле на средини деонице са правом првенства, удаљене од сигналисаних, кружних раскрсница и пешачких прелаза. Резултати су показали да је вероватноћа засићеног тока у великој мери зависна од интервала слеђења и разлике брзина између возила, али само када је растојање слеђења возила мање од 60 m. Такође, резултати су показали да модел добро описује утицај промена карактеристика на слободну брзину, као и да је највећи утицај намене земљишта поред пута, паркинга и тротоара. Промена ограничења брзине утицала је на расподелу слободних брзина возила, као и на брзине у засићеном току, а израженији утицај утврђен је на приградским областима у односу на саобраћајнице у централним градским зонама (Silvano et al., 2020).

Бројна истраживања су се односила на испитивање утицаја геометријских карактеристика пута на слободну брзину. Једно од таквих истраживања спровели су Medina & Tarko (2005), који су узели у обзир утицај просечне брзине тока, дисперзије брзина, геометријских карактеристика и ограничења брзине на модел за прорачун слободних брзина ванградских двотрачних путева. На тај начин су омогућили предвиђање било ког перцентила брзине, посебно посматрајући утицај геометријских карактеристика на просечну брзину тока и дисперзију брзине. Sekhar et al. (2016) су у испитивању спроведеном на двотрачним путевима различитог стања коловоза у Индији показали да са погоршањем стања коловоза брзина слободног тока линеарно опада, нарочито код малих и великих путничких аутомобила. Lovrić & Breški (2014) су истраживали адекватан модел за прорачун слободних брзина на ванградским двотрачним путевима у Босни и Херцеговини. Мотив за ову анализу пронађен је у специфичним карактеристикама путне мреже које узрокују проблеме у примени најзначајнијих постојећих методологија, попут модела из познатих приручника за прорачун капацитета и нивоа услуге – америчког HCM-а или немачког HBS-а (нем. *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*). Мерења брзина спроведена су на 9 деоница различитих геометријских карактеристика – од најбољих ка најлошијим. Брзине путничких аутомобила мерене су камерама, како би се добила средња просторна брзина, у условима слободног тока, односно са протоком од мање од 200 возила/час у оба смера. Укупни узорак износио је 578 возила. Зависност је испитивана применом вишеструке линеарне регресије, а показана је статистичка значајност променљивих које се односе на степен хоризонталне закривљености, ширину саобраћајне траке и просечан уздужни нагиб, где прве две променљиве имају највећи утицај на слободну брзину (Lovrić & Breški, 2014).

Поред модела за прорачун слободне брзине тока развијених и публикованих у бројним научним радовима или на стручним конференцијама, од којих су неки од најзначајнијих наведени у претходном делу, модели за практичну примену развијани су и објављивани у бројним светским приручницима за прорачун капацитета и нивоа услуге. Као што је већ наведено, најкоришћенији и приручник са најдужом традицијом јесте амерички Приручник за капацитет путева, било у оригиналној или верзијама калибрисаним на локалне услове, као што је нпр. верзија HCM-а креирана за потребе специфичности путне мреже Индије (Indo-HCM, 2017). Поред бројних приручника којима је HCM послужио као основа за калибрисање, постоје и они којима је овај приручник био само узор за циљеве сопствених обимних истраживања. Један од таквих је немачки Приручник за капацитет путева – HBS (нем. *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*), чија је прва верзија публикована 2001. године, док је актуелна верзија из 2015. године (HBS, 2015). У односу на амерички, немачки Приручник има доста мању примену јер је ограничен смерницама и стандардима за пројектовање које су важеће пре свега у Немачкој. Наиме, полазна претпоставка за употребу методологије овог приручника је прецизна подела путева по категоријама у складу са RIN-ом (*Richtlinien für integrierte Netzgestaltung – Guidelines for Integrated Network Design*), па је и употреба овог приручника доста ограничена у другим земљама (HBS, 2015). Ограниченост употребе овог приручника приметна је и у Републици

Србији, па иако би поједине деонице двотрачних путева могле да се класификују у складу са RIN-ом, јер имају исте пројектне стандарде, то не би било могуће применити на већини деоница. За разлику од HBS-а, који је доминантно ограничен дефинисаним пројектним стандардима, HCM-ова класификација подразумева разврставање пута у складу са функцијом коју има у мрежи (HCM, 2016), па се она може применити у бројним државама/регионима, између осталог и у Србији. Поред наведених приручника, на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду је крајем XX века развијен Новокласични поступак за прорачун капацитета и нивоа услуге на бази искустава из методологије америчких приручника за капацитет путева и многобројних домаћих истраживања (Kuzović, 1994, 2000). Према Новокласичном поступку, прорачун слободне брзине такође је дефинисан као почетни корак у анализама, а заснива се на геометријским карактеристикама деонице, попут ширине коловоза и банкина, минималног радијуса хоризонталних кривина, уздужног нагиба и стања коловоза (Kuzović, 1994, 2000). Због свега наведеног, а пре свега због широке примене и универзалне класификације према функцији пута у мрежи, као референтни модел за валидацију издвојио се HCM-ов модел за прорачун слободне брзине.

3.3.3. Рекапитулација закључака досадашњих истраживања о брзини слободног тока

На основу прегледа актуелне литературе, истакнут је проблем прецизног утврђивања границе слободног тока, што представља отворено питање за даља истраживања. Наиме, базни приступ у утврђивању граница слободног тока на основу постулата теорије саобраћајног тока базира се на утврђивању граничне вредности интервала слеђења. Временом су истраживачи покушали да утврде ту границу појединим практичнијим методама, нпр. преко протока, али је ипак потврђено да је интервал слеђења најпогоднији параметар за овај проблем, нпр. код истраживања Lobo et al. (2011) или Mahmud et al. (2021). Међутим, до сада су бројни истраживачи користили одређену вредност интервала слеђења возила као граничну вредност слободног тока, али без конкретних објашњења, као нпр. Lamm et al. (1990) или Mahmud et al. (2021), док су поједини вршили врло егзактна и прецизна мерења овог параметра, као нпр. Lobo et al. (2011) или Vogel (2002), али уз велику разлику у вредности овог параметра. Наиме, може се уочити да се распон у истраживањима најчешће креће од 3 s до 10 s. Због великог распона граничне вредности интервала слеђења возила слободног тока у досадашњим истраживањима, као и због потребе за развојем модела за прорачун слободне брзине, посебно по класама ванградских двотрачних путева, идентификована је потреба за прецизним утврђивањем вредности истог за сваку класу појединачно (Stepanović et al., 2023).

Посматрајући аналитичке моделе за прорачун слободне брзине који се пре свега употребљавају у условима када није могуће измерити брзину на терену, нпр. у фазама креирања и пројектовања адекватних попречних профила, најчешће је примењиван HCM-ов модел базиран на грубом одређивању базне слободне брзине (додавањем 16 km/h на вредност ограничења брзине) на свим класама двотрачних путева (HCM, 2016). Непрецизност оваквог приступа наводи и сам HCM (2016), али детаљнија истраживања нису вршена. Поред различитих утицаја геометријских карактеристика пута на брзину слободног тока, бројни аутори су анализирали утицај ограничења брзине на слободну брзину, као нпр. у истраживањима Fazio et al. (2014) или Mahmud et al. (2021). Уочено је да бројне студије користе правило простог додавања фиксне вредности брзине на ограничену брзину, која није егзактно утврђена и не узима у обзир остале факторе путева различитих функција у мрежи (Fazio et al., 2014). Приметна су и опречна мишљења и дискусије да ли је оправдано укључити ограничење брзине у модел или не, као нпр. код Himes et al. (2013) или Wang et al. (2006). У актуелним приручницима и истраживањима до сада су развијани јединствени модели прорачуна слободне брзине за двотрачне путеве упркос наведеној разлици у функцији двотрачних путева различитих класа. Логично је да би за повећање прецизности

прорачуна и избегавања простог додавања јединствене вредности брзине на брзину ограничења, које препоручује НСМ (2016), било потребно развити посебне моделе за прорачун слободне брзине по класама ванградских двотрачних путева (Stepanović et al., 2023).

3.4. Методологија истраживања

3.4.1. Методологија прикупљања података

За утврђивање утицаја ограничења брзине и осталих геометријских карактеристика пута на слободну брзину на различитим класама ванградских двотрачних путева било је неопходно издвојити репрезентативне деонице путне мреже Србије у складу са функционалном класификацијом дефинисаном у НСМ-овој методологији (НСМ, 2016), које су опремљене аутоматским бројачима саобраћаја (АБС). На основу класификације дефинисане у америчком Приручнику за капацитет путева (НСМ, 2016) и функционалне класификације путева у Србији (Tubić & Maletin, 2008), издвојено је укупно 50 деоница и то: 30 деоница путева I класе и 20 деоница путева II класе. Све деонице опремљене су савременим аутоматским бројачима (QLTC 10C) који раде на принципу индуктивних петљи. Потребно је напоменути да се индуктивне петље и даље доминантно користе на ванградским, али и градским деоницама, као и за потребе напредних система за управљање саобраћајем (Dobrota et al., 2022). Ови бројачи, поред података о протоку, структури саобраћајног тока, временским неравномерностима итд., региструју и брзину проласка сваког појединачног возила, као и временске интервале слеђења (Слика 3.6). Сви наведени подаци са аутоматских бројача саобраћаја на испитиваним деоницама добијени су увидом у базу података о бројању саобраћаја Јавног предузећа „Путеви Србије” (Putevi Srbije, 2016–2020).

00377	02.02.19	06:32:17	0	0	C1	75	1503
00460	02.02.19	06:32:44	3	1	A1	84	483
00461	02.02.19	06:32:48	3	1	A1	86	450
00462	02.02.19	06:32:59	3	1	A1	78	459
00378	02.02.19	06:33:03	0	0	B2	56	727
00379	02.02.19	06:33:04	0	0	B2	56	877
00380	02.02.19	06:33:06	0	0	B2	54	871
00463	02.02.19	06:33:20	3	1	A1	92	547
00464	02.02.19	06:33:32	3	1	A1	90	491
00465	02.02.19	06:33:34	3	1	B1	86	717
00466	02.02.19	06:33:39	3	1	A2	86	659
00467	02.02.19	06:34:06	3	1	A1	75	435
00468	02.02.19	06:34:09	3	1	A2	77	677
00469	02.02.19	06:34:15	3	1	A1	82	505
00470	02.02.19	06:34:18	3	1	A1	113	537
00471	02.02.19	06:34:45	3	1	A1	84	529
00381	02.02.19	06:35:01	0	0	A1	55	486
00472	02.02.19	06:35:36	3	1	A1	77	438
00473	02.02.19	06:35:59	3	1	B5	78	1806

Слика 3.6. Пример података са АБС-а који показују: редни број возила по смеру, датум, време наилаaska возила, смер кретања, категорију возила, брзину [km/h] и дужину возила [cm]

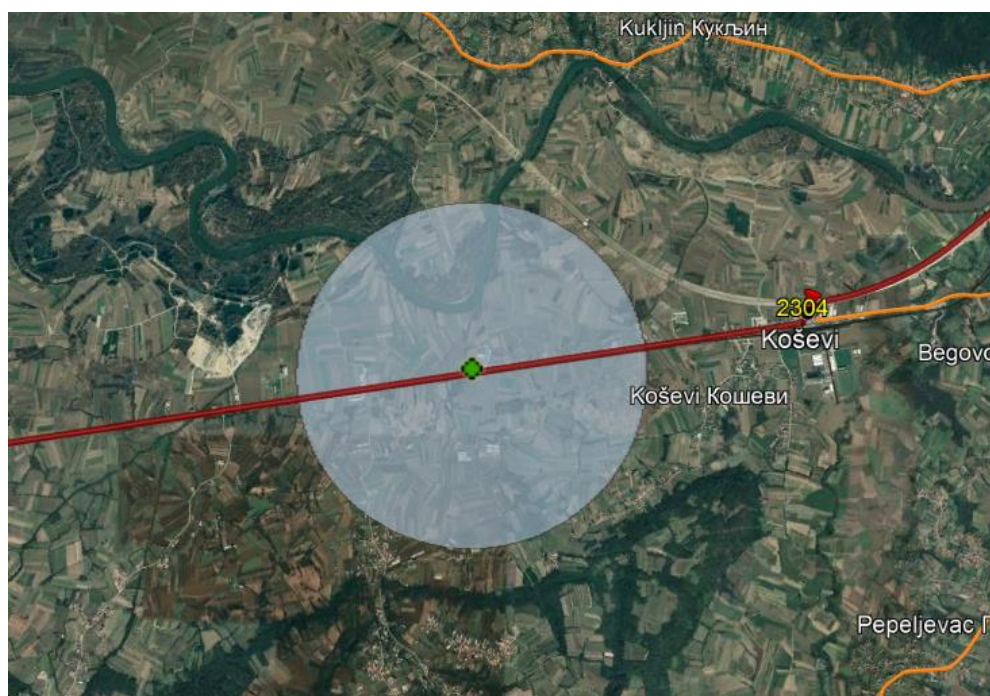
Анализе спроведене у овом истраживању односе се на утицајне зоне аутоматских бројача саобраћаја. Под овом зоном подразумева се одсек пута од по 0,75 km испред и иза АБС. Параметри саобраћајног тока очитани са АБС на овај начин репрезентативни су за предметни одсек, с обзиром на то да су у овој зони одступања у вредностима параметара минимална. Увидом у базу података о путевима Јавног предузећа „Путеви Србије” (Putevi Srbije, 2012), за све утицајне зоне АБС утврђене су геометријске карактеристике пута: минимални радијус хоризонталне кривине – R_{\min} [m], уздужни нагиб – UN [%], минимална

ширина коловоза – $\check{S}K$ [m], минимална ширина банке – B [m] и број приступних тачака – PT [-]. Приказ распона вредности основних геометријских карактеристика анализираних деоница приказан је у Табели 3.1. Такође, на основу базе података Министарства унутрашњих послова Републике Србије, прикупљени су подаци о ограничењима брзина – V_{og} [km/h] за сваку утицајну зону АБС. Ограничења брзине на деоницама су варијала између 40 km/h и 80 km/h, а најчешће су забележене вредности од 80 km/h на двотрачним путевима I и II класе, што представља опште законске вредности ограничења брзине. Пример утицајне зоне АБС може се видети на Слици 3.7, док су на Сликама 3.8 и 3.9 представљени примери положаја АБС у оквиру деоница путева I и II класе, респективно.

Табела 3.1. Опсег вредности основних геометријских карактеристика анализираних утицајних зона АБС

Класа двотрачног пута	R_{min} (m)	UN (%)	$\check{S}K$ (m)	B (m)	PT (-)
I	120 – 4584	0 – 4,2	6,5 – 9	0,5 – 2	2 – 34
II	85 – 2450	0 – 6,1	5,5 – 8,6	0,5 – 2	3 – 41

За анализу је одабран меродаван дан у меродавном месецу – четвртак, 18. април 2019. године. Ова година је одабрана како би се избегли утицаји пандемије COVID-19, односно мера које су повремено биле на снази, попут ограничења кретања, на варијације у саобраћајном току. С обзиром на то да се у дисертацији анализира брзина у слободном току, дан и период истраживања су одабрани тако да услови буду што приближнији идеалним – дан је био сунчан на свим изабраним деоницама, без икаквих падавина (сув асфалт), а подаци су прикупљени током дневне светлости, од 06:00 h до 20:00 h. Укупан валидан узорак на свих 50 деоница опремљених АБС-ом износио је 191.720 возила (Stepanović et al., 2023).



Слика 3.7. Пример утицајне зоне АБС: АБС 1222 (зелена тачка) на деоници државног пута IB реда са бројем 02305 (Stepanović et al., 2023)

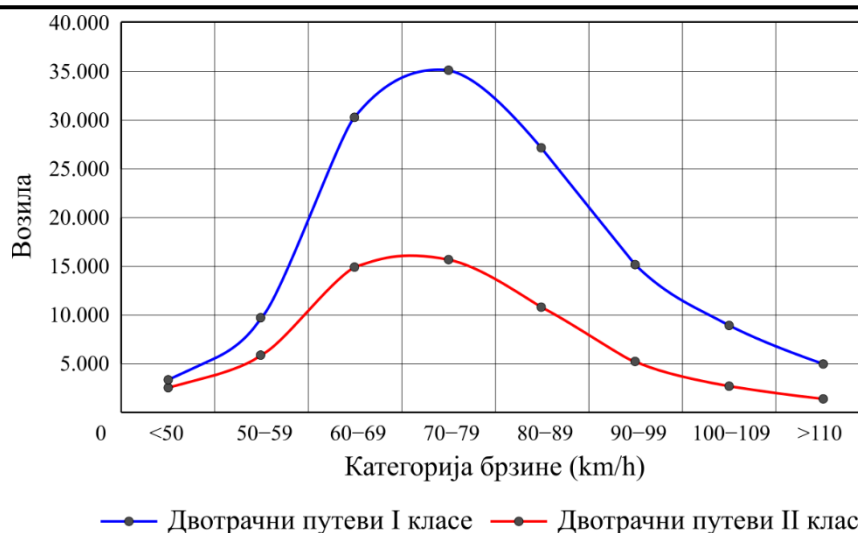


Слика 3.8. Пример положаја АБС на деоници ванградског двотрачног пута I класе (Google Maps)



Слика 3.9. Пример положаја АБС на деоници ванградског двотрачног пута II класе (Google Maps)

Дистрибуција брзина свих возила измерених на аутоматским бројачима саобраћаја по класама ванградских двотрачних путева тежи ка нормалној расподели, што је и очекивано када се има у виду величина узорка (Слика 3.10). Веће саобраћајно оптерећење се може приметити на ванградским двотрачним путевима I класе – у просеку 4.450 возила на дан истраживања, у поређењу са 2.911 возила регистрованих на двотрачним путевима II класе. Поред тога, веће брзине се могу уочити на двотрачним путевима I класе, па се може истаћи следеће: на двотрачним путевима I класе забележено је 9,6% возила која имају брзину мању од 60 km/h, у поређењу са 14,1% на двотрачним путевима II класе; на двотрачним путевима I класе уочено је 21,4% возила која имају брзину већу или једнаку 90 km/h, у поређењу са 15,3% на двотрачним путевима II класе итд. Средња брзина на двотрачним путевима I класе износи 77,8 km/h, а медијана 77,0 km/h, док на двотрачним путевима II класе ове вредности износе 74,31 km/h, односно 73,0 km/h, репективно (Stapanović et al., 2023).



Слика 3.10. Распореда брзина свих возила измерених аутоматским бројачима саобраћаја на ванрадским двотрачним путевима I и II класе (Stepanović et al., 2023)

3.4.2. Анализа граничне вредности слободног тока

Како би се утврдила слободна брзина на испитиваним деоницама двотрачних путева, првенствено је било неопходно испитати када кретање возила n нема значаја на брзину возила иза ($n-1$), односно где је граница слободног тока у коме нема утицаја интеракције између возила. Као што је претходно речено, најпогоднији и најкоришћенији параметар за одређивање те границе је интервал слеђења возила у току (Lobo et al., 2011; Mahmud et al., 2021), али су вредности у досадашњим истраживањима значајно варирале – од 3 до преко 10 секунди. Како би се испитале вредности за путну мрежу Србије и да би се омогућио наставак анализе по класама двотрачних путева, одлучено је да се прорачуна гранична вредност интервала слеђења за сваку класу посебно, што до сада није испитивано (Stepanović et al., 2023).

Временски интервал слеђења представља време које протекне између проласка исте тачке два узастопна возила преко попречног пресека деонице (Tubić et al., 2022). У случају прорачуна интервала слеђења на основу детектора, најчешће се посматра време између проласка две исте осовине возила n и $n-1$, што је био случај и приликом овог истраживања. Познато је да возило n има великог утицаја на брзину возила које га следи ($n-1$) при малим вредностима интервала слеђења, док је код великих вредности интервала слеђења тај утицај минималан, јер тада на кретање возила утичу пре свега карактеристике пута, возила и возача. Због тога брзине између возила n и $n-1$ неће бити у корелацији у условима слободног тока, односно очекивано је да ће се корелација смањивати са растом интервала слеђења док не достигне стабилне вредности око нуле (Vogel, 2002). Када се то има у виду, неопходно је идентификовати граничну вредност до које су брзине возила зависне од интервала слеђења, а након које је та зависност јако слаба. Вредности корелације до 0,4 прихваћене су као слаба корелација (Soldić-Aleksić & Chroneos Krasavac, 2009). Након тога, могуће је поделити групе возила у односу на добијену граничну вредност и наћи регресиону криву која описује вредност корелације узастопних возила за групу са јаким и слабом корелацијом. На тај начин могуће је добити додатни критеријум за одређивање прецизне граничне вредности, а који се односи на вредност интервала слеђења очитаном на месту спајања две криве. Добијена вредност треба да буде блиска вредности коришћеној за поделу на две групе а ако није, поступак се спроводи поново (Vogel, 2002).

С обзиром на то да аутоматски бројачи саобраћаја који се налазе на дефинисаним одсецима утицајне зоне АБС мере интервале слеђења и заокружују их на вредности од 1 s, креирано је

укупно 15 група у складу са вредностима интервала слеђења између возила. Тако су брзине свих возила чије вредности интервала слеђења износе 1 s класификоване у групу 1, брзине возила са интервалима слеђења од 2 s у групу 2, и тако до последње групе, која је обухватила брзине свих возила са растојањима слеђења ≥ 15 s. Интервали слеђења мањи од 1 s (мањи од 0,5 s) нису анализирани, с обзиром на то да је најчешће реч о возилима која нагло започињу или завршавају маневар претицања. За све анализиране деонице са АБС испитиване су корелације између расподељених брзина сваког возила (n) и возила које следи ($n-1$) у оквиру сваке од 15 наведених група. За чување и обраду података коришћен је SQL Server Express, у којем је направљена релациона база података. Приликом одабира система за управљање базама података посебно су разматрани скалабилност, поузданост, као и компатибилност SQL упитног језика са другим окружењима. Статистичка обрада података вршена је у софтверу IBM SPSS Statistics v. 21 (Stepanović et al., 2023).

3.4.3. Анализа утицајних фактора на брзину слободног тока

Након дефинисања граничне вредности интервала слеђења слободног тока за сваку класу пута, на основу података са аутоматских бројача саобраћаја утврђена је просечна брзина која одговара брзини слободног тока по смеровима. Овако добијени подаци о брзини могу се класификовати у индиректна мерења брзине на пресеку, односно представљају средњу временску брзину због мале удаљености између детектора индуктивне петље (Wolshon & Pande, 2016). Међутим, с обзиром на занемарљиву дисперзију измерених брзина, може се закључити да су вредности средње временске брзине сличне вредностима средње просторне брзине (Elefteriadou, 2014) и да одговарају брзини слободног тока посматраних утицајних зона АБС. Тако одређена брзина слободног тока по смеровима на посматраним деоницама представља зависну променљиву у развијеним моделима. Следеће променљиве су изабране као независне: ограничење брзине – V_{og} [km/h], минимални радијус хоризонталне кривине – R_{min} [m], уздужни нагиб – UN [%], минимална ширина коловоза – $\check{S}K$ [m], минимална ширина банке – B [m] и број приступних тачака – PT [-]. Све променљиве у раду су континуалне.

За анализу повезаности наведених предиктора и брзине слободног тока за различите класе ванградског двотрачног пута коришћена је линеарна регресија, тзв. поступена (*Stepwise*) метода. Испитана су два независна модела за деонице I и II класе двотрачних путева. Прво је испитана колинеарност независних променљивих, с обзиром на то да је реч о моделима вишеструке регресије. Хипотеза о непостојању мултиколинеарности није угрожена, јер је вредност толеранције (енгл. *Tolerance*) била знатно виша од граничне вредности. Наиме, добијена минимална вредност толеранције већа од 0,4 је већа од граничне вредности од 0,10 (Pallant, 2007). Слично томе, параметар VIF (eng. *Variance Inflation Factor*), као реципрочна вредност толеранције, није имао забрињавајуће вредности, пошто је максимална добијена вредност од 2,5 нижа од 10 (Pallant, 2007). Резултати теста мултиколинеарности, односно вредности VIF и *Tolerance* свих испитиваних променљивих, приказани су у Табели 3.2.

Табела 3.2. Резултати теста мултиколинеарности

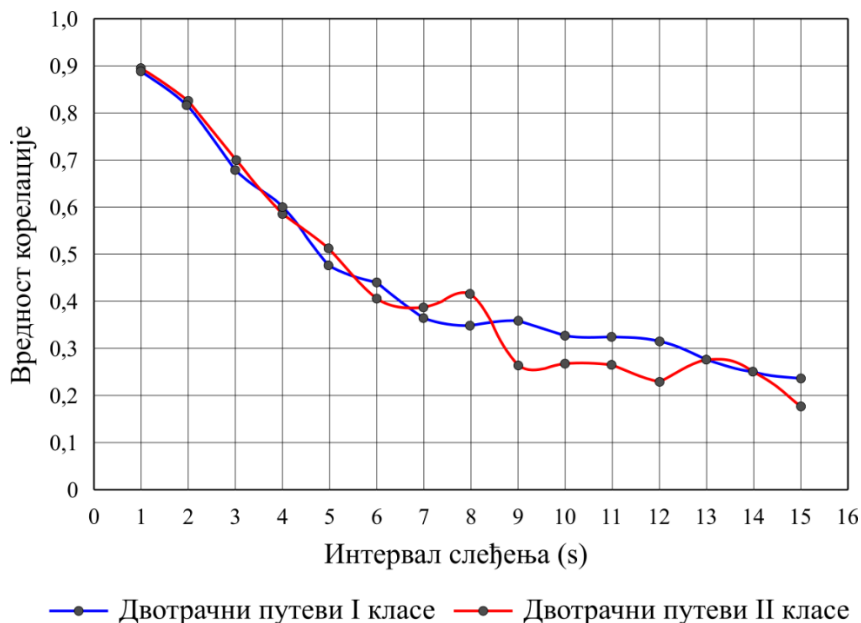
Независне променљиве	Tolerance	VIF
Ограничење брзине [km/h]	0,404	2,474
Минимални радијус хоризонталне кривине [m]	0,755	1,325
Уздужни нагиб [%]	0,737	1,358
Ширина коловоза [m]	0,795	1,257
Ширина банке [m]	0,884	1,131
Број приступних тачака	0,392	2,55

*VIF–Variance Inflation Factor

3.5. Анализа и синтеза резултата

3.5.1. Анализа граничне вредности слободног тока

Испитивањем корелације (r) између брзине возила n и следећег возила ($n-1$) за сваку од 15 дефинисаних група интервала слеђења (t_h) и обе класе ванградских двотрачних путева добијени су следећи резултати (Табела 3.3 и Слика 3.11).



Слика 3.11. Вредности корелације за сваку дефинисану групу временског интервала слеђења (Stapanović et al., 2023)

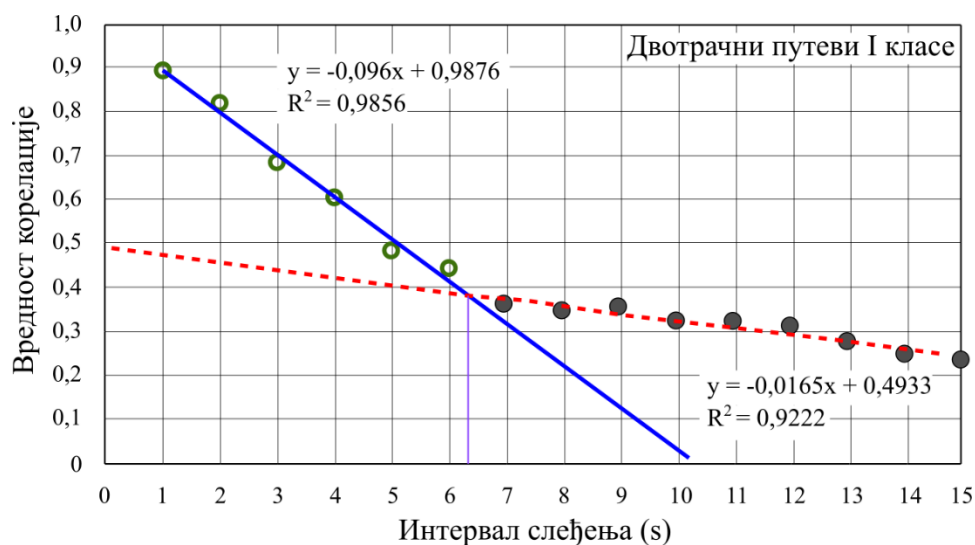
Табела 3.3. Коефицијенти корелације брзина узастопних возила по дефинисаним групама временских интервала слеђења на ванградским двотрачним путевима I и II класе

t_h (s)	Двотрачни путеви I класе			Двотрачни путеви II класе		
	корелација	значајност	валидан узорак	корелација	значајност	валидан узорак
1	0,892	<0,001	17048	0,895	<0,001	5.082
2	0,817	<0,001	17397	0,824	<0,001	6.851
3	0,682	<0,001	9433	0,700	<0,001	4.153
4	0,600	<0,001	6223	0,586	<0,001	2.642
5	0,479	<0,001	4730	0,512	<0,001	1.800
6	0,439	<0,001	3899	0,405	<0,001	1.452
7	0,365	<0,001	3380	0,387	<0,001	1.263
8	0,350	<0,001	3113	0,415	<0,001	1.101
9	0,360	<0,001	2827	0,264	<0,001	1.073
10	0,326	<0,001	2605	0,269	<0,001	985
11	0,325	<0,001	2465	0,264	<0,001	897
12	0,316	<0,001	2276	0,232	<0,001	864
13	0,278	<0,001	2183	0,279	<0,001	817
14	0,250	<0,001	1995	0,254	<0,001	765
15	0,236	<0,001	50566	0,176	<0,001	28.175

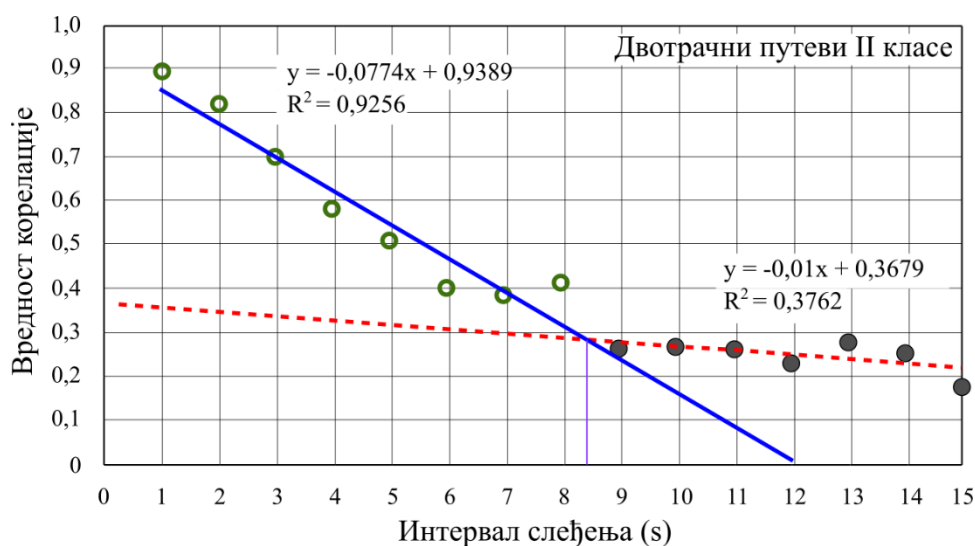
Увидом у добијене резултате примећује се статистички значајна корелација брзине узастопних возила свих дефинисаних група интервала слеђења. Као што је и очекивано, приметно је генерално смањење коефицијента корелације, односно смањење зависности између брзина возила n и $n-1$ са повећањем интервала слеђења, као и успорење пада (заравњавање криве) након одређене вредности интервала слеђења. Добијени резултати

јасно указују на постојање разлике између граничне вредности интервала слеђења слободног тока по класама пута. Наиме, уколико се за слабу корелацију посматрају вредности до 0,4 (Soldić-Aleksić & Chronos Krasavac, 2009) из Табеле 3.2 и са Сlike 3.11, може се закључити да стабилни услови слободног тока за двотрачне путеве I класе почињу од 7. s, а за путеве II класе од 9. s (Stepanović et al., 2023).

Како би се провериле добијене вредности, односно потврдиле тачне граничне вредности интервала слеђења, дефинисане су регресионе криве за вредности корелације испод (група са слабом корелацијом) и изнад (група са средње јаком и јаком корелацијом) уочене граничне вредности од 7 s код путева I класе и 9 s код деоница путева II класе. Може се уочити да пресечна тачка две регресионе криве за обе испитиване класе двотрачних путева пада близу претпостављених вредности – 6,3 s за двотрачне путеве I класе (Слика 3.12) и 8,4 s за путеве II класе (Слика 3.13), на основу чега се може закључити да су то граничне вредности слободног тока.



Слика 3.12. Регресионе криве вредности корелације за дефинисане групе возила са интервалима слеђења испод и изнад граничне вредности на двотрачним путевима I класе (Stepanović et al., 2023)



Слика 3.13. Регресионе криве вредности корелације за дефинисане групе возила са интервалима слеђења испод и изнад граничне вредности на двотрачним путевима II класе (Stepanović et al., 2023)

3.5.2. Анализа утицајних фактора на брзину слободног тока

Прорачунате граничне вредности интервала слеђења возила у слободном току заокружене су на први већи цео број, па су за прорачун слободне брзине тока коришћене брзине возила која имају интервале слеђења веће или једнаке следећим граничним вредностима: 7 s за путеве I класе и 9 s за путеве II класе. Просечне вредности брзине возила у слободном току, геометријске карактеристике и ограничења брзине на свим испитиваним деоницама утврђене су посебно по смеровима. Резултати два независно развијена модела за деонице ванградских двотрачних путева I и II приказани су у Табели 3.4.

Табела 3.4. Модели линеарне регресије повезаности слободне брзине и геометријских карактеристика деонице

Модел	Beta (95% CI), p вредност
Двотрачни путеви I класе	
Корак 1: ($\Delta R^2 = 0,37$; $F(1,58) = 36,17$; $p < 0,001$)	
V_{og} (km/h)	0,620 (0,336–0,672), $p < 0,001$
Корак 2: ($\Delta R^2 = 0,45$; $F(2,57) = 25,28$; $p < 0,001$)	
V_{og} (km/h)	0,494 (0,23–0,573), $p < 0,001$
R_{min} (m)	0,319 (0,001–0,003), $p = 0,004$
Корак 3: ($\Delta R^2 = 0,49$; $F(3,56) = 19,91$; $p < 0,001$)	
V_{og} (km/h)	0,421 (0,170–0,515), $p < 0,001$
R_{min} (m)	0,262 (0,000–0,003), $p = 0,015$
B (m)	0,241 (0,660–9,312), $p = 0,025$
Двотрачни путеви II класе	
Корак 1: ($\Delta R^2 = 0,27$; $F(1,38) = 15,76$; $p < 0,001$)	
R_{min} (m)	0,541 (0,001–0,003), $p < 0,001$
Корак 2: ($\Delta R^2 = 0,37$; $F(2,37) = 12,67$; $p < 0,001$)	
R_{min} (m)	0,520 (0,001–0,003), $p < 0,001$
V_{og} (km/h)	0,337 (0,072–0,532), $p = 0,012$
Корак 3: ($\Delta R^2 = 0,45$; $F(3,36) = 11,84$; $p < 0,001$)	
R_{min} (m)	0,392 (0,000–0,002), $p = 0,004$
V_{og} (km/h)	0,377 (0,121–0,554), $p = 0,003$
B (m)	0,328 (1,289–11,496), $p = 0,016$

Ограничење брзине – V_{og} (km/h), минимални радијус хоризонталне кривине – R_{min} [m], уздужни нагиб – UN [%], минимална ширина коловоза – ŠK [m], минимална ширина банке – B [m] и број приступних тачака – PT [-]

Првим регресионим моделом тестирана је хипотеза да слободну брзину на ванградским двотрачним путевима I класе дефинишу променљиве: ограничење брзине, минимални радијус хоризонталне кривине, просечан уздужни нагиб, ширина коловоза, ширина банке и број приступних тачака. Постепени (*Stepwise*) регресиони модел издвојио је три модела. У првом кораку издвојена је променљива ограничење брзине (Beta [β]=0,620; 95% CI: 0,336–0,672; $p < 0,001$), при чему сама објашњава 37% варијабилитета зависне променљиве. У другом кораку издвојене су променљиве: ограничење брзине (Beta [β]=0,494; 95% CI: 0,231–0,573; $p < 0,001$) и минимални радијус хоризонталне кривине (Beta [β]=0,319; 95% CI: 0,001–0,003; $p = 0,004$), које објашњавају 45% варијабилитета зависне променљиве. Коначним моделом објашњено је 49% варијабилитета слободне брзине на ванградским двотрачним путевима I класе, а овај варијабилитет објашњавају променљиве: ограничење брзине (Beta [β]=0,421; 95% CI: 0,170–0,515; $p < 0,001$), минимални радијус хоризонталне кривине (Beta [β]=0,262; 95% CI: 0,000–0,003; $p = 0,015$) и ширина банке (Beta [β]=0,241; 95% CI: 0,660–9,312; $p = 0,025$). Сви модели објашњавају значајан проценат варијабилитета зависне променљиве. Такође, промена вредности коефицијента детерминације је статистички значајна. Коначни модел има следећи облик (Једначина 3.4):

$$y = 46,038 + 0,343 V_{og} + 0,02 R_{min} + 4,986 B \quad [3.4]$$

где су све променљиве претходно дефинисане.

У објашњењу слободне брзине возила на ванградским двотрачним путевима II класе генерисана су три корака. F статистика за добијене моделе у сва три корака је статистички значајна, што указује на то да модели у значајном проценту предвиђају зависну променљиву. У првом кораку, једним предиктором објашњено је 27% варијабилитета зависне променљиве. У другом кораку, два предиктора објаснила су 37% варијабилитета, док су последњим, трећим кораком издвојена три статистички значајна предиктора, која објашњавају 45% варијабилитета зависне променљиве. Уважавајући резултате последњег, трећег корака постепене (*Stepwise*) регресије, највећи допринос у објашњењу слободне брзине на ванградским двотрачним путевима II класе показала је променљива минимални радијус хоризонталне кривине (Beta [β]=0,392; 95% CI: 0,000–0,002; p=0,004). Следи променљива: ограничење брзине (Beta [β]=0,377; 95% CI: 0,121–0,554; p=0,003), а затим и ширина банке (Beta [β]=0,328; 95% CI: 1,289–11,496; p=0,016). Коначни модел има следећи облик (Једначина 3.5):

$$y = 41,508 + 0,338 V_{og} + 0,001 R_{min} + 6,392 B \quad [3.5]$$

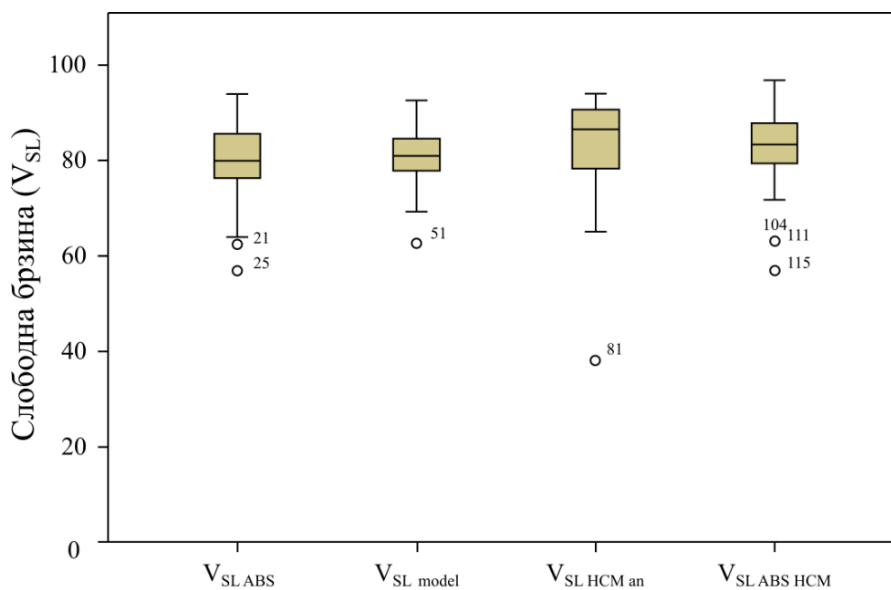
где су све променљиве претходно дефинисане.

3.5.3. Валидација модела за одређивање брзине слободног тока

Да би се упоредили резултати добијени развијеним моделима за утврђивање брзине слободног тока на различитим класама ванградских двотрачних путева и НСМ-овим (2016) моделом са вредностима брзине слободног тока добијеним са аутоматских бројача саобраћаја, коришћени су плотови (енгл. *boxplot*) и Т-тест једнакости средњих вредности (енгл. *One-Sample T-Test*). Т-тест једног узорка (енгл. *One-Sample T-Test*) један је од најчешће коришћених тестова статистичких хипотеза, којим упоређујемо средњу вредност узорка са унапред дефинисаном вредношћу (Chaffin & Rhiel, 1993). Боксплот (енгл. *boxplot*) је метода графичког приказивања основних података дескриптивне статистике, попут распршености и симетричности група нумеричких података кроз њихове квантиле (Du Toit et al., 2012). Поређење резултата спроведено је на истом броју утицајних зона АБС на двотрачним путева I и II класе, на деоницама које нису коришћене у развоју модела.

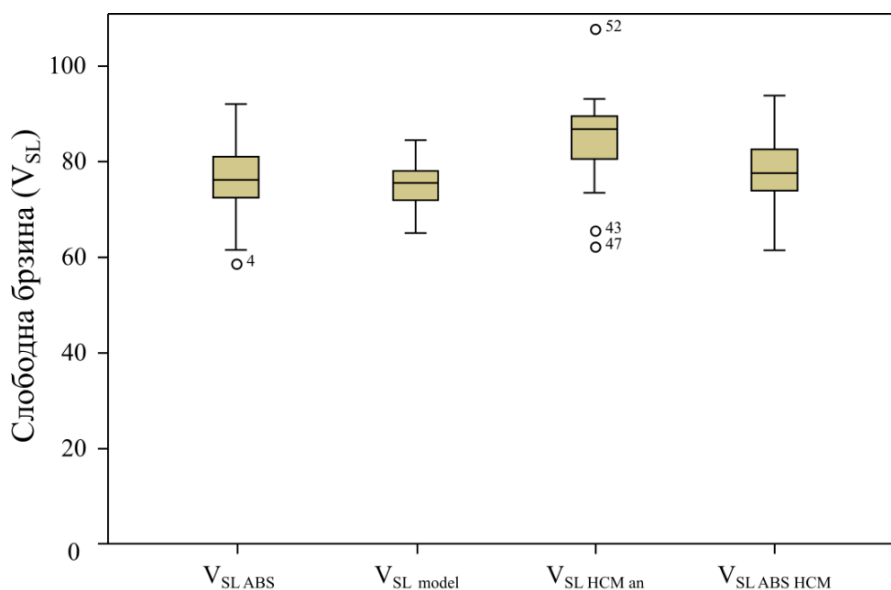
С обзиром на то да су боксплотови (енгл. *boxplot*) корисни за приказ дистрибуције података о брзини, на Сликама 3.14 и 3.15 приказани су дијаграми са вредностима слободне брзине добијени различитим методама. У питању су две аналитичке методе, које укључују развијене моделе (V_{SL} model) и НСМ-ов (2016) аналитички модел (V_{SL} НСМ an), као и две методе у којима су слободне брзине добијене са аутоматских бројача саобраћаја. Методе добијене помоћу АБС-а подразумевају слободне брзине добијене на основу граничне вредности временског интервала слеђења у слободном току (V_{SL} ABS) и на основу НСМ-ове (2016) методе за мерење слободне брзине на терену (V_{SL} ABS НСМ). Последња метода (V_{SL} ABS НСМ) подразумевала је израчунавање слободне брзине коришћењем једног од два могућа приступа у зависности од величине протока (веће или мање од 200 возила/час) и података о брзини добијених са АБС-а. Као што је већ наведено, утврђено је да је најадекватнији параметар за дефинисање граничне вредности слободног тока временски интервал слеђења возила, нпр. Lobo et al. (2011) или Mahmud et al. (2021). Такође, у случају већих протока на деоници (>200 возила/час) НСМ-ов (2016) метод мерења слободне брзине на терену захтева

прилагођавање измерених брзина коришћењем аналитичког обрасца. Брзина слободног тока добијена на овај начин такође зависи од структуре тока, односно присуства теретних возила, што захтева калибрацију на локалне услове. Када се ово има у виду, као и чињеница да HCM-ов (2016) метод не узима у обзир разлику која се јавља на различитим класама ванградских двотрачних путева, за меродавне вредности при поређењу коришћене су брзине слободног тока добијене са АБС-а на основу граничних вредности интервала слеђења ($V_{SL\ ABS}$). На основу приказаних дијаграма може се видети да је, у поређењу са HCM-овим (2016) аналитичким моделом ($V_{SL\ HCM\ an}$), дистрибуција података о слободној брзини добијених развијеним моделима ($V_{SL\ model}$) сличнија дистрибуцији података о брзини која је добијена са аутоматских бројача саобраћаја ($V_{SL\ ABS}$), за обе класе ванградских двотрачних путева (Stepanović et al., 2023).



Различите методе утврђивања V_{SL}

Слика 3.14. Боксплотови (енгл. *boxplot*) утврђивања слободне брзине различитим методама на двотрачним путевима I класе (Stepanović et al., 2023)



Различите методе утврђивања V_{SL}

Слика 3.15. Боксплотови (енгл. *boxplot*) утврђивања слободне брзине различитим методама на двотрачним путевима II класе (Stepanović et al., 2023)

Увидом у резултате Т-теста једнакости средњих вредности (енгл. *One-Sample T-Test*) спроведеног на двотрачним путевима I класе може се приметити да нема статистички значајне разлике између вредности слободне брзине добијених на основу података са аутоматских бројача саобраћаја ($V_{SL\ ABS}$) и вредности добијених моделом ($V_{SL\ model}$) – $t=0,792$; $p=0,435$. Такође, нема статистички значајне разлике када се упореде вредности добијене НСМ-овим (2016) аналитичким моделом ($V_{SL\ HCM\ an}$) и вредности брзине добијених на основу података са аутоматских бројача саобраћаја ($V_{SL\ ABS}$) – $t=1,344$; $p=0,189$. Међутим, може се уочити да је добијена p вредност нешто нижа.

Резултати Т-теста једнакости средњих вредности (енгл. *One-Sample T-Test*) спроведеног на деоницама двотрачних путева II класе показују да нема статистички значајне разлике између вредности слободне брзине добијених помоћу аутоматских бројача саобраћаја ($V_{SL\ ABS}$) и вредности добијених по развијеном моделу ($V_{SL\ model}$) – $t=-0,660$; $p=0,517$. Насупрот томе, поређењем вредности добијених НСМ-овим (2016) аналитичким моделом ($V_{SL\ HCM\ an}$) и вредности брзине добијених на основу података са аутоматских бројача саобраћаја ($V_{SL\ ABS}$), показало се да постоји статистички значајна разлика – $t=3,955$; $p=0,01$.

На основу приказаних боксплотова (енгл. *boxplot*) и Т-теста једнакости средњих вредности (енгл. *One-Sample T-Test*) може се уочити да се вредности добијене коришћењем развијених модела ($V_{SL\ model}$) боље уклапају са вредностима добијеним са аутоматских бројача саобраћаја ($V_{SL\ ABS}$) у поређењу са НСМ-овим (2016) аналитичким моделом ($V_{SL\ HCM\ an}$), код обе класе ванградских двотрачних путева.

3.6. Дискусија добијених резултата

3.6.1. Анализа граничне вредности слободног тока

Добијена разлика у граничним вредностима интервала слеђења слободног тока може се објаснити разликама у условима у саобраћајном току који владају на различитим класама ванградских двотрачних путева. С обзиром на то да путеви I класе представљају путеве са највећим саобраћајним оптерећењем (просечно 4.450 возила у периоду од 06 h до 20 h током испитиваног дана), возачи перцепирају одсуство утицаја кретања возила испред при мањим вредностима интервала слеђења возила у односу на путевима II класе. На њима су вредности саобраћајног оптерећења доста мање (просечно 2.911 возила у периоду од 06 h до 20 h током испитиваног дана), па су возачи навикнутији на услове слободног тока, односно утицај интеракције са возилом испред почиње при већим вредностима интервала слеђења. Иако се у досадашњим студијама и истраживањима не може пронаћи анализа утицаја услова у току на различитим класама двотрачних путева на граничну вредност интервала слеђења слободног тока, добијене вредности од 6,3 s на путевима I класе и 8,4 s на путевима II класе су у складу са вредностима добијеним у сличним истраживањима на овом типу пута. Ове вредности су нешто више од вредности које је добио Hashim (2011) – 5 s, али веома сличне вредностима које су добили Lobo et al. (2011) – 6 s, као и вредностима при прихватљивим условима које препоручују Nomburger et al. (1996) – 7 s.

Посматрањем везе добијених граничних вредности интервала слеђења возила у слободном току по класама двотрачних путева са протоком возила могу се уочити интересантни резултати. Добијене вредности од 6,3 s на путевима I класе и 8,4 s на путевима II класе одговарају вредностима протока од 571 воз/час и 429 воз/час, респективно, у случају посматрања средњих вредности временски равномерног наиласка возила. Ови резултати су у складу са једним од првих истраживања границе осетљивности брзине на раст протока на двотрачним путевима (Greenshields et al., 1935), у којима су утврђене граничне вредности од 400 до 600 возила/час. Такође, у поређењу са граничном вредношћу протока од

450 возила/час (Kuzović, 1987), уочава се да су у случају двотрачних путева I класе добијене веће вредности, а у случају путева II класе се вредности поклапају са наведеном граничном вредношћу. Овакви резултати могу се делимично образложити управо већ наведеним утицајем саобраћајног оптерећења на перцепцију возача о условима слободног тока. Наиме, услед пораста просечног годишњег дневног саобраћаја (ПГДС), утицај интеракције са возилом испред почиње при нижим вредностима интервала слеђења, односно већим вредностима протока. С обзиром на то да је величина ПГДС-а на путевима II класе нижа, односно много приближнија вредностима ПГДС-а из наведених истраживања, очекивано је боље поклапање на овим деоницама. Такође, на генерални раст граничних вредности протока возила слободног тока утичу, поред перцепције возача, и значајно унапређење возно-динамичких карактеристика возила, пројектни стандарди геометријских елемената пута, квалитет коловоза итд. У поређењу са препорукама америчког Приручника за прорачун капацитета (НСМ, 2016), који наводи границу протока од 200 путнички аутомобила/часу/оба смера за мерење слободних брзина на терену, уочава се да су добијене вредности више. Међутим, ова разлика последица је наведених претпоставки о временски равномерном наиласку возила, која је могућа само у теоријски идеалним условима, па резултати нису директно упоредиви. Ипак, добијени резултати недвосмислено показују да би повећање ове вредности требало размотрити, с обзиром на то да се она наводи у америчком Приручнику за прорачун капацитета још од његовог четвртог издања (НСМ, 2000), без јасно наведеног истраживања на основу којег је конкретна вредност добијена. Претходно наведено додатно оправдава коришћење интервала слеђења као подобнијег параметра за дефинисање граничних вредности слободног тока.

3.6.2. Анализа утицајних фактора на брзину слободног тока

Анализа ограничења брзине као независне променљиве у моделима за прорачун слободне брзине се показала оправданом, што се поклапа са налазима појединих студија као нпр. Fitzpatrick et al. (2003) или Himes et al. (2013). Тај закључак је у супротности са закључцима Wang et al. (2006), који су истакли проблем међусобног утицаја геометријских карактеристика пута и ограничења брзине. У овом истраживању, међутим, претпоставка о мултиколинearности у наведеним моделима није нарушена (Tolerance веће од 0,10, VIF мање од 10), што значи да није потврђена корелација између променљивих које су везане за геометријске карактеристике трасе и ограничења брзине. То се може образложити тиме да су на већини деоница важеће опште законске вредности ограничења брзине за ту категорију пута (80 km/h), док велики број деоница има такве карактеристике које дозвољавају и веће брзине кретања возила. То указује на не кредибилитет постављених ограничења брзине (Goldenbeld & Van Schagen, 2007), а у складу је и са закључцима изнетим у Hashim (2011) да се више пажње мора посветити на то да постављена ограничења брзине буду у складу са геометријским карактеристикама пута. Истраживања Mahmud et al. (2021) показала су да са повећањем ограничене брзине на деоницама двотрачних путева са одговарајућим карактеристикама долази до благог раста слободних брзина у току (од око 4 mi/h – 6 km/h), што доприноси већем поштовању ограничења брзине.

Посматрањем појединачног утицаја ограничења брзине на слободну брзину уочава се да ова променљива има најјачи утицај од свих осталих испитиваних код двотрачних путева I класе, док је код путева II класе друга по јачини, што се слаже са резултатима (Medina & Tarko, 2005). Показано је да са растом ограничења брзине расте и слободна брзина тока, као и да ограничење брзине објашњава 37% варијабилитета зависне променљиве код путева I класе и 27% код путева II класе. Утицај ограничења брзине на слободну брзину може се пре свега приписати казним одредбама закона за прекорачење дозвољене брзине. Другим речима, казне за прекорачење ограничених брзина имају утицај на понашање возача у слободном току чак и у бројним ситуацијама када геометријске карактеристике пута и динамичке

карактеристике возила омогућавају вожњу брзинама које су доста веће од ограничених на одређеној деоници, што се слаже са налазима појединих истраживања (Stanojević et al., 2013).

Поред утицаја ограничења брзине, потврђено је и да геометријске карактеристике пута утичу на слободну брзину (Mahmud et al., 2021; Medina & Tarko, 2005). Показано је да минимални радијус хоризонталне кривине, уз ограничење брзине, представља најутицајнију променљиву од свих тестираних код двотрачних путева I и II класе. Код путева I класе радијус хоризонталне кривине објашњава 8%, а код путева II класе 27% варијабилитета зависне променљиве. Већи утицај радијуса хоризонталне кривине на путеве II класе може се објаснити чињеницом да путеви ове класе подразумевају деонице двотрачних путева које пролазе кроз неповољан терен. Због тога тестирани узорак садржи већи број деоница са критичнијим вредностима радијуса хоризонталних кривина које припадају II класи пута. Утврђен је позитиван утицај ове карактеристике пута, односно да са растом вредности радијуса хоризонталне кривине расте и слободна брзина тока. Закључак о значајности утицаја хоризонталних кривина на брзину тока у складу је са резултатима добијеним у већини радова (Lovrić & Breški, 2014; Mahmud et al., 2021; Medina & Tarko, 2005). Овај утицај може се објаснити деловањем центрипеталне/центрифугалне силе на возило и слабијом прегледношћу, због чега возачи успоравају при малим вредностима радијуса. На слободну брзину на двотрачним путевима I класе позитиван утицај има још и ширина банке, што је у складу са истраживањима (Medina & Tarko, 2005). Позитиван утицај ширине банке уочава се и код двотрачних путева II класе, па се може закључити да исте променљиве утичу код обе класе двотрачних путева.

4. Испитивање кредибилитета ограничења брзине на основу брзине слободног тока²

4.1 Дефинисање кредибилитета ограничења брзине и утицаја на услове у саобраћајном току

Исказани проблем прецизног утврђивања слободне брзине употребом досадашњих модела, посебно на деоницама ванградског двотрачног пута, додатно се усложњава уколико постављено ограничење брзине није адекватно условима окружења и техничко-експлоатационим карактеристикама пута. Наиме, у претходном поглављу детаљно су описани проблеми са којима се свакодневно сусрећу саобраћајни инжењери широм света у поступку анализе капацитета и нивоа услуге путева. С обзиром на доказани утицај који постављена ограничења брзине имају на брзину слободног тока, било да је ограничење брзине директно инкорпорирано у модел као један од утицајних фактора (варијабли) или кроз поједине препоруке за одређивање утицајних фактора, поставља се питање како неогдговарајуће ограничење брзине утиче на квалитет представљених модела и услове у реалном саобраћајном току.

Како би се одговорило на то питање, најпре је неопходно објаснити шта је то одговарајуће, односно кредибилно ограничење брзине. Наиме, ограничење брзине представља једну од основних мера политике управљања брзинама на путевима. У идеалном случају, путно окружење и ограничење брзине би требало да буду кохерентни и конзистентни, тако да највећи број возача поштује постављено ограничење брзине. Ограничења брзине, као један од елемената политике управљања брзинама, имају за циљ хармонизацију брзине саобраћајног тока у складу са условима у току, како би се постигло максимизирање капацитета и нивоа услуге посматране деонице, односно минимизирање трошкова и ризика од настанка саобраћајних незгода (Tubić, Glavić, et al., 2018). Дакле, постављено ограничење брзине би требало да буде у складу са геометријским карактеристикама и функцијом пута, окружењем и безбедним условима у току, али и да одговори на захтеве у погледу мобилности и времена путовања. Адекватно ограничење брзине се дефинише као ограничење које је у складу са путним и саобраћајним условима (SWOV, 2012).

Међутим, уколико се претходно речено не примени у пракси током постављања ограничења брзина, возачи неће поштовати то ограничење у прихватљивом проценту. Према резултатима бројних истраживања, прекорачење ограничења брзине је веома често. Тако су, на пример, OECD и ЕСМТ (2006) у спроведеном истраживању дошли до налаза да у Европи, генерално, 40–60% возача вози брже од постављеног ограничења брзине, а најчешће око 10% до 20% њих прекорачује дозвољену брзину за више од 10 km/h. У испитивању које је спровео BRAKE (2004) 68% учесника је изјавило да су прекорачили ограничење брзине у години пре истраживања, а 85% је признало да понекад не поштује постављено ограничење брзине. Возачи често наводе прекорачење ограничења брзине као активност у којој учествују (Musselwhite et al., 2010). У оквиру истраживања SARTRE 3 (2004), возачима из земаља Европске уније је између осталог постављено питање колико често прекорачују брзину на различитим врстама путева. Резултати овог истраживања су показали да постоје значајне разлике у погледу прекорачења ограничења брзине на различитим типовима путева. Највећи проценат возача (28%) изјавио је да не поштује постављено ограничење (често, веома често, или увек) на ауто-путевима, док је тај проценат био мањи на државним путевима (19%),

² Део материјала приказаног у овом поглављу представљен је у резултатима прихваћеног рада који је у процесу публикавања: Stepanović, N., Tubić, V., Milenković, M., Halaj, K. (2023). Determining The impact of basic traffic flow characteristics on traffic accident occurrence on two-lane rural roads in Serbia. *Transport*, 38(4).

општинским путевима (13%) и у изграђеним урбаним зонама (7%) (SARTRE 3, 2004). Поред иностраних, бројне анализе прекорачења брзина спроведена су и у Србији. Tubić et al. (2016) анализирали су 45 локација на деоницама двотрачних државних путева у Републици Србији опремљених аутоматским бројачима саобраћаја. Захваљујући томе, обрађен је изузетан узорак од 135.988.980 возила, а резултати су показали да чак 71% (96.164.383) возача не поштује постављено ограничење брзине. Показано је да је на деоницама са нижим ограничењем брзине (40, 50 и 60 km/h) прекорачење брзине преко 80%. Слична истраживања спроведена су и на проласцима државних путева кроз Београд, где је на 11 локација утврђено слично прекорачење ограничене брзине од чак 76% на узорку од 47.060.794 возила (Milenković et al., 2017), као и на државним путевима који пролазе кроз општину Краљево, где је забележен проценат возила у прекорачењу ограничене брзине од 62,6% на узорку од 27.465.788 (Tubić, Glavić, et al., 2018). У великом истраживању прекорачења брзине спроведеном на свим деоницама државних путева IB реда у Србији опремљених аутоматским бројачима саобраћаја закључено је да 46,35% возача прекорачује ограничену брзину кретања (Tubić, Stepanović, et al., 2018).

Сагледавање овако великих процената прекорачења ограничених брзина у истраживањима спроведеним широм света и у Србији наводи на потребу за утврђивањем разлога за такво понашање возача, упркос потенцијалним мерама казнене политике које се могу над њима применити. Ограничење брзине може се прекорачити свесно или несвесно, јер избор брзине и мотиви брзе вожње зависе од много фактора. Разлози за прекорачење брзине су разноврсни и могу се односити на привремене мотиве (нпр. кашњење), карактеристике возача (нпр. ризична вожња агресивних возача) и карактеристике возила, пута и околине пута (SWOV, 2012). У раду Milenković et al. (2017) дат је сумарни приказ актуелних истраживања у погледу кључних разлога за непоштовање постављених ограничења брзине. Перцепција безбедне брзине путовања је веома важна и она зависи од геометрије пута и његове околине, намене земљишта у непосредној околини пута и временских услова (Wilmot & Khanal, 2010). Kanellaidis et al. (1995) су дошли до налаза да је један од главних разлога непоштовања постављеног ограничења перцепција возача да ограничења брзине нису увек реална. Један од кључних фактора који утичу на избор брзине возача је кредибилитет постављеног ограничења брзине (OECD & ECMT, 2006; Van Nes et al., 2008; Van Schagen et al., 2004). Goldenbeld & Van Schagen (2007) наводе да се генерално може претпоставити да ће возачи возити у складу са постављеним ограничењем брзине ако га сматрају разумним или кредибилним. Насупрот томе, ако постављено ограничење брзине није у складу са ограничењем које возачи сматрају одговарајућим, с обзиром на геометријске карактеристике пута, онда постављено ограничење брзине може бити игнорисано од стране возача. Goldenbeld & Van Schagen (2007) даље наводе да, ако се у систему често појављују ограничења брзине која су некредибилна, читав систем управљања брзинама може бити доведен у питање. Gardner & Rockwell (1983) дошли су до налаза да се возачи радије ослањају на своје сопствене процене о одговарајућој брзини, него на постављено ограничење брзине. Сличне резултате добили су Van Nes et al. (2008), који су спровели истраживање коришћењем симулатора вожње како би испитали утицај кредибилитета ограничења брзине у односу на просечну брзину возила у току. Свака деоница је имала различите карактеристике пута, на основу којих су деонице категорисане као оне које имају висок, односно низак кредибилитет ограничења брзине. Резултати анализе су показали да се на деоницама са високим кредибилитетом ограничења брзине интуитивне брзине вожње учесника експеримента нису статистички значајно разликовале од постављених ограничења, док је на деоницама са ниским кредибилитетом ограничења постојала статистички значајна разлика. Још једно истраживање утицаја промене кредибилитета ограничења брзине на доношење одлука о одговарајућој брзини употребом симулатора вожње спровели су Lee et al. (2017). Оно је обухватило два експеримента. Циљ првог експеримента био је да се утврде брзине које возачи у Малезији сматрају подобним на основу фотографија путева са

уклоњеним информацијама о ограничењу брзине. У оквиру овог експеримента, возачи су изабрали брзине које су корелирале и које су биле статистички значајно веће од стварних ограничења брзине на путевима. У другом експерименту је анализиран утицај кредибилитета информације о ограничењу брзине на брзину коју возачи сматрају одговарајућом. Нова група возача је дала суд о одговарајућим брзинама вожње за исте фотографије као у првом експерименту, само сада са датим информацијама о ограничењу брзине. У овом експерименту је манипулисано са ограничењима брзине тако што су постављена ограничења била или 10% нижа/виша (кредибилна ограничења) или 50% нижа/виша (некредибилна ограничења) од одговарајућих брзина које су оцењене у првом експерименту. Резултати анализе су показали да постављена ограничења брзине утичу на процену возача о одговарајућој брзини вожње и да ће возачи, када су постављена ограничења блиска брзини коју возачи сматрају одговарајућом, модификовати своју процену о одговарајућој брзини у складу са постављеним ограничењем (Lee et al., 2017). Резултати претходних студија слажу се са резултатима Parker et al. (2003), који су показали да постављена ограничења брзина која су значајно већа или мања од оних које пружају путни и саобраћајни услови већина возача не поштује. Концепти који су веома слични кредибилитету су „реална“ ограничења брзине (Fildes & Lee, 1993) и „прихватљива“ ограничења брзина (Risser & Lehner, 1998).

Значај кредибилитета ограничења брзина на одабир прихватљиве брзине возила, а посебно брзине слободног тока када нема утицаја интеракције са другим возилима, за услове у саобраћајном току је веома велики. Осим што је брзина, као што је већ споменуто, један од основних параметара на основу кога се дефинише ниво услуге, она има и изузетан значај у безбедности саобраћаја. Наиме, утврђено је да постоје високе корелације између брзина и ризика од настанка саобраћајних незгода, као и брзина и последица незгода (Aarts & Van Schagen, 2006; Elvik et al., 2004). Ово потврђује и тзв. *Power Model*, представљен у Nilsson (2004), којим је утврђено да повећање просечне брзине за 5% за последицу има повећање броја незгода са повређеним лицима за 10% и повећање броја незгода са смртним исходом за 20%. Најновија истраживања показују да је идентификован однос у облику латиничног слова U између брзине и настанка незгода (Yu et al., 2018). Међутим, у појединим претходним моделима зависности брзине и незгода утврђене су негативне и позитивне корелације између брзине и незгода у зависности од примене различитих концепата прикупљања података о незгодама (базирано на деоници пута или на условима) (Imprialou et al., 2016). Генерално, у досадашњим истраживањима утврђено је да возачи чија брзина у великој мери одступа од постављене ограничене брзине имају већу шансу да учествују у саобраћајним незгодама (Solomon, 1964). Solomon (1964) је, анализирајући зависност између брзине возила и стопе незгода на ванградским путевима у САД, дошао до налаза да су возила која су се кретала до 10 km/h брже од ограничене брзине имала најнижу стопу незгода, док су возила која су се кретала знатно спорије или брже од прописане брзине имала већу шансу да учествују у незгодама. Такође, у појединим радовима утврђено је да велика дисперзија брзина возила у току за последицу има већи ризик догађања саобраћајних незгода (Aarts & Van Schagen, 2006; Montella & Imbriani, 2015) и теже последице саобраћајних незгода (Yu & Abdel-Aty, 2014a, 2014b). Nashim (2006) је утврдио да код саобраћајних незгода са погинулим или тешко повређеним лицима, апсолутна разлика између ограничења брзине и 85. перцентила брзине возила у току је од кључног значаја. Наиме, показано је да повећање ове разлике доводи до већег броја саобраћајних незгода са погинулим и тешко повређеним лицима. Сличан налаз добили су и Milton & Mannering (1998). Анализирајући однос дисперзије брзина и стопе саобраћајних незгода, Garber & Gadiraју (1989) су дошли до налаза да велики утицај на дисперзију брзина у току има разлика између вредности ограничене и рачунске/пројектне брзине. Наиме, Garber & Gadiraју (1989) су утврдили да ће дисперзија брзине бити најмања уколико је вредност ограничене брзине мања од рачунске/пројектне у опсегу од 8 до 17 km/h. Изван овог опсега, са повећањем разлике између поменутих брзина, расте и дисперзија брзина у саобраћајном току. Додатно је утврђено да возачи теже повећању брзине кретања у

случају повољних геометријских карактеристика пута (без обзира на постављено ограничење) и да се стопа догађања саобраћајних незгода не повећава нужно са повећањем брзине, али се повећава са повећањем дисперзије брзина у саобраћајном току (Garber & Gadiraju, 1989). Quddus (2013) је такође утврдио да је дисперзија брзине позитивно статистички повезана са стопом саобраћајних незгода, односно да је повећање дисперзије брзине од 1% повезано са повећањем стопе незгода од 0,3%.

Утицајем геометрије и окружења пута на кредибилитет ограничења брзина, коришћењем упитника и симулатора вожње, као и праћењем електродермалне реакције за оцењивање ризика испитаника, бавили су се и други аутори (Yao et al., 2020a, 2020b; Yao, Carsten, & Hibberd, 2019; Yao, Carsten, Hibberd, et al., 2019). Yao, Carsten, & Hibberd (2019) су потврдили да брзине које се перцепирају као превише ниске или високе не омогућавају сигуран осећај у вожњи, а конкретан износ кредибилиног ограничења је варирао у зависности од конфигурације пута. Yao, Carsten, Hibberd, et al. (2019) су у сличном истраживању дошли до налаза да већи фактор ризика доприноси већем поштовању ограничења брзина, односно да кредибилно ограничење има позитиван утицај на поштовање ограничења брзине, посебно код возача који спадају у теже прекршиоце, као и да перцепција већег ризика доприноси негативној процени кредибилиног ограничења. Yao et al. (2020a) показали су да је на ванградским путевима забележен широк опсег одговора о кредибилином ограничењу (20–80 mi/h), што узрокује пораст маневара претицања у реалном саобраћајном току. Yao et al. (2020b) су применом тзв. *boosting decision tree* алгоритма закључили да се може развити модел понашања возача који је заснован на возачевим перцепцијама кредибилитета ограничења и перцепцијама ризика.

На основу претходно изнетог, може се дати одговор на питање постављено на почетку овог поглавља. Неодговарајуће, односно некредибилно ограничење брзине на деоници може у значајној мери утицати на реалне услове у саобраћајном току, који би у том случају, поред несумњивог повећања ризика од настанка инцидентних ситуација, у већој мери одступали од аналитичких модела за прорачун истих. Наиме, модели за прорачун слободне брзине који узимају у обзир фиксне препоруке за додавање одређене вредности брзине и који су истоветни на свим двотрачним путевима без обзира на класу којој нека деоница припада (НСМ, 2016) у случају некредибилних ограничења на истој могу дати вредности које не одговарају оним из реалног саобраћајног тока. Као што је већ напоменуто, прорачуната вредност слободне брзине која не одговара реалним вредностима последично доприноси погрешним резултатима анализе капацитета и нивоа услуге, као и свим осталим погрешним закључцима које овакве грешке повлаче са собом. С обзиром на очигледан значај кредибилних ограничења брзине на услове у саобраћајном току, како у погледу ефеката на ефикасност, тако и у погледу ефеката на безбедност истог, поставља се питање како на одговарајући начин испитати кредибилитет самих ограничења брзине и који је њихов утицај на услове у саобраћајном току.

Генерално посматрано, у последњих неколико деценија спроведена су бројна истраживања како би се квантификовао утицај основних параметара саобраћајног тока на настанак саобраћајних незгода. Проток возила, изражен као просечан годишњи дневни саобраћај (ПГДС), анализиран је у великом броју досадашњих радова, где је утврђено да са порастом ПГДС-а долази до раста саобраћајних незгода (нпр. Cafiso et al., 2010; Hadi et al., 1995). Ако се погледају приказани резултати досадашњих истраживања, може се уочити да су аутори углавном истраживали однос вредности ограничења брзине и брзине возила у току (нпр. Goldenbeld & Van Schagen, 2007; Kanellaidis et al., 1995; Van Nes et al., 2008), и то често брзину слободног тока када возачи имају могућност избора брзине кретања. Као последица тога, повезаност ограничења брзине, брзине тока и ризика настанка саобраћајних незгода доказали су аутори бројних студија, као нпр. Solomon (1964), Yu et al. (2018) итд. Такође,

није само апсолутна вредност брзине возила у току била предмет анализа, већ и остали аспекти (параметри) брзине, па су тако аутори неколико студија (Garber & Gadiraju, 1989; Hashim, 2006; Quddus, 2013) показали статистички значајну повезаност ограничења и дисперзије брзине, као и утицај дисперзије брзине на раст незгода. Узевши све наведено у обзир, уочава се да су разни облици (параметри) брзине, попут ограничене брзине, просечне брзине, разлике слободне и ограничене брзине, дисперзије брзине итд., биле предмет индивидуалних анализа у оквиру досадашњих истраживања. Међутим, заједнички утицај наведених параметара брзине до сада није истражен у довољној мери. Због тога је циљ истраживања у овом делу дисертације да се први пут детаљно испита заједнички утицај кредибилитета ограничења брзине и карактеристика саобраћајног тока, попут разлике слободне и ограничене брзине, процента прекорачења брзине, дисперзије брзине, експлоатационе брзине, ПГДС-а итд., на настанак саобраћајних незгода. На овај начин могуће је квантификовати утицај кредибилитета ограничења брзине, али и испитати који су најпогоднији параметри, попут брзине слободног тока, за његово одређивање. Испитивање заједничког утицаја карактеристика саобраћајног тока спроведено је на хомогеним одсечима деоница ванградских двотрачних путева I класе у Србији опремљених аутоматским бројачима саобраћаја (АБС). Допринос истраживања у овом делу дисертације огледа се у дефинисаној методологији – природи прикупљених података и величини узорка, као и у чињеници да је по први пут детаљно анализиран међусобни утицај различитих параметара брзине и карактеристика саобраћајног тока на настанак саобраћајних незгода.

4.2 Методологија истраживања

4.2.1. Методологија прикупљања података

Прегледом досадашњих истраживања утврђено је да се већина истраживача базирала на квантификацији утицаја брзине на основу мерења просечних брзина на деоници или брзина појединачних возила радаром у меродавним данима (Garber & Gadiraju, 1989; Solomon, 1964; Taylor et al., 2000), коришћењем софтвера (Kloeden et al., 1997, 2001), употребом симулатора вожње (Van Nes et al., 2008), различитих врста упитника (Gardner & Rockwell, 1983; Goldenbeld & Van Schagen, 2007; Kanellaidis et al., 1995) или комбинацијом наведених метода (Fildes et al., 1991). Наведене методе имају бројне предности, али и одређене мане које могу утицати на коначне резултате. Наиме, уређаји за мерење брзине, ма колико добро били прикривени, могу значајно утицати на редукацију брзина возача (Fildes & Lee, 1993; Teed et al., 1993). Такође, квалитет излазних резултата из софтвера зависи од прецизности улазних података, анкете могу бити непотпуне и нејасне, а одговори неискрени и нетачни (Murgan, 2015), док симулатори вожње често не могу узети у обзир бројне факторе који у реалном окружењу утичу на процес вожње.

Како би се елиминисао утицај наведених фактора на резултате истраживања, подаци су прикупљени са АБС-а постављених на ванградским деоницама државних двотрачних путева I реда. Реч је о аутоматским бројачима (QLTC 10C) који раде на принципу индуктивних петљи. Као што је већ наведено у претходном поглављу, ови бројачи, поред података о протоку, временским интервалима слеђења, структури саобраћајног тока, временским неравномерностима итд., региструју и брзину проласка сваког појединачног возила. Захваљујући томе и чињеници да се подаци мере континуално, током 8.760 часова годишње, на располагању је велики број реалних експлоатационих брзина возила измерених на пресеку деоница. Предност у односу на радаром измерене брзине огледа се у томе што возачи нису свесни присуства уређаја за мерење брзина, односно што не мењају начин и брзину вожње. Сама методологија прикупљања и обраде података је слична методологији објашњеној у претходном поглављу. У овом истраживању анализа је обухватила утицајне зоне АБС од по 1,6 km испред и иза АБС, у којима долази до стабилизације брзине тока меродавне за

очитавање (детектовање) на АБС. Овде је реч о нешто дужој утицаној зони АБС, с обзиром на то да су предмет анализе биле зоне са хомогеним геометријским карактеристикама пута. Другим речима, селектоване су деонице на којима су АБС постављени по дефинисаним критеријумима, а који подразумевају ванградске одсеке приближно идеалних услова: без критичних радијуса хоризонталних кривина – R_{\min} [m], без критичних уздужних нагиба – UN [%], са адекватном ширином коловоза – $\check{S}K$ [m] и банкина – B [m], без великог броја приступних тачака – PT [-], са добрим стањем коловозног застора итд. Одабир деоница је урађен са циљем да се изолују неповољне геометријске карактеристике пута како би се испитао искључиво утицај параметара саобраћајног тока на настанак саобраћајних незгода. Ограничење брзине – V_{og} [km/h] на свим анализираним зонама АБС износи 80 km/h, што такође представља општу законску вредност ограничења брзине на овом типу пута. Приказ распона и просечних вредности основних геометријских карактеристика анализираних деоница дат је у Табели 4.1.

Табела 4.1. Опсег вредности основних геометријских карактеристика анализираних утицајних зона АБС

Одсек двотрачног пута у утицајној зони АБС	R_{\min} (m)	UN_{\max} (%)	$\check{S}K_{\max}$ (m)	B_{\min} (m)	V_{og} (km/h)
Распон вредности	346–6500	0–1,6	7,2–8,5	1,5–2	80
Просечна вредност	1792	0,5	7,9	1,7	80

Подаци су прикупљени на укупном узорку од 235 утицајних зона АБС у петогодишњем периоду, а сви подаци су базирани на годишњем нивоу. Поред података прикупљених директно са АБС-а, као што су подаци о протоку, структури тока и просечним брзинама возила у току, извршен је и прорачун слободних брзина за сваку утицајну зону посебно. Слободне брзине су прорачунате на основу граничне вредности интервала слеђења измерених са АБС, према методологији примењеној у претходном поглављу ове дисертације, а која је слична са методологијама примењеним у неколико истраживања (Lobo et al., 2011; Stepanović et al., 2023; Vogel, 2002). Као што је већ показано, према добијеним резултатима, ова гранична вредност интервала слеђења слободног тока износи 6,3 s за путеве I класе и 8,4 s за путеве II класе према класификацији из америчког Приручника (НСМ, 2016). С обзиром на то да су предмет ове анализе биле деонице I реда, одабране су одговарајуће граничне вредности интервала слеђења слободног тока. Обрада података са АБС и прорачун слободних брзина спроведени су у SQL-у.

На основу наведених података са аутоматских бројача саобраћаја прикупљених увидом у базу о бројању саобраћаја Јавног предузећа „Путеви Србије“ (Putevi Srbije, 206–2020), прорачунати су ПГДС, процентуално учешће теретних возила и аутобуса у току (%TV), проценат прекорачења ограничене брзине, просечне брзине возила у току, слободне брзине и дисперзија брзина за сваку утицајну зону АБС.

Како би се испитао утицај наведених карактеристика саобраћајног тока на настанак саобраћајних незгода, спроведена је детаљна анализа просторне расподеле и последица саобраћајних незгода (укупан број незгода, незгоде са материјалном штетом и незгоде са повређеним и са погинулим лицима, односно са настрадалима) у предметним зонама АБС. За спровођење наведене анализе незгода коришћена је Интегрисана база података о обележјима безбедности саобраћаја (Агенција за безбедност саобраћаја, n. d.). Анализа је обухватила податке за пет година у периоду од 2016. до 2020. године. Применом ANOVA теста утврђено је да пандемија COVID-19 није утицала на број саобраћајних незгода у разматраним утицајним зонама АБС, односно да је нулта хипотеза једнакости варијанси незгода (p -вредност = 0,993), као и нулта хипотеза једнакости средњих вредности незгода ($F=1,247$, p -

вредност = 0,06), прихваћена. Анализа је обухватила укупно 802 геореференциране саобраћајне незгоде – 387 са материјалном штетом и 415 са настрадалима. Графички пример просторне расподеле саобраћајних незгода у утицајној зони АБС-а приказан је на Слици 4.1.



Слика 4.1. Просторна расподела саобраћајних незгода (црвене тачке) у утицајној зони АБС-а 1122 (зелена тачка) на деоници државног пут IB реда 02211

4.2.2. Статистичка анализа

Анализа утицаја карактеристика саобраћајног тока на настанак незгода спроведена је коришћењем метода дескриптивне и аналитичке статистике, а за обраду података коришћен је софтверски пакет IBM SPSS Statistics v. 21. Независне променљиве су променљиве које се односе на карактеристике саобраћајног тока у анализираним зонама АБС-а. У питању су следеће променљиве: просечан годишњи дневни саобраћај (PGDS), процентуално учешће теретних возила и аутобуса у току (%TV), разлика између слободне и ограничене брзине (ΔV_{sl-og}), просечна брзина возила у току (V_e), дисперзија брзине (σ_V^2), проценат прекорачења ограничене брзине (%PV_{og}).

Укупно је развијено три модела. Први модел је као зависну променљиву подразумевао укупан број саобраћајних незгода, коју чине незгоде са материјалном штетом, повређеним и погинулим лицима. Други модел је за зависну променљиву имао саобраћајне незгоде са материјалном штетом, док се код трећег модела зависна променљива односила на саобраћајне незгоде са настрадалим лицима, које чине незгоде са повређеним и погинулим лицима. Дескриптивна статистика зависних променљивих приказана је у Табели 4.2.

Табела 4.2. Дескриптивна статистика зависних променљивих

Зависна променљива	N	Минимум	Максимум	Средња вредност	Дисперзија
Укупан број незгода	235	0,00	11,00	1,6511	3,681
Незгоде са мат. штетом	235	0,00	8,00	1,7660	3,240
Незгоде са настрадалима	235	0,00	15,00	3,4128	8,004

Када се анализирају ови модели, прегледом хистограма зависне варијабле и чињеницом да су у питању континуалне променљиве, намећу се генерализовани линеарни модели као добар избор. Колмогоров–Смирнов тестом потврђено је да зависне променљиве не показују добро слагање са Поасоновом расподелом. Користећи овај закључак и чињеницу да је претпоставка еквидисперзије нарушена код сваке зависне променљиве, предложени су негативни биномни модели са *ln link* функцијом. Након провере претпоставки и одстрањивања независних варијабли које нису значајно допринеле побољшању квалитета модела, добијени су коначни модели.

4.3 Анализа и синтеза резултата

4.3.1. Укупан број саобраћајних незгода

Колмогоров–Смирнов тестом утврђено је да расподела укупног броја саобраћајних незгода не показује добро слагање са Поасоновом расподелом ($p < 0,001$). Након провере претпоставке о присуству прекомерне дисперзије (средња вредност=3,41, дисперзија=8,01), коришћен је негативни биномни регресиони модел. Однос Пирсонове вредности Хи-квадрата и Df (1,05) наводи на закључак да би се проблем прекомерне дисперзије (енгл. *overdispersion*) могао превазићи коришћењем овог модела. Други начин за потврду прикладности употребе негативних биномних модела подразумева проверу његовог резидуалног дијаграма. Може се видети да расподела резидуала мање одступа у односу на модел Поасонове регресије, где се неки резидуали простиру преко 3. Након тога, извршен је тест количника веродостојности (енгл. *Likelihood Ratio Test*), како би се утврдило да ли постоји статистички значајна разлика слагања ова два регресиона модела. Утврђена р-вредност теста била је веома близу нуле ($p < 0,001$), па је закључено да модел негативне биномне регресије нуди значајно боље слагање са подацима у поређењу са моделом Поасонове регресије. Почетни негативни биномни модел може се унапредити искључивањем променљиве просечна брзина возила у току (V_e) из модела због њене високе р-вредности ($p = 0,511$).

У случају коначног модела, однос Пирсонове Хи-квадрат вредности и DF се мења на 1,04. Посматрајући AIC (енгл. *Akaike Information Criteria*) и BIC (енгл. *Bayesian Information Criteria*) критеријуме, може се приметити да су њихове вредности опале, што указује да је коначни модел побољшан у односу на прелиминарни модел. Параметар дисперзије је процењен применом методе максималне веродостојности (енгл. *Maximum Likelihood Method*). Све независне променљиве укључене у коначни модел (Једначина 4.1 и 4.2) су позитивно повезане са зависном променљивом. Другим речима, пораст вредности независних променљивих доводи до повећања очекиваног броја укупних саобраћајних незгода (Табела 4.3). За свако повећање разлике између слободне и ограничене брзине (ΔV_{sl-og}) за једну јединицу, очекивана вредност укупних саобраћајних незгода се повећава за 4,2%, под условом да остале променљиве остану константне. Очекивана вредност укупних саобраћајних незгода се повећава за 0,4% и 2,8% за свако повећање од једне јединице дисперзије брзине (σ_V^2) и процентуалног учешћа теретних возила и аутобуса у току (%TV), респективно. Постоји само незнатно повећање (0,001%) очекиване вредности укупног броја незгода за свако повећање ПГДС-а од једне јединице, због велике разлике између мерних скала ових променљивих и чињенице да ова променљива има мали допринос коначном моделу.

Табела 4.3. Оцена параметара модела укупног броја саобраћајних незгода за анализирани временски период

Параметри	B	Стд. грешка	95% Wald-ов интервал поверења		Тест. хипотезе			e^B	95% Wald-ов интервал поверења за e^B	
			доња	горња	Wald-ов χ^2	Df	Знач.		доња	горња
(Intercept)	-0,956	0,230	-1,408	-0,505	17,224	1	<0,001	0,384	0,245	0,604
ΔV_{sl-og}	0,041	0,009	0,023	0,059	20,063	1	<0,001	1,042	1,023	1,060
σ_V^2	0,004	0,001	0,003	0,005	38,840	1	<0,001	1,004	1,003	1,005
% TV	0,028	0,009	0,011	0,045	11,010	1	0,001	1,028	1,012	1,046
PGDS	9,698E-5	<0,001	7,557E-5	9,915E-5	78794	1	<0,005	1,000	1,000	1,000
(Негативна биномна)	0,094	0,034	0,046	0,191						

Коначни модел има облик (Једначина 4.1 и 4.2):

$$\ln(\mu) = -0,956 + 0,041\Delta V_{sl-og} + 0,004\sigma_V^2 + 0,028\%TV + 0,000097PGDS \quad [4.1]$$

односно:

$$\mu = e^{-0,956+0,041\Delta V_{sl-og}+0,004\sigma_V^2+0,028\%TV+0,000097PGDS} \quad [4.2]$$

где параметар μ представља математичко очекивање зависне променљиве укупног броја саобраћајних незгода.

4.3.2. Незгоде са материјалном штетом

Расподела саобраћајних незгода са материјалном штетом одступа од Поасонове расподеле према спроведеном Колмогоров–Смирнов тесту ($p < 0,001$). Коришћен је негативни биномни регресиони модел (Пирсонова вредност Хи-квадрата/DF=1,037) на основу закључка о присутности прекомерне дисперзије, што је верификовано на више начина. Средња вредност и дисперзија саобраћајних незгода са материјалном штетом износе 1,65 и 3,69, редом. Због својих високих р-вредности, променљиве просечна брзина возила у току (V_e) – $p=0,664$ и процентуално учешће теретних возила и аутобуса у току (%TV) – $p=0,056$ могу се уклонити из модела са циљем његовог побољшања.

У случају финалног модела, однос између Пирсонове Хи-квадрат вредности и DF се променио и износи 1,004. Вредности AIC (*Akaike Information Criterion*) и BIC (*Bayesian Information Criterion*) критеријума су смањене, што сугерише да је коначни модел побољшан у поређењу са прелиминарним моделом. Зависна променљива је позитивно повезана са независним променљивама које су коришћене за креирање коначног модела (Табела 4.4). За свако повећање разлике између слободне и ограничене брзине за једну јединицу, очекивани број незгода са материјалном штетом се повећава за 4%, под условом да су остали предиктори константни. Очекиван број незгода са материјалном штетом се повећава за 0,4% са сваким повећањем једне јединице дисперзије брзине, док постоји само незнатно повећање (0,008%) са сваком јединицом повећања ПГДС-а.

Табела 4.4. Оцена параметара модела саобраћајних незгода са материјалном штетом за анализирани временски период

Параметри	В	Стд. грешка	95% Wald-ов интервал поверења		Тест. хипотезе			e^B	95% Wald-ов интервал поверења за e^B	
			доња	горња	Wald-ов χ^2	Df	Знач.		доња	горња
(Intercept)	-1,119	0,293	-1,694	-0,545	14,590	1	<0,001	0,326	0,184	0,580
ΔV_{sl-og}	0,040	0,016	0,008	0,071	5,910	1	0,015	1,040	1,008	1,074
σ_V^2	0,004	0,001	0,02	0,006	13,643	1	<0,001	1,004	1,002	1,006
PGDS	8,354E-5	<0,001	4,839E-5	9,157E-5	21,692	1	<0,001	1,000	1,000	1,000
(Негативна биномна)	0,094	0,034	0,046	0,191						

Коначни модел има облик (Једначина 4.3 и 4.4):

$$\ln(\mu) = -1,119 + 0,04\Delta V_{sl-og} + 0,004\sigma_V^2 + 0,000083PGDS \quad [4.3]$$

односно:

$$\mu = e^{-1,119+0,04\Delta V_{sl-og}+0,004\sigma_V^2+0,000083PGDS} \quad [4.4]$$

где параметар μ представља математичко очекивање зависне променљиве саобраћајних незгода са материјалном штетом.

4.3.3. Незгоде са настрадалима

Колмогоров–Смирнов тест је показао да расподела саобраћајних незгода са настрадалима не показује добро слагање са Поасоновом расподелом ($p < 0,001$). Средња вредност и дисперзија броја саобраћајних незгода са настрадалима износи 1,77 и 3,24, респективно. Присутна је прекомерна дисперзија, као и код претходних модела. Након провере резидуалних дијаграма и извођења теста односа веродостојности (енгл. *Likelihood Ratio Test*), можемо закључити да негативни биномни регресиони модел нуди значајно боље слагање са подацима у поређењу са Поасоновим регресионим моделом. Почетни негативни биномни модел може се побољшати уклањањем променљивих са високим p -вредностима, јер оне нису значајно допринеле квалитету модела.

Четири независне променљиве укључене су у коначни модел: ПГДС ($p < 0,001$), %TV ($p = 0,004$), дисперзија брзине ($p < 0,001$) и разлика између слободне и ограничене брзине ($p < 0,001$). Однос вредности Пирсоновог Хи-квадрата и Df је 1,03, што показује да је проблем прекомерне дисперзије превазиђен. Посматрањем AIC и BIC критеријума може се приметити да су њихове вредности смањене, што указује да је коначни модел унапређен у поређењу са прелиминарним негативним биномним моделом. Све променљиве представљене у коначном моделу (Једначина 4.5 и 4.6) позитивно су повезане са зависном променљивом (Табела 4.5). Са сваким повећањем једне јединице %TV очекивана вредност саобраћајних незгода са настрадалима повећава се за 3,3%, под условом да су вредности осталих независних променљивих фиксне. Очекивана вредност саобраћајних незгода са настрадалима повећава се за 4,3% са сваком јединицом повећања разлике између слободне и ограничене брзине. Постоји само незнатно повећање (0,4% и 0,01%) у очекиваној вредности броја незгода са настрадалима за свако повећање једне јединице дисперзије брзине и ПГДС-а редом, што је последица велике разлике између мерних скала ових променљивих.

Табела 4.5. Оцена параметара модела саобраћајних незгода са настрадалима за анализирани временски период

Параметри	B	Стд. грешка	95% Wald-ов интервал поверења		Тест. хипотезе			e^B	95% Wald-ов интервал поверења за e^B	
			доња	горња	Wald-ов χ^2	Df	Знач.		доња	горња
(Intercept)	-1,855	0,314	-2,469	-1,240	34,998	1	<0,001	0,157	0,085	0,289
PGDS	0,0001	1,446E-5	8,582E-5	2,518E-4	62,348	1	<0,001	1,000	1,000	1,000
ΔV_{sl-og}	0,042	0,012	0,020	0,065	13,400	1	<0,001	1,043	1,020	1,067
σ_V^2	0,004	0,001	0,003	0,006	23,726	1	<0,001	1,004	1,003	1,006
%TV	0,032	0,011	0,010	0,055	8,209	1	0,004	1,033	1,010	1,056
(Негативна биномна)	0,109	0,063	0,035	0,340						

Коначни модел има облик (Једначина 4.5 и 4.6):

$$\ln(\mu) = -1,855 + 0,00011PGDS + 0,042\Delta V_{sl-og} + 0,004\sigma_V^2 + 0,032\%TV \quad [4.5]$$

односно:

$$\mu = e^{-1,855+0,00011PGDS+0,042\Delta V_{sl-og}+0,004\sigma_V^2+0,032\%TV} \quad [4.6]$$

где параметар μ представља математичко очекивање зависне променљиве саобраћајних незгода са материјалном штетом. Оцењени дисперزيونи параметар негативног биномног модела не утиче на математичко очекивање зависне променљиве саобраћајних незгода са настрадалима.

4.4 Дискусија добијених резултата

Посматрањем развијених модела за предвиђање укупног броја саобраћајних незгода, незгода са материјалном штетом и саобраћајних незгода са настрадалима, уочава се да негативни биномни регресиони модел има добро слагање са добијеним подацима. Употреба негативног биномног регресионог модела у овом раду у складу је са методологијама које се користе у највећем броју актуелних истраживања која се баве анализом настанка саобраћајних незгода, уз све предности и недостатке различитих методолошких приступа (Lord & Mannering, 2010; Mannering & Bhat, 2014).

Добијени резултати три негативна биномна модела за укупан број саобраћајних незгода, незгода са материјалном штетом и незгода са настрадалима показују да су три променљиве статистички значајне у свакој од њих: ПГДС, дисперзија брзине (σ_V^2) и разлика између слободне и ограничене брзине (ΔV_{sl-og}). Све независне променљиве укључене у финалне моделе су позитивно повезане са зависном променљивом. Другим речима, пораст вредности ПГДС-а, дисперзије брзине и разлике између слободне и ограничене брзине повећава очекивани број саобраћајних незгода. Променљива ПГДС је међу најјачим предикторима броја саобраћајних незгода. Овај резултат је у складу са претходним истраживањима о утицају ПГДС-а на појаву саобраћајних незгода (Safiso et al., 2010; Hadi et al., 1995). Резултат је логичан, с обзиром на чињеницу да са порастом броја возила расте и интеракција између њих у саобраћајном току, а самим тим долати и до већег ризика од настанка саобраћајне незгоде. Резултати који се односе на позитиван утицај дисперзије брзине на појаву саобраћајних незгода слични су резултатима неколико претходних студија које су утврдиле да повећање дисперзије брзине узрокује повећања броја саобраћајних незгода (Aarts & Van Schagen, 2006; Garber & Gadiraju, 1989; Quddus, 2013). Добијени резултати су очекивани јер када се дисперзија брзине повећава, односно усклађеност (хармонизација) брзина у саобраћајном току смањи, долази до пораста захтева за маневром претицања и потенцијалних конфликтних ситуација. Посебно интересантан резултат, који је даје одговор на финално питање из прве тачке овог поглавља, тиче се утицаја разлике слободне и ограничене брзине на настанак незгода. Као што је већ истакнуто, показано је да је ова променљива статистички значајна у сва три модела, односно да утиче на настанак незгода са различитим последицама. Резултати показују да је разлика између слободне и ограничене брзине позитивно повезана са настанком незгода, односно да већа разлика између ових брзина резултира већим бројем саобраћајних незгода. То потврђује налазе претходних студија у којима се наводи да је (не)веродостојност односно (не)кредибилитет ограничења брзине значајан фактор за настанак саобраћајне незгоде (Hashim, 2006; Montella & Imbriani, 2015). Наведени резултати директно имплицирају да је брзина слободног тока један од индикатора кредибилитета ограничења брзина, односно да велика разлика између слободне и ограничене брзине на појединим деоницама треба да сигнализира потребу за преиспитивањем постављених ограничења брзина. То је у складу са већ изнетом чињеницом да је слободна брзина показатељ конзистентности пројектних елемената пута, а чим они нису у складу са ограничењем брзине, долази до пораста броја инцидентних ситуација. Преиспитивањем некредибилних ограничења и међусобним усклађивањем са геометријским карактеристикама деонице, односно са перцепцијом адекватне брзине од стране већине

возача, доћи ће до приметног смањења броја саобраћајних незгода и унапређења услова у саобраћајном току. То би, поред свега наведеног, допринело и прецизности и поузданости постојећих и будућих аналитичких модела за анализу капацитета и нивоа услуге, са свим наведеним бенефитима које то са собом повлачи (Stepanović et al., 2023).

Поред три претходно наведене променљиве, статистички значај у моделима који се односе на укупан број саобраћајних незгода и саобраћајних незгода са настрадалима има и променљива која се односи на процентуално учешће теретних возила и аутобуса у саобраћајном току. У оба модела је утврђен позитиван утицај променљиве %TV на појаву саобраћајних незгода, односно констатовано је да са растом учешћа тешких возила у саобраћајном току расте и очекивани број незгода. То је у складу са резултатима појединих студија, као нпр. код истраживања које су спровели Chen et al. (2021). Добијени резултат је разумљив, јер повећање процента теретних возила, односно возила са лошим возно-динамичким карактеристикама, у саобраћајном току негативно утиче на брзину тока, на повећање захтева за претицањем итд. У коначном моделу предикције незгода са материјалном штетом није показана статистичка значајност ове променљиве. С обзиром на возно-динамичке карактеристике теретних возила, а пре свега на њихову велику масу, јасно је да незгоде у којима учествују возила ове категорије подразумевају генерисање веће силе, а самим тим и теже последице по остале учеснике у незгоди. Због тога саобраћајне незгоде са више возила у којима учествују и тешка возила обично резултирају повредама или смртним исходима учесника незгоде, а не само материјалном штетом (Zhu & Srinivasan, 2011).

5. Испитивање кредибилитета ограничења брзине на деоницама двотрачног пута са уздужним нагибом³

5.1. Специфичност услова у саобраћајном току на двотрачним путевима са уздужним нагибом

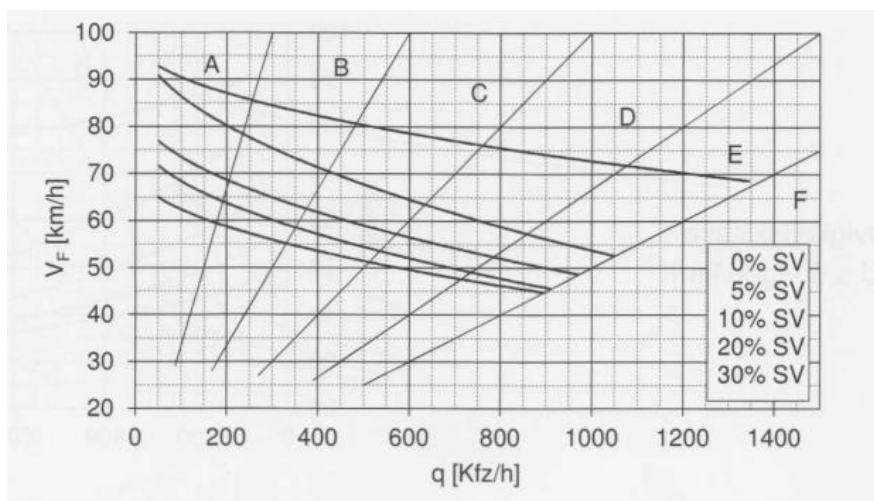
Геометријске карактеристике пута које одступају од идеалних могу значајно утицати на брзину саобраћајног тока, а последично и на капацитет и ниво услуге деонице. Посебно критичне елементе по услове у саобраћајном току чине карактеристике које се не могу лако кориговати нити избећи приликом пројектовања нових путева, а једна од таквих је управо уздужни нагиб. Уздужни нагиб већи од 3%, који се простире у дужини већој од 400–500 m сматра се критичним уздужним нагибом на свим типовима путева и захтева примену посебне методологије приликом анализе услова у саобраћајном току код бројних приручника за прорачун капацитета путева (HBS, 2015; HCM, 2016). Утицај критичних услова на услове у саобраћајном току нарочито је присутан на деоницама двотрачних путева због пада брзине возила у току и раста дисперзије брзина, што заједно утиче и на раст захтева за претицањем, које се обавља у саобраћајној траци намењеној за кретање возила у супротном смеру. Истовремено, возила у супротном смеру крећу се на паду, што продужава њихов зауставни пут и такође негативно утиче на све претходно наведене елементе. Претходно наведено значајно погоршава услове у саобраћајном току у поређењу са деоницама без утицаја ове геометријске карактеристике.

Негативан утицај уздужног нагиба на услове у саобраћајном току посебно је изражен у случају значајнијег присуства тешких возила у току. Сам термин „тешка возила“ може се дефинисати на различите начине. Тако, рецимо, амерички Приручник за прорачун капацитета путева (HCM, 2016) дефинише ова возила као било која возила која укупно имају више од четири точка којим се при нормалном коришћењу ослањају на пут. Другим речима, у њих спадају теретна возила, аутобуси и рекреативна возила. Теретна возила обухватају камионе свих величина и носивости – од мањих камиона са удвојеним точковима на задњој осовини, до великих вучних возила са полуприколицом са по пет и више осовина. Аутобуси обухватају све типове возила за превоз већег броја путника – међуградске, туристичке аутобусе итд. У рекреативна возила спадају различити типови возила – од моторних камп-кућица, преко камп-приколица које вуку друга возила, па све до путничких аутомобила или лаких теретних возила који вуку веће приколице. Генерално посматрано, ова возила су бољих возно-динамичких карактеристика (однос kW/kg) од теретних возила и аутобуса, а лошија од путничких аутомобила. Такође, њима најчешће управљају возачи који нису професионалци и чија је вештина управљања таквим возилима упитна. Издвајање категорије рекреативних возила специфична је за амерички Приручник за капацитет путева (HCM, 2016), јер се таква возила могу наћи на њиховој путној мрежи у значајнијем броју. Иако су оваква возила присутна и у осталим земљама, само у мањем броју, званична класификација не подразумева њихово посебно издвајање, већ се она сврставају кроз неку од стандардних категорија возила којима припадају, што се најчешће ради на основу података са аутоматских бројача саобраћаја. Тако је и у Србији и окружењу, где се „тешка возила“ класификују кроз лака и тешка теретна возила (по потреби и средња), аутобусе и ауто-возове (Putevi Srbije, n. d.). Специфичност везана за тешка возила, без обзира која класификација је у питању, односи се на чињеницу да је реч о возилима са неповољним возно-динамичким карактеристикама (однос kW/kg) у поређењу са путничким аутомобилима, што посебно

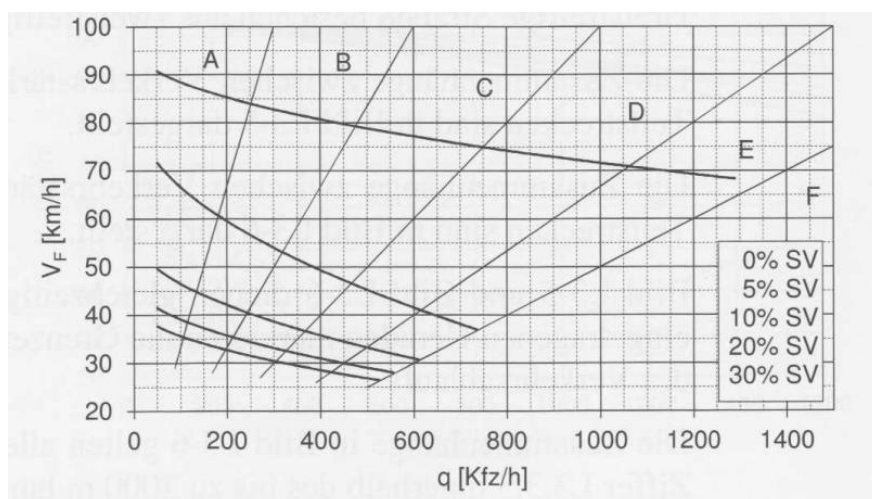
³ Део материјала приказаног у овом поглављу представљен је у резултатима публикованог рада: Subotić, M., Stepanović, N., Tubić, V., Softić, E., & Bouraima, M. B. (2022). Models of analysis of credible deviation from speed limits on two-lane roads of Bosnia and Herzegovina. *Complexity*. <https://doi.org/10.1155/2022/2832175>

долази до изражаја на критичним удужним нагибима. Резултат тога је појава још већих разлика у брзинама возила у току и захтева за претицањем, што додатно погоршава услове у току у односу на ток са малим уделом тешких возила.

Утицај тешких возила на критичним успонима може се видети на дијаграмима представљеним у немачком Приручнику за капацитет путева (HBS, 2015), на којима је приказан утицај раста протока (q) на брзину путничких возила (V_F) у зависности од различитог процента учешћа тешких возила (SV). Може се уочити да при истим вредностима хоризонталне закривљености и свих осталих карактеристика, брзина значајније опада код класе успона 4, која подразумева уздужни нагиб од око 8% са дужином од 1.800 m (Слика 5.1), у односу на класу успона 2, која подразумева уздужни нагиб од 3–4% у дужини од 1.800 m (Слика 5.2).



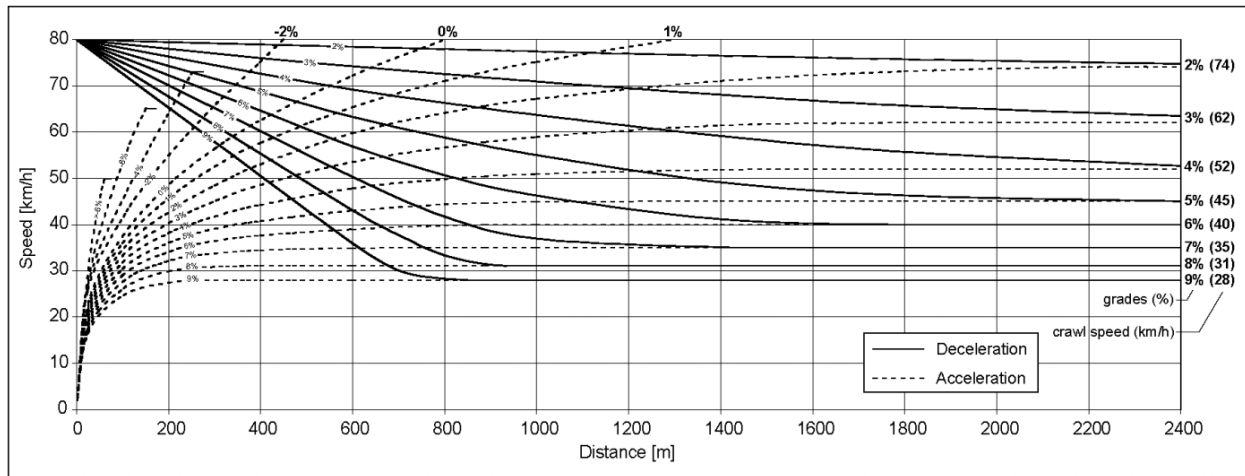
Слика 5.1. Просечна брзина путничких возила на деоници двотрачног пута класе успона 2 (HBS, 2015)



Слика 5.2. Просечна брзина путничких возила на деоници двотрачног пута класе успона 4 (HBS, 2015)

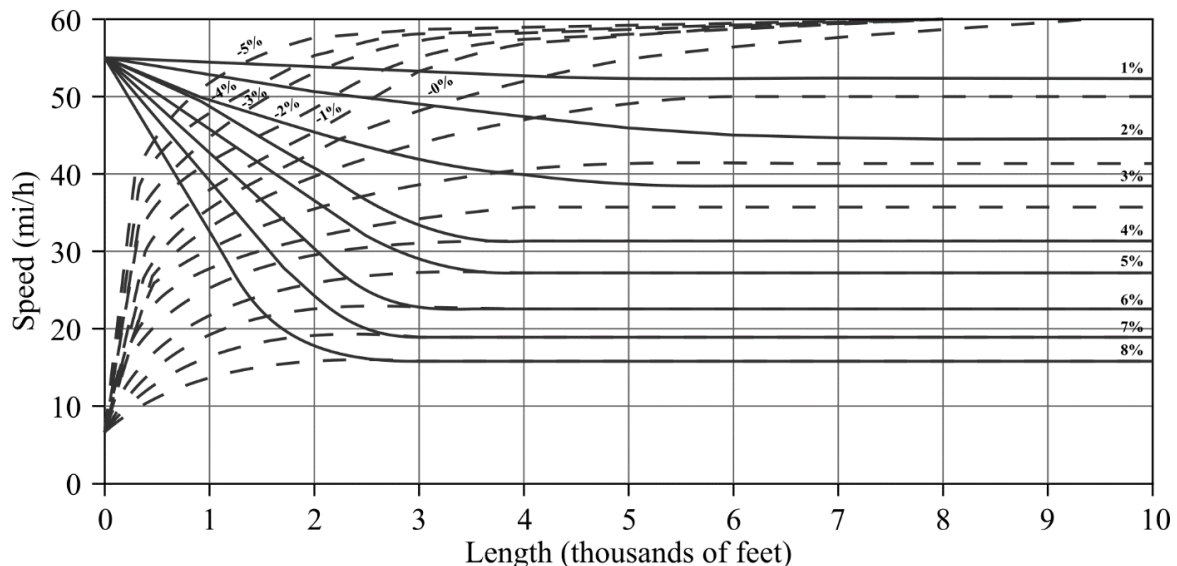
За потребе дефинисања и унапређења критеријума за изградњу додатне траке на успону, која побољшава услове у току на одсечима са критичним уздужним нагибима, перманентно се спроводе истраживања са циљем идентификовања везе између елемената подужног профила (нагиба и његове дужине) и брзине. Управо се на оваквим дијаграмима, који се пре свега односе на меродавно теретно возило, најбоље може уочити утицај уздужног нагиба и његове дужине на услове у саобраћајном току. Посматрајући европске норме максималне дозвољене носивости од 40 тона по возилу и просечне специфичне снаге меродавног теретног возила од

8,28 kW/t, или оквирно 121 kg/kW, у Швајцарској је спроведено истраживање са циљем дефинисања дијаграма смањења брзине под утицајем уздужног нагиба (Коу & Срасек, 2005). Резултат овог истраживања исказан кроз дијаграм приказан је на Слици 5.3.



Слика 5.3. Промена брзине меродавног теретног возила у функцији уздужног нагиба (Коу & Срасек, 2005)

На основу резултата приказаних на Слици 5.3 може се јасно видети колики негативни утицај критични уздужни нагиб има на брзину меродавног теретног возила, а самим тим и на брзину целог тока, дисперзију брзине и захтеве за претицањем. Поред истраживања спроведених у Европи, амерички Приручник за капацитет путева (НСМ, 2010) такође приказује сличан дијаграм зависности брзине меродавног теретног возила специфичне снаге од 122 kg/kW од уздужног нагиба (Слика 5.4), који се користи за потребе прорачуна капацитета и нивоа услуге деоница са специфичним уздужним нагибима (Слика 5.4).



Слика 5.4. Промена брзине меродавног теретног возила у функцији уздужног нагиба (НСМ, 2010)

Утицај уздужног нагиба на услове у саобраћајном току најпрецизније се квантификује применом еквивалената путничких ауомобила (ПАЕ) приликом одређивања условно хомогеног тока, односно конверзије реалног у хомоген ток који се састоји искључиво од путничких ауомобила (Тубић et al., 2022). Када се посматрају препоруке ПАЕ исказане у америчком Приручнику за капацитет путева (НСМ, 2016), може се уочити да при одређивању брзине тока еквивалент једног теретног возила може износити до 15,4

путничких аутомобила у случају уздужног нагиба већег од 6,5% и дужином већом од 4 миље (6,44 km). На основу претходно наведеног утицаја уздужног нагиба на услове у саобраћајном току, намеће се јасна потреба за спровођењем посебних анализа брзине на одсечима путева са овом специфичном геометријском карактеристиком.

5.2. Дефинисање проблема одступања слободне од ограничене брзине на одсечима са уздужним нагибом

Анализа спроведена у претходном поглављу показала је значај кредибилитета ограничења брзине на услове у саобраћајном току, односно на ефикасност и безбедност саобраћаја. Закључено је да брзина слободног тока може имати круцијалну улогу у идентификовању потенцијалних некредибилних ограничења брзина, чијим би се преиспитивањем и усаглашавањем са условима пута и окружења осетно унапредила и прецизност самих аналитичких модела за прорачун исте. Наведена истраживања спроведена су на одсечима ванградских двотрачних путева са приближно идеалним техничко-експлоатационим карактеристикама, са циљем анализе утицаја карактеристика саобраћајног тока. Међутим, бројне студије које су се бавиле испитивањем кредибилитета ограничених брзина у функцији геометријских елемената пута истакле су управо њихов значај, као нпр. Cruzado & Donnell (2010) или Zheng et al. (2017). Са појавом критичних елемената, попут минималног радијуса хоризонталних кривина, великог уздужног нагиба, саобраћајне траке или банке мале ширине ситуација се усложњава. Тако су рецимо у студији Cheng et al. (2020), спровођењем анализе Бајесове мреже ради формирања модела предвиђања вероватноће настанка незгода на путу у функцији геометријских карактеристика пута, стања коловоза и карактеристика саобраћајног тока, посебно истакнути следећи утицајни фактори: брзина возила, радијус хоризонталне кривине, тип возила, коефицијент пријањања и уздужни нагиб. Такође, резултати студије коју су спровели Zheng et al. (2017) показују да су континуирана употреба неколико граничних индекса и велики просечан нагиб, који се простирао на великој дужини на испитиваним деоницама пута у Кини, били један од главних узрока честих саобраћајних незгода.

Утицај уздужног нагиба на настанак саобраћајних незгода истакнут је у резултатима неколико приказаних истраживања. Као што је претходно наведено, присуство тешких возила, које одликују лошије возно-динамичке карактеристике, на одсечима са критичним уздужним нагибима додатно утиче на смањење брзине тока, раст дисперзије брзине и захтева за претицањем. Овај закључак потврђен је и у истраживању Medina & Tarko (2005), који су такође утврдили да на успонима долази до смањења просечне брзине тока, али и до раста дисперзије брзина, док су на паду уочене нешто веће брзине и ниже вредности дисперзије. Смањење брзине тешких теретних возила посебно је анализирано у истраживању Šrnová (2017), у коме је узет у обзир и уздужни нагиб од 9,0% на 1,20 km пута, на коме је уочено значајно смањење брзине тешких возила. Atanacković (2008) је спровео истраживање засновано на испитивању вредности брзина на ауто-путевима и двотрачним путевима у функцији уздужног нагиба. Овим истраживањем развијени су модели брзина слободног саобраћајног тока у функцији уздужног нагиба, за путничка и теретна возила. Негативан утицај присуства тешких возила у току у односу на категорију путничких аутомобила је неоспоран. Међутим, термин тешка возила односи се на сва возила лошијих возно-динамичких карактеристика (лошији однос масе и снаге, лошије перформансе убрзавања и успоравања) од путничких аутомобила, а која су намењена транспорту робе и путника. Ако се детаљније сагледа претходно наведено, може се уочити да у тешка возила спадају различите категорије, где у односу на различите типове класификације можемо разликовати аутобусе, лака и тешка теретних возила, ауто-возове итд. Њих одликује разлика у возно-

динамичким карактеристикама, па је самим тим и различит утицај на услове у саобраћајном току.

Када се узме у обзир наведени утицај уздужног нагиба на одступање брзине саобраћајног тока, посебно у случајевима присуства тешких возила различитих категорија, уочена је потреба за анализом одступања слободне брзине тока од ограничења брзина на одсецима са различитим вредностима успона и пада. Наиме, на одсецима са уздужним нагибима потребно је посебну пажњу посветити хармонизацији брзина, јер превелика дисперзија брзина на оваквим одсецима додатно погоршава услове у саобраћајном току у односу на одсеке без уздужног нагиба. Такође, с обзиром на наведене разлике у утицају које различите категорије тешких возила имају на брзину тока, потребно је спровести засебну анализу по категоријама возила. Главни допринос ове анализе управо се огледа у формирању детерминистичких модела предикције одступања реалних брзина различитих класа возила од ограничених брзина у функцији уздужних нагиба (успона и пада). На основу ових модела може се испитати како промена вредности уздужног нагиба утиче на одступања брзине различитих категорија возила у току у односу на вредност ограничења брзине. Тиме се омогућава сагледавање кредибилитета ограничења брзина у локалним условима на специфичним одсецима деоница, односно доношење адекватних инжењерских мера и препорука у погледу постављања кредибилног ограничења са циљем хармонизације брзина у саобраћајном току.

5.3. Методологија истраживања

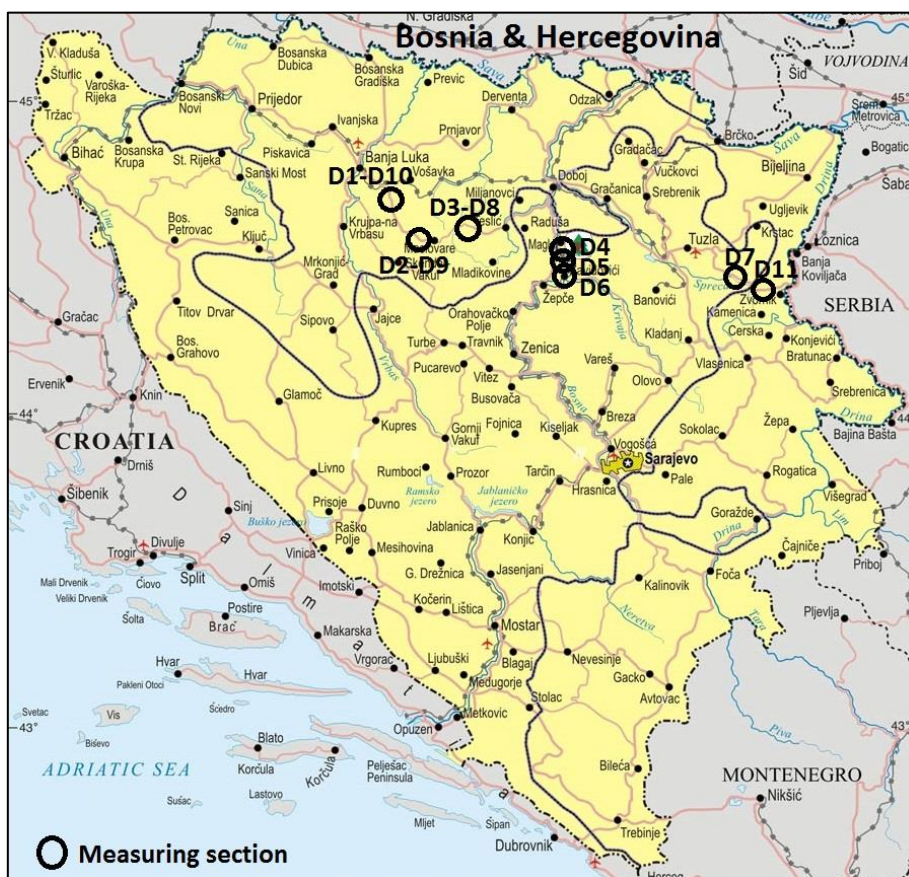
Анализа се базира на претпоставци да се са растом уздужног нагиба (успона/пада) у реалним условима повећава и одступање вредности брзине саобраћајног тока од ограничене, односно разлика слободне и ограничене брзине. Основни циљ истраживања односи се на анализу утврђене разлике у брзинама, односно на питање да ли је та разлика кредибилна ако одговара путним и амбијенталним условима и ако већина возача на тај начин перципира одговарајућу брзину. На овај начин могуће је донети закључке о кредибилитету ограничења брзина на деоницама са уздужним нагибом (Subotić et al., 2022).

Као што је наведено, ова претпоставка се односи на све категорије возила у саобраћајном току, које су за потребе овог истраживања класификоване на следећи начин: путнички аутомобили (ПА), лака теретна возила (ЛТВ), тешка теретна возила (ТТВ) и аутобуси (БУС). Истраживање је, због заступљености брдовитог терена и добијања референтног узорка спроведено у Босни и Херцеговини, на 11 карактеристичних пресека (D_1 – D_{11}). Методологија прикупљања података, одабира локација истраживања и начин обраде података дефинисани су критеријумима приказаним у Табели 5.1.

Мерна места на ванградским двотрачним путевима селектована су у функцији уздужних нагиба ради добијања репрезентативних података, на деоницама магистралних путева М-1-108 Клупе–Теслић, М-1-110 Граница (РС/БиХ) – Доње Цапарде, М-1-110 Маглај–Озимица и М-1-115 Шепак–Каракај. Сви мерни одсеци испитиваних деоница имају приближно исте техничко-експлоатационе карактеристике (Табела 5.2), са главном разликом у погледу вредности уздужног нагиба ради испитивања утицаја ове карактеристике на услове у саобраћајном току. Мерни пресек постављен је на крају мерног одсека чија је дужина 1.000 m, са утврђеним успоном/падом. Неопходно је напоменути да на посматраним мерним одсецима нема додатне траке на успону нити било какве друге „2+1“ конфигурације попречног профила. На Слици 5.5, приказане су локације означених мерних секција (D_1 – D_{11}) на карти путева у Босни и Херцеговини.

Табела 5.1. Основне карактеристике истраживања

Примењена методологија	Основни метод дефинисања одступања слободне од ограничне брзине ($\Delta V = V_{sl} - V_{ог}$), посматрање четири класе возила и њихова груписања (ПА, БУС, ЛТВ и ТТВ)
Техника снимања	Применом посебног мерног уређаја (ручни радар) Bushnell NSN 5840-01-620-6670
Избор локација	Класа путева: стандардни двотрачни путеви (магистрални пут I реда) – II класа двотрачних путева према методологији HCM-а (2016) Ширина саобраћајне траке: <3,5 m Удаљеност бочних сметњи: <2,50 m Густина приступа: <13 приступних тачака/km Тип терена: равничарски или брдовит Ограничење брзине: 50–80 km/h Брзина слободног тока: мерење на терену Стање коловоза: добро Уздужни нагиб: $-5,70\% \leq G \leq 7,00\%$ Дужина мерног одсека: мин. 1.000 m Семафорисаних раскрсница: нема Нема утицаја пешачких токова
Карактеристике саобраћајног тока	ПГДС: 4.305 воз/дан – 10.086 воз/дан Учешће комерцијалних возила у току: >15% Неравномерност протока по смеровима: 60/40
Обрада података	Занемарене вредности брзина возила која не прекорачују ограничену брзину



Слика 5.5. Локација мерних одсека (Subotić et al., 2022)

С обзиром на одсуство савремених аутоматских бројача који могу да мере брзину тока у Босни и Херцеговини, мерења су извршена у реалним путним и амбијенталним условима, помоћу уређаја за мерење брзине – радара Bushnell NSN 5840-01-620-6670. Мерење брзина у слободном саобраћајном току извршено је „методом локалног мерења“ (Tubić et al., 2022),

након чега се приступило обради. Емпиријско истраживање је спроведено у мају, јуну и јулу 2021. године на одабраним мерним секцијама, у меродавним радним данима. Мерење на терену вршено је током дневне светлости, од 08:00 h до 20:00 h, под оптималним временским условима (није било снега, кише, магле или смањене видљивости) и са вредностима протока до 200 воз/час у оба смера по препорукама НСМ-а (2016). Из узорка истраживању су изузета возила јавног градског превоза, специјална возила, ватрогасна возила и слична возила осталих намена. Уздужни нагиб (успон/пад) на мерним секцијама одређен је утврђивањем аритметичке средине (на основу базе података ЈП Путеви Републике Српске и Цесте БиХ) вредности уздужних нагиба дате деонице, који су мерени на сваких 200 m. Утврђивање одступања од ограничене брзине селектовано према класама појаве возила на мерним секцијама подразумева израчунавање по следећој једначини (5.1):

$$\Delta V = V_{sl} - V_{og} \quad [5.1]$$

где су:

V_{sl} – измерена брзина возила у слободном току,

V_{og} – ограничена брзина на мерном одсеку.

Наведеним емпиријским истраживањима утврђено је да више од 65% возила прекорачује ограничену брзину на одабраним мерним секцијама двотрачних путева (Табела 5.2). За анализу података усвојен је распон класе брзина од 2 km/h.

Табела 5.2. Процент прекорачења брзине у функцији разлике слободне и ограничене брзине

Деоница двотрачног пута	Ознаке деонице	Дужина деонице	Успон/пад на 1.000 m (%)	ПГДС 2017. (воз/дан)	V_{sl} (km/h)	Ограничена брзина V_{og} (km/h)	% прекорачења брзине	
D1	Клупе–Теслић	M-I-108	16,734	-5,700	6.498	63	50	90,12
D2	Клупе–Теслић	M-I-108	16,734	-4,060	6.498	66	50	89,42
D3	Клупе–Теслић	M-I-108	16,734	-3,000	6.498	61	50	80,91
D4	Маглај–Озимица	M-I-110	10,520	-2,760	10.086	82	70	87,00
D5	Маглај–Озимица	M-I-110	10,520	-1,700	10.086	90	80	67,42
D6	Маглај–Озимица	M-I-110	10,520	-1,350	10.086	79	70	75,37
D7	Шепак–Каракај 3	M-I-115	20,950	1,000	6.408	69	50	65,28
D8	Теслић–Клупе	M-I-108	16,734	3,000	6.498	60	50	75,98
D9	Теслић–Клупе	M-I-108	16,734	4,060	6.498	71	50	93,40
D10	Теслић–Клупе	M-I-108	16,734	5,700	6.498	64	50	86,34
D11	Граница (РС/ФБиХ) – Доње Цапареле	M-I-110	3,140	7,000	4.305	64	50	73,22

Приликом мерења брзина и одређивања одступања слободне од ограничене брзине потребно је утврдити карактеристике основне популације узорка. Вероватноћа да узорак репрезентује основну популацију зависи од грешака насталих приликом прикупљања података и величине узорка. Грешке најчешће настају услед несавршености мерне опреме, начина узорковања и сл. Грешке у начину узорковања се повећавају услед снимања само дела саобраћајног тока (нерепрезентативност). Коришћењем већег узорка смањује се могућност да се карактеристике узорка разликују од карактеристика популације. У анализи одступања реалних брзина од ограничене брзине, апроксимација расподеле је вршена Гаусовом расподелом, која је симетрична у односу на средину и асимптотски се приближава ординатној оси.

Анализом величине узорка за потребан ниво тачности и поузданости утврђена је његова вредности из општег облика на основу Једначине 5.2 (Subotić et al., 2022):

$$n = \frac{K^2 \cdot \sigma^2 \cdot (2 + U^2)}{2 \cdot e^2} \quad [5.2]$$

где су:

K – број стандардних одступања око средње вредности нормалне расподеле,

σ – стандардно одступање узорка,

U – коефицијент нивоа поузданости,

e – граница прихватљивог одступања.

Коефицијент U за процентну брзину дат је у Табели 5.3. за 15-и, 50-и и 85-и перцентил.

Табела 5.3. Вредности K и U за одређени ниво поузданости

Ниво поузданости (%)	K	ΔV вредности у процентима	U
90,0	1,65	50%	0,00
95,0	1,96	15% или 85%	1,04

Уколико се назначи вредност стандардног одступања од $\sigma=2, 4, 6, 8, 10$ и 12 km/h , а гранична вредност прихватљиве грешке $e=1 \text{ km/h}$, за нивое поузданости утврђена је вредност величине узорка дата у Табели 5.4.

Табела 5.4. Потребна и довољна величина узорка за прихватљиву вредност одступања од $e=1 \text{ km/h}$

Ниво поузданости (%)	K	U	Стандардно одступање σ (km/h)					
			2	4	6	8	10	12
90,0	1,65	0,00	11	44	98	174	272	392
95,0	1,96	1,04	24	95	213	379	592	852

Пре него што се приступи анализи одступања слободне од ограничене брзине, неопходно је утврдити структуру саобраћајног тока на наведеним мерним секцијама. У анализи (Табела 5.5) су обухваћене четири наведене класе возила – путнички аутомобили (ПА) и три класе тешких возила (ЛТВ, ТТВ и БУС).

Табела 5.5. Потребна и довољна величина узорка за прихватљиву вредност одступања од $e=1 \text{ km/h}$

Деоница двотрачног пута	Ознаке деонице	Дужина деонице	Успон/пад на 1.000 m (%)	величина мерног узорка по класама одступања брзина (% greške $\pm 2.0\%$)						
				ПА	БУС	ЛТВ	ТТВ	КВ	Σ свих возила	
D ₁	Клупе–Теслић	M-I-108	16,734	-5,700	1.805	100	145	75	320	2.125
D ₂	Клупе–Теслић	M-I-108	16,734	-4,060	1.763	47	53	87	187	1.950
D ₃	Клупе–Теслић	M-I-108	16,734	-3,000	1.497	75	98	108	281	1.778
D ₄	Маглај–Озимица	M-I-110	10,520	-2,760	588	84	133	105	322	910
D ₅	Маглај–Озимица	M-I-110	10,520	-1,700	530	171	121	89	381	911
D ₆	Маглај–Озимица	M-I-110	10,520	-1,350	415	97	141	105	343	758
D ₇	Шепак–Каракај 3	M-I-115	20,950	1,000	735	106	171	103	380	1.115
D ₈	Теслић–Клупе	M-I-108	16,734	3,000	1.428	58	92	91	241	1.669
D ₉	Теслић–Клупе	M-I-108	16,734	4,060	1.746	79	98	137	314	2.060
D ₁₀	Теслић–Клупе	M-I-108	16,734	5,700	1.691	77	105	92	274	1.965
D ₁₁	Граница (РС/ФБиХ) – Доње Цапареде	M-I-110	3,140	7,000	782	84	104	77	265	1.047
Укупно					12.980	978	1.261	1.069	3.308	16.288

Анализа структуре тока на испитиваним одсечима показује да приближно 80% возила у току чине путнички аутомобили, док су преосталих 20% тешка возила. Вредности ПГДС-а на деоницама варирају од 4.305 воз/дан на деоници D₁₁ до преко 10.000 воз/дан на деоницама D₄, D₅ и D₆. На основу емпиријски измерених вредности брзина класираних у пет класа, употребом Microsoft Office Excel софтвера, добијене су вредности одступања слободне од ограничене брзине у складу са Једначином (5.1), након чега је вршена даља статистичка обрада (Subotić et al., 2022).

5.4. Анализа и синтеза резултата

У спроведеном емпиријском истраживању измерене су вредности брзине за четири класе возила, а из узорка су приликом анализе одбачене брзине возила која су се кретала спорије од вредности ограничене брзине на посматраном одсеку. Издвајањем само брзина возила у прекорачењу, анализирано је нешто више од 65% целокупног узорка измерених брзина на свим мерним секцијама (Табела 5.2). За сваку категорију возила утврђене су вредности аритметичке средине одступања вредности слободне брзине од ограничене (АС), стандардног одступања (σ) и коефицијента варијације (КВ) на мерним одсечима двотрачних путева. Класирање добијених вредности вршено је са ширином класе од 2 km/h. Класирањем је добијена дистрибуција вредности одступања брзина за сваку испитану категорију возила (ПА, БУС, ЛТВ, ТТВ). Табеларно добијени подаци коришћени су за даљу статистичку анализу и дефинисање адекватне расподеле добијених вредности, као и за утврђивање 15-ог ($\Delta V_{15\%}$), 50-ог ($\Delta V_{50\%}$) и 85-ог ($\Delta V_{85\%}$) перцентила одступања слободне од ограничене брзине. За то је коришћен статистички софтвер TableCurve 2D v5.01. Емпиријски и табеларно добијене вредности АС, σ и КВ, коришћене су у сврху развијања детерминистичких математичких модела за утврђивање одступања слободне од ограничене брзине у функцији уздужног нагиба (успона/пада).

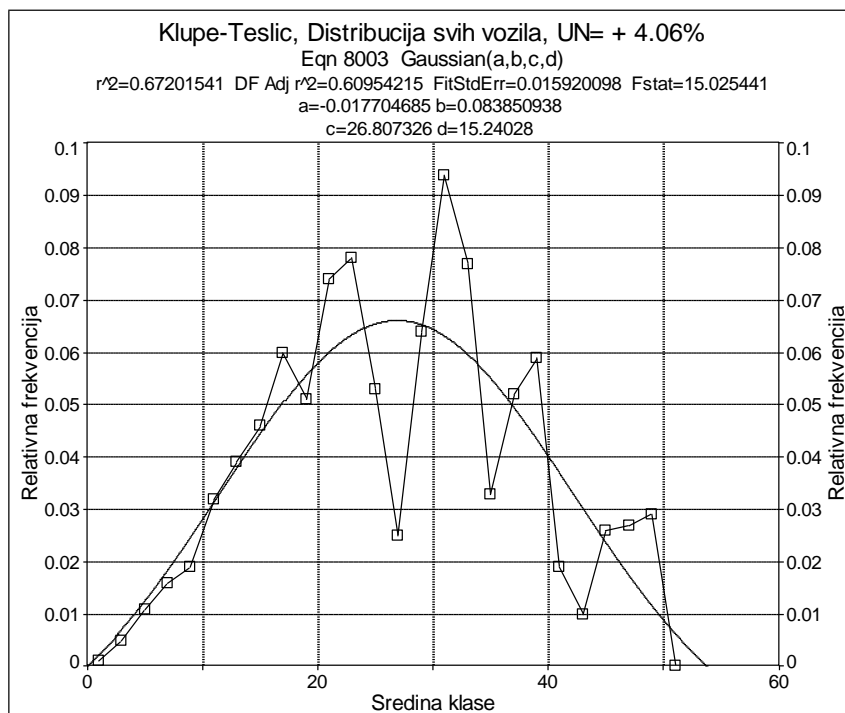
Статистичко истраживање добијених вредности на пресецима мерних секција тестирано је Гаусовом (нормалном) расподелом. На основу статистичке анализе, табеларно добијене вредности одступања слободне од ограничене брзине према распореду класа приказано је распоређивање Гаусовом расподелом са адекватним коефицијентом корелације ($R^2 > 0,5$), што је приказано на Слици 5.6. Претпоставка је да се емпиријска дистрибуција вредности одступања брзине од ограничене у случају довољно великог статистичког узорка за дате класе возила може торијски апроксимирати нормалном расподелом. Такође, одређене су и вредности кумулативне релативне фреквенције, која се у свим случајевима може апроксимирати кумулативном Гаусовом расподелом (Слика 5.7).

Након добијања вредности емпиријске аритметичке средине (АС) за сваки пресек мерног одсека за све испитиване класе возила, приступило се развоју вишестепених математичких модела. Такође, утврђене су и вредности стандардног одступања (σ), где је показано да су сви коефицијенти варијације (КВ) за наведене пресеке били већи од 0,50. Модели су развијени са циљем добијања функционалне зависности одступања слободних од ограничених брзина појединачних класа возила (ПА, БУС, ЛТВ, ТТВ) од уздужног нагиба (успона/пада) двотрачних путева (Subotić et al., 2022). Општи облик вишестепеног модела дат је у следећем облику (Једначина 5.3):

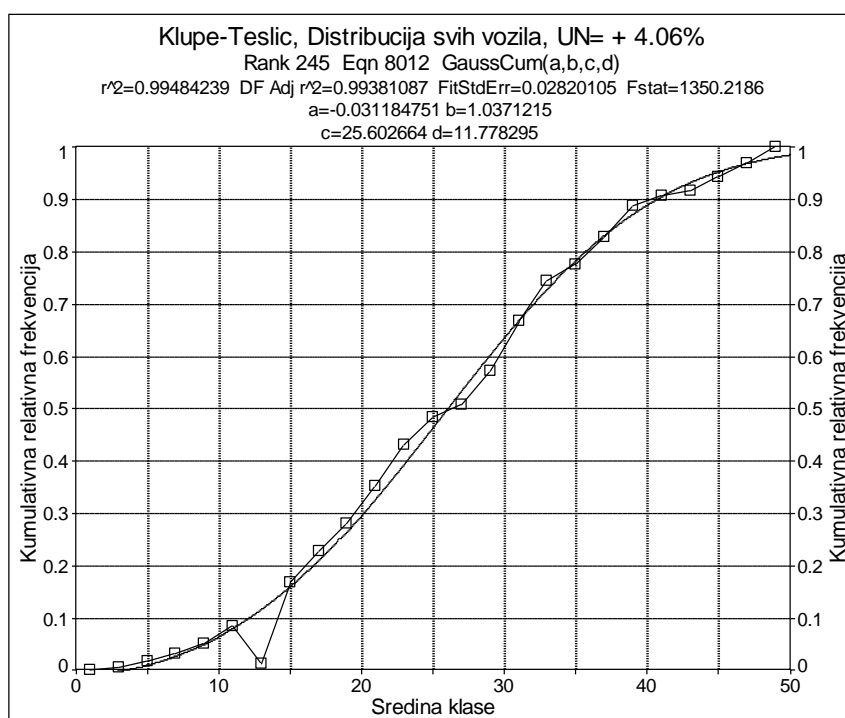
$$\Delta V = a + b \cdot UN^{\pm 1} + c \cdot UN^{\pm 2} + \dots + x \cdot UN^{\pm n} \quad [5.3]$$

где су:

a, b, c, \dots, x – коефицијенти регресионе криве заокружени на трећу децималу,
 UN – уздужни нагиб (%) у успону или паду.



Слика 5.6. Пример релативне фреквенције добијених вредности одступања слободне од ограничене брзине свих возила у саобраћајном току (Subotić et al., 2022)



Слика 5.7. Пример кумулативне релативне фреквенције добијених вредности одступања брзина од ограничене за сва возила у саобраћајном току (Subotić et al., 2022)

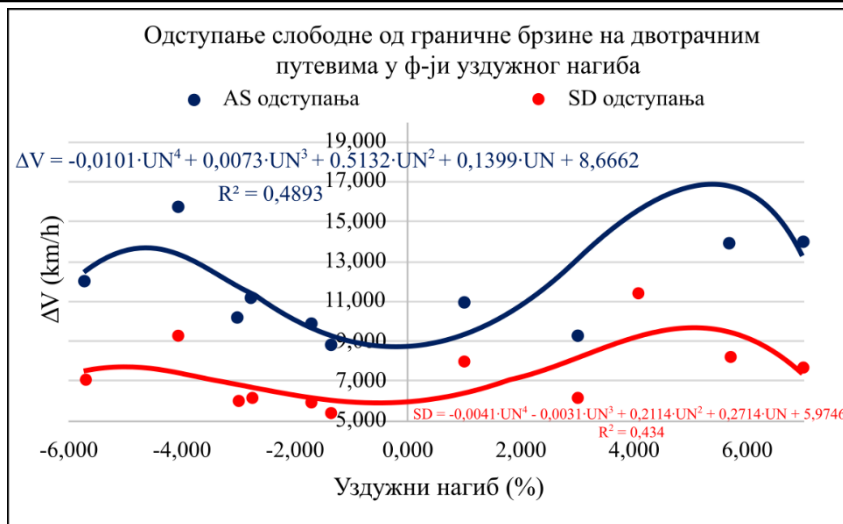
На основу претходно приказане Једначине 5.3, развијени су емпиријски математички модели за утврђивање функционалне зависности одступања слободне од ограничене брзине од уздужног нагиба (Subotić et al., 2022). Модели су дати у облику полинома вишег степена за све испитиване класе возила (Табела 5.6). Прецизност и висока тачност модела према класама возила које су обрађене (ПА, БУС, ЛТВ, ТТВ), потврђена је високим коефицијентима корелативне зависности прекорачене брзине од уздужног нагиба ($R^2 > 0,8$).

Значајно је истаћи да се у класи ПА, за емпиријски измерене брзине, најниже вредности одступања слободне од ограничене брзине јављају за мерни одсек са $UN=+3,00\%$, које износи $9,743 \text{ km/h}$, до $22,49 \text{ km/h}$, колико се јавља на одсечима са $UN=+1,00\%$. Одступање код ПА је уравнотежено на равном терену, али се мења при расту уздужног нагиба, што утиче на велику дисперзију брзина на поједним мерним одсечима. Код ЛТВ дисперзија одступања брзина у функцији уздужног нагиба је нешто нижа него код ПА и креће се у распону $7,417 \text{ km/h} \leq \Delta V \leq 15,316 \text{ km/h}$. Највише одступање од ограничене брзине на успону јавља се на мерном одсеку нагиба $UN=+4,06\%$. Знатно нижа дисперзија јавља се код БУС и у функционалној зависности од уздужног нагиба креће се у распону $7,143 \text{ km/h} \leq \Delta V \leq 13,250 \text{ km/h}$. Такође, код БУС је највеће расипање прекорачења брзине од ограничене за $UN=+4,06\%$. Ако се узме одступање за ТТВ, најмање одступање јавља се у случају одсека са највећим уздужним нагибом $UN=+7,00\%$ и оно износи $3,467 \text{ km/h}$, док се прекорачење преко 10 km/h јавља на равном терену и низбрдици. Овако неуравнотежен тренд расипања разлике слободних и ограничених брзина на одабраним мерним одсечима може се објаснити карактером терена, возно-динамичким карактеристикама возила, психо-физичким способностима возача и техничко-експлоатационим карактеристикама испитиваних деоница двотрачних путева. Због ових утицајних фактора тражене су AC и σ вредности одступања брзина за наведене мерне одсеке са циљем добијања адекватне статистичке регресивности (Subotić et al., 2022).

Табела 5.6. Емпиријски математички модели функционалне зависности одступања брзине од уздужног нагиба

Категорија возила: ПА	Коефицијент корелације: $R^2=0,997$
$\Delta V = 14,845 + 18,524 \cdot UN - 119,496 \cdot UN^{-1} + 1,16 \cdot UN^2 - 124,945 \cdot UN^{-2} - 0,866 \cdot UN^3 + 104,888 \cdot UN^{-3} - 0,03 \cdot UN^4 + 128,398 \cdot UN^{-4} + 0,012 \cdot UN^5 \text{ [km/h]}$	
Категорија возила: БУС	Коефицијент корелације: $R^2=0,995$
$\Delta V = 28,118 + 7,292 \cdot UN - 47,413 \cdot UN^{-1} - 0,602 \cdot UN^2 - 127,083 \cdot UN^{-2} - 0,325 \cdot UN^3 + 29,764 \cdot UN^{-3} + 0,005 \cdot UN^4 + 119,38 \cdot UN^{-4} + 0,004 \cdot UN^5 \text{ [km/h]}$	
Категорија возила: ЛТВ	Коефицијент корелације: $R^2=0,834$
$\Delta V = 29,12 + 22,622 \cdot UN^2 + 7,664 \cdot UN^4 - 1,053 \cdot UN^6 + 0,064 \cdot UN^8 - 0,002 \cdot UN^{10} \text{ [km/h]}$	
Категорија возила: ТТВ	Коефицијент корелације: $R^2=0,928$
$\Delta V = 7,515 + 3,472 \cdot UN + 1,784 \cdot UN^2 - 1,571 \cdot UN^3 - 0,513 \cdot UN^4 + 0,202 \cdot UN^5 + 0,038 \cdot UN^6 - 0,01 \cdot UN^7 - 0,001 \cdot UN^8 \text{ [km/h]}$	

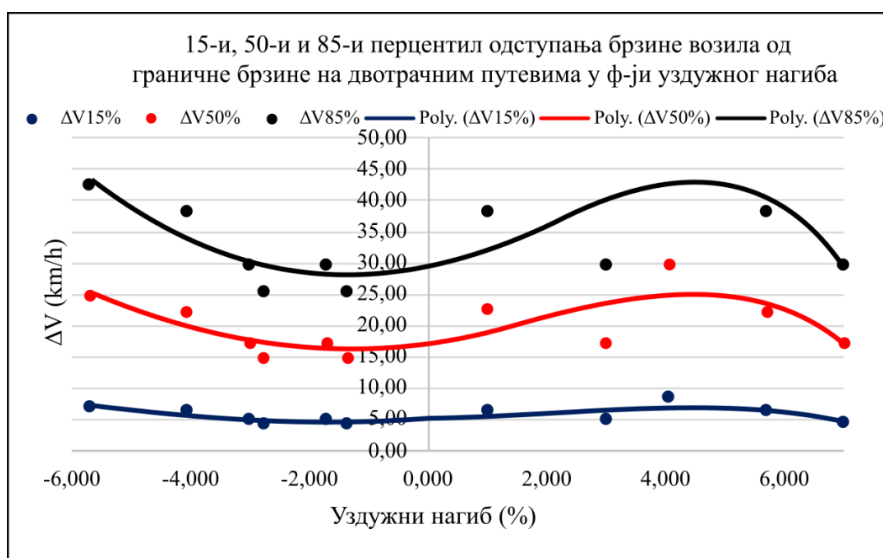
Слика 5.8 приказује графичко уопштавање модела за утврђивање одступања слободне од ограничене брзине у виду полинома четвртог степена, за све класе возила на испитиваним мерним одсечима двотрачних путева. Калибрацијом овог модела могу се приметити две екстремне вредности одступања слободне од ограничене брзине, и то једна мања на паду и једна већа на успону. Коефицијент корелације од приближно $R^2 \approx 0,5$ показује да аритметичке средине одступања вредности брзина варирају од одсека до одсека, па је полином четвртог степена коришћен као инструмент за упрошћавање модела. Модел је приказан и у Једначини 5.4, где су све променљиве претходно дефинисане.



Слика 5.8. Одступање брзина саобраћајног тока у функцији уздужног нагиба (Subotić et al., 2022)

$$\Delta V = -0,0101 \cdot UN^4 + 0,0073 \cdot UN^3 + 0,5132 \cdot UN^2 + 0,1399 \cdot UN + 8,6662 \quad [5.4]$$

У моделу приказаном на Слици 5.8 анализирани су искључиво брзине возила свих класа које прекорачују ограничену брзину и приказане су АС и σ вредности одступања брзина за наведене мерне одсеке. На основу предложеног модела може се закључити да се најмање одступање брзина свих возила јавља на равном терену, односно при $UN=0 \pm 1,00\%$, а да вредност одступања не прелази 10 km/h (Subotić et al., 2022). Анализом модела, као и увидом у претходни калибрисани модел, јавља се привидни закључак да одступање слободне брзине тока од ограничене брзине расте на успону и паду за све класе возила, уз напомену да је модел направљен за све четири претходно наведене класе возила (ПА, БУС, ЛТВ, ТТВ). Такође, ради добијања прецизнијих вредности претходно наведеног модела, у даљем току приступило се изради калибрисаног модела за $\Delta V_{15\%}$, $\Delta V_{50\%}$ и $\Delta V_{85\%}$. Одступања вредности на мерним секцијама за 15-и, 50-и и 85-и перцентил вредности разлике слободне и ограничене брзине износе и преко 10 km/h, што се може уочити према моделу наведеном на Слици 5.9. Развијени аналитички модели за наведене вредности одступања слободне од ограничене брзине свих класа возила за 15-и, 50-и и 85-и перцентил приказани су у Табели 5.7.



Слика 5.9. 15-и, 50-и и 85-и перцентил одступања слободних брзина у функцији уздужног нагиба (Subotić et al., 2022)

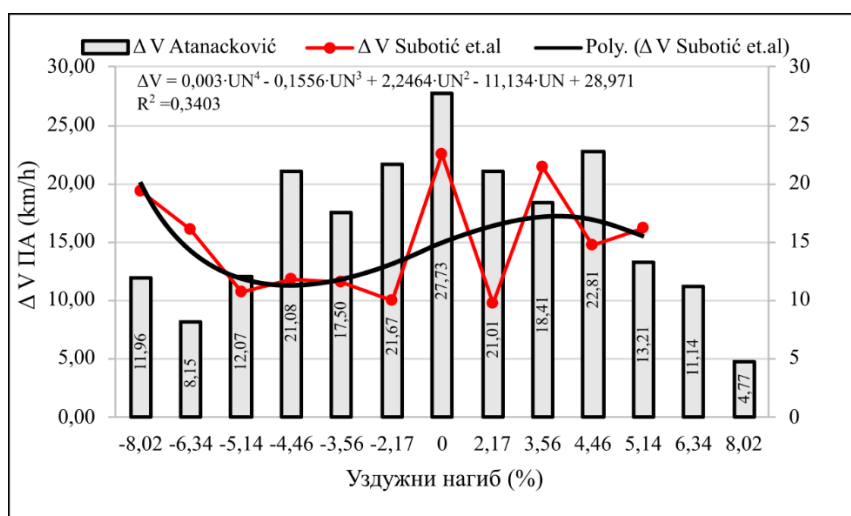
Табела 5.7. Аналитички модел 15%, 50% и 85% одступања слободне од ограничене брзине на двотрачним путевима

15-ти перцентил одступања ΔV	Коефицијент корелације: $R^2 = 0,614$
$\Delta V_{15\%} = -0,002 \cdot UN^4 - 0,014 \cdot UN^3 + 0,126 \cdot UN^2 + 0,397 \cdot UN + 4,884$ [km/h]	
50-ти перцентил одступања ΔV	Коефицијент корелације: $R^2 = 0,586$
$\Delta V_{50\%} = -0,006 \cdot UN^4 - 0,048 \cdot UN^3 + 0,394 \cdot UN^2 + 1,403 \cdot UN + 17,391$ [km/h]	
85-ти перцентил одступања ΔV	Коефицијент корелације: $R^2 = 0,596$
$\Delta V_{85\%} = -0,010 \cdot UN^4 - 0,079 \cdot UN^3 + 0,712 \cdot UN^2 + 2,341 \cdot UN + 29,462$ [km/h]	

Вредности добијене развијеним аналитичким моделима приказаним у Табели 5.6. а графички на Слици 5.9, показују значајно расипање вредности одступања слободне од ограничене брзине за 85-и перцентил, а минимално за 15-и перцентил (Subotić et al., 2022).

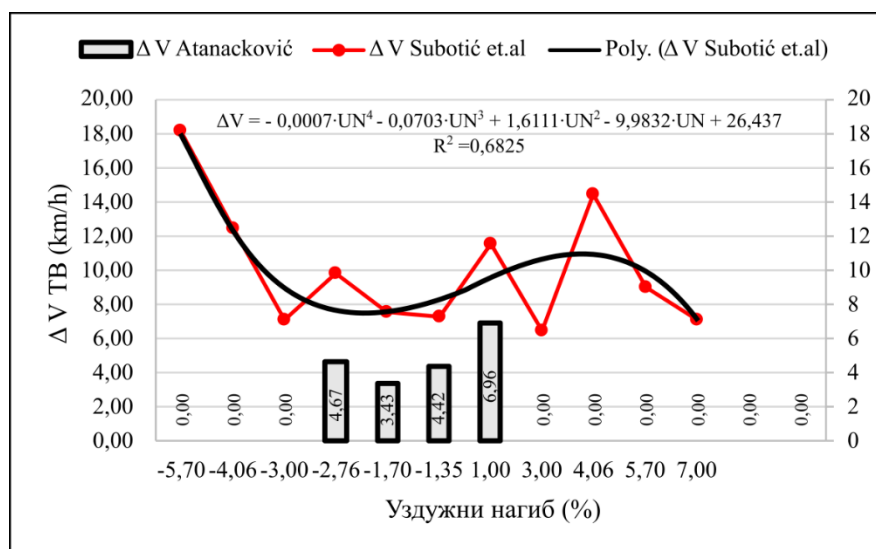
5.5. Валидација (поређење) резултата модела

Како би се поред статистичких показатеља квалитета развијених модела спровела додатна верификација односно валидација резултата истих, извршено је поређење са моделима које је у сличном истраживању добио Atanasković (2008), упркос одређеним разликама у методологији истраживања. Истраживање које је спровео Atanasković (2008) реализовано је на деоницама двотрачних путева са уздужним нагибом у Србији са ограничењем брзине од 70 km/h, на којима су прорачунаване аритметичке средине одступања вредности слободне од ограничене брзине (АС). Највећа разлика која утиче на поређење резултата односи се на чињеницу да је у овом истраживању рачунато одступање брзине слободног тока од ограничене брзине за цео саобраћајни ток, а не као у истраживању спроведеном у БиХ (Subotić et al., 2022), где су у анализи издвојене само брзине возила која прекорачују постављена ограничења брзина на мерним одсесима. Међутим, с обзиром на то да су оба истраживања спроведена у условима слободног саобраћајног тока, могуће је упоредити добијене вредности и дати адекватан закључак у складу са наведеним ограничењима. На Сликама 5.10 и 5.11 приказано је поређење вредности аритметичке средине одступања слободне од ограничене брзине добијених емпиријским истраживања у Босни и Херцеговини и Србији, за категорију путничких аутомобила и тешких возила, редом.



Слика 5.10. Упоредни приказ одступања слободне од ограничене брзине за путничке аутомобиле у Србији и БиХ (Subotić et al., 2022)

Посматрајући упоредне резултате приказане на Слици 5.10, може се уочити да вредности ΔV значајно одступају у истраживањима спроведеним у Србији (Atanasković, 2008), у односу на истраживања спроведена у БиХ (Subotić et al., 2022). Генерално се може закључити да су ова одступања већа у Србији, а то је нарочито приметно ако се узму у обзир вредности $-5,0\% \geq UN \geq 5,0\%$. Потребно је напоменути да би одступања била и знатно већа да су приликом истраживања у Србији узете у обзир само вредности брзина возила која су вршила прекорачења ограничених брзина, као што је то био случај са истраживањем у БиХ. Највеће одступање слободне од ограничене брзине у Србији добијено је за раван терен ($UN=0\%$), што се поклапа са резултатима истраживања у БиХ, с тим што је у Србији добијено веће одступање – преко 27 km/h. Код истраживања спроведеног у БиХ уочљиво је присуство великог расипања вредности одступања слободне од ограничене брзине, што показује низак коефицијент корелације $R^2=0,34$ (Subotić et al., 2022).



Слика 5.11. Упоредни приказ одступања слободне од ограничене брзине за тешка возила у Србији и БиХ (Subotić et al., 2022)

Прегледом упоредних резултата истраживања одступања слободне од ограничене брзине тешких возила спроведених у Србији (Atanasković, 2008) и у БиХ (Subotić et al., 2022), приказаних на Слици 5.11, уочава се супротна ситуација у односу на резултате добијене за категорију путничких аутомобила. Наиме, када се упореде одступања у функцији уздужног нагиба, могу се уочити знатно веће вредности добијене у истраживањима спроведеним у БиХ (Subotić et al., 2022). Може се закључити да тешка возила у Србији прекорачују ограничену брзину само на равном терену и благом паду, док на већим успонима и падовима нису забележена прекорачења брзина. У БиХ није уочен такав закључак, па је забележена средња вредност одступања од преко 14 km/h на нагибу $UN=4,06\%$. У овом случају, развојем модела четвртог степена за теретна возила у Босни и Херцеговини (Subotić et al., 2022), јавља се добра корелативна веза $R^2=0,6825$. Овако забележена одступања у Србији, која не прелазе 7 km/h, доста се разликују од резултата у БиХ, а последица су, између осталог, и наведене разлике у методологији истраживања наведене на почетку. Наиме, мора се узети у обзир чињеница да је приликом анализа резултата истраживања спроведеног у Србији узет укупан узорак брзина возила, док су код истраживања у БиХ издвојене само брзине возила која прекорачују ограничену брзину. У случају такве анализе, очекиван је мали проценат возила на успону и паду која прекорачују дозвољену брзину и ниже вредности аритметичке средине (Subotić et al., 2022).

5.6. Дискусија добијених резултата

Велики број истраживања кредибилитета ограничења брзине односи се на анализу утицајних фактора који доприносе повећању/смањењу прекорачења ограничене брзине у реалним путним и амбијенталним условима. У претходном прегледу литературе уочено је да се један део истраживања углавном заснива на утицајним факторима геометрије пута, у шта се сврстава уздужни нагиб, радијуси кривина и сл. Да би се утврдила вредност одступања брзине тока од ограничене, која је из перспективе возача прихватљива и у складу са карактеристикама пута и окружења, потребно је сваку карактеристику посматрати издвојено, јер постоји велики број фактора који могу бити утицајни који могу бити утицајни (карактеристике пута, психо-физичке способности возача и возно-динамичке карактеристике возила).

Истраживање спроведено на 11 одсека деоница двотрачних путева са различитим вредностима уздужног нагиба у БиХ показало је да преко 65% возача прекорачује ограничену брзину, што је у складу са резултатима појединих истраживања прекорачења ограничене брзине (нпр. BRAKE, 2004; Tubić et al., 2016), али је веће од 40%, што је добио Hashim (2011). Међутим, сличност са резултатима истраживања које је спровео Hashim (2011) огледа се у томе што проценат прекорачења варира по мерним одсечима, што показује потребу за индивидуалним приступом у анализи кредибилитета ограничених брзина. Анализом прекорачења брзина на посматраним одсечима, на основу емпиријског мерења је утврђено да се највеће прекорачење брзина јавља код ПА, где средња вредност АС за ΔV на свим мерним секцијама износи 14,898 km/h (≈ 15 km/h). Најнижа вредност АС за ΔV на свим мерним секцијама измерена је код ТТВ и износи 8,585 km/h (≈ 9 km/h), док та вредност за БУС (9,785 km/h) и ЛДВ (10,201 km/h) износи ≈ 10 km/h (Subotić et al., 2022). Овако висок проценат прекорачења ограничене брзине, чак и на деоницама двотрачних путева са израженим уздужним нагибом, који је у мањој или већој мери присутан код свих испитиваних категорија возила, указује на потребу за преиспитивањем ограничења брзина. Анализом наведених вредности одступања слободне брзине од ограничене на наведених 11 мерних секција (D1–D11), издваја се вредност одступања у износу од 10 km/h без обзира на вредност уздужног нагиба, које је одговарајуће великој већини возача у току на путевима у БиХ (Subotić et al., 2022).

Ради провере добијених резултата и омогућавања доношења адекватних закључака о одступању слободне од ограничене брзине коју би већина возача сматрала кредибилном, односно при којој би прихватили да возе у складу са правилима политике управљања брзинама, чиме би се повећала хармонизација брзина у току, развијени су вишестепени детерминистички математички модели функционалне зависности од уздужног нагиба. Најпре је креиран општи вишестепени модел за све категорије возила, чијим су калибрисањем полиномом четвртог степена развијени модели 15-ог, 50-ог и 85-ог перцентила вредности разлике слободне и ограничене брзине за све категорије возила (Subotić et al., 2022). Може се уочити да се са повећањем перцентилне вредности повећава расипање одступања ΔV , али и да са повећањем вредности нагиба долази до повећања одступања, што је у складу са резултатима које су добили Medina & Tarko (2005). Овај раст може се приписати расту значаја разлике у возно-динамичким карактеристикама возила на већим уздужним нагибима, што посебно долази до изражаја код теретних возила и аутобуса.

Добијени резултати одступања слободне од ограничене брзине од 10 km/h могу индиковати прихватљиву меру којој би требало тежити приликом анализе кредибилитета ограничења брзина. Поред тога што је, из возачеве перцепције карактеристика пута и окружења, та вредност у највећем проценту добијена као кредибилна, поједина истраживања показују да

приближне вредности одступања доводе до мањег броја незгода. Solomon (1964) је дошао до налаза да су возила која су се кретала до 10 km/h брже од ограничене брзине имала најнижу стопу незгода, док су возила која су се кретала знатно спорије или брже од прописане брзине имала већу шансу да учествују у незгодама. Међутим, и резултати појединих знатно новијих истраживања (Fleiter & Watson, 2006; Goldenbeld & Van Schagen, 2007) довели су до закључка да прихватљиво одступање реалних од ограничених брзина износи око 10%. Упоредивањем са вредношћу ограничене брзине, још једном је потврђено да слободна брзина представља кључан утицајни фактор за анализу кредибилитета ограничених брзина, што је показано и у претходном поглављу. Испитивањем кредибилитета ограничених брзина и разматрањем прилагођавања истих карактеристикама пута и окружења у оквирима граница добијених овим и сличним истраживањима, повећава се хармонизација брзина у току и смањује разлика између слободне и ограничене брзине. Претходно наведено допринело би побољшању нивоа услуге у саобраћајном току, али и смањењу броја саобраћајних незгода са најтежим последицама (Hashim, 2006). Због тога резултати овог истраживања могу бити добар индикатор прихватљивих вредности разматрања унапређења кредибилитета ограничених брзина у функцији уздужног нагиба постојећих, али и будућих путева захваљујући развијеним моделима предикције одступања слободне од ограничене брзине.

6. Закључна разматрања и правци будућих истраживања

Брзина је, као један од основних параметара саобраћајног тока, присутна још од најранијих истраживања из области Теорије саобраћајног тока. Њен значај за решавање теоријских и практичних проблема саобраћајног инжењерства перманентно је растао са годинама, посебно са напретком технологије континуалног снимања карактеристика саобраћајног тока. Иако постоје разни апсекти и облици брзина који се употребљавају за различите анализе, брзина слободног тока се издвојила као незаобилазни почетни корак при анализи капацитета и нивоа услуге путева на којим је присутан непрекинут и неометен ток. Важност егзактног утврђивања слободне брзине, било мерењем на терену било аналитичким моделима, истакнута је у релевантним истраживањима кроз препоруке за њено одређивање, посебно од почетка XXI века. Међутим, због непрецизности у препорукама за коришћење појединих утицајних фактора у досадашњим аналитичким моделима, који се често користе у случајевима када слободну брзину није могуће измерити на терену, може доћи до погрешних резултата анализа капацитета и нивоа услуге. Ово се пре свега односи на аналитичке моделе приказане у најкоришћенијем приручнику за прорачун капацитета и нивоа услуге широм света – НСМ-у. Проблем је посебно изражен на ванградским деоницама двотрачних путева због препорука о униформном коришћењу ограничења брзине као једног од утицајних фактора у одређеним случајевима, упркос великој разлици у функцији коју ови путеви имају у мрежи. Претходно наведени проблем се додатно усложњава у случајевима када постављена ограничења брзине на деоницама нису веродостојна или кредибилна, односно када ограничење брзине не одговара геометријским карактеристикама пута и окружења.

Због препознатих проблема који се могу јавити при употреби модела који униформно третира ограничење брзине при аналитичком прорачуну слободне брзине на ванградским двотрачним путевима различитих класа, утврђена је неопходност развијања новог модела за прорачун слободне брзине који би на прецизнији начин квантификовао утицај овог, али и осталих фактора који се тичу геометријских карактеристика деонице. Како би се развили одговарајући модели за прорачун слободне брзине по класама ванградских двотрачних путева, било је неопходно првобитно испитати теоријску границу слободног и нормалног (стабилног) саобраћајног тока. Како услови слободног тока подразумевају одсуство међусобне интеракције између возила, у истраживању је ова граница дефинисана на основу слабе корелације између два узастопна возила исказана кроз параметар временског интервала слеђења. Овај параметар је, према анализама досадашњих истраживања, најпогоднији за то, али његова вредност до сада није усаглашена (Vogel, 2002). С тим у виду, спроведено је опсежно истраживање на 50 деоница двотрачних путева I и II класе. Деонице су селектоване према критеријумима дефинисаним у класификацији америчког Приручника за капацитет путева (НСМ, 2016) и критеријумима функционалне класификације путева у Србији (Tubić & Maletin, 2008). Све испитиване деонице опремљене су аутоматским бројачима саобраћаја, са којих су добијени подаци о брзинама и интервалима слеђења за укупан узорак од 191.720 возила. Добијени резултати су показали да постоје разлике у граничној вредности интервала слеђења слободног тока на различитим класама ванградских двотрачних путева. Утврђено је да код путева I класе гранична вредност интервала слеђења износи 6,3 s, док код путеве II класе износи 8,4 s. Иако до сада није вршена посебна анализа по класама двотрачних путева, добијене вредности су у оквирима резултата досадашњих истраживања, као код нпр. Lobo et al. (2011). Утврђена разлика у граничним вредностима интервала слеђења слободног тока може се објаснити разликама у условима у саобраћајном току који владају на различитим класама ванградских двотрачних путева. Овима је потврђена једна од полазних хипотеза докторске дисертације – да гранична вредност интервала слеђења слободног тока на ванградским двотрачним путевима зависи од класе којој пут припада. Добијене вредности граничних интервала слеђења одговарају вредностима

протока од 571 возила/час на путевима I класе и 429 возила/час на путевима II класе, у случају посматрања средњих вредности временски равномерног наилазак возила. Поређењем добијене вредности протока са појединим истраживањима може се закључити да су добијене граничне вредности протока слободног тока нешто више, посебно за путеве I класе (Greenshields et al., 1935; HCM, 1950; Kuzović, 1987). На генерални раст граничних вредности протока возила слободног тока, односно пада вредности интервала слеђења возила, поред промене перцепције возача о условима слободног тока због раста саобраћајног оптерећења, утиче и значајно унапређење возно-динамичких карактеристика возила, пројектних стандарда геометријских елемената пута, квалитета коловоза итд. Добијеним резултатима се потврдила потреба за развојем посебних модела за прорачун слободне брзине тока по класама ванградских двотрачних путева због различите функције коју ти путеви имају у мрежи, што за собом повлачи и различите стандарде геометријских карактеристика при пројектовању, различита очекивања возача у погледу прихватљивих услова у саобраћајном току итд. Све то заједно утиче на вредност слободне брзине тока, а последично и на већу прецизност при прорачуну исте.

Дефинисане граничне вредности интервала слеђења су потом коришћене за утврђивање слободних брзина разматраних класа двотрачних путева. Применом тзв. постепене (*Stepwise*) методе линеарне регресије развијени су нови модели предикције слободне брзине у функцији ограничења брзине и геометријских карактеристика за деонице I и II класе ванградских двотрачних путева. За разлику од појединих модела развијених у досадашњим истраживањима, који не третирају ограничење брзине као утицајни фактор због високе корелације са рачунском брзином и геометријским карактеристикама деонице (Wang et al., 2006), модели развијени на бази истраживања приказног у овој дисертацији потврђују оправданост коришћења ограничења брзине за одређивање слободне брзине. То је потврђено тестирањем мултиколинearности између коришћених варијабли у моделу, где су добијене вредности толеранције (*Tolerance*) и VIF јасно указале на непостојање исте. Такође, ови резултати су у сагласности са резултатима истраживања која су испитивала утицај ограничења брзине на слободну брзину и доказала оправданост коришћења ограничења брзине у моделима за одређивање слободне брзине, као код нпр. Fazio et al. (2014) или Nimes et al. (2013). Добијени резултати су показали да, поред већ споменутог ограничења брзине, на слободну брзину на путевима I и II класе утичу и радијус хоризонталне кривине и ширина банке, што је у складу са резултатима неколико истраживања, као нпр. Mahmud et al. (2021) и Medina & Tarko (2005). Развијени модели квантификовали су различит утицај постављеног ограничења брзине на слободну брзину, у складу са функцијом пута у мрежи. На овај начин избегнута је потреба за уопштеним додавањем јединствене вредности брзине на постављену вредност ограничења брзине коју препоручује HCM-ов (2016) аналитички модел. Применом развијених модела смањују се потенцијалне непрецизности у прорачуну капацитета и нивоа услуге двотрачних путева. Предложена методологија за развој модела слободне брзине омогућава примену и калибрацију на локалне услове у различитим срединама, у случајевима када је могуће извршити функционалну класификацију у складу са препорукама америчког Приручника за капацитет путева (HCM, 2016). Такође, у оквиру ове анализе извршена је и валидација, односно поређење резултата добијених модела са резултатима наведеног HCM-овог (2016) аналитичког модела, али и вредностима слободне брзине мерене на терену. Показано је да вредности добијене развијеним моделима мање одступају од емпиријски утврђених слободних брзина добијених са аутоматских бројача саобраћаја у поређењу са вредностима добијеним коришћењем HCM-овог (2016) аналитичког модела, за обе класе ванградских двотрачних путева. Ови резултати показују оправданост развоја посебних модела за различите класе ванградских двотрачних путева, са циљем прецизнијег утврђивања слободне брзине, а последично и капацитета и нивоа услуге. Развијени модели потврђују основну полазну хипотезу докторске дисертације да различите класе ванградског двотрачног пута имају различит утицај на слободну брзину тока.

Ограничење брзине постављено у складу са геометријским карактеристикама пута и окружења значајно доприноси поузданости аналитичких модела за анализу слободне брзине. Међутим, у случају када постављено ограничење није одговарајуће или кредибилно, то може представљати отежавајући фактор при прорачуну слободне брзине, због значајног одступања од реалних услова у саобраћајном току. То је посебно изражено у моделима који узимају у обзир фиксне препоруке за додавање одређене вредности брзине и који су истоветни на свим двотрачним путевима без обзира на класу којој нека деоница припада, попут НСМ-овог (2016) модела. С обзиром на очигледан негативан утицај који неодговарајућа ограничења брзине имају на услове у саобраћајном току, по питању ефикасности, али и ризика настанка инцидентних ситуација које доводе до саобраћајних незгода, истиче се потреба за прецизним квантификавањем кредибилитета ограничења брзина и утицаја на услове у саобраћајном току. Због тога је у оквиру ове дисертације спроведено истраживање којим је испитан заједнички утицај кредибилитета ограничења брзине и карактеристика саобраћајног тока (разлике слободне и ограничене брзине, процента прекорачења брзине, дисперзије брзине, експлоатационе брзине, ПГДС-а и удела теретних возила и аутобуса) на настанак саобраћајних незгода. Истраживање је спроведено на деоницама ванградских двотрачних путева I реда у Србији, а подаци о основним параметрима саобраћајног тока, попут протока и брзине кретања возила у анализираном петогодишњем периоду, добијени су са аутоматских бројача саобраћаја. Метод прикупљања реалних брзина са аутоматских бројача саобраћаја представља једну од предности истраживања, с обзиром на то да не долази до промена параметара вожње до којих може доћи када се користи друга врста опреме, као што су радар. Анализом су обухваћене 802 незгоде које су се догодиле током петогодишњег периода, на укупном узорку од 235 одсека хомогених геометријских карактеристика у утицајним зонама аутоматских бројача саобраћаја. Употребом генерализованих линеарних модела са негативном биномном расподелом развијена су три модела која се односе на укупан број саобраћајних незгода, незгоде са материјалном штетом и незгоде са настрадалима. Добијени резултати показују да разлика слободне и ограничене брзине, дисперзија брзине и ПГДС имају статистички значајан позитиван утицај на настанак анализираних врста незгода, чиме се потврђује једна од полазних хипотеза ове дисертације да већа разлика између слободне и ограничене брзине, као и већа дисперзија брзина у току доводи до раста броја инцидентних ситуација. Код укупног броја саобраћајних незгода и код саобраћајних незгода са настрадалим лицима статистички значајан позитиван утицај имала је и променљива која се односи на удео тешких возила у току, односно теретних возила и аутобуса. Из спроведене анализе проистиче закључак да брзина слободног тока представља један од индикатора кредибилитета ограничења брзине, па велика разлика између слободне и ограничене брзине треба обавезно да иницира потребу за преиспитивањем постављених ограничења брзина. То је у складу са већ изнетом чињеницом да је слободна брзина показатељ конзистентности пројектних елемената пута. Када ови елементи нису у складу са ограничењем брзине, долази до пораста броја инцидентних ситуација, односно саобраћајних незгода. Преиспитивањем некредибилних ограничења и међусобним усклађивањем са геометријским карактеристикама деонице, односно са перцепцијом адекватне брзине од стране већине возача, доћи ће до значајног смањења броја саобраћајних незгода и унапређења услова у саобраћајном току. То би, поред свега наведеног, допринело и прецизности и поузданости аналитичких модела за анализу капацитета и нивоа услуге, са свим наведеним бенефитима које то са собом повлачи (Stepanović et al., 2023).

Потврђивање значаја анализе кредибилитета ограничених брзина на услове у саобраћајном току и издвајање брзине слободног тока као индикатора за анализу кредибилитета ограничених брзина спроведено је истраживањем на одсечима ванградских двотрачних путева приближно идеалних карактеристика. Са појавом критичних вредности геометријских елемената пута долази до погоршања услова у саобраћајном току, а посебно изазовна

карактеристика представља критичан уздужни нагиб. Повећањем вредности и дужине нагиба долази до пада брзине и раста дисперзије брзина возила у току и захтева за претицањем, посебно ако су у току присутна теретна возила и аутобуси. Разлог за то огледа се у чињеници да тешка возила одликују лошије возно-динамичке карактеристике, односно лошија специфична снага возила, што посебно долази до изражаја на одсецима са критичним уздужним нагибима. С обзиром на утицај уздужног нагиба, идентификована је потреба за анализом одступања слободне брзине тока од ограничене брзине на одсецима са различитим вредностима уздужног успона и пада, са циљем сагледавања кредибилитета ограничења брзине на одсецима са специфичним карактеристикама. Истраживање је спроведено на 11 пресека репрезентативних деоница са различитим вредностима успона и пада и узорком од 16.288 возила различитих категорија. Развијени су вишестепени детерминистички математички модели за утврђивање зависности разлике слободне и ограничене брзине од уздужног нагиба. Развијени су појединачни модели предикције за четири разматране категорије возила – путничке аутомобиле, аутобусе, лака и тешка теретна возила, као и модел за саобраћајни ток у целини. Добијени резултати потврђују једну од полазних хипотеза дисертације, да промена уздужног нагиба доводи до различитог одступања слободне од ограничене брзине. Наиме, анализом резултата уочава се да са растом уздужног нагиба долази до повећања одступања слободне од ограничене брзине, као и да се одступање разликује у зависности од категорије возила. Детаљним испитивањем добијених вредности одступања слободне брзине од ограничене показује се да је разлика од 10 km/h одговарајућа великој већини возача у току, што може представљати оријентациони оквир приликом анализе кредибилитета ограничења брзина. Добијене вредности прекорачења брзине приближније су вредностима 85. перцентила одступања на анализираним одсецима, што потврђује валидност употребе 85. перцентила измерених брзина као једног од критеријума за одређивања ограничених брзина у многим земљама (TRB, 1998). Приказани модели омогућавају испитивање кредибилитета ограничења брзине на деоницама са израженим уздужним нагибима, а тиме и почетни корак при доношењу адекватних инжењерских мера са циљем хармонизације брзина у саобраћајном току.

Сумирајући резултате спроведених анализа и приказане закључке, могу се издвојити следећи основни научни доприноси ове докторске дисертације:

- Дефинисане су одвојене граничне вредности интервала слеђења слободног тока за различите класе ванградских двотрачних путева – 6,3 s за путеве I и 8,4 s за путеве II класе;
- Развијени су посебни модели предикције слободних брзина за обе класе ванградских двотрачних путева, у функцији ограничења брзине, радијуса хоризонталних кривина и ширине банке;
- Потврђен је утицај основних карактеристика саобраћајног тока, попут различитих облика (аспеката) брзине, протока и учешћа теретних возила и аутобуса у току на настанак саобраћајних незгода са различитим последицама кроз развијене моделе за предикцију истих;
- Доказан је позитиван утицај разлике слободне и ограничене брзине и дисперзије брзине на раст броја саобраћајних незгода, чиме је показан утицај кредибилитета ограничења брзина на настанак незгода и истакнут значај слободне брзине у погледу индикатора за испитивање кредибилитета ограничених брзина на ванградским двотрачним путевима;
- Развијени су модели за предикцију одступања слободне од ограничене брзине у функцији уздужног нагиба ванградских двотрачних путева, чиме се омогућава иницијални корак за анализу кредибилитета ограничених брзина на путевима са овим критичним елементом трасе.

Спроведена истраживања и добијени резултати везани за тему ове докторске дисертације отворила су бројна питања на која би требало одговорити у будућим истраживањима, а која су сублимирана и укратко објашњена у наредним тезама:

- Анализа граничне вредности слободног тока и развој модела за предикцију слободне брзине на двотрачним путевима III класе. Наиме, нагле промене ванградских услова окружења пута у урбане и мешање даљинских и локалних саобраћајних токова захтевају детаљнију поделу група интервала слеђења возила ради одређивања граничне вредности слободног тока. Такође, с обзиром на специфичне карактеристике ове класе двотрачних путева, потребно је обухватити и испитати значај додатних утицајних фактора приликом развоја модела за одређивање слободне брзине. Тако би, поред променљивих укључених у спроведена истраживања, требало анализирати утицај окружења пута. Појам окружења пута подразумевао би испитивање утицаја пешака, бициклиста, објеката са повећаним степеном атракције у близини пута, степена развијености (урбанизације) насеља и свих карактеристика које значајно утичу на кретање возила у урбаним срединама.
- Утврђивање ефеката додатних техничко-експлоатационих карактеристика свих класа двотрачних путева на моделе за предикцију слободне брзине. Истраживања у овој дисертацији, због ограничења постојећих база података у погледу релевантности и актуелности информација, нису обухватила испитивање утицаја појединих карактеристика, као што су стање коловоза, прегледност, степен хоризонталне закривљености трасе пута итд.
- Анализа граничне вредности слободног тока и развој модела за предикцију слободне брзине на осталим типовима ванградских путева. Као што је претходно наведено, истраживања у овој дисертацији односила су се на ванградске двотрачне путеве. Поред уочених потреба за анализом деоница двотрачних путева које пролазе кроз урбане средине, исто тако се јавља потреба за спровођењем сличног истраживања на осталим ванградским типовима путева, као што су ауто-путеви и вишетрачни путеви.
- Унапређење постојећих модела предикције саобраћајних незгода. Фокус спроведених истраживања односио се искључиво на испитивање заједничког утицаја карактеристика саобраћајног тока и различитих аспекта (облика) брзина на настанак саобраћајних незгода на деоницама ванградских двотрачних путева приближно идеалних карактеристика, са циљем испитивања утицаја кредибилитета ограничења брзине и аспеката брзине у слободном току на настанак незгода. Међутим, унапређење постојећих свеобухватних модела предикције саобраћајних незгода на двотрачним путевима, који су саставни део саобраћајних студија и студија оправданости, могуће је спровести употребом представљене методологије уз анализу додатних утицајних фактора. Најпре је потребно испитати заједнички утицај и осталих карактеристика саобраћајног тока који до сада нису у довољној мери истражени, попут неравномерности тока по смеру, али и геометријских карактеристика саобраћајница, као што су проценат забране претицања, удаљеност бочних сметњи итд., или временских прилика.
- Анализа одступања слободних од ограничених брзина на деоницама са различитим критичним геометријским елементима. Акцент анализе одступања слободних од ограничених брзина у дисертацији односио се на одсеке ванградских двотрачних путева са уздужним нагибом, ради омогућавања анализе кредибилитета ограничења брзина на деоницама са овим критичним геометријским елементом. У будућим истраживањима неопходно је испитати низ додатних фактора који нису разматрани, попут утицаја карактеристика попречног профила, хоризонталне закривљености трасе, карактеристика возила, метеоролошких утицаја, карактеристика возача итд.

Литература

- Aarts, L., & Van Schagen, I. (2006). Driving speed and the risk of road crashes: A review. *Accident Analysis and Prevention*, 38(2), 215–224. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2005.07.004>
- AASHTO (1994). *A policy on geometric design of highways and streets* (3rd ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO (2001). *A policy on geometric design of highways and streets* (4th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO (2004). *A policy on geometric design of highways and streets* (5th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Agencija za bezbednost saobraćaja (n. d.). *Integrisana baza podataka o obeležjima bezbednosti saobraćaja*. Retrieved August 7, 2022, from <http://195.222.99.60/ibbsPublic/>
- Atanasković, Ž. (2008). *Prilog utvrđivanju slobodnih brzina i reprezentativnih vozila u saobraćajnom toku u procedurama vrednovanja*. Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet.
- BRAKE (2004). *The green flag report on safe driving 2004 – Part two: Speed*.
- Cafiso, S., Di Graziano, A., Di Silvestro, G., La Cava, G., & Persaud, B. (2010). Development of comprehensive accident models for two-lane rural highways using exposure, geometry, consistency and context variables. *Accident Analysis and Prevention*, 42(4), 1072–1079. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2009.12.015>
- Chaffin, W., & Rhiel, S. (1993). The effect of skewness and kurtosis on the one-sample T-test and the impact of knowledge of the population standard deviation. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 46(1–2), 79–90. <https://doi.org/10.1080/00949659308811494>
- Chandler, R. E., Herman, R., & Montroll, E. W. (1958). Traffic dynamics: studies in car following. *Operations Research*, 6(2), 165–184.
- Chen, T., Sze, N. N., Chen, S., Labi, S., & Zeng, Q. (2021). Analysing the main and interaction effects of commercial vehicle mix and roadway attributes on crash rates using a Bayesian random-parameter Tobit model. *Accident Analysis and Prevention*, 154, 106089. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2021.106089>
- Cheng, G., Cheng, R., Pei, Y., & Xu, L. (2020). Probability of roadside accidents for curved sections on highways. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/9656434>
- Cruzado, I., & Donnell, E. T. (2010). Factors affecting driver speed choice along two-lane rural highway transition zones. *Journal of Transportation Engineering*, 136(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000137](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000137)
- Currin, T. R. (2001). *Spot speed study in introduction to traffic engineering: A manual for data collection and analysis*. Wadsworth Group.
- Dobrota, N., Stevanović, A., & Mitrović, N. (2022). A novel model to jointly estimate delay and arrival patterns by using high-resolution signal and detection data. *Transportmetrica A: Transport Science*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/23249935.2022.2047126>
- Du Toit, S. H., Steyn, A. G., & Stumpf, R. H. (2012). *Graphical exploratory data analysis*. Springer Science & Business Media.
- Elefteriadou, L. (2014). *An introduction to traffic flow theory* (Vol. 84). Springer.
- Elvik, R., Christensen, P., & Amundsen, A. (2004). *Speed and road accidents: an evaluation of the Power Model*. Transportøkonomisk Institutt.
- Fazio, J., Wiesner, B. N., & Deardoff, M. D. (2014). Estimation of free-flow speed. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(2), 646–650. <https://doi.org/10.1007/S12205-014-0481-7>
- Fildes, B., & Lee, S. (1993). *The speed review: road environment, behaviour, speed limits, enforcement and crashes*.
- Fildes, B., Rumbold, G., & Leening, A. (1991). Speed behaviour and drivers' attitude to speeding. *Monash University Accident Research Centre, Report*, 16(186), 104–115.
-

- Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M., Wooldridge, M., & Miaou, S.-P. (2003). *NCHRP report 504: Design speed, operating speed, and posted speed practices*. Transportation Research Board.
- Fitzpatrick, K., Elefteriadou, L., Harwood, D. W., Collins, J. M., McFadden, J., Anderson, I. B., Krammes, R. A., Irizarry, N., Parma, K. D., Bauer, K. M., & Passetti, K. (2000). *Speed prediction for two-lane rural highways* (FHWA-RD-99). U. S. Department of transportation – Federal Highway Administration.
- Fleiter, J., & Watson, B. (2006). The speed paradox: The misalignment between driver attitudes and speeding behaviour. *Journal of the Australasian College of Road Safety*, 17(2), 23–30.
- Garber, N., & Gadiraju, R. (1989). Factors affecting speed variance and its influence on accidents. *Transportation Research Record*, 1213, 64–71.
- Gardner, D. J., & Rockwell, T. H. (1983). Two views of motorist behavior in rural freeway construction and maintenance zones: The driver and the state highway patrolman. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 25(4), 415–424. <https://doi.org/10.1177/001872088302500407>
- Gazis, D. C. (2002). The Origins of Traffic Theory. *Operations Research*, 50(1), 69–77. <https://doi.org/10.1287/opre.50.1.69.17776>
- Gazis, D. C., Herman, R., & Potts, R. B. (1959). Car-following theory of steady-state traffic flow. *Operations Research*, 7(4), 499–505.
- Gazis, D. C., Herman, R., & Rothery, R. W. (1961). Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow. *Operations Research*, 9(4), 545–567.
- Goldenbeld, C., & Van Schagen, I. (2007). The credibility of speed limits on 80 km/h rural roads: The effects of road and person(ality) characteristics. *Accident Analysis and Prevention*, 39(6), 1121–1130. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2007.02.012>
- Greenshields, B. D., Bibbins, J. R., Channing, W. S., & Miller, H. H. (1935). *A study of traffic capacity*.
- Greenshields, B. D., Thompson, J. T., Dickinson, H. C., & Swinton, R. S. (1933). *The photographic method of studying traffic behavior*.
- Hadi, M. A., Aruldas, J., Chow, L.-F., & Wattleworth, J. A. (1995). Estimating safety effects of cross-section design for various highway types using negative binomial regression. *Transportation Research Record*, 169–177.
- Hashim, I. H. (2006). *Safety and the consistency of geometry and speed on rural single carriageways*. University of Newcastle upon Tyne.
- Hashim, I. H. (2011). Analysis of speed characteristics for rural two-lane roads: A field study from Minoufiya Governorate, Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 2(1), 43–52. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2011.05.005>
- Hazen, Whipple, & Fuller (1914). No Title. *Transactions American Society of Civil Engineers*, 77.
- HBS (2015). *Handbuch für Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV).
- HCM (1950). *Highway capacity manual* (1st ed.). Highway Research Board. Committee on Highway Capacity, Bureau of Public Roads, U. S. Department of Commerce. Washington DC.
- HCM (1965). *Highway capacity manual* (2nd ed.). Highway Research Board, National Research Council. Washington DC.
- HCM (1985). *Highway capacity manual* (3rd ed.). Highway Research Board, National Research Council. Washington DC.
- HCM (1994). *Highway capacity manual* (3rd ed., 1st rev.). Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC.
- HCM (2000). *Highway capacity manual* (4th ed.). Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC.
- HCM (2010). *Highway capacity manual* (5th ed.). Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC.

- HCM (2016). *Highway capacity manual* (6th ed.). Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC.
- Himes, S. C., Donnell, E. T., & Porter, R. J. (2013). Posted speed limit: To include or not to include in operating speed models. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 52, 23–33. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2013.04.003>
- Homburger, W., Hall, J., Loutzenheiser, R., & Reilly, W. (1996). *Fundamentals of traffic engineering*.
- Imprialou, M. I. M., Quddus, M., Pitfield, D. E., & Lord, D. (2016). Re-visiting crash–speed relationships: A new perspective in crash modelling. *Accident Analysis and Prevention*, 86, 173–185. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2015.10.001>
- Indo-HCM (2017). *Indian highway capacity manual*. CSIR – Central Road Research Institute.
- Jiang, Z., Jadaan, K., & Ouyang, Y. (2016). Speed harmonization – design speed vs. operating speed. In *Civil Engineering Studies, Illinois Center for Transportation Series* (Issues 16–021).
- Kanellaidis, G., Golias, J., & Zarifopoulos, K. (1995). A survey of drivers' attitudes toward speed limit violations. *Journal of Safety Research*, 26(1), 31–40. [https://doi.org/10.1016/0022-4375\(94\)00025-5](https://doi.org/10.1016/0022-4375(94)00025-5)
- Kloeden, C. N., McLean, A. J., Moore, V. M., & Ponte, G. (1997). *Travelling speed and the rate of crash involvement. Volume 1: findings*. Report No. CR 172. Federal Office of Road Safety FORS, Canberra.
- Kloeden, C. N., Ponte, G., & McLean, A. J. (2001). *Travelling speed and the risk of crash involvement on rural roads*. Australian Transport Safety Bureau, Canberra.
- Koy, T., & Spacek, P. (2005). Speed on upgrades and downgrades. *5th Swiss Transport Research Conference*.
- Krammes, R. A., Fitzpatrick, K., Blaschke, J. D., & Fambro, D. B. (1996). *Understanding design, operating, and posted speed*.
- Kuzović, L. (1987). *Teorija saobraćajnog toka*. IRO Građevinska knjiga.
- Kuzović, L. (1994). *Vrednovanje u upravljanju razvojem i eksploatacijom putne mreže*. Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet.
- Kuzović, L. (2000). *Kapacitet i nivo usluge drumskih saobraćajnica*. Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet.
- Lamm, R., Choueiri, E. M., & Mailaender, T. (1990). Comparison of operating speeds on dry and wet pavements of two-lane rural highways. *Transportation Research Record*, 1280(8), 199–207.
- Lee, Y. M., Chong, S. Y., Goonting, K., & Sheppard, E. (2017). The effect of speed limit credibility on drivers' speed choice. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 45, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.11.011>
- Lighthill, M. J., & Whitham, G. B. (1955). A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 317–345.
- Lin, F. B., Su, C. W., & Huang, H. H. (1996). Uniform criteria for level-of-service analysis of freeways. *Journal of Transportation Engineering*, 122(2), 123–129. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1996\)122:2\(123\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:2(123))
- Lobanov, E. M., Siljanov, V. V., Sitnikov, J. M., & Sapegin, L. N. (1970). Propusnaja sposobnost avtomobilnih dorog. *Transport, Moskva*. [Лобанов, Е. М., Сильянов В. В., Ситников, Ю. М., Сапегин, Е. М. (1970). Пропускная способность автомобильных дорог, Транспорт, Москва]
- Lobo, A., Jacques, M. A. P., Rodrigues, C. M., & Couto, A. (2011). Free-gap evaluation for two-lane rural highways. *Transportation Research Record*, 2223, 9–17. <https://doi.org/10.3141/2223-02>
- Lord, D., & Mannering, F. (2010). The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(5), 291–305. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2010.02.001>

- Lovrić, I., & Breški, D. (2014). Modelling free flow speed on two-lane rural highways in Bosnia and Herzegovina. *Promet – Traffic & Transportation*, 26(2), 121–127.
- Luttinen, R. T. (1996). *Statistical analysis of vehicle time headways*. Aalto University.
- Mahmud, M. S., Gupta, N., Safaei, B., Jashami, H., Gates, T. J., Savolainen, P. T., & Kassens-Noor, E. (2021). Evaluating the impacts of speed limit increases on rural two-lane highways using quantile regression. *Transportation Research Record*, 2675(11), 740–753. <https://doi.org/10.1177/03611981211019732>
- Maletin, M., & Tubić, V. (2012). *Predlog mreže državnih puteva I reda Republike Srbije*. Javno preduzeće Putevi Srbije, Beograd.
- Maletin, M., Tubić, V., & Vidas, M. (2015). Functional classification of rural roads in Serbia. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 5(2), 184–196. [https://doi.org/10.7708/ijtpe.2015.5\(2\).08](https://doi.org/10.7708/ijtpe.2015.5(2).08)
- Mannering, F. L., & Bhat, C. R. (2014). Analytic methods in accident research: Methodological frontier and future directions. *Analytic Methods in Accident Research*, 1, 1–22. <https://doi.org/10.1016/J.AMAR.2013.09.001>
- May, A. D. (1994). *Traffic management from theory to practice: past, present, future*. Transportation Research Record, National Research Council.
- Medina, A. M. F., & Tarko, A. P. (2005). Speed factors on two-lane rural highways in free-flow conditions. *Transportation Research Record*, 1912, 39–46. <https://doi.org/10.1177/0361198105191200105>
- Milenković, M., Tubić, V., Glavić, D., & Vidas, M. (2017). Analiza podobnosti postavljenih ograničenja brzine na prolascima državnih puteva kroz Beograd. *XII međunarodna konferencija – Bezbednost saobraćaja u lokalnoj zajednici*.
- Milton, J., & Mannering, F. (1998). The relationship among highway geometrics, traffic-related elements and motor-vehicle accident frequencies. *Transportation*, 25(4), 395–413. <https://doi.org/10.1023/A:1005095725001>
- Montella, A., & Imbriani, L. L. (2015). Safety performance functions incorporating design consistency variables. *Accident Analysis and Prevention*, 74, 133–144. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2014.10.019>
- Murgan, M. (2015). A critical analysis of the techniques for data gathering in legal research. *Journal of Social Sciences and Humanities*, 1(3), 266–274.
- Musselwhite, C., Avineri, E., Fulcher, E., & Susilo, Y. (2010). *Understanding public attitudes to road-user safety – Literature review*. Road safety research report no. 112.
- MUTCD (2009). *Manual on uniform traffic control devices for streets and highways*. U. S. Department of Transportation – Federal Highway Administration.
- Nilsson, G. (2004). *Traffic safety dimensions and the power model to describe the effect of speed on safety*. Lund Institute of Technology.
- OECD, & ECMT (2006). *Speed management*. <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/06speed.pdf>
- Pallant, J. (2007). *SPSS survival manual* (3rd ed.). McGraw-Hill Open University Press.
- Parker, M., Sung, H., & Dereniewski, L. (2003). *Review and analysis of posted speed limits and speed limit setting practices in British Columbia*.
- Pipes, L. A. (1953). An operational analysis of traffic dynamics. *Journal of Applied Physics*, 24(3), 274–281.
- Putevi Srbije (n. d.). *Baza podataka o brojanju saobraćaja*. Javno preduzeće Putevi Srbije.
- Putevi Srbije (2012). *Baza podataka o putevima*. Javno preduzeće Putevi Srbije.
- Quddus, M. (2013). Exploring the relationship between average speed, speed variation, and accident rates using spatial statistical models and GIS. *Journal of Transportation Safety and Security*, 5(1), 27–45. <https://doi.org/10.1080/19439962.2012.705232>
- Reuschel, A. (1950). Fahrzeugbewegung in der Kolonne bei gleichförmig beschleunigtem oder verzögertem Leitfahrzeug. *Zeitschrift Des Österreichischen Ingenieur Und Architektenvereins*, 7(8), 98–98.

- Risser, R., & Lehner, U. (1998). *Acceptability of speeds and speed limits to drivers and pedestrians/cyclists*.
- Robertson, H. D., Hummer, J. E., Nelson, D. C., & Institute of Transportation Engineers (1994). *Manual of transportation engineering studies*. Englewood Cliffs, N. J. Prentice Hall.
- SARTRE 3 (2004). *European drivers and road risk*.
- Sekhar, C. R., Nataraju, J., Velmurugan, S., Kumar, P., & Sitaramanjaneyulu, K. (2016). Free flow speed analysis of two lane inter urban highways. *Transportation Research Procedia*, 17, 664–673. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2016.11.121>
- Siljanov, V. V. (1977). *Teorija transportnih potokov v projektovanji dorog i organizaciji dvizenija*. Transport, Moskva. [Сильянов В. В. (1977). *Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения*. Транспорт, Москва]
- Silvano, A. P., Koutsopoulos, H. N., & Farah, H. (2020). Free flow speed estimation: A probabilistic, latent approach. Impact of speed limit changes and road characteristics. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 138, 283–298. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2020.05.024>
- Skszek, S. L. (2004). *Actual speeds on the roads compared to the posted limits*.
- Soldić-Aleksić, J., & Chroneos Krasavac, B. (2009). *Kvantitativne tehnike u istraživanju tržišta*. CID Ekonomskog fakulteta u Beogradu.
- Solomon, D. (1964). *Accidents on main rural highways related to speed, driver, and vehicle*. U. S. Department of Commerce. United States Government Printing Office, Washington, D.C.
- Srnová, B. (2017). *A case of road design in mountainous terrain with an evaluation of heavy vehicles performance* (Issue June). KTH Royal Institute of Technology Stockholm.
- Stanojević, P., Jovanović, D., & Lajunen, T. (2013). Influence of traffic enforcement on the attitudes and behavior of drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 52, 29–38. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2012.12.019>
- Stepanović, N., Tubić, V., & Zdravković, S. (2023). Determining free-flow speed on different classes of rural two-lane highways. *Promet – Traffic & Transportation*, 35(3), 315–330. <https://doi.org/https://doi.org/10.7307/ptt.v35i3.195>
- Subotić, M., Stepanović, N., Tubić, V., Softić, E., & Bouraima, M. B. (2022). Models of analysis of credible deviation from speed limits on two-lane roads of Bosnia and Herzegovina. *Complexity*. <https://doi.org/10.1155/2022/2832175>
- SWOV (2012). *Speed choice: the influence of man, vehicle, and road*.
- Taylor, M. C., Lynam, D. A., & Baruya, A. (2000). *The effects of drivers' speed on the frequency of road accidents* (Report 421). Road Safety Division, Department of the Environment, Transport and the Regions Transport research laboratory.
- Teed, N., Lund, A. K., & Knoblauch, R. (1993). The duration of speed reductions attributable to radar detectors. *Accident Analysis and Prevention*, 25(2), 131–137. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(93\)90052-X](https://doi.org/10.1016/0001-4575(93)90052-X)
- TRB (1998). *Managing speed: Review of current practice for setting and enforcing speed limits*.
- Tubić, V., Glavić, D., Stepanović, N., Milenković, M., & Vidas, M. (2018). Analiza realnih i prekoračenih brzina na državnim putevima – opština Kraljevo. *XIII međunarodna konferencija – Bezbednost saobraćaja u lokalnoj zajednici*, 207–215.
- Tubić, V., & Maletin, M. (2008). *Kriterijumi za kategorizaciju putne mreže Srbije*. Institut Saobraćajnog fakulteta, Beograd.
- Tubić, V., Milenković, M., Glavić, D., & Vidas, M. (2016). Generalna analiza prekoračenja brzina na državnim dvotračnim putevima u Srbiji. *XI međunarodna konferencija – Bezbednost saobraćaja u lokalnoj zajednici*, 31–43.
- Tubić, V., Stepanović, N., Glavić, D. et al. (2018). *Analiza prekoračenja brzina na državnim putevima prvog reda u Republici Srbiji*. Institut Saobraćajnog fakulteta, Beograd.
- Tubić, V., Vidas, M., & Stepanović, N. (2022). *Osnove teorije saobraćajnog toka*. Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet.
- Van Nes, N., Houtenbos, M., & Van Schagen, I. (2008). Improving speed behaviour: The potential

- of in-car speed assistance and speed limit credibility. *IET Intelligent Transport Systems*, 2(4), 323–330. <https://doi.org/10.1049/IET-ITS:20080036>
- Van Schagen, I., Wegman, F., & Rozbach, R. (2004). *Safe and credible speed limits: a strategic exploration*.
- Vogel, K. (2002). What characterizes a “free vehicle” in an urban area? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 5(1), 15–29. [https://doi.org/10.1016/S1369-8478\(02\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S1369-8478(02)00003-7)
- Wang, J., Dixon, K. K., Li, H., & Hunter, M. (2006). Operating-speed model for low-speed urban tangent streets based on in-vehicle Global Positioning System data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1961(1), 24–33. <https://doi.org/10.1177/0361198106196100104>
- Wardrop, J. G. (1952). Road paper. Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, 325–362.
- Webster, F. V. (1958). *Traffic signal settings*.
- Wilmot, C. G., & Khanal, M. (2010). Effect of speed limits on speed and safety: A review. *Transport Reviews*, 19(4), 315–329. <https://doi.org/10.1080/014416499295420>
- Wolshon, B., & Pande, A. (2016). *Traffic Engineering Handbook* (7th edition). John Wiley & Sons.
- Yao, Y., Carsten, O., & Hibberd, D. (2019). An empirical approach to determining speed limit credibility. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 63, 270–282. <https://doi.org/10.1016/J.TRF.2019.04.015>
- Yao, Y., Carsten, O., & Hibberd, D. (2020a). A close examination of speed limit credibility and compliance on UK roads. *IATSS Research*, 44(1), 17–29. <https://doi.org/10.1016/J.IATSSR.2019.05.003>
- Yao, Y., Carsten, O., & Hibberd, D. (2020b). Predicting compliance with speed limits using speed limit credibility perception and risk perception data. *Transportation Research Record*, 2674(9), 450–461. <https://doi.org/10.1177/0361198120929696>
- Yao, Y., Carsten, O., Hibberd, D., & Li, P. (2019). Exploring the relationship between risk perception, speed limit credibility and speed limit compliance. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 62, 575–586. <https://doi.org/10.1016/J.TRF.2019.02.012>
- Ye, Q., Tarko, A., & Sinha, K. C. (2001). Model of free-flow speed for Indiana arterial roads. *Transportation Research Record*, 1776, 189–193. <https://doi.org/10.3141/1776-24>
- Yu, R., & Abdel-Aty, M. (2014a). Analyzing crash injury severity for a mountainous freeway incorporating real-time traffic and weather data. *Safety Science*, 63, 50–56. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2013.10.012>
- Yu, R., & Abdel-Aty, M. (2014b). An optimal variable speed limits system to ameliorate traffic safety risk. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 46, 235–246. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2014.05.016>
- Yu, R., Quddus, M., Wang, X., & Yang, K. (2018). Impact of data aggregation approaches on the relationships between operating speed and traffic safety. *Accident Analysis and Prevention*, 120, 304–310. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2018.06.007>
- Zheng, Y., Guo, H., & Wei, X. (2017). The evaluation analysis of design code about the road design of longitudinal gradient in the mountain road. *7th International Conference on Education, Management, Computer and Society (EMCS 2017)*, 693–699. <https://doi.org/10.2991/emcs-17.2017.133>
- Zhu, X., & Srinivasan, S. (2011). A comprehensive analysis of factors influencing the injury severity of large-truck crashes. *Accident Analysis and Prevention*, 43(1), 49–57. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2010.07.007>

Биографија аутора

Немања Степановић је рођен 5. фебруара 1992. године у Београду, где је завршио основну школу „Свети Сава“ и XIV београдску гимназију. Саобраћајни факултет Универзитета у Београду уписао је 2010. године, на Одсеку за друмски и градски саобраћај и транспорт – Саобраћајни смер. Дипломирао је 2014. године са просечном оценом 9,28 и тиме са укупно 240 ЕСП бодова стекао академски назив Дипломирани инжењер саобраћаја. Завршни рад под називом „Анализа услова саобраћаја и контроле приступа на путу ДП ИБ од Ченте до Падинске Скеле“, под менторством проф. др Владана Тубића, одбранио је са оценом 10. Исте године уписао је мастер академске студије на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду, на Модулу за саобраћајно инжењерство, које је завршио 2015. године са просечном оценом 10,00 чиме је са укупно 300 ЕСП бодова стекао академски назив Мастер инжењер саобраћаја. Мастер рад, под називом „Ех-рост анализа оправданости изградње аутопута Београд – Нови Сад“, под менторством проф. др Владана Тубића, одбранио је са оценом 10. Докторске академске студије уписао је 2015. године на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду, на студијском програму Саобраћај, где је положио све испите и испунио све обавезе предвиђене планом и програмом докторских академских студија.

На основним, мастер и докторским академским студијама био је стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја, а 2016. године је од стране Саобраћајног факултета у Београду награђен за изузетан успех на мастер академским студијама.

На Одсеку за друмски и градски саобраћај и транспорт запослен је од 2017. године као асистент, на ужој научној области Теорија саобраћајног тока, капацитет и вредновање друмских саобраћајница. На основним академским студијама држи наставу на предметима *Теорија саобраћајног тока*, *Основе теорије тока и капацитета саобраћајница*, *Практикум лабораторијске вежбе А*, *Капацитет саобраћајница* и *Вредновање у саобраћају*. Од 2018. године ангажован је у настави на Војној академији у Београду, на предмету *Саобраћајни токови и капацитет друмских саобраћајница*. До сада је учествовао у преко 80 комисија за одбрану завршних радова на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду.

Као аутор или коаутор учествовао је у изради једног уџбеника и 32 научна и стручна рада, од којих је пет објављено у научним часописима међународног значаја (M21, M22 и M23), а шеснаест саопштено на скуповима међународног значаја. Током рада на факултету учествовао је у изради више од 15 пројеката и студија.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Немања Степановић
Број индекса DS15D013

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

МОДЕЛ ЗА АНАЛИЗУ БРЗИНЕ СЛОБОДНОГ ТОКА У ФУНКЦИЈИ КЛАСЕ ДВОТРАЧНОГ ПУТА

- 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 кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора	Немања Степановић
Број индекса	DS15D013
Студијски програм	Саобраћај
Наслов рада	МОДЕЛ ЗА АНАЛИЗУ БРЗИНЕ СЛОБОДНОГ ТОКА У ФУНКЦИЈИ КЛАСЕ ДВОТРАЧНОГ ПУТА
Ментор	др Владан Тубић, редовни професор Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао 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.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

МОДЕЛ ЗА АНАЛИЗУ БРЗИНЕ СЛОБОДНОГ ТОКА У ФУНКЦИЈИ КЛАСЕ ДВОТРАЧНОГ ПУТА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао 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 одлучио.

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).

Потпис аутора

У Београду, _____

1. **Ауторство.** Дозвољава се 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.** Дозвољава се 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.** Дозвољава се 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.** Дозвољава се 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.** Дозвољава се 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.** Дозвољава се 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
-