

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Драган Д. Стаменковић

**МОДЕЛ УПРАВЉАЊА АУТОНОМНИМ  
МОТОРНИМ ВОЗИЛОМ**

докторска дисертација

Београд, 2022.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Dragan D. Stamenković

**AUTONOMOUS MOTOR VEHICLE  
CONTROL MODEL**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2022.

**Ментор:**

Др Владимир Поповић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

**Чланови комисије:**

Др Драган Александрић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Иван Благојевић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Горан Воротовић, ванредни професор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Небојша Бојовић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет

**Датум одбране:**

---

## ЗАХВАЛНОСТ

Када би аутор пожелео да ове редове искористи да се захвали за подршку пружену током рада на дисертацији свим пријатељима/колегама за које је макар једном помислио да су можда забринутији за исход од њега самог, увећање броја штампаних страница не би било еколошки прихватљиво. Учиниће се клишеом, али се аутор жели захвалити свом ментору на стрпљењу, стрпљењу и подршци, чији су резултат успешан пролазак кроз полигон до циља. Период од зачетка идеје до завршетка дисертације обележен је незауостављивом експанзијом аутономних возила – аутор се нада да ће је млађи истраживачи боље пратити.



# МОДЕЛ УПРАВЉАЊА АУТОНОМНИМ МОТОРНИМ ВОЗИЛОМ

## Сажетак

Аутономна возила представљају не само будућност, већ и садашњост на путевима око нас. Као и код конвенционалних возила, безбедност путника у возилу, али и осталих учесника у саобраћају, мора бити на првом месту. Од аутономних возила очекује се још већи допринос безбедности саобраћаја – ово представља и основни мотив њиховог развоја. Системи који се тренутно уграђују у аутономна возила нису конструисани тако да могу избећи препреке на путу маневрима на граници могућности возила и подлоге – тема дисертације је управо развој оваквог система. За те потребе усвојен је универзални полигон заснован на стандардима *ISO 3888-1* и *ISO 3888-2* којим се може представити свака ситуација у којој се на путу испред возила нађе препрека коју треба избећи. Спроведена је анализа кривих за исцртавање путања за пролазак кроз полигон, на основу које су за ове потребе изабране Безјеове криве. Поред њих, за генерисање путање коришћени су и резултати симулација у програмском пакету *Adams Car*, које се могу сматрати еквивалентом реалним испитивањима са професионалним возачем за воланом. Развијен је управљачки модел за подужно и попречно управљање возилом заснован на *PID* регулаторима, уз избор оптималних параметара, како самих регулатора, тако и оних који дефинишу остале карактеристике модела. Верификација модела је спроведена косимулацијама користећи програме *Adams Car* и *MATLAB Simulink*. Модел се показао успешним у вођењу возила кроз полигон при свим брзинама при којима су маневри могући. Показало се да су Безјеове криве бољи избор при мањим брзинама, док је путање засноване на *Adams Car* симулацијама боље бирати при већим брзинама. У прилогу дисертације је дато детаљно упутство за поменуте симулације, у случају потребе за понављањем или унапређењем експеримента.

**Кључне речи:** аутономно возило, попречно управљање, двострука промена саобраћајне траке, тест северног јелена, динамика возила

**Научна област:** Машинство

**Ужа научна област:** Моторна возила

# AUTONOMOUS MOTOR VEHICLE CONTROL MODEL

## **Abstract**

Autonomous vehicles are not only the future, but also the present on the roads around us. As with conventional vehicles, the safety of passengers in the vehicle, as well as other road users, must be the first priority. Autonomous vehicles are expected to make an even greater contribution to traffic safety, since this is the main motive for their development. The systems that are currently installed in autonomous vehicles are not designed to avoid obstacles on the road by maneuvering at the limits of the vehicle and the road surface – the goal of the dissertation is to develop such system. For these purposes, a universal test track based on ISO 3888-1 and ISO 3888-2 standards was adopted, which can be used to represent any situation in which there is an obstacle on the road in front of the vehicle that needs to be avoided. An analysis of the curves for generating the paths through the test track was carried out, on the basis of which the Bezier curves were chosen. In addition to them, the results of simulations in Adams Car software were used to generate the paths, which can be considered equivalent to real-world trials with a professional driver behind the wheel. A control model was developed for longitudinal and transverse control of the vehicle based on PID controllers, with the selection of optimal parameters – the ones that define PID controllers, and the others that define other characteristics of the model. The verification of the model was carried using Adams Car – MATLAB Simulink co-simulation. The model proved to be successful in guiding the vehicle through the test track at all speeds at which maneuvers are possible. Bezier curves are shown to be a better choice at lower speeds, while paths based on Adams Car simulations are a better choice at higher speeds. Detailed instructions for co-simulations are given in an appendix to the dissertation, in case there is a need to repeat or improve the experiment.

**Key words:** autonomous vehicle, lateral control, double lane change, moose test, vehicle dynamics

**Scientific field:** Mechanical Engineering

**Scientific subfield:** Motor Vehicles

# САДРЖАЈ

<b>1. Увод</b> .....	<b>1</b>
1.1. Историја аутономних возила .....	1
1.1.1. Почеци.....	1
1.1.2. Године сањарења.....	1
1.1.3. Сан постаје јава .....	5
1.1.4. Садашњост.....	9
1.2. Аутономна возила и прописи .....	11
1.2.1. Европа.....	12
1.2.2. САД.....	15
1.2.3. Остатак света.....	17
1.2.4. Закључак.....	18
1.3. Приступачност технологије.....	19
<b>2. Препознавање граница пута, учесника у саобраћају и препрека</b> .....	<b>21</b>
2.1. Преглед коришћених давача .....	21
2.2. Прелиминарни експеримент – управљање возилом на основу снимка са камере .....	23
2.3. Избор давача.....	28
2.4. Препознавање граница пута и препрека помоћу камере .....	28
2.5. Препознавање растојања од препрека коришћењем лидара .....	33
2.6. Коришћење давача глобалног система за позиционирање.....	34
2.7. Коришћење програмског пакета <i>MATLAB</i> за одређивање околине возила .....	35
<b>3. Критеријуми за избор маневра након препознавања препреке</b> .....	<b>36</b>
3.1. Моралне и остале недоумице .....	36
3.2. Време потребно за реаговање возача.....	39
3.3. Основ за дефинисање критеријума .....	41
3.4. Дефинисање критеријума за маневре управљања.....	42
3.4.1. УН правилник бр. 79 .....	45
3.5. Дефинисање критеријума за маневре кочења .....	48
3.5.1. Избегавање и ублажавање судара .....	48
3.5.2. УН правилник бр. 152 .....	50
3.5.3. Критеријуми за маневре кочења .....	51
3.6. Кочити или скретати?.....	52
3.7. Развој критеријума у будућности.....	55
<b>4. Одређивање најпогодније трајекторије возила</b> .....	<b>57</b>
4.1. Стандарди <i>ISO 3888-1</i> и <i>ISO 3888-2</i> .....	57
4.2. Универзални полигон.....	58
4.3. Одређивање путање кроз задате тачке .....	59
4.3.1. Сплајн и Б-сплајн.....	59

4.3.2.	Безјеове криве .....	60
4.3.3.	Поређење различитих сплајнова и Безјеових кривих .....	61
4.4.	Одређивање трајекторије .....	67
4.5.	Процена коефицијента приањања и угла повођења .....	69
4.5.1.	Процена тренутне вредности коефицијента приањања .....	73
4.5.2.	Процена целокупне карактеристике приањања .....	75
4.5.3.	Одређивање клизања .....	80
4.5.4.	Процена угла повођења .....	80
<b>5.</b>	<b>Управљачки модел .....</b>	<b>83</b>
5.1.	Косимулација .....	83
5.2.	Преглед коришћених контролера за управљање аутономним возилима .....	84
5.3.	Подужно управљање .....	84
5.3.1.	Кочење .....	85
5.3.2.	Убрзање .....	86
5.4.	Попречно управљање .....	87
5.4.1.	Верзија контролера 1 .....	92
5.4.2.	Верзија контролера 2 .....	95
5.4.3.	Верзија контролера 3 (коначна) .....	101
<b>6.</b>	<b>Резултати симулација .....</b>	<b>112</b>
<b>7.</b>	<b>Закључна разматрања .....</b>	<b>165</b>
7.1.	Анализа резултата спроведених симулација .....	165
7.1.1.	Оптималне путање .....	165
7.1.2.	Успешност праћења задате путање .....	166
7.1.3.	Зависност параметара модела од брзине и димензија полигона .....	166
7.1.4.	Утицај на динамичко понашање возила .....	167
7.2.	Допринос развијеног модела .....	167
7.3.	Могућа унапређења система у будућности .....	167
<b>8.</b>	<b>Прилози .....</b>	<b>169</b>

„Све што један човек може да замисли,  
други може да оствари.”

Жил Верн

# 1. Увод

---

## 1.1. Историја аутономних возила

Није лак задатак описати историју аутономних возила. Почетак се можда и може ухватити, а крај – краја нема. Таман када би се помислило да је описан и последњи битан догађај, десио би се нови.

### 1.1.1. Почети

Давне 1478. године Леонардо да Винчи направио је нацрт програмираних колица (слика 1.1.) која би, да су израђена, према тврдњама изумитеља, погођена механизмом сличном сатном, била у стању да пређу четрдесетак метара унапред познатог и програмираног пута [1]. Ово се може сматрати зачетком идеје аутономног возила – идеје која ће вековима након настанка бити водиља инжењерима широм света.

Као што аутономних возила не би било без система за помоћ возачу који су им утрли пут, тако ни Да Винчијевих колица не би било без изума његових претходника. Слика 1.2, овде пренесена из књиге [2] у неизмењеном облику, представља изуме настале у античкој Грчкој, а за које аутор (и кустос неколико музеја оваквих изума) сматра да су поставили темеље савременом возилу. Међу њима је и аутоматизована луткарска представа Херона из првог века нове ере, представљена као претеча „аутопилота” у возилу.

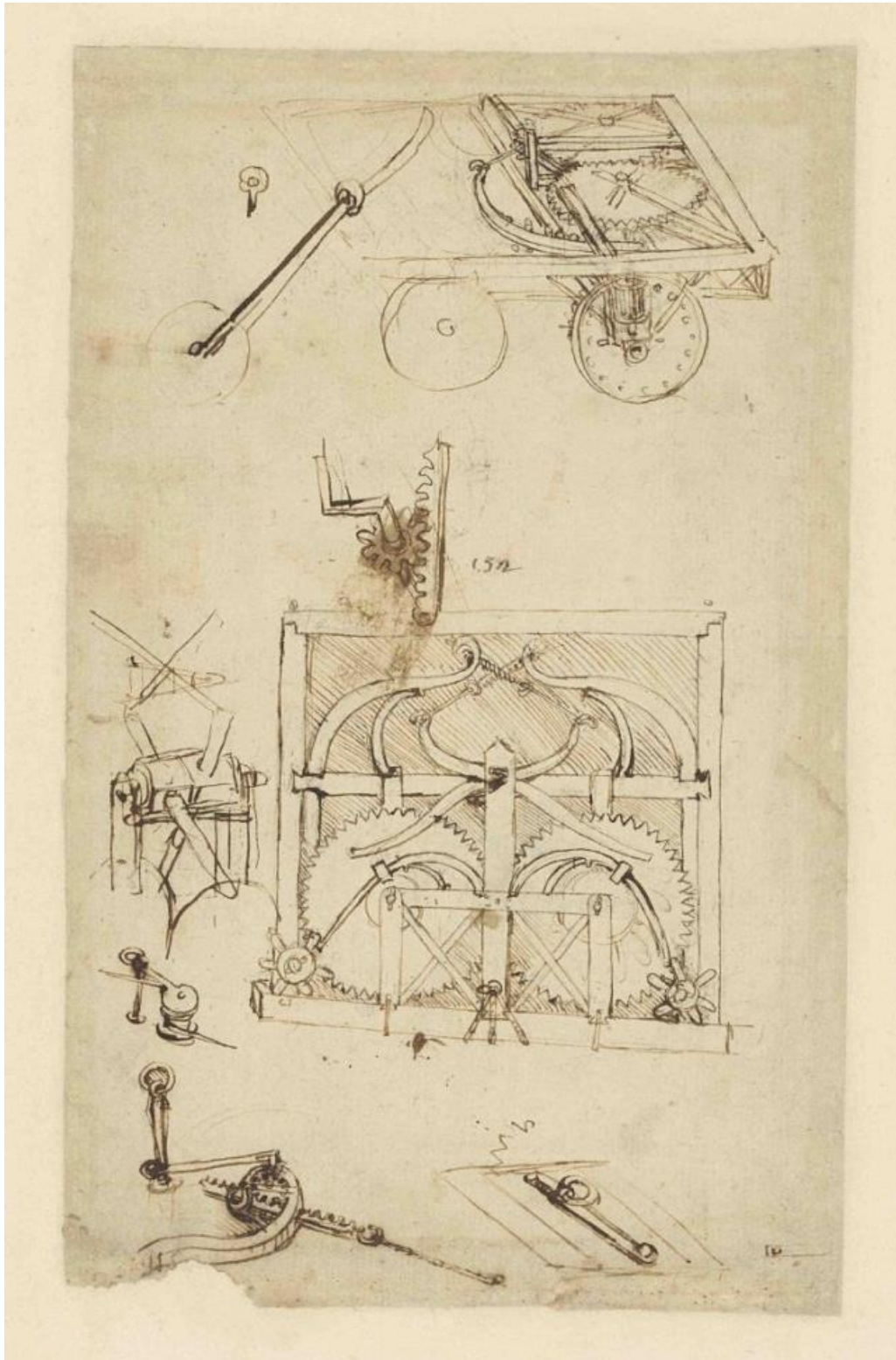
Скоро 450 година након Да Винчијевог пројекта, 1925. године, компанија Худина Рејдио Контрол (*Houdina Radio Control*) представила је аутомобил способан да се креће без возача. Возило названо Линрикан Вондер (*Linrrican Wonder*) (слика 1.3) [3], заправо Чендлер Метрополитен Седан (*Chandler Metropolitan Sedan*) са уграђеним електромоторима као актуаторима којима се управљало радио таласима са одашиљача у возилу иза, прошло је њујоршком Петом авенијом и Бродвејом кроз густ саобраћај. Иако је сигнале за управљање возилом задавао оператер из возила у пратњи, овај експеримент је поплочао пут следећим покушајима стварања потпуно аутономног возила.

### 1.1.2. Године сањарења

Следећих пет деценија покушаји да се створи аутономно возило махом су се задржавали на концептима. Џенерал Моторс је 1939. године спонзорисао изложбу Нормана Бела

Гедиса (*Geddes*) под називом „*Футурама*” (слика 1.4), која је у оквиру светске изложбе у Њујорку приказала визију града будућности са возилима управљаним радио таласима [4].

Педесетих и шездесетих година двадесетог века Џенерал Моторс је приказао серију прототипова возила под називом Фајерберд (*Firebird*) за које су тврдили да су снабдевена електричним системима способним да возилима управљају при кретању на аутопуту без помоћи возача. Један од аутомобила из серије је Фајерберд III из 1958. године (слика 1.5).

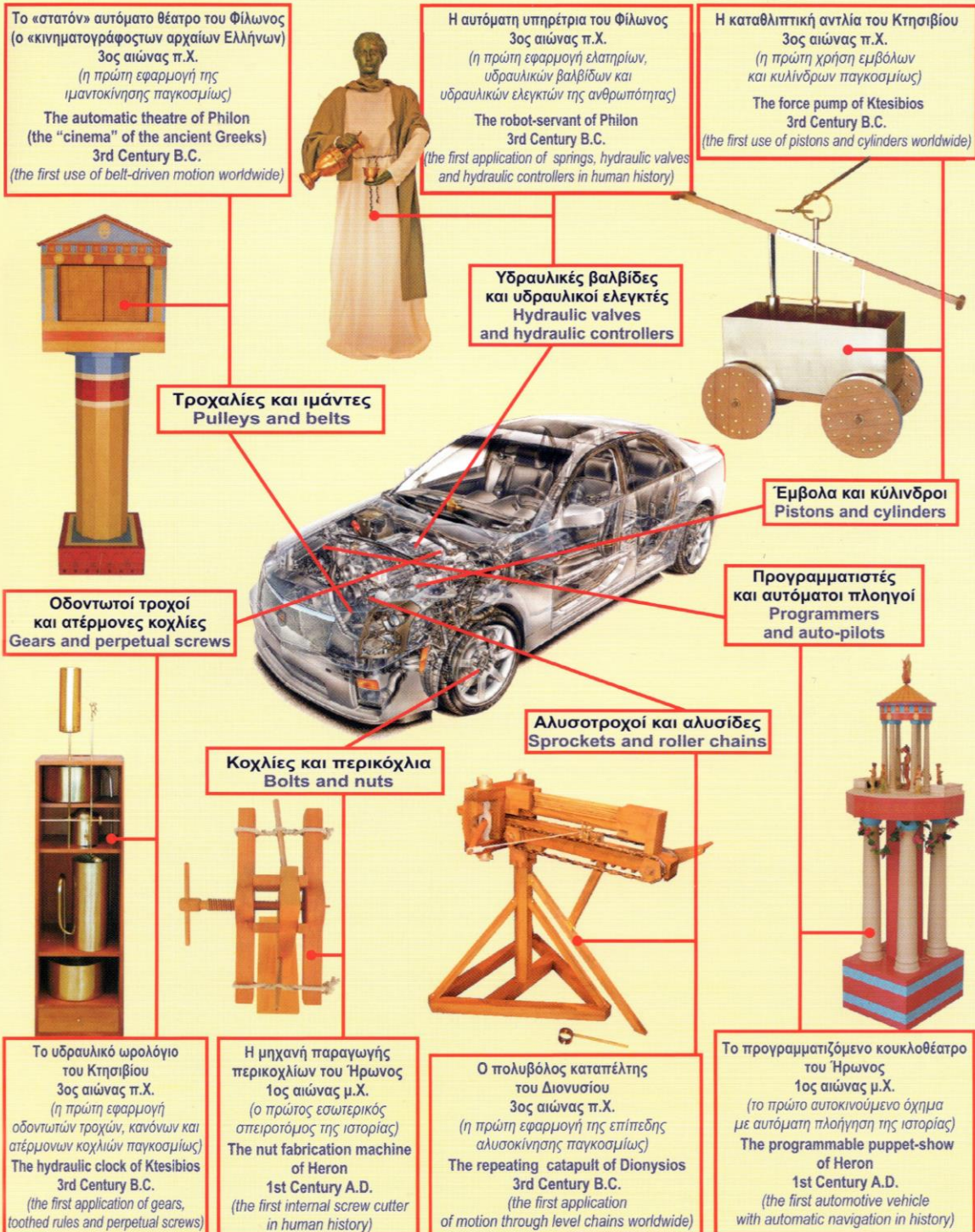


Слика 1.1 Нацрт Да Винчијевих програмираних колица

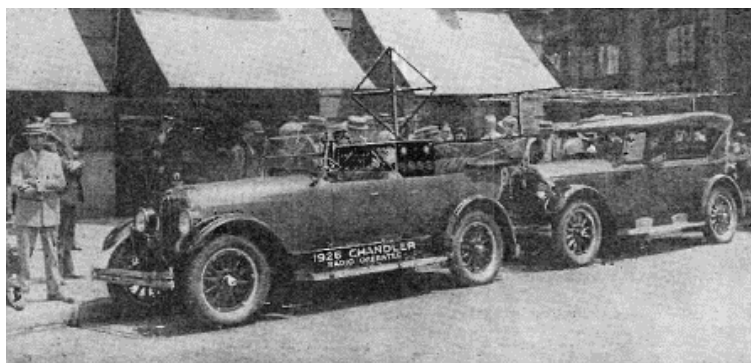


## MUSEUM of ANCIENT GREEK TECHNOLOGY ([www.kotsanas.com](http://www.kotsanas.com))

Η εξέλιξη της σημερινής τεχνολογίας θα ήταν αμφίβολη χωρίς την ανέξοδη επανάκτηση από το δυτικό πολιτισμό (μετά από χίλια χρόνια ωρίμανσης) της «ξεχασμένης» αρχαιοελληνικής τεχνολογίας  
 The development of today's technology would have been uncertain without the costless assumption by Western Civilisation (after maturing for one thousand years) of the "forgotten" Ancient Greek Technology



Слика 1.2 Изуми античких Грка као основ савременог аутомобила [2]



*Слика 1.3* Линрикан Вондер и пратеће возило



*Слика 1.4* Изложба „Футурама”



Компанија РЦА у сарадњи са владом Небраске представила је 1958. године 120 метара дугу деоницу аутопута на периферији града Линколна са уграђеним електричним колима која су била у стању да детектују возило и пошаљу му управљачке импулсе. За овај пројекат Џенерал Моторс је два возила опремио радио пријемницима и актуаторима у систему за управљање, за контролисање рада погонског агрегата и управљање системом за кочење. Две године касније у седишту РЦА лабораторије у Принстону, новинарима је омогућено да се провозају овим аутомобилима (слика 1.6) [5].



*Слика 1.5 Џенерал Моторс Фајерберд III*



*Слика 1.6 РЦА „аутономна” возила*

### 1.1.3. Сан постаје јава

Током шездесетих година прошлог века Лабораторија за испитивање саобраћаја и путева Велике Британије преправила је Ситроен ДС (слика 1.7) како би био управљан кабловима уграђеним у пут. Возило је било у стању да пређе пробну стазу брзином од 130 km/h без одступања од задате брзине и правца у свим временским условима [6]. Испитивања су настављена и у првој половини седамдесетих година, а анализе из тог времена предвиђале су да би се улагања у преправку путева отплатила до краја века, повећавајући капацитет путева за најмање 50% и смањујући број несрећа за 40%. Финансирање пројекта прекинуто је средином седамдесетих година.



Слика 1.7 Citroen ДС направљен од стране Лабораторије за испитивање саобраћаја и путева

Лабораторија Цукуба (*Tsukuba*) из Јапана је 1977. представила прво компјутеризовано аутономно возило (слика 1.8) које је било у стању да достигне брзину од 30 km/h пратећи беле ознаке на путу забележене камером [7].



Слика 1.8 Цукуба аутономно возило

Почетком осамдесетих година Ернст Дикманс (*Dickmanns*) и његов тим са Државног универзитета у Минхену започели су низ пројеката у циљу стварања аутономног возила. Први резултат њихових напора приказан је 1986. године – модификовани Мерцедес-Бенц ТН назван *VaMoRs – Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen* (слика 1.9) управљан на основу података са камере инсталиране у возилу [8]. Возило је испитивано на путевима без саобраћаја, а било је у стању да достигне брзине од око 100 km/h. Исте године ЕУРЕКА започиње 749 милиона евра вредан пројекат под називом „Прометеј” (*PROMETHEUS – PROgramme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety*) [9]. Резултат овог пројекта су два возила „близанца” које је Дикмансов тим развио на бази Мерцедес-Бенц Ц класе – *VaMP* (скраћеница настала на

основу скраћенице *VaMoRs*, при чему *P* обележава путничко возило) и *VITA-2* (*VITA* – *Vision Technology Application*). 1995. године једно од два возила прешло је пут од Минхена до Одензеа (1758 km) крећући се брзинама до 175 km/h, 95% пута крећући се потпуно аутономно, при томе вршећи маневре промене траке и претицања.



Слика 1.9 *VaMoRs*

Осамдесете године двадесетог века донеле су пројекат под називом *ALV* (*Autonomous Land Vehicle*), финансиран од стране Агенције за напредне одбрамбене истраживачке пројекте Сједињених Америчких Држава (*DARPA* – *Defense Advanced Research Projects Agency*), а у ком су учествовали Универзитет у Мериленду, Универзитет Карнеги Мелон (*Carnegie Mellon*), Институт за истраживање животне средине у Мичигену и „СРИ интернешенел” (*SRI International*). 1989. године на Универзитету Карнеги Мелон први пут је за управљање аутономним возилом употребљена вештачка неуронска мрежа [10], чиме је створена основа за стратегије управљања аутономним возилима које се и данас користе. Шест година касније, пројекат Универзитета Карнеги Мелон под називом *Navlab* [11] (слика 1.10) прешао је пут од око 5000 km, од тога 98,2% потпуно аутономно. Овај подухват назван је „Без руку преко Америке” (*No Hands Across America*). Ово возило је, међутим, било полуаутономно – неуронска мрежа је коришћена за управљање актуаторима у систему за управљање, док је управљање погонским агрегатом и системом за кочење, пре свега из безбедносних разлога, вршио човек.



Слика 1.10 *Навлаб*



Професор Алберто Брођи (*Broggi*) са Универзитета у Парми је 1996. године покренуо пројекат назван *ARGO* са задатком да омогући модификованој Ланча Теми (слика 1.11) да прати линије на немодификованом аутопуту. Хиљаду аутономних миља (*Mille Miglia in Automatico*) назив је за пут које је ово возило прешло у дужини од око 1900 km дуж аутопутева у северној Италији просечном брзином од 90 km/h, 94% времена потпуно аутономно. Возило је било опремљено са само две јефтине црно-беле камере и алгоритмом за стереоскопско анализирање окружења. Четрнаест година касније, тим професора Брођија под називом *VisLab* извео је прву међуконтиненталну возњу аутономног возила трасом дужине 13000 km од Парме до светске изложбе у Шангају. Била су потребна три месеца да четири електрична возила Пјађо Портер стигну на циљ [12].



Слика 1.11 Вожња у Ланча Теми модификованој за потребе пројекта *ARGO*

Поменута агенција *DARPA* је 2004. организовала такмичење под називом „Велики изазов” (*Grand Challenge*). Награда од милион америчких долара је понуђена сваком тиму који створи аутономно возило у стању да пређе стазу од 240 km у пустињи Мохави за не више од 10 сати. Ниједно возило није успело да пређе више од 5% дужине стазе. Следеће године одржано је друго издање такмичења, овога пута успешније – пет возила је завршило трку, од чега четири у предвиђеном року [13]. Победило је возило Стенли (*Stanley*) Лабораторије за вештачку интелигенцију Универзитета Стенфорд. Друго и треће место заузела су возила Универзитета Карнеги Мелон – „Пешчана олуја” (*Sandstorm*) и „Горштак” (*Highlander*) (слика 1.12). Две године касније, на трећем по реду такмичењу, овога пута у градским условима, на стази од 97 km победило је возило Универзитета Карнеги Мелон под називом „Газда” (*Boss*).

Крајем 2008. године почело је тестирање првог комерцијалног аутономног дампера фирме Комацу (*Komatsu*) (слика 1.13) у руднику Пилбара у власништву компаније Рио Тинто [14]. До априла 2020. године број аутономних дампера у власништву ове компаније повећао се на преко 130.



Слика 1.12 Победници „Великог изазова II” – Стенли, „Горштак” и „Пешчана олуја”

Пројекат под називом *SARTRE* (*SAfe Road TRains for the Environment*), који је финансирала Европска комисија, спроведен је од 2009. до 2012. године [15]. Циљ пројекта био је развој друмских водова у којима би путничка возила пратила теретно возило којим управља професионални возач. На овај начин би се, осим повећања безбедности (претпостављајући да је вероватноћа да саобраћајну несрећу изазове професионални возач много мања у односу на возача аматера), учиниле и уштеде у потрошњи горива услед смањења отпора ваздуха у оваквим водовима (слика 1.14 приказује један), што се никако не сме занемарити, имајући у виду предвиђања везана за будућност извора енергије за моторна возила [16]. Ово ипак није први покушај развоја аутономних водова – тим истраживача из компаније Дајмлер-Бенц је још 1995. године развио камион по имену *Otto* који је био у стању да прати возила испред [17].



Слика 1.13 Првих пет аутономних дампера у руднику Пилбара

#### 1.1.4. Садашњост

Модерни системи за помоћ возачу који се уграђују у серијски произведена возила већ су „обична” возила приближили аутономном возилу. Ови системи могу обухватати:

- Спречавање судара;
- Праћење возача;
- Препознавање саобраћајних знакова;
- Адаптивна светла;
- Праћење мртвог угла;
- Спречавање напуштања траке;
- Помоћ при паркирању;
- Активно ослањање.



Слика 1.14 Друмски вод у оквиру пројекта SARTRE

Савремени безбедносни системи на возилима поседују велики број сензора – слика 1.15 приказује сензоре система *Pre Sense 360°* на возилу марке Ауди, који обједињује функције више различитих система (за спречавање судара, праћење возача, препознавање саобраћајних знакова, праћење мртвог угла, спречавање напуштања траке и помоћ при паркирању). Стога се овакви системи морају посматрати као делови обједињеног система који помаже возачу у безбедној вожњи, а неизбежно је приметити како овакав систем поседује готово све елементе потребне за аутономно управљање возилом.

Развојем сопственог аутономног возила бави се велики број произвођача, међу којима су Нисан [18], Мерцедес-Бенц [19], Тесла [20], Волво [21], Тојота [22] и Фолксваген [23]. Широј јавности је можда најпознатији пројекат фирме Гугл [24], која је са развојем аутономног возила почела 2009. године. Сада се развој одвија у оквиру Гуглове подружнице Вејмо (*Waymo*), на платформама возила као што су Тојота Пријус, Ауди ТТ, Лексус *RX450h*, Крајслер Пасифика и Јагуар Ајпејс, али и стотинак возила развијених специјално за потребе компаније.

Сви до сада учињени напори су усмерени ка томе да аутономна возила постану свакодневица на нашим путевима. Симболичан корак ка том циљу јесте подухват Дајмлера и Технолошког института из Карлсруеа из 2013. године, када је возило





хуманистичких. Питања етичких принципа, одговорности и осигурања су и даље отворена, али она овде не представљају примарну област интересовања, па ће бити само кратко помињана на појединим прикладним местима.



Слика 1.16 Полицајац зауставља Гугл аутономно возило (фотографија: Зандр Милевски)

### 1.2.1. Европа

Бечка конвенција о друмском саобраћају [29] из 1968. године, чија је потписница и Република Србија, прописује да свако возило или скуп возила који се креће мора имати возача коме је у сваком тренутку омогућено да управља возилом. Неке земље су ову одредбу схватиле као препреку за увођење аутономних возила у саобраћај. Измене текста конвенције које су ступиле на снагу 2016. године дозволиле су аутономно кретање возила, али све док систем аутономног управљања може бити надјачан или искључен од стране возача [30].

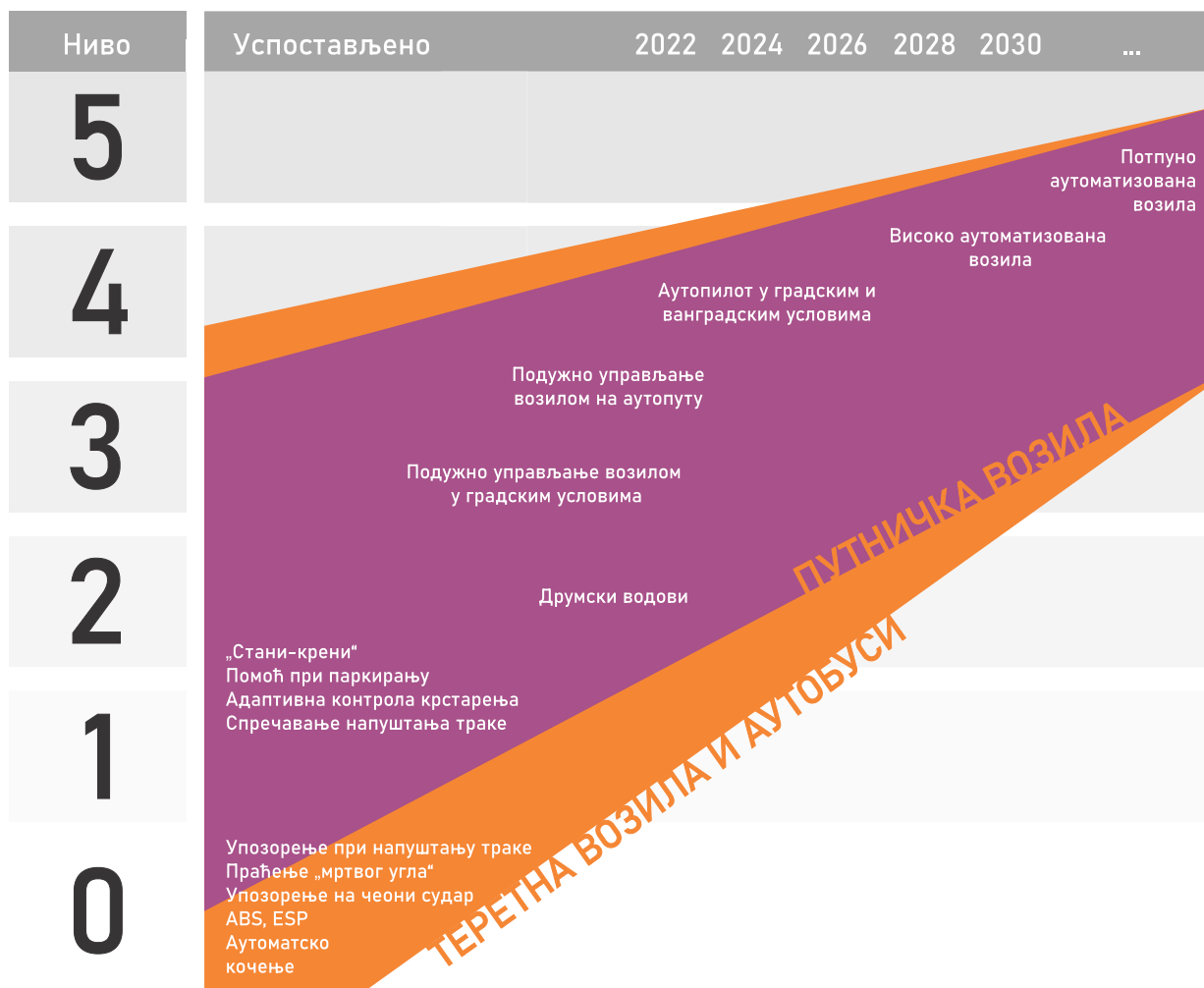
Слика 1.17 приказује план развоја аутономних возила у Европи који је објавио Европски савет за истраживање друмског саобраћаја (*ERTRAC – European Road Transport Research Advisory Council*) [31].

Влада Уједињеног краљевства је 2013. године одобрила испитивање аутономних возила на јавним путевима [32]. Да би се испитивање могло обавити, возило мора бити осигурано, у возилу се мора налазити обучен и искусан возач чија је обавеза да током читавог пута прати понашање возила и буде у приправности како би, уколико се појави потреба, преузео контролу над возилом. Осим тога, у возилу мора постојати уређај за снимање података о кретању возила (тзв. „црна кутија”), који би у случају саобраћајне несреће пружио довољно података за истрагу њеног узрока, а пре свега податак о томе да ли је возило било у аутономном или „мануелном” моду. Осим наведеног, произвођач мора уверити власти да је возило претходно успешно прошло лабораторијска и испитивања на затвореним путевима или полигонима. Прва четири инфраструктурна пројекта покренута су 2017. године, развијајући два затворена и два отворена (у оквиру јавних путева) полигона за испитивање аутономних возила у Западном Мидленду и Лондону [31].

Холандска влада је прилагодила законодавство испитивањима аутономних возила на јавним путевима. Као следећи корак, скупштина је дала одобрење за доношење закона који ће омогућити испитивање аутономних возила без присуства возача. Холандија је у тренутку писања ове дисертације лидер у истраживању аутономних возила [31].



Француска је у јулу 2014. године у оквиру стратегије под називом „Нова француска индустрија” [33] покренула пројекат под називом „План за аутономна возила”, а за руководиоца поставила тадашњег директора Рено-Нисан групације Карлоса Госна. План, између осталог, укључује и пробне зоне за испитивање аутономних возила, али и промене у обуци возача.



Слика 1.17 План развоја аутономних возила у Европи [31]

У пролеће 2015. године, швајцарско министарство животне средине, саобраћаја, енергетике и комуникација је дозволило компанији „Swisscom” да испита Фолксваген Пасат модификован у аутономно возило на улицама Цириха [34].

Септембра 2015. године немачка влада усвојила је „Стратегију за аутономна и повезана возила” [35]. Стратегија предвиђа измену термина возач у Бечкој конвенцији о друмском саобраћају (тако да укључи и „системе са пуном контролом над возилом”), дозвољену брзину до 130 km/h уз аутономну промену саобраћајних трака (уз промену УН правилника бр. 79 [36] који дефинише услове за системе за управљање) и измену Закона о саобраћају на путевима којом су дефинисана права и одговорности возача током фазе аутоматизоване вожње и развој етичких смерница за програмирање аутоматизованих система вожње [31]. За сада, свака покрајина у Немачкој може изузећем омогућити испитивање аутономних возила на јавним путевима, уз обавезно присуство возача са пуном одговорношћу за безбедно кретање возила.

Шведска влада је уз помоћ компаније Волво покренула иницијативу под називом „Вози ме” (*Drive Me*) [37]. Мотивисана визијом саобраћаја без људских жртава, иницијатива омогућава истраживања унутар различитих области повезаних са аутономним возилима. Од 2017. године у области Гетеборга „обични” људи свакога дана користе Волво аутономна возила у циљу њиховог развоја. Ово је омогућила уредба владе којом се омогућава испитивање аутономних возила [31].

Шпански Генерални директорат за саобраћај је 2015. донео уредбу којом се дозвољава испитивање аутономних возила на четири наменска полигона [31].

У Аустрији од 2017. године постоје три полигона за испитивање аутономних возила [31].

Постојеће финско законодавство је либерално и омогућава аутоматизовано управљање возилима на отвореним путевима (укључујући и даљинско управљање), уз издавање посебних таблица за оваква возила. Активно се користи полигон Аурора дужине 75 km са посебно опремљеном (инструментима) деоницом дужине 10 km дуж аутопута Е8 у северној Финској [31].

Одлуком министра од 13. јуна 2015. године, Грчка је дозволила саобраћај потпуно аутоматизованих возила без возача у градским срединама и на јавним путевима ради истраживања, уз детаљну анализу предложених рута, одобрење возила, одговарајућу обуку за оператере (укључујући и даљинске), надзор од стране специјализованих истраживачких или академских тела и активну подршку локалних власти. Прва потпуно аутоматизована возила су добила дозволу за саобраћај 29. октобра 2015. у Трикали [31].



Слика 1.18 Полигон ZalaZone

Мађарска заснива своју стратегију на полигону за испитивање аутономних возила *ZalaZone* (слике 1.18 и 1.19) у области града Залаегерсег. Од 12. априла 2017. у Мађарској је дозвољено испитивање прототипова аутономних возила на јавним путевима [31]. Треба рећи да постоји мноштво сличних полигона широм света (добар део њих је у фази развоја), али је овај полигон поменут пре свега зато што се налази у суседној држави. У Републици Србији, нажалост, тренутно не постоје прописи који предвиђају употребу аутономних возила у саобраћају, макар и у оквиру испитивања на ограниченим деоницама. Влада Републике Србије је 18. марта 2021. године усвојила Акциони план за спровођење стратегије одрживог урбаног развоја Републике Србије до 2030. године за период од 2021. до 2022. године [38] у оквиру ког је предвиђен пројекат под називом „Истраживачко-

развијени и тест центар за електрична и аутономна возила и дроне” који спроводи Научно-технолошки парк Чачак, уз следеће организације партнере: Национална асоцијација аутономних и електричних возила (НААЕВ), Академија инжењерских наука Србије (АИНС), Удружење инжењера електротехнике Србије (УДИЕС), Министарство грађевинарства, саобраћаја и инфраструктуре, Министарство заштите животне средине, Министарство просвете, науке и технолошког развоја. Извори финансирања пројекта су буџет Републике Србије, Светска банка и Европска банка за обнову и развој.



Слика 1.19 Полигон ZalaZone (подела по зонама)

## 1.2.2. САД

Прва земља у којој је прописима дозвољено испитивање аутономних возила јесу САД. У тренутку писања овог текста, тридесет осам држава унутар САД поседује прописе о аутономним возилима – међу њима предњачи Невада (слика 1.20). Прописи пет држава одобравају студије, дефинишу кључне термине и предвиђају финансирање пројеката везаних за аутономна возила. Испитивање аутономних возила је дозвољено у дванаест држава, док је потпуно учешће у саобраћају дозвољено у шеснаест држава и округу Колумбија – од ових двадесет осам држава, у осамнаест је дозвољено учешће у саобраћају без човека на месту возача. Прописи четири државе регулишу аутономне водове [39].

Национална агенција за безбедност друмског саобраћаја (*NHTSA – National Highway Traffic Safety Administration*) је 2013. године предложила формални систем поделе возила према нивоу аутономије [40]:

- **Ниво 0** – Возач у потпуности управља возилом све време;
- **Ниво 1** – Поједине контроле возила су аутоматизоване (као што је систем за контролу стабилности или систем за спречавање судара);
- **Ниво 2** – Најмање две контроле су аутоматизоване у оквиру једне целине (на пример, адаптивна контрола крстарења и систем за задржавање у саобраћајној траци);

- **Ниво 3** – Возач може у потпуности уступити управљање свим по безбедност критичним функцијама под одређеним условима. Возило „осећа” када услови захтевају да возач преузме контролу и оставља возачу довољно времена за реаговање;
- **Ниво 4** – Возило управља свим по безбедност критичним функцијама све време, а од возача се не очекује да управља возилом нити у једном тренутку. Како ово возило контролише све функције од покретања до заустављања возила, укључујући и функције паркирања, овај ниво може означавати и возила без путника.



Слика 1.20 Први регистровани аутономни тегљач у америчкој савезној држави Невади

Касније је ова подела измењена стандардом SAE J3016 [41] и као таква је постала општеприхваћена. Табела 1.1 и слика 1.21 (у упрошћеном облику) приказују ову поделу. У јануару 2017. године, Министарство саобраћаја САД је одредило десет локација за испитивање аутономних возила [31].



Слика 1.21 Нивои аутоматизације [41] (упрошћен приказ преузет са [www.caa.ca](http://www.caa.ca))

Табела 1.1 Нивои аутоматизације [41]

Ниво	Назив	Опис	Динамички задаци за возача		„План Б” за динамичке задатке	Опсег функционисања
			Подужно и бочно управљање возилом	Детектовање и реаговање на објекте и догађаје		
Возач обавља део или све динамичке задатке	0	Без аутоматизације	Возач	Возач	Возач	Ограничен
	1	Помоћ возачу	Возач и систем			
	2	Делимична аутоматизација	Систем			
Систем за аутоматизовану вожњу обавља све динамичке задатке (када је укључен)	3	Условна аутоматизација	Систем	Систем	Возач спреман да преузме управљање	Ограничен
	4	Висок ниво аутоматизације			Систем	
	5	Потпуна аутоматизација			Систем	Неограничен

### 1.2.3. Остатак света

Испитивање аутономних возила на јавним путевима уз специјалну дозволу могуће је у Јапану од септембра 2013. године [42]. Два највећа јапанска произвођача, Тојота и Нисан, тренутно раде на пројектима аутономних возила. Током 2017. започета је серија испитивања, између осталог и на путевима у близини локација на којима су одржане Летње олимпијске игре у Токију [31]. Ово је логична последица тежње Јапана ка преласку из Индустрије 4.0 у Друштво 5.0, чији један од основних стубова чине аутономна возила [43].





*Слика 1.22* Аутономно возило Хандеј Џенезис приказује могућност избегавања другог возила

Јужнокорејско Министарство земљишта, инфраструктуре и саобраћаја одржало је марта 2016. године церемонију у владином комплексу у граду Сеџонг поводом прве саобраћајне дозволе издате за аутономно возило у Јужној Кореји, и то домаћем произвођачу Хандеј Моторс, са важношћу од пет година [44]. Три недеље пре тога, произвођач је поднео захтев за издавање дозволе за једно возило Хандеј Џенезис (слика 1.22) и двојицу возача, од којих бар један мора бити у возилу када год се оно креће. Возило је на посебан начин обележено како би возачи осталих аутомобила били свесни да је у питању возило без возача. Кретање возила је ограничено на две деонице аутопута и четири деонице пута за моторна возила (укупно 320 km).

Пекинг је у децембру 2019. одредио површину од 40 km<sup>2</sup> за испитивање аутономних возила са путницима. Град је такође издао дозволу за превоз путника у четрдесет аутономних возила у власништву интернет гиганта Баиду [45].

Јужна Аустралија је прва аустралијска држава која је усвојила прописе о аутономним возилима [46]. Ови прописи ће дозволити произвођачима да испитују аутономна возила на путевима Јужне Аустралије уз дозволу министарства саобраћаја. Ову одлуку треба посматрати и кроз призму гашења погона аустралијског произвођача Холдена у овом делу Аустралије, па се локална влада нада да ће произвођачи аутономних возила попунити празнину која је на овај начин настала.

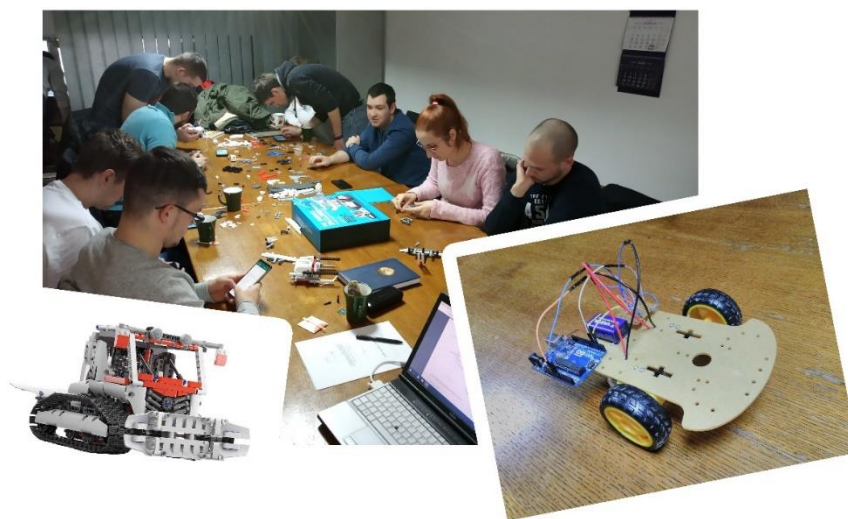
#### 1.2.4. Закључак

Може се закључити да развој пратећих прописа поприлично заостаје за развојем аутономних возила – и када у некој држави постоје закони који предвиђају кретање аутономних возила на јавним саобраћајницама, углавном је њихова употреба ограничена на испитивање возила које спроводе произвођачи. Могао би се извести закључак да прописи постају кључна препрека у примени аутономних возила, али остаје питање колико тренутни степен развоја технологије заслужује поверење доносилаца прописа – у каснијим деловима текста даће се примери који иду у прилог постојећој скепси, мада ће се ово свакако променити у будућности. Већина тренутно важећих прописа стога захтева присуство возача у возилу како би могао да реагује у случају потребе. Због тога постојеће прописе треба посматрати као неку врсту прелазних одредби – када испитивања покажу

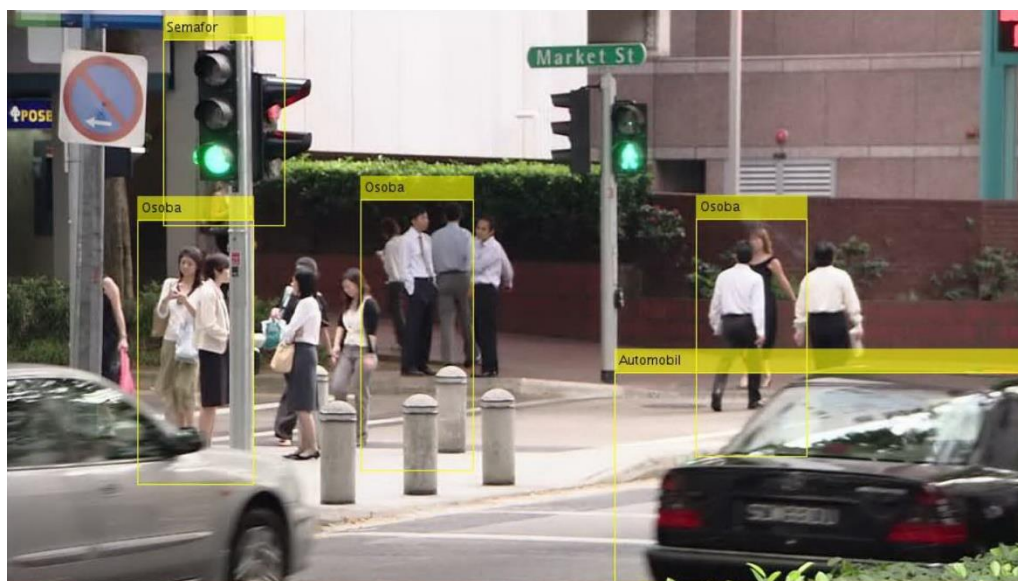
да су аутономна возила довољно поуздана, присуство возача вероватно више неће бити обавезно. Додатни изазов у будућности ће свакако представљати проблем високотехнолошког криминала – већ је показано да напади ове врсте могу угрозити безбедност конвенционалних возила, а у случају аутономних возила, опасност постаје још већа.

### 1.3. Приступачност технологије

Технологија (у смислу хардвера) која омогућава аутономију возила је све приступачнија. Томе говори у прилог и да су можда тренутно најактивније компаније на пољу аутономних возила софтверске компаније (Гугл, Убер, Енвидија...).



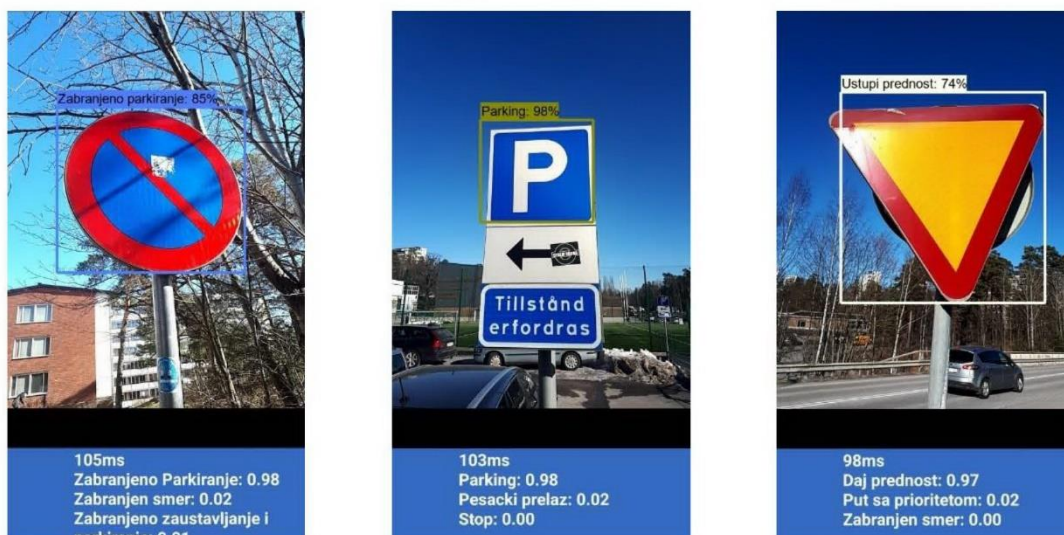
Слика 1.23 Вежбе студената из предмета Мехатроника на возилу



Слика 1.24 Софтвер за препознавање учесника у саобраћају као резултат мастер рада на Катедри за моторна возила [47]

Цена компоненти за аутоматизацију умањених модела возила такође је знатно опала, што омогућава студентима широм света да, на сличним принципима на којим велике

компаније то чине са правим возилима, развијају сопствена аутономна возила. Ово је искористила Катедра за моторна возила Машинског факултета Универзитета у Београду и својим студентима омогућила да се „играју” склапајући своја „аутономна” возила (слика 1.23). Резултат такве „игре” су и мастер радови чији резултати наликују онима у развојним тимова светских компанија (слике 1.24 и 1.25) [47,48].



Слика 1.25 Софтвер за препознавање саобраћајних знакова као резултат мастер рада на Катедри за моторна возила [48]



Слика 1.26 Тим „Racin’ Mates”

Тим „Racin’ Mates”, састављен од студената мастер и докторских студија Машинског факултета Универзитета у Београду учествовао је 2022. године на такмичењу „Bosch Future Mobility Challenge” које се од 2018. године одржава у Клузу [49]. Сваки тим је од организатора добио умањени модел аутономног возила са потребним давачима и управљачком јединицом и задатак да овај модел програмира тако да буде у стању да савлада испитни полигон састављен од умањених саобраћајница са сигнализацијом и другим учесницима у „саобраћају”.



„Технологија је реч која описује нешто што још увек не функционише.”

Даглас Адамс

## 2. Препознавање граница пута, учесника у саобраћају и препрека

---

### 2.1. Преглед коришћених давача









Постоје многе стратегије које се користе за контролу аутономног возила [50,51]. Користе се различити улази за управљање возилом – сигнали са видео камера, давача система за глобално позиционирање, акцелерометара, радара, ултразвучних (УЗ) и ласерских давача итд. Такође, постоје различите врсте контролера. Многи од њих заснивају се на вештачкој интелигенцији – углавном на неуронским мрежама. Проучавањем литературе може се закључити да око 60% описаних модела [52] аутономних возила као примарни уређај за препознавање користи камере, 20% радаре и 20% даваче глобалног система за позиционирање (*GPS*). У истој групи око 80% модела контролишу вештачке неуронске мреже, а око 20% контролери засновани на фази логици [52]. Дакле, управљање на основу сигнала са камере који обрађује вештачка неуронска мрежа је најчешћа комбинација у литератури. Претходно је, између осталог, коришћена у [53-55].

Реч давач води порекло отуда што овакав уређај управљачкој јединици (или уређају за аквизицију података) даје податке о некој физичкој појави. У литератури на енглеском језику се не може пронаћи пандан овој речи, јер се за даваче користе појмови претварач (*transducer*, обично за уређаје који мере силу, момент и померај), сложенице се суфиксом метар (термометар, акцелерометар, инклинометар...) и сензор (*sensor*). У овој дисертацији ће се реч давач користити за све уређаје који дају податак о квантитативној вредности неке физичке појаве, док ће се реч сензор користити за уређаје чији је задатак да осете (*sensor – to sense*) физичку појаву или њену промену (преко или испод задате границе).



Табела 2.1 [52] приказује прикупљене податке о давачима који се користе у изведеним аутономним возилима. Бројеви давача, уколико су познати, дати су у заградама. Тачне методе које се користе за управљање возилом тајне су произвођача, али са сигурношћу можемо рећи да се заснивају на вештачкој интелигенцији.

Произвођачи желе да своја возила учине што је могуће поузданијим користећи принцип редундансе, јер само једна грешка коју аутономни аутомобил направи може довести до смртног исхода. Из тог разлога се на изведеним возилима готово по правилу користи више од једног давача који „посматрају” исту величину (исто растојање, на пример).

Табела 2.1 Давачи коришћени на изведеним аутономним возилима

	Возило	Камера	Радар	Лидар	УЗ	GPS
1		Да	Да	Да	Не	Не
2		Да (1 v1, 6 v2)	Не	Не	Да (12)	Не
3		Да (3)	Да (2)	Да (7)	Не	Да
4		Да	Не	Да	Не	Да
5		Да (1)	Не	Да (5)	Не	Да
6		Да (1)	Да (2)	Да (4)	Не	Да
7		Да	Да	Да	Не	Не
8		Да (3 скупа)	Да	Да (4)	Не	Да

Табела 2.1 Давачи коришћени на изведеним аутономним возилима (наставак)

9		Да (3)	Да (2)	Да (1)	Не	Да
10		Да (1)	Не	Да (3)	Не	Да

1. Waymo (Google Car)

2. Tesla Autopilot

3. MadeInGermany

4. Spirit of Berlin

5. Stanley (победник DARPA изазова 2005)

6. Boss (победник DARPA изазова 2007)

7. LUTZ Pathfinder

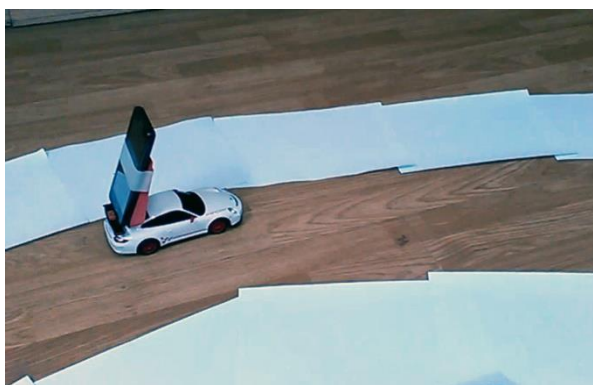
8. Uber аутономно возило

9. Autonomous Hyundai Ioniq

10. Intelligent Pioneer

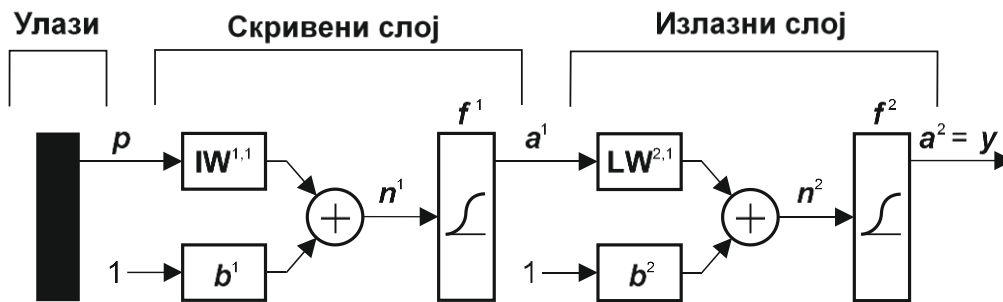
## 2.2. Прелиминарни експеримент – управљање возилом на основу снимка са камере

У циљу провере могућности коришћења камере за препознавање граница пута, у оквиру истраживања за потребе ове дисертације, спроведен је прелиминарни експеримент [56]. На умањени модел аутомобила (слика 2.1) постављен је мобилни телефон са Андроид оперативним системом и инсталираним програмом који снимак са камере прослеђује рачунару путем бежичне мреже. Сигнал који рачунар добија се обрађује у програмском пакету *MATLAB* користећи две различите вештачке неуронске мреже, односно два алгоритма заснована на обради фотографија. У сва четири случаја, излази су управљачки сигнали за даљински управљач возилом. Границе су симулиране постављањем листова белог папира на под. То се касније може лако променити јер би основни принцип рада алгоритма остао исти. Осим провере саме могућности усмеравања возила како би остало унутар граница пута, експеримент је имао задатак и да утврди колико је времена потребно рачунару за обраду сигнала и доношење одлуке. Промене у окружењу возила се дешавају веома брзо, па је време потребно за одлучивање потребно смањити на најмању могућу меру.



Слика 2.1 Модел возила са телефоном као камером на носачу

За све прорачуне је коришћен рачунар са *Core i3-4000M* 2.4 GHz процесором и 4 Gb RAM меморије са оперативним системом Виндоуз 7. Све фотографије коришћене за симулације су у Виндоуз осмобитном бит-мапа формату.



Слика 2.2 Архитектура неуронске мреже (упрошћени приказ)

Слика 2.2 приказује општу архитектуру неуронске мреже са једним скривеним слојем и логистичком сигмоидном преносном функцијом. У коришћеним моделима број колона улазног вектора  $p$  био је једнак укупном броју пиксела на обрађиваној фотографији. Број колона у излазном вектору  $y$  био је три у првом случају и 45 у другом. То одговара броју команди послатих возилу. У првом случају шаљу се само три врсте команди: напред, лево или десно. У другом случају, једна наредба је била напред, док су остале 44 наредбе подељене у два низа по 22 корака за улево и удесно, баш као и у познатом возилу *ALVINN* [58]. То значи да су пуни углови закретања оба управљана точка били подељени у 22 једнака корака.

Обука неуронске мреже изведена је коришћењем Бејзовог (*Thomas Bayes* 1702–1761) алгоритма регуларизације простирањем уназад (*backpropagation*) [57]. Ова врста алгоритма за обуку прилагођава тежинске факторе према Левенберг-Маркарт (*Levenberg-Marquardt*) оптимизацији [59,60] и не захтева посебан скуп података за валидацију [61]. Подаци о обуци садржавали су скуп слика и одговарајућих наредби које је задао људски оператер. Излаз из вештачке неуронске мреже израчунава се помоћу следеће једначине:

$$y = f^2(LW^{2,1}f^1(IW^{1,1}p + b^1) + b^2),$$

где је:

$IW^{1,1}$  – матрица тежинских фактора за улазни вектор;

$LW^{2,1}$  – матрица тежинских фактора за скривени слој;

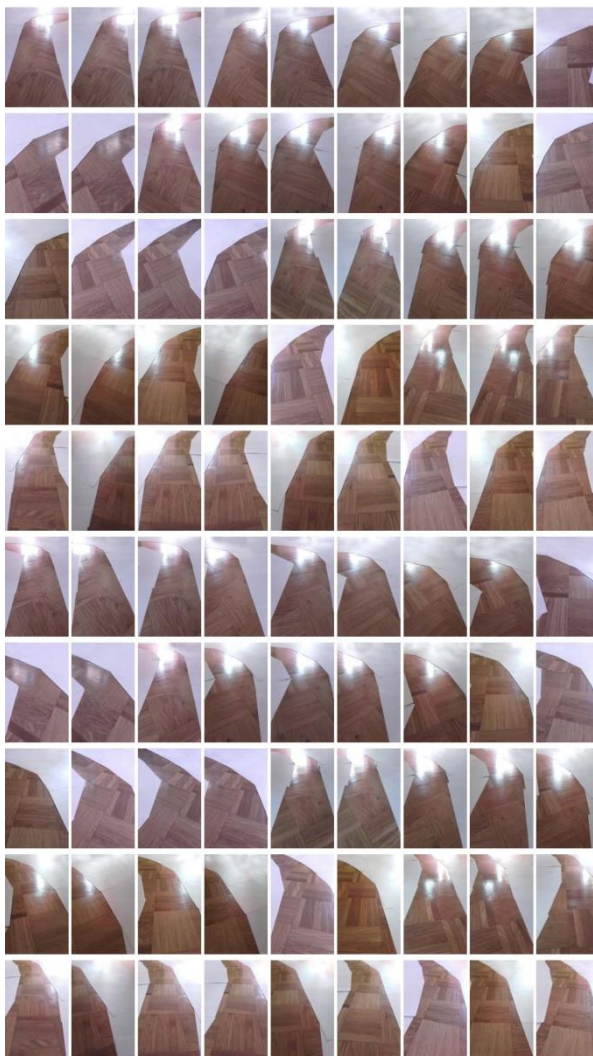
$b^1$ ,  $b^2$  – вектори унутрашње побуде (*bias*).

Једначина је коришћена за израчунавање времена потребног за обраду фотографије добијене помоћу камере на „возилу” и доношење одлуке. Симулација је вршена у 100000 пролаза на 450 слика, од којих је 90 (насумично изабраних) приказано на слици 2.3.

Резултати симулације су приказани су у табелама 2.2 и 2.3 за два случаја: када постоје три излаза из мреже (табела 2.2) и када их је 45 (табела 2.3). Број неурона у скривеном слоју је мењан (2, 4, 8, 16, 32 и 64). Такође, симулација је вршена за четири различите резолуције фотографија:

- 800x1280 (1024000 пиксела и исто толико улаза);
- 400x640 (256000 пиксела/улаза);

- 200x320 (64000 пиксела/улаза);
- 100x160 (16000 пиксела/улаза).



*Слика 2.3* Део фотографија коришћен за симулацију

Времена потребна за учитавање слике у зависности од резолуције приказана су у обе табеле (иако не зависе од структуре неуронске мреже, већ само од резолуције фотографије). Укупно време обраде састоји се од времена учитавања слике и времена потребног за израчунавање једначине (2.1).

*Табела 2.2* Средње време [ms] потребно за одређивање смера кретања неуронском мрежом са три излаза

		Резолуција фотографије			
		800x1280	400x640	200x320	100x160
Средње време учитавања [ms]		3,890	2,289	1,869	1,739
Број неурона у скривеном слоју	2	2,289	0,580	0,047	0,016
	4	3,786	0,965	0,072	0,019
	8	6,702	1,704	0,316	0,025
	16	13,932	3,455	0,806	0,046
	32	28,927	7,074	1,604	0,226
	64	58,549	14,027	3,135	0,765

**Табела 2.3** Средње време [ms] потребно за одређивање смера кретања неуронском мрежом са 45 излаза

		Резолуција фотографије			
		800x1280	400x640	200x320	100x160
Средње време читавања [ms]		3,890	2,289	1,869	1,739
Број неурона у скривеном слоју	2	2,296	0,557	0,050	0,016
	4	3,778	0,951	0,068	0,020
	8	6,701	1,678	0,320	0,027
	16	13,309	3,422	0,802	0,051
	32	27,137	6,747	1,557	0,247
	64	55,223	13,370	3,133	0,769

Табеле 2.4 и 2.5 приказују ефикасност два модела вештачке неуронске мреже. Ефикасност је дефинисана као проценат успешних одлука (које су возило задржале унутар граница пута) и дата је за сваку комбинацију резолуције слике и броја неурона у скривеном слоју. Ефикасност је испитана на истом скупу од 450 фотографија на ком је претходно мерено време читавања и обраде.

**Табела 2.4** Ефикасност [%] неуронске мреже са три излаза

		Резолуција фотографије			
		800x1280	400x640	200x320	100x160
Број неурона у скривеном слоју	2	32,12	30,48	29,09	27,43
	4	80,23	79,93	77,63	77,22
	8	89,62	87,48	87,27	85,12
	16	93,34	91,03	90,65	88,17
	32	97,18	96,98	94,64	94,15
	64	98,37	98,22	96,46	95,36

**Табела 2.5** Ефикасност [%] неуронске мреже са 45 излаза

		Резолуција фотографије			
		800x1280	400x640	200x320	100x160
Број неурона у скривеном слоју	2	23,19	22,34	21,75	19,27
	4	45,92	45,48	44,08	43,17
	8	85,24	84,19	83,84	81,40
	16	87,54	86,19	85,43	83,01
	32	89,91	88,54	88,23	85,78
	64	90,54	90,12	89,87	89,25

Поред два коришћена модела неуронских мрежа, за потребе дисертације су развијена и два алгоритма заснована на обради фотографија сличних оном коришћеном у [62]. Први само одређује да ли возило треба да иде напред, лево или десно у датом тренутку, док је задатак другог алгоритма да одреди и исцрта границе пута (оног дела који је снимљен камером).

Први алгоритам обраде слике може се сматрати аналогним неуронској мрежи која има три излаза, јер у оба случаја постоје три могуће команде, док је други аналоган неуронској мрежи са 45 излаза, пошто угао управљања зависи од путање коју следи, а не само од тренутног положаја „возила” унутар граница пута.



Симулације за први алгоритам спроведене су за исте четири резолуције фотографија као што је то био случај са неуронским мрежама. Показало се да се резолуције фотографија од 200x320 и 100x160 пиксела не могу користити за други алгоритам јер не пружају довољно прецизности. Ефикасност алгоритама за обраду слике била је 100% за сваку приказану резолуцију слике (табела 2.6).

**Табела 2.6** Средње време [ms] потребно за одређивање смера кретања и путање обрадом фотографија

Резолуција фотографије	Први алгоритам (напред, лево или десно)	Други алгоритам (препознавање путање)
800x1280	2,670	99,924
400x640	2,400	33,206
200x320	2,208	-
100x160	2,148	-

Табела 2.6 приказује времена потребна да два развијена алгоритма донесу одлуку. Представљене вредности времена састоје се од времена потребног за учитавање фотографије и времена потребног за њену обраду и доношење одлуке, односно препознавање путање.

Два неурона у скривеном слоју показала су се недовољним за тачно усмеравање возила напред, лево или десно, баш као у једној од претходних студија [63]. То се може видети из података (табела 2.4). Приближно трећина исправних одлука у том случају су очигледно резултат случајности (вероватноћа насумично донете исправне одлуке је један према три).

Као најнижа прихватљива ефикасност за неуронске мреже усвојена је вредност од 80%. Најбржи (у смислу утрошеног времена за доношење одлуке) начин за добијање такве ефикасности у случају мреже са три излаза је са 8 неурона у скривеном слоју и резолуцијом 100x160 ( $1,739 + 0,025 = 1,764$  ms), што је 18% брже од првог алгоритма за обраду слике исте резолуције (2,148 ms), али са 15% мање ефикасности. Овде се мора напоменути да је први алгоритам обраде слике био 100% тачан у свим симулацијама извршеним за потребе овог истраживања. У случају мреже са 45 излаза, најбржа комбинација која је омогућила ефикасност од најмање 80% је такође са 8 неурона у скривеном слоју и резолуцијом 100x160 ( $1,739 + 0,027 = 1,766$  ms), што је 19 пута брже од алгоритма обраде фотографија у најбржој варијанти (33,206 ms). Међутим, алгоритам заснован на обради фотографија показао се 100% успешним, што је од велике важности за безбедно управљање „возилом”.

Све изнето у овом одељку има за циљ да покаже да је управљање возилом (макар и умањеним) на основу сигнала са камере могуће, чак и уз релативно мало уложеног времена и труда. Вештачке неуронске мреже се преко тридесет година користе за управљање аутономним возилима и у тренутном стадијуму технолошког развоја су доведене на ниво који задовољава услове за њихово коришћење на возилима која су одобрена за учешће у саобраћају. Њихова ефикасност је, дакле, много већа од оне измерене за мреже развијене за потребе овог малог експеримента. У даљем тексту дисертације сматраће се да је управљачка јединица већ снабдевена вештачком неуронском

мрежом обученом и способном да препознаје пут испред на основу сигнала са камере. Управљање возилом у циљу безбедног проласка дуж препознатог пута свакако остаје задатак који треба решити.

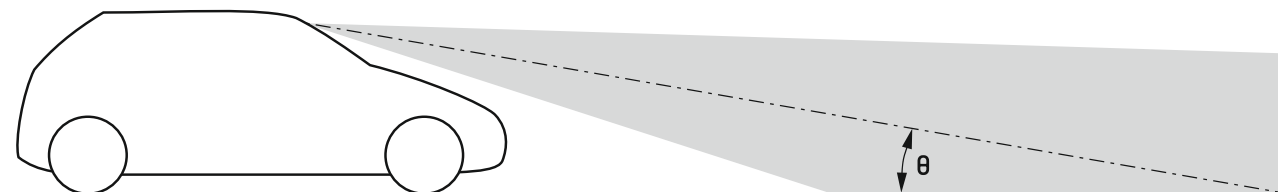
### 2.3. Избор давача

На моделу аутономног возила ће се користити следећи давачи:

- **Монокуларна камера** – са следећим задацима:
  - Препознавање граница пута;
  - Препознавање покретних и непокретних препрека (возила, бициклиста, пешака, одрона...);
  - Одређивање положаја препознатих препрека (у односу на возило, али и међусобних);
- **Лидар** – са задатком одређивања растојања препрека од возила;
- **Давач глобалног система за позиционирање** – са задатком провере израчунате позиције унутар граница пута.

### 2.4. Препознавање граница пута и препрека помоћу камере

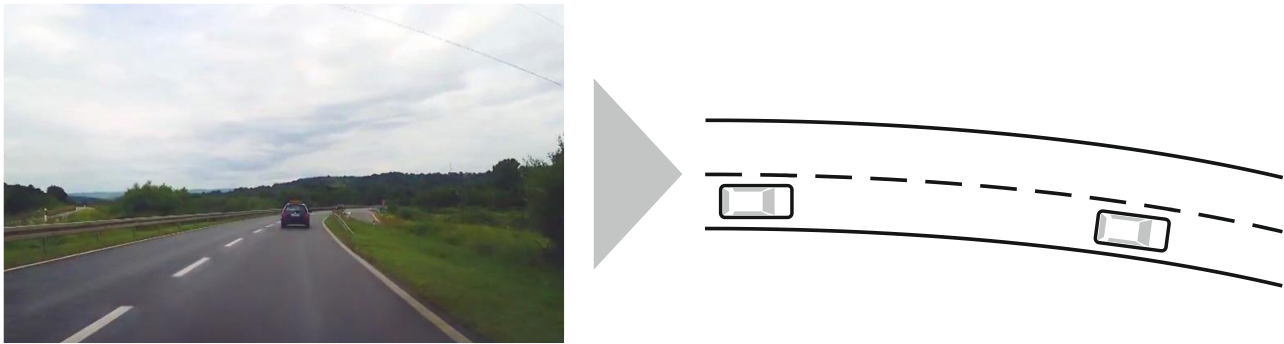
За препознавање граница пута и препрека на њему (укључујући и друга возила, бициклисте и пешаке) ће се користити камера. На овом месту, али ни у дисертацији, неће се дубље улазити у начин на који се од снимка са камере долази до „тлоцрта” пута испред возила, односно до касније описаног универзалног полигона. Даће се, међутим неке основе фотограметрије уз помоћ које се приказ који даје камера „прецртава” на пут испред возила посматран из птичје перспективе. Препознавање граница пута (раније у тексту је показано да је изводљиво) и препрека препустиће се вештачком неуронској мрежи, у чију се структуру и начин функционисања неће улазити. Данас је препознавање граница пута помоћу камере прилично развијено. Томе у прилог иде и чињеница да су неки од лидера у истраживању и примени аутономних возила ИТ компаније (Убер, Гугл, Енвидија) [64], а не класични произвођачи возила.



Слика 2.4 Приказ вертикалног угла захвата камере и њеног нагиба ( $\theta$ )

Слика 2.4 приказује угао захвата камере у вертикалној равни (означен сивом бојом) и њен нагиб у односу на хоризонтални пут ( $\theta$ ). За потребе дисертације ће се претпоставити да је пут по ком се возило креће хоризонталан, односно да је нагиб пута непроменљив, тако да угао који оса симетрија угла захвата камере гради са тлом у сваком тренутку одговара углу нагиба камере, као што је то приказано на слици 2.4. Ова претпоставка ће олакшати касније прорачуне, а модел се релативно лако касније може унапредити тако да узима у обзир и промену нагиба пута испред.

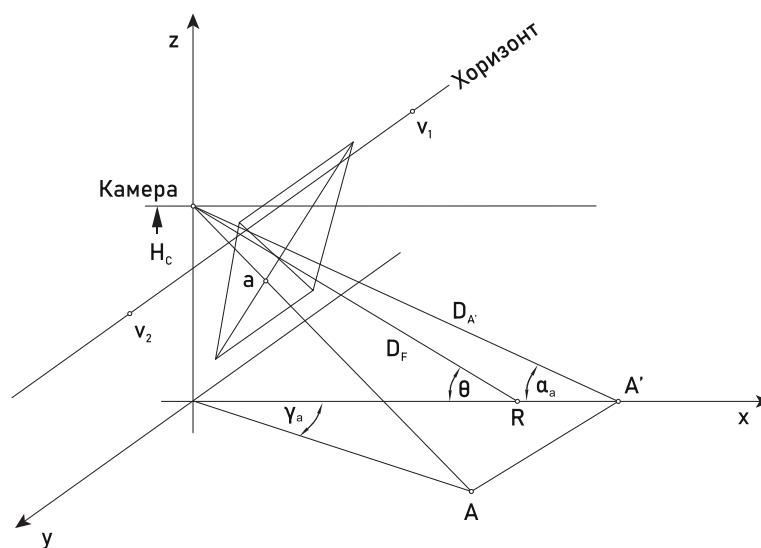




Слика 2.5 Од снимка са камере до „глоцрт” пута испред

Циљ система је да на основу снимка са камере састави „глоцрт” пута испред возила са приказаним покретним и непокретним препрекама, као што је то приказано на слици 2.5. За ово ће се користити принципи фотограметрије приказани на наредним сликама и дефинисани пратећим једначинама, преузети из [65] и модификовани тако да прате конвенцију означавања координатног система коришћену на Катедри за моторна возила Машинског факултета Универзитета у Београду.

Слика 2.6 приказује положај камере (заправо њеног објектива, односно жиже објектива) у односу на координатни систем возила ( $x$  – подужни правац,  $y$  – попречни правац,  $z$  – вертикални правац), нагнуте за угао  $\theta$  у односу на хоризонталну раван. Тачка  $a$  представља положај на фотографији тачке  $A$  која се налази на путу испред возила.



$A'$  – пројекција тачке  $A$  на  $x$  осу

$\gamma_a$  – азимут

$\alpha_a$  – угао депресије

$R$  – тачка продора осе симетрије угла захвата камере кроз раван пута

$D_F$  – растојање камере од тачке  $R$

$D_{A'}$  – растојање камере од тачке  $A'$

$H_c$  – висина жиже објектива у односу на раван пута

$v_{1/2}$  – тачке на хоризонту

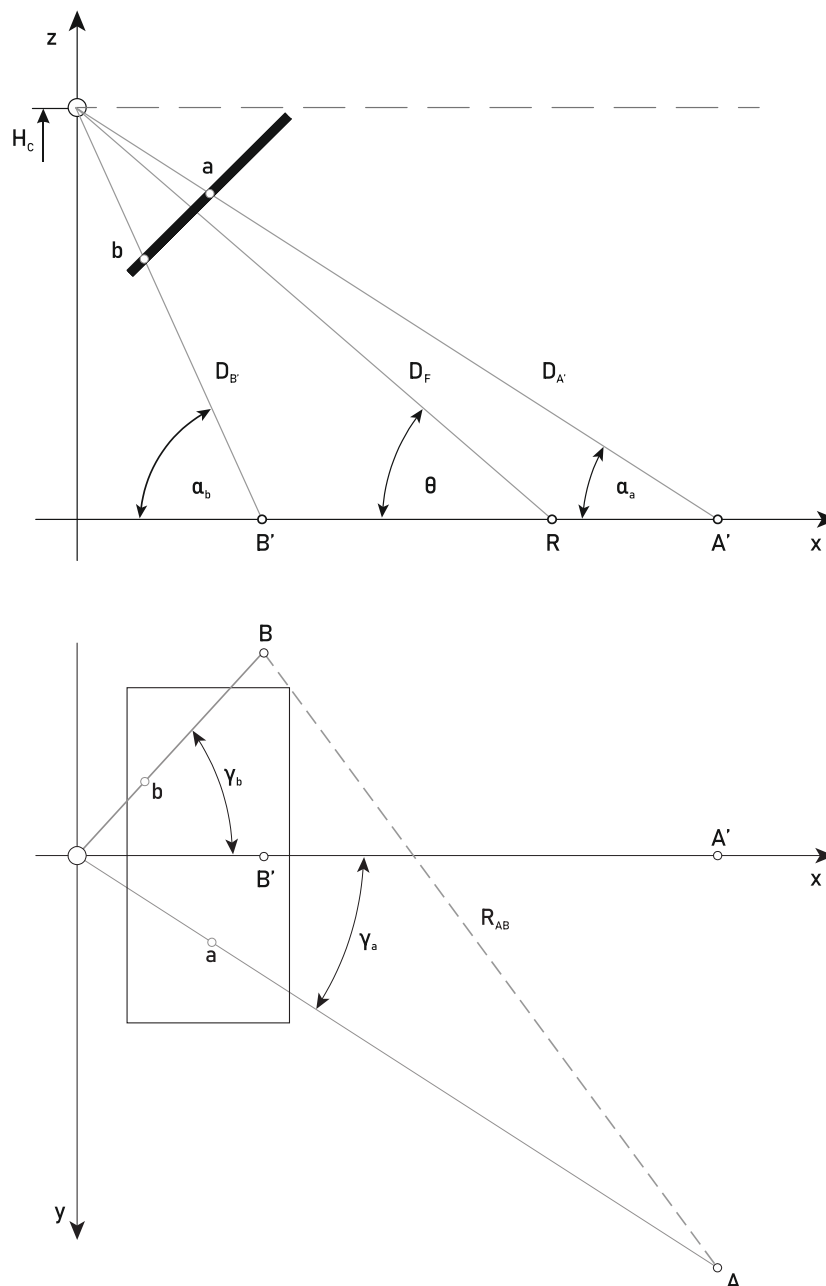
Слика 2.6 Положај камере у координатном систему [65]

Положај фотографије је приказан између објектива и посматраних објеката, на растојању од објектива који одговара жижној даљини помноженој увећањем позитива у односу на

негатив (као што се фотографија увећава приликом преноса са фотографског филма на папир) и може се посматрати као осветљени део фотографског филма или фотоосетљивог чипа дигиталне камере. Филм, односно чип, се увек налази иза објектива, на растојању које одговара жижној даљини, а овде је приказан „у огледалу” ради поједностављења, као позитив.

Слика 2.7 приказује положај камере у вертикалној и хоризонталној равни, али и положај тачака од интереса. За разлику од претходне слике на којој је била приказана само тачка  $A$  и еквивалентна тачка на фотографији  $a$ , на овој слици је приказана и тачка  $B$  и њен еквивалент на фотографији  $b$ . Ознаке су аналогне ознакама на претходној слици, уз додатак ознаке  $R_{AB}$  која означава растојање тачака  $A$  и  $B$ .

На слици 2.8 приказан је положај камере у односу на фотографију (позитив) ширине  $W$  и висине  $H$ , на којој се налази тачка  $a$ , која одговара тачки  $A$  на путу испред.



Слика 2.7 Положај камере и тачака од интереса у вертикалној (горе) и хоризонталној равни (доле) [65]



$$\alpha_a = \arctg \frac{\overline{aa'}}{\overline{La'}} = \arctg \frac{\overline{aa'} \cos \gamma_a}{(\overline{Lk} - \overline{hk})} = \arctg \frac{z_a \cos \theta \cos \gamma_a}{\left( \frac{f'}{\cos \theta} - z_a \sin \theta \right)}.$$

Тада се  $x$  координата тачке  $R$  може израчунати као:

$$X_R = \frac{H_C}{\operatorname{tg} \theta},$$

на основу чега се могу израчунати претходно дефинисана растојања:

$$D_F = \sqrt{X_R^2 + H_C^2},$$

$$D_{A'} = D_F \frac{\sin \theta}{\sin \alpha_a}$$

и

$$D_{B'} = D_F \frac{\sin \theta}{\sin \alpha_b}.$$

То нам даље омогућава израчунавање растојања тачака  $A$  и  $B$ :

$$R_{AB} = \sqrt{(X_{A'} - X_{B'})^2 + (Y_A - Y_B)^2},$$

при чему се потребна растојања израчунавају као

$$X_{A'} = D_{A'} \cos \alpha_a,$$

$$X_{B'} = D_{B'} \cos \alpha_b,$$

$$Y_A = X_{A'} \operatorname{tg} \gamma_a \text{ и}$$

$$Y_B = X_{B'} \operatorname{tg} \gamma_b.$$

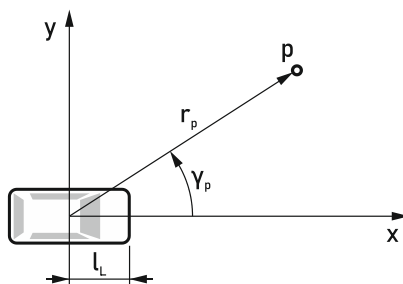
Положај свих тачака на путу од интереса, али и њихова међусобна растојања се могу израчунати на начин аналоган приказаном. То би омогућило да управљачка јединица возила добије раније поменут жељени „тлоцрт” пута испред возила који је слободан за његов пролазак.

Може се рећи да је одређивање растојања тачака  $A$  и  $B$  на слици 2.7 извршено принципом инверзне триангулације – обратно у односу на случај када се помоћу стерео камере (са познатим међусобним положајем две жиже) триангулацијом, односно

стереофотограметријом, може одредити положај једне тачке у простору, која се, рецимо, налази на возилу испред, а изнад тла (па нема олакшавајуће околности у смислу унапред познате координате  $z$ ). Принцип се заснива на проналажењу парова тачака на двема фотографијама које одговарају истим тачкама у простору, узимајући у обзир чињеницу да свака тачка на фотографији одговара једној полуправој у простору и да се све тачке на тој полуправој пројектују у једну тачку на фотографији (овде се неће дубље улазити у начине израчунавање проблема). Принцип инверзне триангулације се може применити и за одређивање положаја возила када је познато растојање између две тачке које се на њему налазе, а које детектује моно камера – овај принцип је, ради уштеде у цени опреме, коришћен у [17].

## 2.5. Препознавање растојања од препрека коришћењем лидара

Лидар ће се користити за препознавање препрека око возила. Поставиће се на кров возила и ротираће око вертикалне осе како би могао да „посматра“ свих  $360^\circ$  околине. Овде се неће улазити дубље у принцип функционисања лидара – битна је само чињеница да се на основу времена потребног да се зрак одбијен од препреке врати у пријемник израчунава растојање од препреке. На слици 2.9 је приказана уочена препрека  $p$  и измерено растојање од ње  $r_p$ .



Слика 2.9 Одређивање растојања од препреке

На основу измереног растојања и познатог угла зрака лидара у односу на подужну осу возила могу се израчунати координате препреке (њених делова најближих возилу – ово нас и интересује) користећи следеће једначине:

$$x_p = r_p \cos \gamma_p,$$

$$y_p = r_p \sin \gamma_p.$$

Растојање возила од препреке испред тада износи  $x_p - l_L$ .

За што прецизније одређивање слободног простора око возила потребно је узети у обзир и временско одступање настанка информације о положају препреке и датог тренутка, чија се максимална вредност израчунава користећи следећу једначину:

$$t_k = \frac{r_p}{c} + t_o + \frac{1}{f_L},$$

где је:

$c$  – брзина таласа лидара;

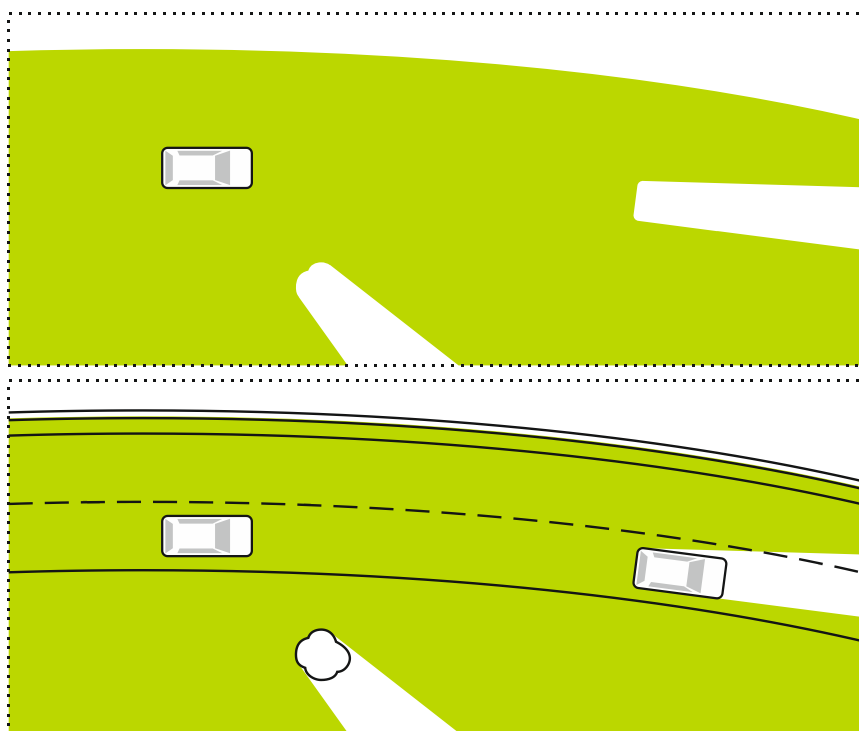
$t_o$  – време обраде сигнала;

$f_L$  – учестаност обртања лидара.

Због тога се препоручује да се измерене вредности растојања од препреке коригују узимајући у обзир брзину кретања возила  $v$  (дат је пример за кориговање  $x$  координате у случају када је вектор брзине возила саосан са подужном осом возила):

$$x_p' = x_p - v \cdot t_k.$$

Слика 2.10 приказује слободан простор одређен лидаром (означен зеленом бојом). Овако одређен слободан простор се мора поклопити са „тлоцртом“ одређеним помоћу камере, уколико је прецизност оба начина одређивања околине довољно велика.



**Слика 2.10** Слободни простор одређен лидаром (горе) и његово преклапање са „тлоцртом“ добијеним помоћу камере

## 2.6.Коришћење давача глобалног система за позиционирање

Давач глобалног система за позиционирање ће се користити само у циљу провере тачности информација о тренутном положају возила. Прецизност оваквих давача није довољно велика да би се кориговао одређени положај возила у попречном профилу пута којим се креће, али се може користити за корекцију положаја возила у подужном



профилу, нарочито ако се испостави да претходна два давача (лидар и камера) нису довољно прецизно предвидела надолазећу кривину. Математички модел овакве корекције би додатно оптеретио дисертацију и скренуо пажњу са суштине, па се овде неће даље развијати, већ се помиње само као концепт.

## 2.7. Коришћење програмског пакета *MATLAB* за одређивање околине возила

Програмски пакет *MATLAB* од своје верзије R2017a нуди пакет за аутономно управљање возилом (*Automated Driving Toolbox*) [66]. На овај начин је технологија управљања аутономним возилом ушла и у наше (студентске) домове – студенти широм света сада имају доступан алат за пројектовање аутономног управљања возилима. Поменути пакет, између осталог, нуди следеће функције:

- Фузија података са различитих давача;
- Визуелизација података са давача и њихов приказ у погледу из птичје перспективе;
- Симулација система упозорења на могућност чеоног судара;
- Симулација система за препознавање саобраћајне траке и спречавање њеног напуштања;
- Визуелизација аутоматског паралелног паркирања уз помоћ тродимензионалне симулације;
- Симулација система адаптивне контроле крстарења;
- Визуелна перцепција помоћу монокуларне камере;
- Препознавање објеката (стационарних и покретних) на основу снимка камере;
- Обрада сигнала са лидара и прављење тродимензионалне мапе окружења.

Имајући наведено у виду, у даљем тексту дисертације ћемо сматрати да је програмски пакет попут *MATLAB*-а и његовог додатка за управљање аутономним возилом већ одрадио посао препознавања окружења и на располагање нам ставио „тлоцрт” пута испред возила. Тако се задатак свео „само” на одређивање најоптималнијег начина за пролазак кроз тако постављен „лабиринт”.

„Знањем се могу створити проблеми,  
али се незнањем не могу решити.”

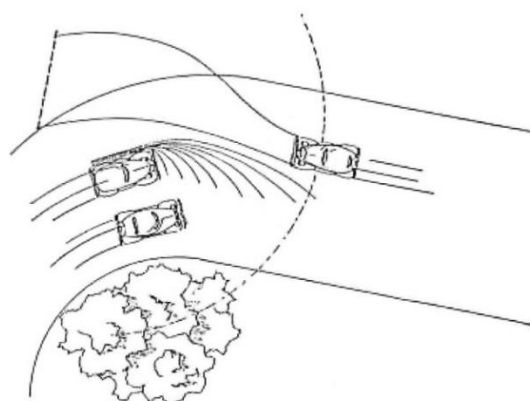
Исак Асимов

## 3. Критеријуми за избор маневра након препознавања препреке

---

### 3.1. Моралне и остале недоумице

Истраживања понашања возача у случају опасности сежу далеко у прошлост. На слици 3.1 приказан је један од случајева приказаних у студији из 1938. године, а која се бави питањем понашања возача у таквим приликама [67].



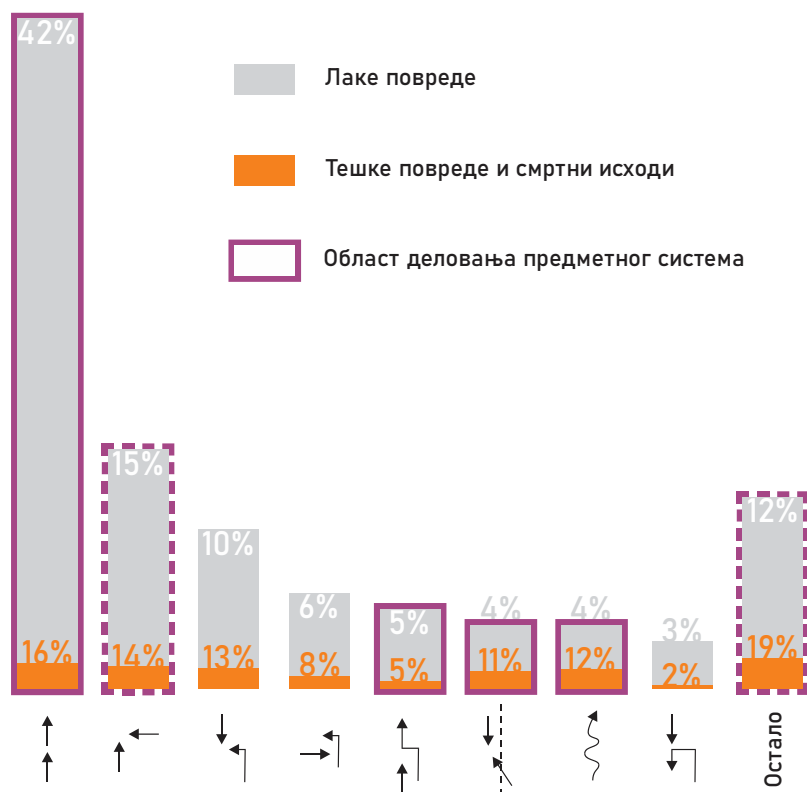
*Слика 3.1 Приказ опасне ситуације и анализе могућег деловања возача у студији из 1938. године [67]*

Слика 3.2 приказује податке о узроцима саобраћајних несрећа<sup>1</sup> који су прикупљени у пројекту *GIDAS* (*German In-Depth Accident Study*) од 1999. до 2015. године [68]. Подаци су прикупљени на територији Савезне републике Немачке, али се у великој мери поклапају са резултатима сличних анализа спроведених широм света. Процентуално учешће у укупном броју лако, али и тешко повређених (укључујући и смртне исходе) особа дато је за различите узроке саобраћајних несрећа (приказане стрелицама које представљају путање возила). На слици су љубичастим оквиром означени узроци несрећа које се желе спречити маневрима описаним у овом поглављу (а које чине око половине свих несрећа).

---

<sup>1</sup> Иако је у прописима који важе у Републици Србији устаљен термин незгода, у овом тексту ће се користити термин несрећа. Често се може чути образложење да не може постојати саобраћајна несрећа, зато што не постоји ни саобраћајна срећа. Аутор ове дисертације сматра да не постоји ни саобраћајна згода.

Саобраћајне несреће чији су узроци сврстани у „остало” уоквирене су испрекиданом линијом. Претпоставља се да међу њима има и оних које би се могле спречити деловањем система који је предмет ове дисертације (несреће изазване одроном, на пример). Испрекиданом линијом су уоквирене и несреће у раскрсници – иако развијани систем није предвиђен за њихово спречавање, уласком у раскрсницу се може сматрати (а претпоставка је и да је тако учињено приликом анализе чији је график резултат) и укључивање возила са споредног пута на саобраћајницу на којој се налази предметно возило.



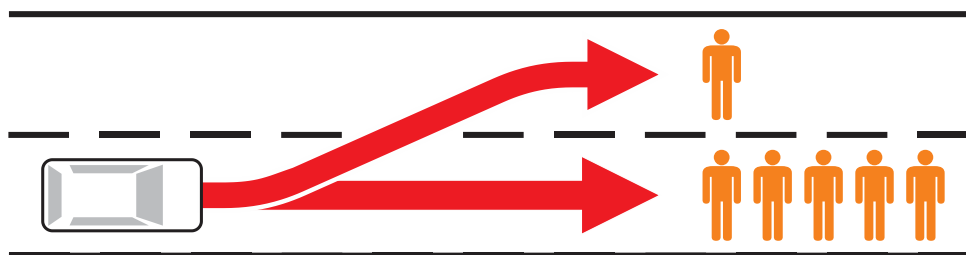
Слика 3.2 Узроци саобраћајних несрећа [68]

Када је у критичној ситуацији потребно изабрати између два могућа маневра, намеће се морална дилема – који од њих ће проузроковати мању штету на возилу и мање последице по возача и путнике, али и друге учеснике у саобраћају. Избора је некада више него два, па дилема лако може постати трилема, кватрилема... Овде се наводи један пример из литературе [69] – у случају препознавања критичне ситуације (нагло кочење возила испред), возач (управљачка јединица у случају аутономног возила) мора изабрати између три маневра и:

- Скренути десно у јарак, што ће проузроковати превртање возила; или
- Продужити право, што ће довести до удара у задњи крај возила испред; или
- Скренути лево, што ће довести до чеоног судара са надолazeћим возилом у суседној траци.

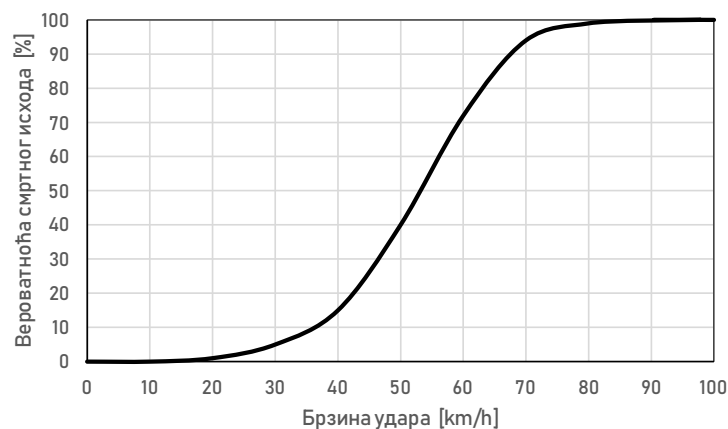
Проблем трамваја, добро познати мисаони експеримент у етици првобитно формулисан (у данас познатом облику) у оквиру расправе око права на абортус [70], може се прилагодити потребама ове дисертације. Уместо могућности да се померањем скретнице спаси пет

особа на рачун смрти једне, овде управљачка јединица може одлучити да остане у траци у којој се налази опасност и угрози животе пет особа, или да скрене у суседну саобраћајну траку где се налази једна особа, као што је приказано на слици 3.3.



Слика 3.3 Морална дилема приликом избора маневра

Сигурно није лако начинити избор, чак и када је исход једне или друге одлуке познат као у датом примеру. Одлучивање додатно отежава чињеница да се исходи одлука управљачке јединице или возача могу само претпоставити. У конкретном случају ово би се могло урадити на основу постојећих анализа бројних саобраћајних несрећа које се спроводе широм света. Тако би се, помоћу дијаграма приказаног на слици 3.4 [71], могла претпоставити вероватноћа смртог исхода приликом наилаaska возила на пешака, уколико бисмо могли претпоставити (још једна ставка која уноси несигурност) брзину удара (управљачка јединица би свакако тежила да је смањи на најмању могућу вредност). Ово отвара питање да ли управљачка јединица (коју је пројектовао човек) треба људске животе да посматра кроз бројеве и проценте, а аутор је мишљења да оно превазилази оквире ове дисертације.



Слика 3.4 Вероватноћа смртог исхода приликом наилаaska возила на пешака [71]

При решавању проблема избора маневра, према мишљењу аутора ове дисертације, морају се узети у обзир следећи чиниоци:

1. Границе пута;
2. Положај предметног возила;
3. Тренутна брзина предметног возила (подужна и попречна);
4. Тренутно убрзање возила (подужно и око вертикалне осе);

5. Процењена путања предметног возила према тренутним поставкама система за управљање, кочење, пренос снаге и погонског агрегата, узимајући у обзир подужну и попречну брзину, подужно и убрзање око вертикалне осе;
6. Положај и претпостављено кретање учесника у саобраћају који могу доћи у контакт са возилом;
7. Процењено стање подлоге;
8. Расположиво време за одлучивање и реаговање;
9. Процењена штета при различитим сценаријима;
10. Процењени ризик при извођењу било ког од маневара.

Модел избегавања препреке који је резултат ове дисертације узима у обзир ставке под редним бројевима 1 до 5 и условно ставку под редним бројем 6. Ставке под редним бројевима 7 до 10 нису узете у обзир и остављају се за нека следећа истраживања.

### 3.2. Време потребно за реаговање возача

Расположиво време за одлучивање и реаговање при управљању возилом се у литератури на енглеском језику назива временским буџетом [72]. Табела 3.1 приказује правце истраживања у области заједничког деловања човека (возача) и машине (управљачке јединице) у циљу безбедног управљања возилом, а у односу на расположиво време [73].

**Табела 3.1** Правци истраживања у зависности од расположивог времена [72]

		
Границе система познате у дужем року (велика вредност расположивог времена)	Краткотрајна претицања и кривине (средња вредност расположивог времена)	Маневри у случају опасности (мала вредност расположивог времена)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Промена режима (мануелни/аутоматски)</li> <li>• Свест о тренутном режиму вожње</li> <li>• Човек-машина интерфејс</li> <li>• Оптерећење возача информацијама</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Перформансе претицања</li> <li>• Човек-машина интерфејс</li> <li>• Упозорења</li> <li>• Ефекти аутоматизације</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Мере за избегавање судара</li> <li>• Интервенција „возача”</li> </ul>

Ова истраживања се спроводе у циљу постизања најбоље могуће синергије приликом описаног заједничког деловања, које је карактеристично за возила чија се аутономија дефинише раније наведеним нивоима 1, 2, 3 и 4. Систем који се развија у оквиру ове дисертације се сматра саставним делом аутономног возила нивоа 5, па интервенција возача није потребна. Време потребно возачу да реагује и преузме контролу ће се стога

овде анализирати само у циљу стицања увида у могуће уштеде у поређењу са конвенционалним и делимично аутономним возилима.

У првом од три приказана случаја, када је расположиво време највеће, истраживања се усмеравају на промену режима вожње (из мануелног у аутоматски и обрнуто) – очекује се да се овакве промене по жељи возача (човека), осим у случају опасности, врше баш у оваквим приликама (приликом вожње на аутопуту, са довољно времена на располагању). Потребно је предузети и све мере потребне да би возач у сваком тренутку био свестан тренутног режима. Овде ће се искористити аналогија са ваздушним саобраћајем – нека возач (човек) буде пилот, а управљачка јединица копилот. Не сме се дозволити ситуација у којој и копилот и пилот мисле да други члан посаде управља авионом. Као што је добра комуникација између пилота и копилота од пресудне важности за безбедност авиона и путника у њему, тако је и комуникација између возача (човека) и управљачке јединице (машине) основа за безбедно кретање аутоматизованог возила (ово се посматра кроз интерфејс између човека и машине). Додатну пажњу потребно је посветити и мерама за спречавање преоптерећења возача информацијама које добија од управљачке јединице. Оне га не смеју омести у вожњи, али ни у праћењу саобраћаја када возилом управља управљачка јединица.

Други приказани случај, који возачу обезбеђује средњу вредност расположивог времена, и даље захтева да се пажња посвети интерфејсу између човека и машине (сада са акцентом на упозорења која се дају возачу). Морају се пратити утицаји аутоматизације, укључујући и оне на перформансе претицања (које не би смеле бити лошије од перформанси приликом претицања којим управља човек).

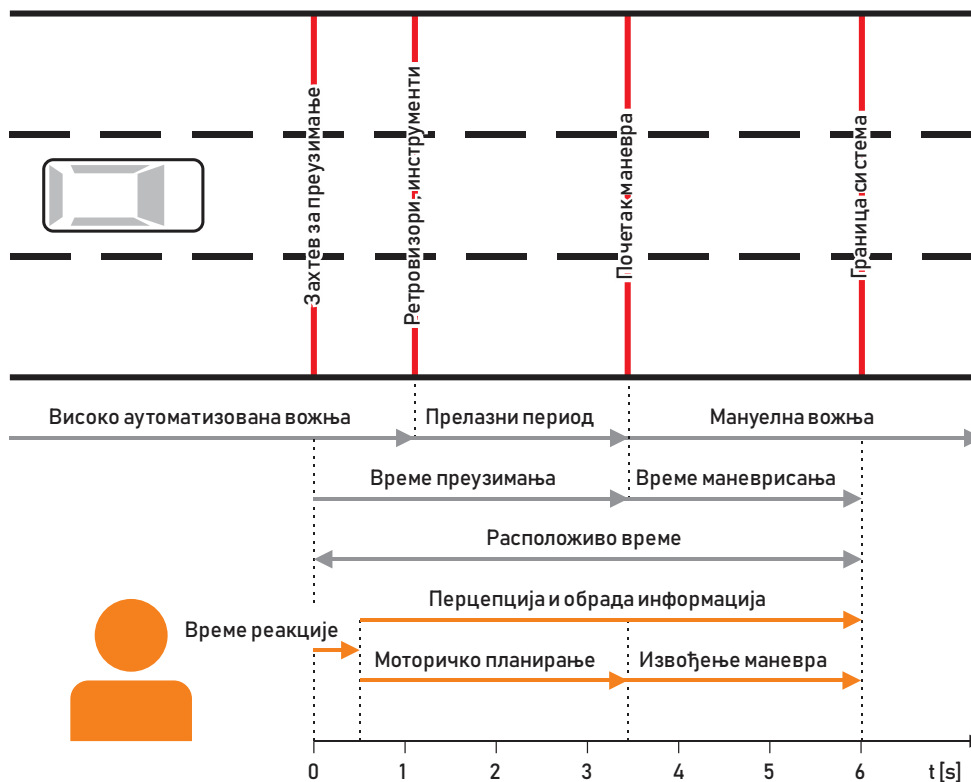
Трећи случај, који је илустрован приказом трактора који изненада излази на пут, а који је део рекламног материјала за систем компаније *ZF* под називом *Emergency Steering Control* [73], одговара предмету истраживања ове дисертације. Као што је наведено у табели, испитивања је за овај случај потребно усмерити на мере за избегавање судара и интервенције возача, односно управљачке јединице – маневре које је потребно извести за избегавање судара или ублажавање његових последица.

Када возило није у стању да аутономно реагује на насталу опасност, од возача се захтева да преузме управљање возилом. Слика 3.5 приказује процес преузимања контроле над возилом од стране возача [72]. У овом поглављу ће се возачем који преузима управљање у случају опасности сматрати управљачка јединица чији је задатак да управља системима за кочење, управљање, погонским агрегатом и системом за пренос снаге.

**Табела 3.2** Расположено време и време преузимања према различитим истраживачима

Извор	Критеријуми		Расположиво време [s]	Време преузимања [s]
	Педала кочнице	Точак управљача		
[74]	> 0%	-	4,15, 4,65, 5,15	1,9
[75]	> 10%	> 2°	5, 7	2,1, 2,9
[76]	> 0%	> 2°	7	2,4
[77]	> 10%	> 2°	7	2,9
[78]	> 0%	4°/s	>10	8,8





Слика 3.5 Преузимање од стране возача у случају потребе [72]

У оквиру студије [72] направљен је и преглед расположивог времена и времена преузимања контроле над возилом као резултат неколико истраживања. Овај преглед, приказан у табели 3.2, даје корисне информације о потребном времену за извођење појединих акција, али и о потенцијалној уштеди у времену када ове маневре спроводи управљачка јединица уместо човека (претпоставља се да ће њој бити потребно знатно мање времена за одлуку него што је то потребно човеку).

### 3.3. Основ за дефинисање критеријума

Као основ за дефинисање критеријума за систем који се развија могу се користити већ постојећи прописи. Чињеница је да прописи не успевају у потпуности да прате развој технологије – потребно је да протекне одређено време да би се развијени системи одобрили за употребу, али се то чини пре свега због осигурања безбедности свих учесника у саобраћају (не сме се дозволити употреба недовољно испитаних система).

Светски форум за хармонизацију правилника за возила (*World Forum for Harmonization of Vehicles Regulations – WP.29*) покреће и спроводи активности у сврху глобалне хармонизације и развоја техничких правилника за возила [79]. Овај форум је у јуну 2018. променио област деловања Радне групе за кочење и ходне системе (*Groupe de Rapporteurs en Matière de Roulement et de Freinage – GRRF*) и преименовао је у Радну групу за аутоматизована/аутономна и повезана возила (*Groupe de Rapporteurs pour les Véhicules Autonomes – GRVA*). Области деловања ове групе су [80] (области од интереса у смислу ове дисертације су исписане курзивом и подебљаним словима):

- Безбедност и сигурност аутоматизације и повезивања возила;
- Функционални захтеви;

- Методе валидације аутоматизоване вожње;
- Сајбер безбедност и ажурирање софтвера;
- Системи за бележење података у аутоматизованој вожњи;
- Напредни системи за помоћ возачу:
  - Даљинско маневрисање;
  - *Аутоматски вођене функције управљања*;
- Динамика возила:
  - *Напредни системи за кочење у случају опасности*;
  - Системи за спречавање блокирања точкова за уградњу на мотоцикле;
  - Системи за контролу стабилности.

Деловањем система за контролу стабилности (за који су критеријуми дефинисани у УН правилнику бр. 140 [81]) се неће управљати у оквиру модела који се развија, пошто би то довело до његовог претераног усложњавања. То не значи да систем за контролу стабилности неће функционисати током маневара избегавања препрека – неке од ових маневара би било немогуће избећи без помоћи овог система. Међутим, управљање радом система за контролу стабилности ће се препустити његовој управљачкој јединици, а ефекти његовог деловања ће бити укључени у анализу понашања целокупног возила. Зато ће се пажња посветити само УН правилницима бр. 79 (Једнообразни технички услови за хомологацију возила у погледу система за управљање) [36] и 152 (Једнообразни технички услови за хомологацију моторних возила у погледу напредног система за кочење у случају опасности за уградњу у возила врста М1 и N1) [82], као и *ISO* стандардима који дефинишу тестове за проверу стабилности возила приликом двоструке промене саобраћајне траке, а који ће бити основа за касније дефинисање „универзалног полигона” за проверу могућности возила да безбедно избегне изненадне препреке на путу. Треба напоменути да ови прописи не обухватају све предвиђене могућности система који се развија (може се рећи да су „конзервативни” – пре свега због безбедности учесника у саобраћају), али могу бити добра смерница за дефинисање сопствених критеријума, и у том циљу се и наводе.

### 3.4. Дефинисање критеријума за маневре управљања

Закон о безбедности саобраћаја на путевима Републике Србије [83] дефинише претицање као пролажење учесника у саобраћају поред другог учесника у саобраћају који се креће коловозом у истом смеру, а обилажење као пролажење поред другог учесника у саобраћају који се не помера, објекта или препреке на коловозу. Овај закон прописује следеће услове за претицање и обилажење:

- Претицање или обилажење возач сме да врши само ако тиме не омета нормално кретање возила која долазе из супротног смера када на путу има довољно простора за безбедно извођење тих радњи;
- Возач не сме да врши претицање или обилажење када тиме може угрозити друге учеснике у саобраћају;
- Возач не сме возилом да врши претицање или обилажење:
  - Колоне возила;
  - Ако је возач који се креће иза њега отпочео претицање или обилажење;

- Ако је возач испред њега у истој саобраћајној траци дао знак за претицање или обилажење;
- Ако би тиме угрозио безбедност саобраћаја или ометао саобраћај из супротног смера;
- Ако по извршеном претицању или обилажењу не би могао да се врати у саобраћајну траку којом се кретао пре тога без ометања или угрожавања осталих учесника у саобраћају;
- Зауоставном траком;
- На почетку превоја, на превоју, испред и у непрегледној кривини, осим на коловозу са најмање две саобраћајне траке за кретање возила у истом смеру;
- У тунелу, осим у тунелу са најмање две саобраћајне траке за кретање возила у истом смеру;
- Возила које се приближава пешачком прелазу или га прелази;
- Возила које се зауставило или зауставља ради пропуштања пешака на пешачком прелазу;
- На прелазу пута преко железничке или трамвајске пруге;
- Колоне возила под пратњом;
- Саобраћајном траком за спора возила;
- На месту где је то забрањено саобраћајном сигнализацијом (дозвољено је ради претицања, односно обилажења бицикла, радне машине, трактора, мотокултиватора, односно запрежног возила, под условом да се не ометају други учесници у саобраћају и да се маневар може извести безбедно);
- На начин да прелази возилом преко неиспрекидане уздужне линије при чему користи саобраћајну траку намењену за кретање возила из супротног смера (дозвољено је ради претицања, односно обилажења бицикла, радне машине, трактора, мотокултиватора, односно запрежног возила, под условом да се не ометају други учесници у саобраћају и да се маневар може извести безбедно);
- Обилажење заустављене колоне на путу је забрањено ако се возач након обилажења не би могао безбедно укључити на саобраћајну траку намењену кретању возила у смеру у коме се он креће;
- Возач који претиче дужан је да своје возило држи на потребном растојању и одстојању од возила које претиче, тако да га не омета нити угрожава друге учеснике у саобраћају;
- После претицања или обилажења возач је дужан да се, без ометања или угрожавања осталих учесника у саобраћају, врати у саобраћајну траку којом се кретао пре тога.

Може се закључити да је маневар претицања, односно обилажења потребно спровести за што краће време, не угрозивши при томе безбедност осталих учесника у саобраћају, али и путника у возилу које изводи маневар. Шпански закон о безбедности саобраћаја је у претходним верзијама прописивао да се претицање мора извршити за мање од петнаест секунди [84]. Група аутора [84] препоручује ограничење времена трајања сваке од три фаза претицања – прве, која траје до тренутка када предњи крај возила које претиче постане паралелан са задњим крајем претицаног возила, на 3 s, друге, која се завршава када задњи крај возила које претиче постане паралелан са предњим крајем претицаног возила, на 2 s и

треће, која траје до тренутка повратка возила у своју саобраћајну траку, на 3 s. Праћењем понашања возача утврђено је да просечно време потребно за промену саобраћајне траке (маневар који можемо посматрати као прву или трећу фазу претицања) износи 5 s, не укључујући време потребно за реакцију возача [85].

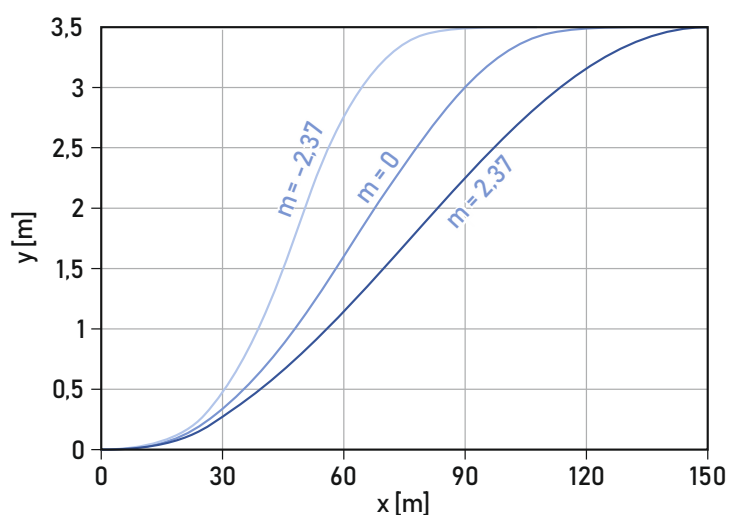
Минимална вредност времена потребног за извођење маневра промене саобраћајне траке може се одредити и на основу дефинисаног максималног попречног убрзања као [86]:

$$\Delta T > 2,4025 \sqrt{\frac{\Delta y}{a_{y,\max}}},$$

где је:

$\Delta y = 3,5$  m – ширина саобраћајне траке.

За граничне вредности бочног убрзања од 1, 2 и 4 m/s<sup>2</sup>,  $\Delta T$  износи 4,49, 3,17 и 2,24 s, редом. Прве две вредности представљају границе удобности према различитим ауторима – 1 m/s<sup>2</sup> према [87] и 2 m/s<sup>2</sup> према [84], док вредност од 4 m/s<sup>2</sup> одговара предложеној граничној вредности у оквиру предлога за измену одредби УН правилника бр. 79 које се тичу аутоматизованог маневра у критичној ситуацији, што ће бити наведено касније у тексту. У већ поменутој студији [86] путања за једноструку промену саобраћајне траке дефинисана је параметрисаним полиномом петог степена приказаним на слици 3.6. Дефинисање путање коришћењем одговарајућих функција предмет је следећег поглавља, а овде се наводи само ради сагледавања утицаја трајекторије на вредности попречног убрзања – приказано смањење вредности параметра полинома од 2,37 ка –2,37, при непромењеној вредности брзине возила, утицаће на пораст попречног убрзања.



Слика 3.6 Параметрисани полином петог степена као путања једноструке промене саобраћајне траке [86]

У оквиру исте студије постављени су и следећи услови за једноструку промену саобраћајне траке:

- Функција  $y(x)$  мора бити монотона (возило се може само удаљавати од изворне саобраћајне траке);

- Брзина кретања возила мора бити мања од највеће дозвољене на датој деоници пута (аутор ове дисертације би овај услов изменио тако да брзина мора бити мања или једнака највећој дозвољеној);
- Подужно убрзање мора бити мање од граничне вредности која обично има вредност  $2 \text{ m/s}^2$  (у оригиналном тексту је наведена вредност од  $2 \text{ g}$ , али је очито у питању грешка – путничка возила не могу постићи оволика бочна убрзања; у другој студији, која са предметном дели двојицу аутора, као граница удобности се наводи вредност  $0,18 \text{ g}$  [88]);
- Максимално успорење мора бити мање од границе удобности  $0,8 \text{ g}$ .

### 3.4.1. УН правилник бр. 79

УН правилник бр. 79 се, као и већина других УН правилника, редовно унапређује како би пратио развој технологије. Тако су измене новијег датума у овај правилник уврстиле и услове које морају испуњавати системи за управљање који део свог функционисања препуштају аутоматизацији – аутоматски вођене функције управљања и функције управљања у случају опасности.

Битно је напоменути да се сва испитивања ових аутоматских функција обављају на асфалтној или бетонској подлози која обезбеђује добро приањање – не постоји обавеза да системи функционишу у условима смањеног приањања.

#### 3.4.1.1. Аутоматски вођена функција управљања

Аутоматски вођена функција управљања (*Automatically Commanded Steering Function – ACSF*) у смислу овог правилника означава функцију у оквиру електронског управљачког система код које активирање управљачког система може бити резултат аутоматске оцене сигнала покренуте унутар возила, могуће у комбинацији са елементима пасивне инфраструктуре, да би се произвело деловање у циљу помоћи возачу. Правилник даје поделу ових аутоматских функција у неколико категорија, по начину функционисања и могућностима. Две су категорије чије се функционисање може упоредити са функционисањем система чији је развој циљ ове дисертације:

- **Аутоматски вођена функција управљања категорије Ц** означава функцију коју покреће возач и која може извести једноструки бочни маневар (нпр. промену саобраћајне траке) ако то нареди возач;
- **Аутоматски вођена функција управљања категорије Е** означава функцију коју покреће возач и која може континуирано утврђивати могућност извођења неког маневра (нпр. промене саобраћајне траке) и извршавати те маневре током дужег временског периода без додатне возачеве наредбе/потврде.

Захтеви за аутоматске вођене функције управљања категорије Е још увек нису дефинисани у УН правилнику бр. 79. Стога ће се навести захтеви за категорију Ц, који могу бити добра смерница за дефинисање захтева у каснијем делу текста.

Активирање аутоматски вођене функције управљања од стране возача може бити могуће само на путевима на којима је пешацима и бициклистима забрањено кретање и код којих су саобраћајне траке (има их најмање две у једном смеру) за различите смерове

кретања физички одвојене. Систем мора препознати овај услов на најмање два независна начина.

Бочно убрзање које проузрокује систем изводећи маневар промене саобраћајне траке не сме:

- Повећати укупно бочно убрзање (на пример услед кретања возила у кривини) за више од  $1 \text{ m/s}^2$ ; и
- Проузроковати да укупно бочно убрзање возила превазиђе вредности наведене у табели 3.3.

Средња вредност (осредњена током периода од пола секунде) трзаја који узрокује систем не сме прећи  $5 \text{ m/s}^3$ . Маневри промене траке морају се завршити за мање од 5 секунди за возила категорије  $M_1$  и  $N_1$ .

**Табела 3.3** Граничне вредности убрзања [ $\text{m/s}^2$ ] за возила категорије  $M_1$  и  $N_1$

Брзина [km/h]	[10÷60]	(60÷100]	(100÷130]	> 130
Дефинисано максимално бочно убрзање	0÷3	0,5÷3	0,8÷3	0,3÷3

У оквиру Радне групе за аутоматизована/аутономна и повезана возила дато је неколико предлога [88-90] за повећање вредности максималног бочног убрзања на  $4 \text{ m/s}^2$  у критичним ситуацијама (под условом да је систем у стању да задржи средишњи положај у траци), а узимајући у обзир полупречник кривине, брзину возила (различити предлози обухватају различите опсеге брзина кретања возила у којима би ово било дозвољено) и временске прилике (систем би морао бити способан да препозна временске услове који би негативно утицали на перформансе возила, као што су снег, киша и лед, када би важила ограничења наведена у табели 3.3).

Аутоматски вођена функција управљања не сме довести возило у критичну ситуацију. Ситуација се сматра критичном ако је започет маневар промене траке и ако се возило које се приближава (крећући се у истом смеру) у траци у коју се предметно возило жели престојити мора успорити интензитетом већим од  $3 \text{ m/s}^2$ , 0,4 секунде након што је започет маневар промене траке, како би се обезбедило да удаљеност између два возила не падне испод вредности која одговара раздаљини коју би возило које мења саобраћајну траку прешло за једну секунду. Резултујућа критична удаљеност између два возила на почетку маневра промене траке израчунава се следећом формулом:

$$S_{krit} = (v_{sus} - v_{pred})t_{pksus} + \frac{(v_{sus} - v_{pred})^2}{2a_{sus}} + v_{pred} \cdot t_{bezp}$$

где је:

$v_{sus}$  – стварна брзина возила које се приближава у суседној траци или  $130 \text{ km/h}$  (мања од две вредности);

$v_{pred}$  – стварна брзина предметног возила;

$a_{sus}$  – успорење возила које се приближава ( $3 \text{ m/s}^2$ );



$t_{pksus}$  – време које је протекло од почетка промене саобраћајне траке и након чијег истека започиње успорење возила које се приближава (0,4 s);

$t_{bezb}$  – време које обезбеђује безбедно растојање између возила након успорења возила које се приближава у суседној траци (1 s).

Аутоматски вођена функција управљања категорије Ц мора бити у стању да детектује возила која се приближавају са задње стране у суседној траци до удаљености  $S_{zad}$ , коју декларише произвођач возила, а која не сме бити мања од 55 m. Провера удаљености на којој систем детектује возила се врши детектовањем возила категорије L3.

Минимална брзина  $v_{smin}$  при којој је аутоматски вођеној функцији управљања категорије Ц дозвољено да изводи маневар промене траке, израчунава се помоћу најмање удаљености  $S_{zad}$ , користећи следећу формулу:

$$v_{smin} = a_{sus} (t_{pksus} - t_{bezb}) + v_{sus} - \sqrt{a_{sus}^2 (t_{pksus} - t_{bezb})^2 - 2a_{sus} (v_{sus} \cdot t_{bezb} - S_{zad})},$$

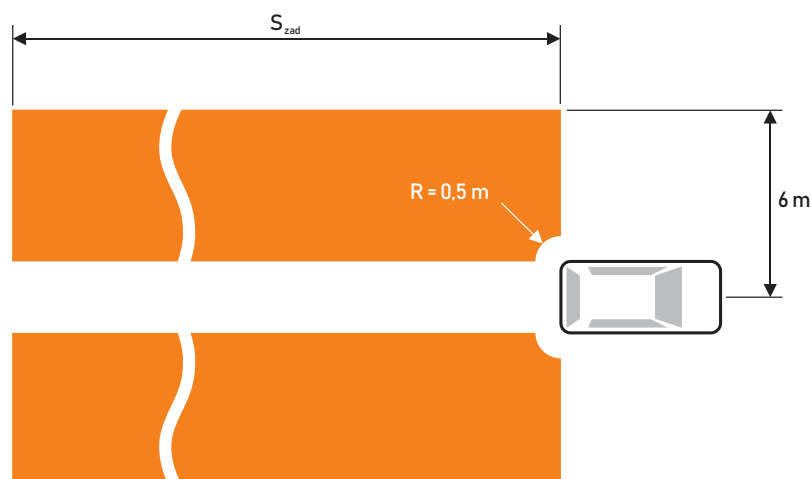
где је:

$S_{zad}$  – најмање растојање декларисано од стране произвођача [m];

$v_{sus}$  – брзина возила које се приближава у суседној траци (36,1 m/s = 130 km/h).

Без обзира на наведене захтеве, аутоматски вођена функција управљања категорије Ц може извести маневар промене траке при брзини мањој од  $v_{smin}$ , под условом да су испуњени следећи услови:

- Систем је открио друго возило у суседној траци у коју је планиран прелаз на удаљености мањој од  $S_{zad}$ ;
- Ситуација се не сматра критичном (нпр. при малим разликама у брзини и  $v_{sus} < 130$  km/h);
- Декларисана вредност  $S_{zad}$  је већа од израчунате вредности  $S_{krit}$ .



Слика 3.7 Површина детекције возила на тлу

Минимална захтевана површина детекције возила на нивоу тла приказана је на слици 3.7. Испитивања аутоматски вођених функција управљања потребно је обавити при брзини предметног возила од 130 km/h.

За потребе испитивања ове функције, ширина саобраћајне траке мора бити најмање 3,5 m.

### 3.4.1.2. Функција управљања у случају опасности

Функција управљања у случају опасности (*Emergency Steering Function – ESF*) означава управљачку функцију која може аутоматски открити потенцијални судар и аутоматски активирати систем управљања возилом у ограниченом трајању, како би се возило усмерило тако да се избегне или ублажи судар:

- Са другим возилом које се креће у суседној траци (у оба смера); и
  - Скреће према путањи предметног возила; и/или
  - Према чијој путањи скреће предметно возило; и/или
  - Према којем је возач покренуо маневар промене саобраћајне траке;
- Са препреком која се налази на путањи предметног возила или у случају да је препрека на путањи предметног возила неизбежна.

Функција управљања у случају опасности сме започети интервенцију само у случају када је препознат ризик од судара.

Свако возило опремљено функцијом управљања у случају опасности мора бити опремљено средствима за праћење окружења у саобраћају (ознаке трака, ивице пута, други учесници...) у складу са дефинисаним подручјем употребе. Ова средства треба да прате окружење у сваком тренутку када је функција управљања у случају опасности активна.

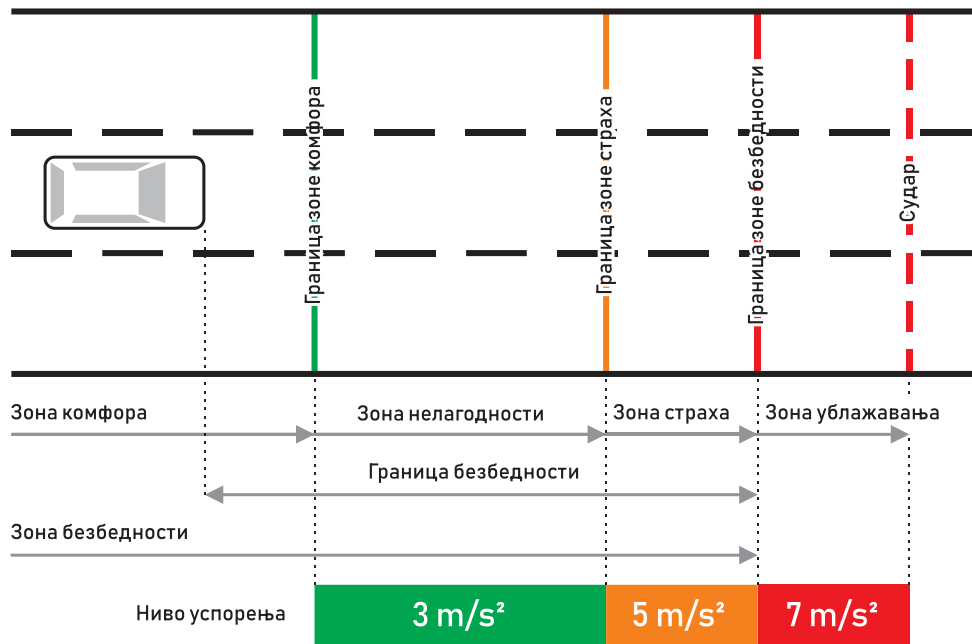
Приликом интервенције функције управљања у случају опасности на путу или траци која је ограничена ознакама на једној или обе стране, покренути аутоматски маневар не сме довести до напуштања саобраћајне траке. Међутим, ако интервенција започне током промене саобраћајне траке коју обавља возач или током ненамерног скретања у суседну траку, систем може усмерити возило назад у првобитну траку. На овом месту се мора напоменути да овај критеријум није прихватљив за систем који се развија у оквиру ове дисертације – његов циљ јесте да усмери возило да напусти саобраћајну траку и да се након избегавања судара врати у њу.

Интервенција функције управљања у случају опасности не сме довести до слетања возила са пута (иако би овакав маневар некада можда био најбоље решење) или судара са другим учесником у саобраћају.

## 3.5. Дефинисање критеријума за маневре кочења

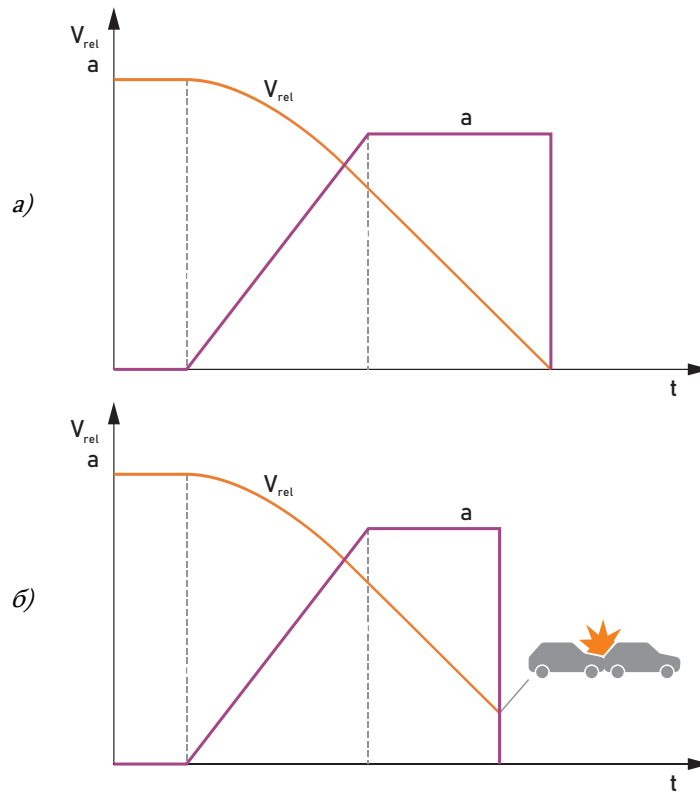
### 3.5.1. Избегавање и ублажавање судара

Слика 3.8 приказује зоне приликом кочења у случају опасности које треба имати у виду приликом пројектовања контролера чији би задатак био да кочењем избегне судар или ублажи његове последице [92]. Пожељно је да се зона означена црвеном бојом избегне када год је то могуће.



Слика 3.8 Зоне у случају избегавања судара [92]

Слика 3.9 приказује два могућа сценарија приликом маневра кочења у циљу смањења релативне брзине. У првом случају је релативна брзина доведена на вредност нула и судар је избегнут. У другом случају, нажалост, то није било могуће, али је барем вредност релативне брзине смањена, пожељно на довољно низак ниво који би спречио озбиљније последице по путнике.



Слика 3.9 Дијаграми релативне брзине и успорења: а) када се судар избегава; б) када се судар ублажава [93]

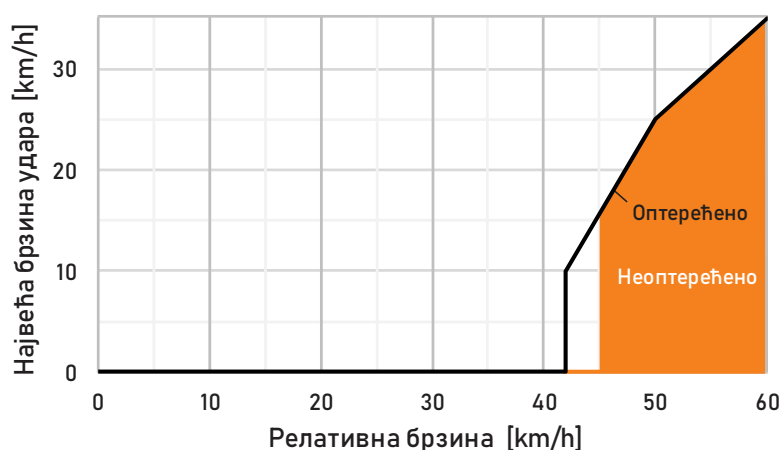
Модел развијен за потребе ове дисертације спроводи двоструку промену саобраћајне траке без промене брзине кретања. Изводи из УН правилника бр. 152 и критеријуми за избор маневра кочења ће стога бити дати само ради оријентације.

### 3.5.2. УН правилник бр. 152

УН правилник бр. 152 дефинише захтеве за напредне системе за кочење у случају опасности (*Advanced Emergency Braking Systems – AEBs*) уграђене у возила категорија М<sub>1</sub> и N<sub>1</sub>, преваходно намењене за употребу у градским условима саобраћаја. Овај правилник је први пут објављен 4. фебруара, а ступио на снагу 22. фебруара 2020. године. Према захтевима овог правилника, напредни систем за кочење мора бити у стању да аутоматски препозна потенцијални судар, пружи возачу одговарајуће упозорење и активира кочни систем како би успорио возило у циљу избегавања или ублажавања последица судара у случају да возач не реагује на упозорење. Правилник се односи на системе који могу спречити или ублажити судар са возилом испред у саобраћајној траци и пешацима на пешачком прелазу.

Као и код аутоматских функција управљања, и овде се сва испитивања система обављају на асфалтној или бетонској подлози која обезбеђује добро приањање (при чему је овде дефинисано да подлога мора омогућити постизање вршне вредности кочног коефицијента у износу од 0,9). Дакле, ни за ове системе не постоји обавеза да функционишу у условима смањеног приањања.

Када напредни систем за кочење у случају опасности открије могућност скорог судара, мора послати захтев систему за кочење за остваривање успорења од најмање 5 m/s<sup>2</sup>. Систем мора бити активан барем у опсегу брзина од 10 до 60 km/h (за спречавање судара са возилом), односно 20 до 60 km/h (за спречавање судара са пешаком), и при свим условима оптерећења возила, осим ако се ручно не деактивира.



Слика 3.10 Највећа релативна брзина удара за возила категорије М<sub>1</sub>

Када је систем активиран, мора бити у стању да обезбеди да релативна брзина удара не пређе вредности приказане на слици 3.10:

- Код судара са незаклоњеним непомичним или препрекама које се крећу константном брзином;

- Код судара са незаклоњеним пешаком који прелази пешачки прелаз брзином чија попречна (у односу на пут) компонента није већа од 5 km/h (у недвосмисленој ситуацији – нпр. када нема више пешака на прелазу);
- Код судара са незаклоњеним бициклом који прелази улицу попречно константном брзином од 10 to 15 km/h (у недвосмисленој ситуацији – нпр. када нема више бицикала);
- На равним, хоризонталним и сувим путевима;
- За оптерећено и неоптерећено возило;
- Када растојање уздужних равни симетрије возила чији се судар предвиђа, односно уздужне равни симетрије возила и предвиђене тачке удара у пешака, односно вратила педала бицикла, није веће од 0,2 m;
- У условима осветљења околине од најмање 1000 lux (за спречавање судара са возилом), односно 2000 lux (за спречавање судара са пешаком и бициклом) без директног заслепљујућег зрака сунчеве светлости;
- У одсуству временских прилика које могу утицати на динамичко понашање возила (олуја, ниске температуре...);
- Када се возило креће на правцу.

Разуме се да тражене перформансе приказане на слици 3.10 не могу бити у потпуности постигнуте када горе наведени услови нису испуњени. Међутим, систем не сме искључити или драстично променити стратегију управљања у другим условима.

### 3.5.3. Критеријуми за маневре кочења

Као критеријум за започињање кочења може се узети временски размак од препреке на ком треба започети кочење, а који се одређује на основу следеће једначине:

$$t_{pk} = t_{odz} + \frac{d}{v_{rel}}.$$

Ако се растојање између возила и препреке изрази као пут кочења максималним успорењем од почетне релативне брзине  $v_{rel}$  до релативне брзине која је једнака нули:

$$d = \frac{v_{rel}^2}{2a_{max}},$$

Једначина постаје:

$$t_{pk} = t_{odz} + \frac{v_{rel}}{2a_{max}}.$$

У обзир треба узети и утицај трзаја, па једначина постаје (уз апроксимацију због избегавања нумеричке интеграције):



$$t_{pk} = t_{odz} + \frac{v_{rel}}{2a_{max}} + \frac{t_j}{2},$$

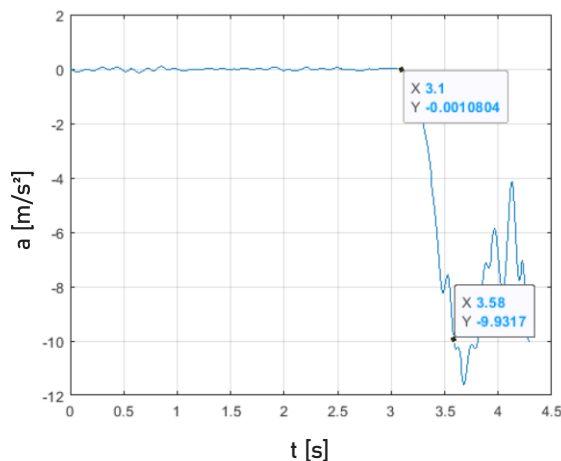
ОДНОСНО

$$t_{pk} = t_{odz} + \frac{v_{rel}}{2a_{max}} + \frac{a_{max}}{2j_{max}}.$$

где је:

- $t_{pk}$  – пројектовано време до судара у ком треба започети кочење;
- $t_{odz}$  – време одзива система (0,1 s) [94];
- $d$  – растојање возила и препреке;
- $v_{rel}$  – релативна брзина возила и препреке;
- $a_{max}$  – највеће оствариво успорење;
- $t_j$  – време повећања због трзаја;
- $j_{max}$  – највећа вредност трзаја.

Типичне вредности максималног трзаја износе 16 до 25  $m/s^3$  (што значи да је за повећање успорења од 0 до 10  $m/s^2$  потребно 0,4 до 0,6 s) [93]. На слици 3.11 је приказан насумично изабран снимак успорења са *Euro NCAP* теста спроведеног 2019. године [93]. На њему се може видети да је возилу било потребно 0,48 s да оствари успорење од 9,9  $m/s^2$ .



Слика 3.11 Снимак убрзања из насумично изабраног *Euro NCAP* теста спроведеног 2019.

### 3.6. Кочити или скретати?

Слика 3.12 показује три зоне које представљају могућност избегавања судара (или ублажавања његових последица) у зависности од растојања од непокретне препреке  $d$  и брзине возила  $v$  [95]. Уколико се комбинација брзине и растојања налази у зеленој зони, могуће је кочење до заустављања пре препреке или релаксирана промена саобраћајне траке. У наранцастој зони је судар могуће избећи променом саобраћајне траке. Црвеном бојом је означена зона у којој није могуће ни заустављање возила, ни промена саобраћајне траке. Бројем један је означен маневар кочења ради остваривања најмање брзине при којој

је могуће извршити промену траке. Бројем два је означен маневар кочења ради смањења брзине удара, а самим тим и његових последица.



Слика 3.12 Зоне које дефинишу могуће маневре [95]

У литератури се могу пронаћи различити предлози за избор између скретања или кочења. Не треба изгубити из вида чињеницу да на избор маневра свакако утиче заузетост суседне саобраћајне траке – уколико у њој не постоји слободан простор, једина опција остаје кочење у покушају заустављања или смањења брзине удара.

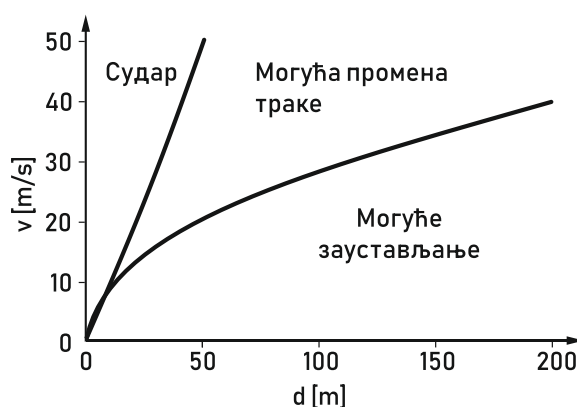
Према [84] маневар (био он скретање или кочење) је потребно покренути када је процењено време до судара мање од 6 s. У случају скретања, аутори студије препоручују повећање брзине да би се маневар извео за што краће време. Предлог аутора друге студије [96] је да се максимална брзина за извођење маневра скретања одреди као:

$$v_{\max} \leq d \sqrt{\frac{a_{y\max}}{2\Delta y}} = d \sqrt{\frac{\varphi g}{2\Delta y}},$$

где је:

$d$  – раздаљина до препреке

$\Delta y$  – потребно попречно померање возила

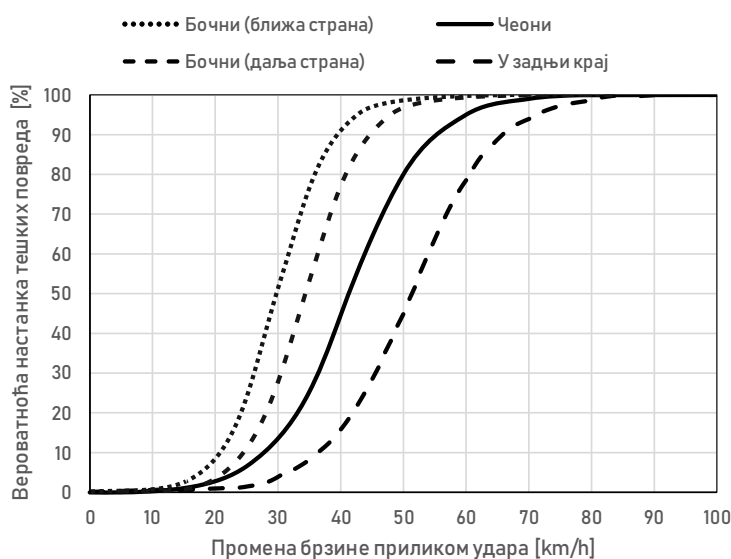


Слика 3.13 Зоне које дефинишу могуће маневре додатно дефинисане бројним вредностима које су резултат симулације [94]

Слика 3.13 представља зоне приказане на слици 3.12, али са бројним вредностима добијеним симулацијом [95]. Аутори ове студије сматрају да је оптимални маневар промене саобраћајне траке у случају опасности најоштрији могући при датој брзини (онај

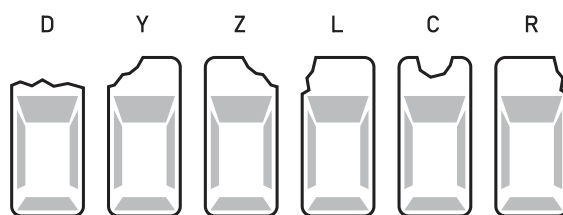
са највећим односом попречног и подужног померања возила), узимајући у обзир својства возила и подлоге. Растојања од препреке при којима их је могуће избећи су израчуната управо за овакве, најоштрије могуће, маневре. Нагиб криве која представља границу између зоне у којој је судар неизбежан и зоне у којој се маневром промене саобраћајне траке може избећи износи приближно  $1 \text{ s}^{-1}$ , што значи да маневар мора отпочети најкасније једну секунду пре пројектованог судара, независно од брзине возила, што се поклапа са тврдњом из друге студије [97].

На слици 3.14 [98] приказана је вероватноћа настанка тешких повреда у зависности од промене брзине приликом удара, а за случај чеоног удара, удара у задњи крај возила испред и бочног удара (у страну ближу или даљу путнику). Постоји велики број истраживања на сличну тему, а сва дају криве истог облика, при чему се бројне вредности које дефинишу ове криве незнатно разликују [99,100]. На основу приказа је јасно да најмању опасност са собом носи удар у задњи крај возила испред. Оваква констатација би се вероватно могла чути и од случајног пролазника на улици – подразумевао би да је релативна брзина удара у овом случају најмања. Међутим, са исте слике се може видети да је вероватноћа настанка тешких телесних повреда у случају удара у возило испред са задње стране мања него у случајевима чеоног и бочног судара и при истој вредности промене брзине посматраног возила. Мишљење је аутора ове дисертације да увек треба тежити, када га је већ немогуће избећи, да удар буде у возило испред са задње стране, нарочито имајући у виду да ће овакве ударе вероватно карактерисати најмање вредности релативне брзине, али и промене брзине посматраног возила. Удари у возило које се у суседној траци крећу у истом смеру као посматрано возило такође могу бити карактерисани нижим вредностима ових брзина, али их треба избегавати због немогућности прецизног усмеравања оваквих удара, па су окретања и превртања на путу веома могућа, а овакве сценарије свакако треба избећи. Постоје, наравно и анализе последица превртања возила [101], али је тешко, а вероватно и немогуће, проценити у ком случају ће доћи до превртања возила и на који начин ће се оно испољити (колико пута ће се, на пример, возило преврнути пре него што се заустави).

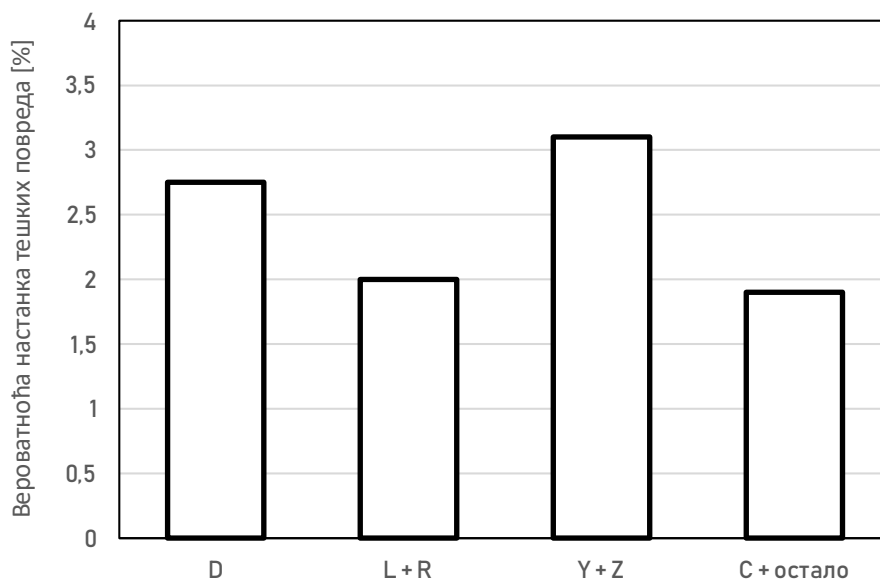


Слика 3.14 Вероватноћа настанка тешких повреда приликом удара возила у препреку [98]

Удари предњег краја возила у подужном правцу се, према месту удара и расподели енергије деформација могу поделити на неколико категорија. Једна од подела дата је на слици 3.15 [102] и дефинисана је за потребе Националног система за узорковање података о возилима Сједињених Америчких Држава. Вероватноћа настанка тешких повреда у зависности од категорије удара предњег краја возила (дефинисане према слици 3.15) дата је на слици 3.16 [102]. Посматрајући ову слику, неко би могао закључити да се вероватноћа настанка тешких повреда може смањити отклоном возила од осе возила у које удара, пошто је она мања за ударе категорија  $L$  и  $R$ , али се лако може десити да овакви удари заправо прерасту у ударе категорија  $Y$  и  $Z$ , који са собом носе већу опасност. Стога, када је већ судар неизбежан, треба тежити чеоном удару категорије  $D$ . Поред већих деформација возила које смакнути судари могу узроковати, додатну опасност у случају ових судара представља могућност губљења стабилности.



Слика 3.15 Подела удара предњег краја возила у подужном правцу [102]



Слика 3.16 Вероватноћа настанка тешких повреда у зависности од категорије удара предњег краја возила [102]

Модел развијен за потребе дисертације ће у сваком случају покушавати да препреку избегне скретањем – узимање у обзир процене ризика приликом могућег судара превазилази оквире дисертације.

### 3.7.Развој критеријума у будућности

Предлози за измену захтева и начина испитивања у овом поглављу описаних система дају се на свакој од седница радних група у оквиру *WP.29* и од тренутка започињања писања

овог поглавља било их је више десетина. За очекивати је да оволики број предлога уроди и чешћим изменама правилника него што је то случај са правилницима који описују конвенционалне системе возила. То је и очекивано имајући у виду да се ради о системима чији брзи технолошки развој законодавство веома тешко може да прати у стопу. Организација *Euro NCAP* је у септембру 2020. године објавила прву верзију протокола за испитивање и оцену система за аутоматизовану вожњу [103], а као што је то случај и са осталим безбедносним системима, очекује се да ће критеријуми постајати све строжи и строжи.

Акцентат ће се ставити и на испитивање понашања система у случају квара неког од његових елемената (на пример давача), али и на негативан утицај околине на дејство система (недовољно видљиве линије које одвајају саобраћајне траке, на пример) [104].

Оно што аутор ове дисертације са сигурношћу тврди, јесте чињеница да ће се системи развијати у правцу да у свакој ситуацији изведу маневар који са собом носи најмањи могући ризик (*minimal-risk manoeuver*) [105-107]. Остаје питање утврђивања који то маневар са собом носи најмањи ризик, али ће се свакако тежити достизању нивоа нултог ризика у друмском саобраћају.

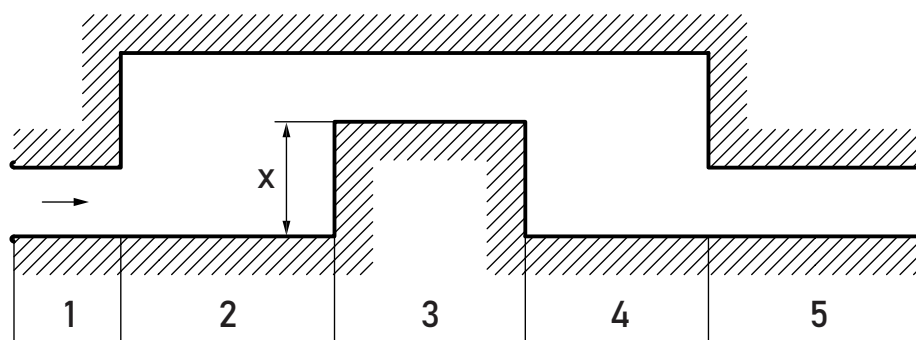
## 4. Одређивање најпогодније трајекторије возила

Трајекторија, за разлику од путање, поред информација о положају тачака кроз које возило пролази, дефинише и векторе брзине у свакој од тачака. За постизање оптималног маневра избегавања препреке потребно је изабрати оптималну трајекторију, која обухвата оптималну путању и оптималне вредности брзине возила у свакој њеној тачки. На почетку је потребно усвојити оквир за параметрисано дефинисање путање – моделом којим се, променом параметара, може представити било која од могућих путања приликом извођења потребног маневра. Као основ за дефинисање таквог модела послужиће стандарди *ISO 3888-1* [108] и *ISO 3888-2* [109].

### 4.1. Стандарди *ISO 3888-1* и *ISO 3888-2*

За оцену стабилности и управљивости возила (како у фази употребе, тако и у фази развоја [110]) приликом двоструке промене саобраћајне траке користе се тестови описани у стандардима *ISO 3888-1* (*Double Lane Change Test*) и *ISO 3888-2* (тест „северног јелена”). Ови тестови се спроводе на полигонима приказаним на слици 4.1 и описаним у табели 4.1.

Тест 1 дефинисан у стандарду *ISO 3888-1* изводи се проласком кроз описани полигон, при чему је препоручена брзина уласка у деоницу 1  $80 \pm 3$  km/h, а током трајања теста положај педале „гаса” треба држати у константном положају, колико год је то могуће.



Слика 4.1 Полигон за испитивање према стандардима *ISO 3888-1* и *ISO 3888-2*



Табела 4.1 Мере полигона за испитивање према стандардима ISO 3888-1 и ISO 3888-2

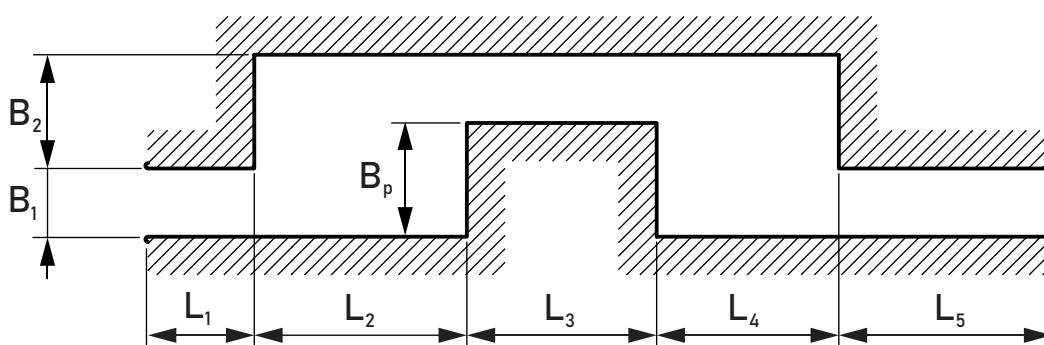
Деоница	Дужина [m]		Ширина [m]	
	ISO 3888-1	ISO 3888-2	ISO 3888-1	ISO 3888-2
1	15	12	1,1b + 0,25	
2	30	13,5		
3	25	11	1,2b + 0,25	b + 1
4	25	12,5		
5	30	12	1,3b + 0,25	min(1,3b + 0,25; 3)
x			3,5	1,1b + 1,25

$b$  – ширина возила

Приликом извођења теста „северног јелена” према стандарду ISO 3888-2 у деоницу 1 се улази у највишем степену преноса који обезбеђује најмање 2000 обртаја замајца погонског агрегата у минути. Два метра након уласка у деоницу 1, потребно је отпустити педалу „гаса” и на тај начин прећи остатак полигона. Све симулације у оквиру ове дисертације, независно од димензија полигона, биће спроведене константном брзином.

#### 4.2. Универзални полигон

Уводи се претпоставка да се свака ситуација у којој возило мора променити саобраћајну траку да би избегло препреку може представити универзалним полигоном приказаним на слици 4.2. Универзални полигон је заснован на полигонима дефинисаним стандардима ISO 3888-1 и ISO 3888-2, а његове димензије зависе од података добијених помоћу давача и камера описаних у претходном поглављу.



$B_1$	ширина траке у којој се налази предметно возило
$B_2$	ширина суседне траке
$B_p$	ширина препреке (мерено од десне ивице траке у којој се возило налази)
$L_1$	пројектовано растојање предметног и возила у суседној траци у тренутку уласка предметног возила у суседну траку
$L_1+L_2$	растојање од предметног возила до препреке
$L_3$	дужина препреке
$L_2+L_3+L_4$	слободна дужина у суседној траци
$L_4+L_5$	слободна дужина после препреке у траци у коју се возило враћа након маневра

Слика 4.2 Универзални полигон

### 4.3. Одређивање путање кроз задате тачке

За конструисање путања аутономних возила користе се различите криве – кружни лукови, полиноми различитог степена, клотоиде (Корнуове, односно Ојлерове спирале, како се још називају), сегменти синусоиде, сплајнови и Безјеове криве, при чему ће се највећа пажња у овом поглављу поклонити последњим двома.

Треба напоменути да се за конструисање аутопутева често користе клотоиде (криве чија је закривљеност пропорционална дужини лука). Ова чињеница би се некоме могла учинити као врло јак аргумент да се ове криве користе и за конструисање путања на тим путевима, али је њихова мана та што се не могу изразити у затвореној форми, што отежава њихово израчунавање [111].

#### 4.3.1. Сплајн и Б-сплајн

Сплајн је савитљиво помагало за цртање кривих, направљено од дрвета, метала или пластике, осмишљено пре свега за потребе бродоградитеља (једно такво помагало приказано је на слици 4.3).



Слика 4.3 Сплајн

У математици, сплајном се назива функција дефинисана део-по-део преко полинома. Крајње тачке подинтервала називају се чворовима. Сплајн степена  $n$  ( $n \geq 1$ ) је функција која је полином степена  $n$  или мањег на сваком подинтервалу и има предодређен степен глаткости. Мора бити непрекидна, а обично има и непрекидне изводе реда до  $k$  за неко  $k$  ( $0 \leq k < n$ ) [112].

Базни сплајн (скраћено Б-сплајн) је сплајн конструисан помоћну основне (базне – отуда и име) функције:

$$c(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i,$$

где је:

$n$  – број контролних тачака  $P_i$ ;

$p$  – степен сплајна;

$u$  – нормализовани параметар криве;

$N_{i,p}$  –  $i$ -та основна функција Б-сплајна.

Б-сплајн има  $n+1$  чворова. За разлику од Безјеових кривих (које ће бити поменуте у следећој тачки), ред Б-сплајн криве не зависи од броја контролних тачака. Могуће су модификације било ког сегмента путање без утицаја на суседне сегменте [113].

Неравномерни рационални Б-сплајн (*Non-uniform rational B-spline – NURBS*) представља Б-сплајн са додељеним тежинским факторима у контролним тачкама. Ово омогућава да се крива приближава жељеним тачкама. Поменута врста сплајна дефинисана је следећим изразом:

$$c(u) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,p}(u) P_i}{\sum_{i=0}^n w_i P_i},$$

где су  $w_i$  тежински фактори (већа вредност приближава путању контролној тачки).

Б-сплајн криве су често коришћене за конструисање путања аутономних возила (на пример у [113] и [114]).

#### 4.3.2. Безјеове криве

Безјеове криве су такође коришћене за конструисање путања аутономних возила у великом броју истраживања. Нека од њих су [115] и [116].

Тим Универзитета Корнел је на раније поменутом *DARPA* изазову 2005. користио Безјеове криве трећег реда за конструисање путање за своје возило [117].

Безјеове криве носе назив по инжењеру Пјеру Безјеу (*Pierre Bézier*) који је 1962. године почео да их користи за конструисање каросерија Реноових возила [118]. Безјеова крива  $n$ -тог реда је дефинисана следећом једначином:

$$c(u) = \sum_{i=0}^n B_{n,i}(u) P_i,$$

где је:

$n$  – број контролних тачака;

$u$  – нормализовани параметар криве ( $0 \leq u \leq 1$ );

$B_{n,i}(u)$  – Безјеова функција спајања  $n$ -тог реда са Бернштајновим базним полиномима за  $i$ -ту контролну тачку  $P_i$ , дефинисана изразом:

$$B_{n,i}(u) = \binom{n}{i} u^i (1-u)^{n-i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i}.$$

Број контролних тачака одређује ред Безјеове криве – Безјеова крива  $n$ -тог реда има  $n+1$  контролних тачака.

Безјеове криве имају повољне карактеристике за цртање путања [115]:

- Увек пролазе кроз прву и последњу контролну тачку;

- Увек су тангентне на линије које повезују суседне контролне тачке у првој и последњој контролној тачки;
- Увек леже унутар конвексне љуске коју дефинишу контролне тачке.

Помоћу Де Кастелжуовог (*Paul de Casteljau*) алгоритма, Безјеова крива се може поделити у сегменте који такође представљају Безјеове криве [115]. Крива која настане на такав начин назива се Безјеовим сплајном.

Безјеове криве нису погодне у ситуацијама када је потребно променити путању, због тога што је број контролних тачака потребно знати унапред [113].

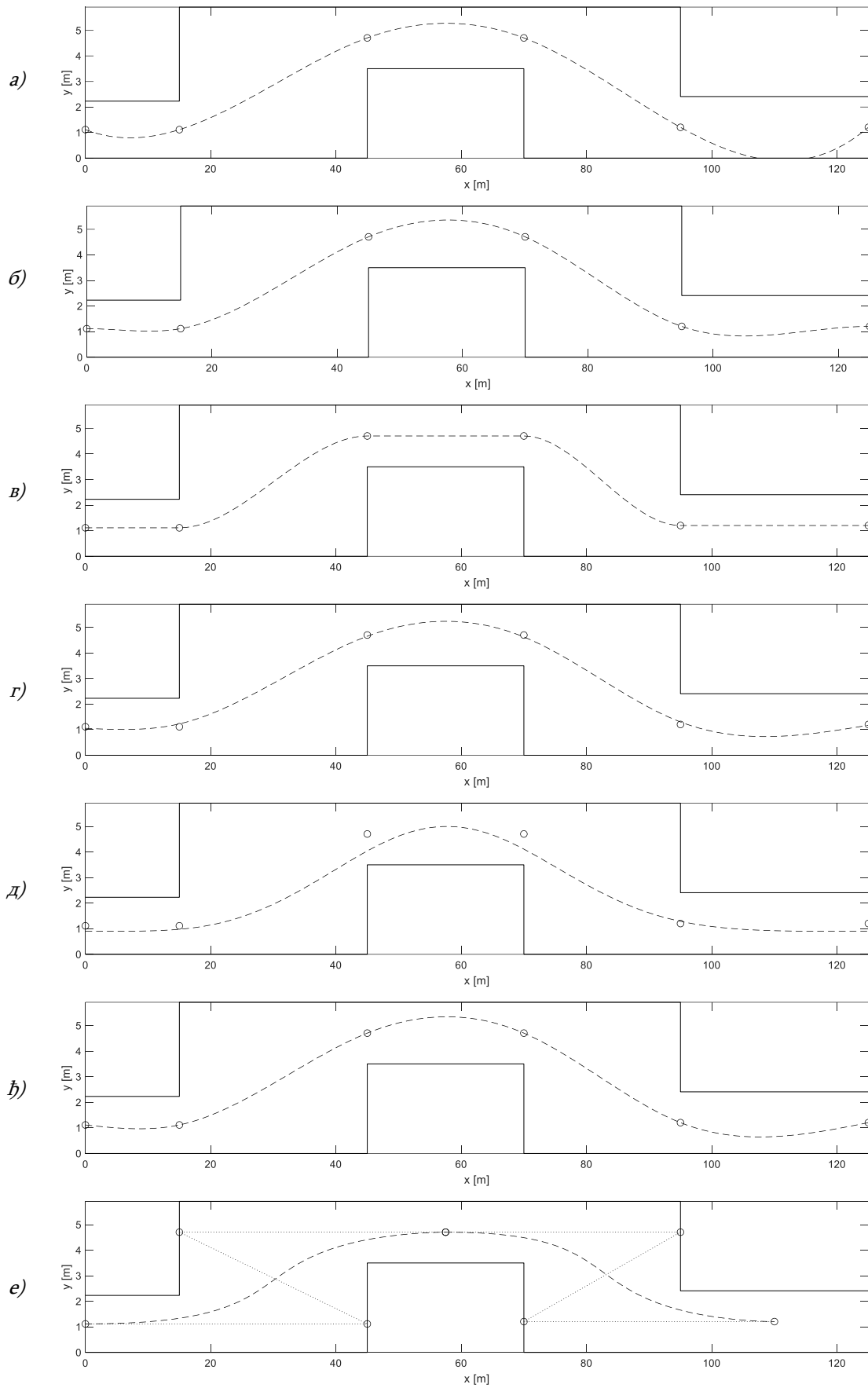
#### 4.3.3. Поређење различитих сплајнова и Безјеових кривих

Слика 4.4 приказује осам различитих путања насталих провлачењем осам различитих кривих кроз, односно поред дефинисаних тачака на полигону прописаним стандардом *ISO 3888-1* у програмском пакету *MATLAB*, користећи функције наведене у табели 4.2.

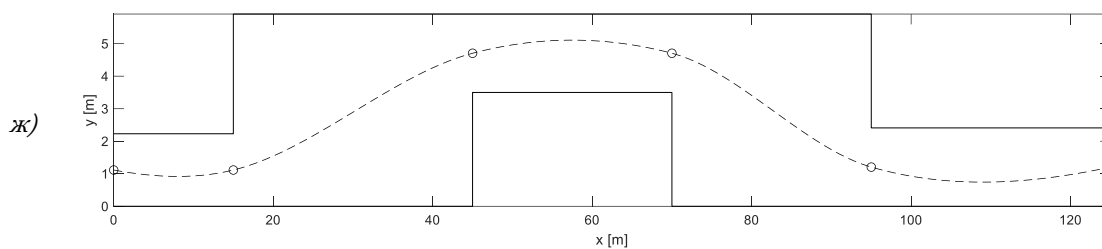
**Табела 4.2** Криве коришћене за дефинисање путање

Крива (са ознаком на сликама 4.4 до 4.6)		<i>MATLAB</i> функција	Додатни параметри	Најмањи полупречник кривине при проласку <i>ISO 3888-1</i> полигона [m]
а)	Кубни сплајн	spline	-	70
б)	Укљештени кубни сплајн	spline	Нагиби на почетку и крају једнаки нули	100
в)	Прекидни кубни Ермитеов интерполациони полином	pchip	-	45
г)	Кубни сплајн (глатки)	csaps	Фактор глаткоће: 0,01	115
д)	Б-сплајн	spmak	Коефицијенти: 7; 7; 7 (три за шести ред сплајна)	90
ђ)	Б-сплајн (глатки)	spaps	Толеранције: 0; 1; 1; 1; 0	100
е)	Безјеова крива трећег реда	[119]	-	70
ж)	Модификовани Акима сплајн	makima	-	60

Од осам приказаних кривих, шест су сплајнови, а седма по реду је комбинација две Безјеове криве, па се и она може сматрати сплајном, мада није настала применом Де Кастелжуове теореме (о овоме ће бити касније речи). Тачке су изабране тако да се налазе на средини ширине полигона на сваком месту где полигон мења ширину, уз додатак почетка и краја полигона. Померањем тачака ка линији која раздваја две саобраћајне траке (односно према границама полигона ближим овој линији) смањила би се закривљеност путање, што би омогућило пролазак возила већом брзином, односно смањило вероватноћу губитка попречне стабилности (у смислу проклизавања). Овакво померање би захтевало довољно велику вредност ширине сегмента полигона и, претпоставља се, повећало ризик да возило дође у контакт са границама полигона.



Слика 4.4 Конструисање путање



Слика 4.4 Конструисање путање (наставак)

Можда и најбитнија карактеристика која опредељује избор криве за конструисање путање јесте закривљеност  $\kappa$ , која се дефинише као реципрочна вредност локалног полупречника кривине:

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{\Delta\theta}{\Delta s},$$

где је:

$\theta$  – угао усмерености тангенте на криву у датој тачки;

$s$  – пређени пут дуж путање.

Једначина за одређивање закривљености у Декартовом координатном систему гласи [120]:

$$\kappa = \frac{|y''|}{(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}},$$

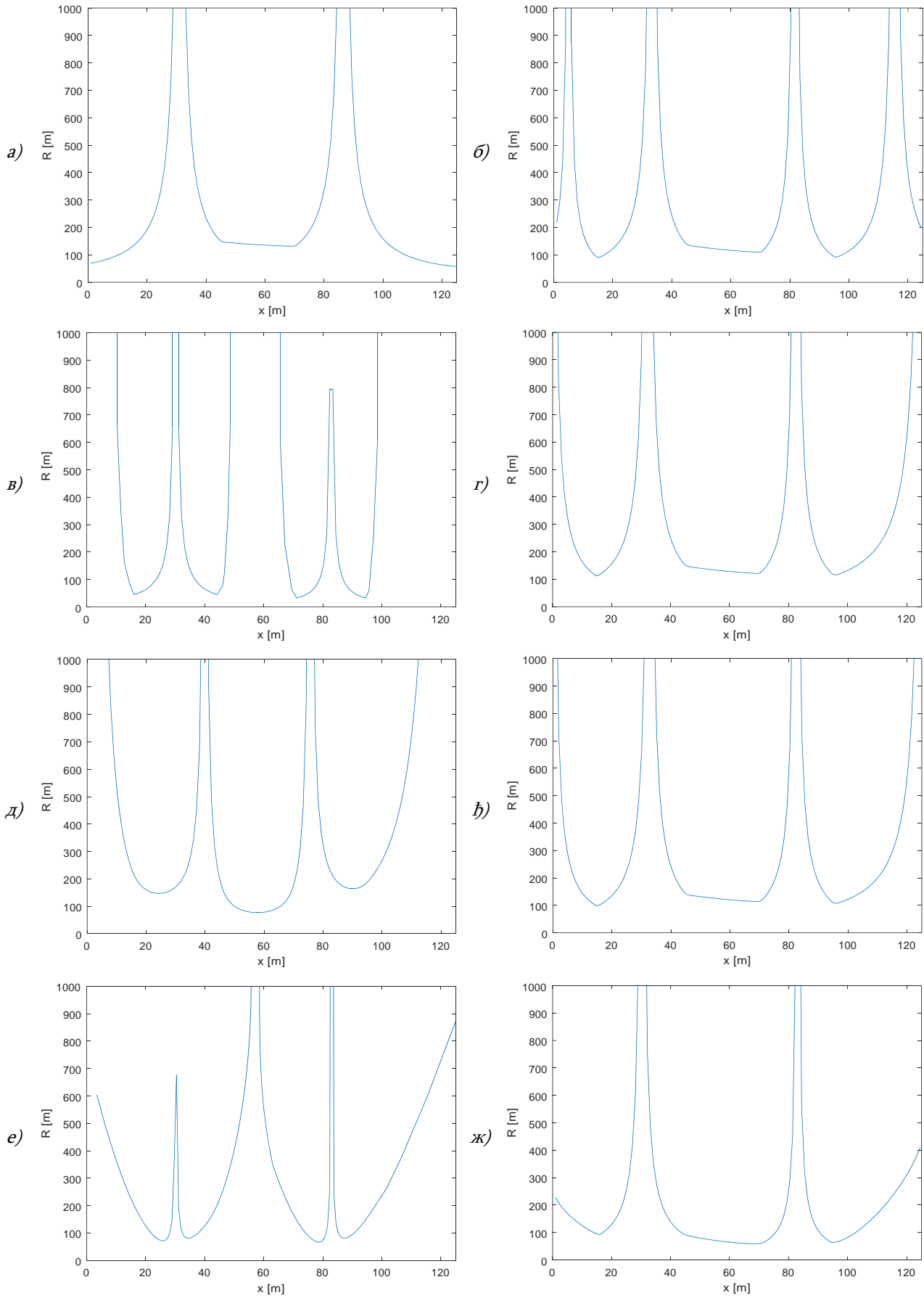
односно

$$\kappa = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x}}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

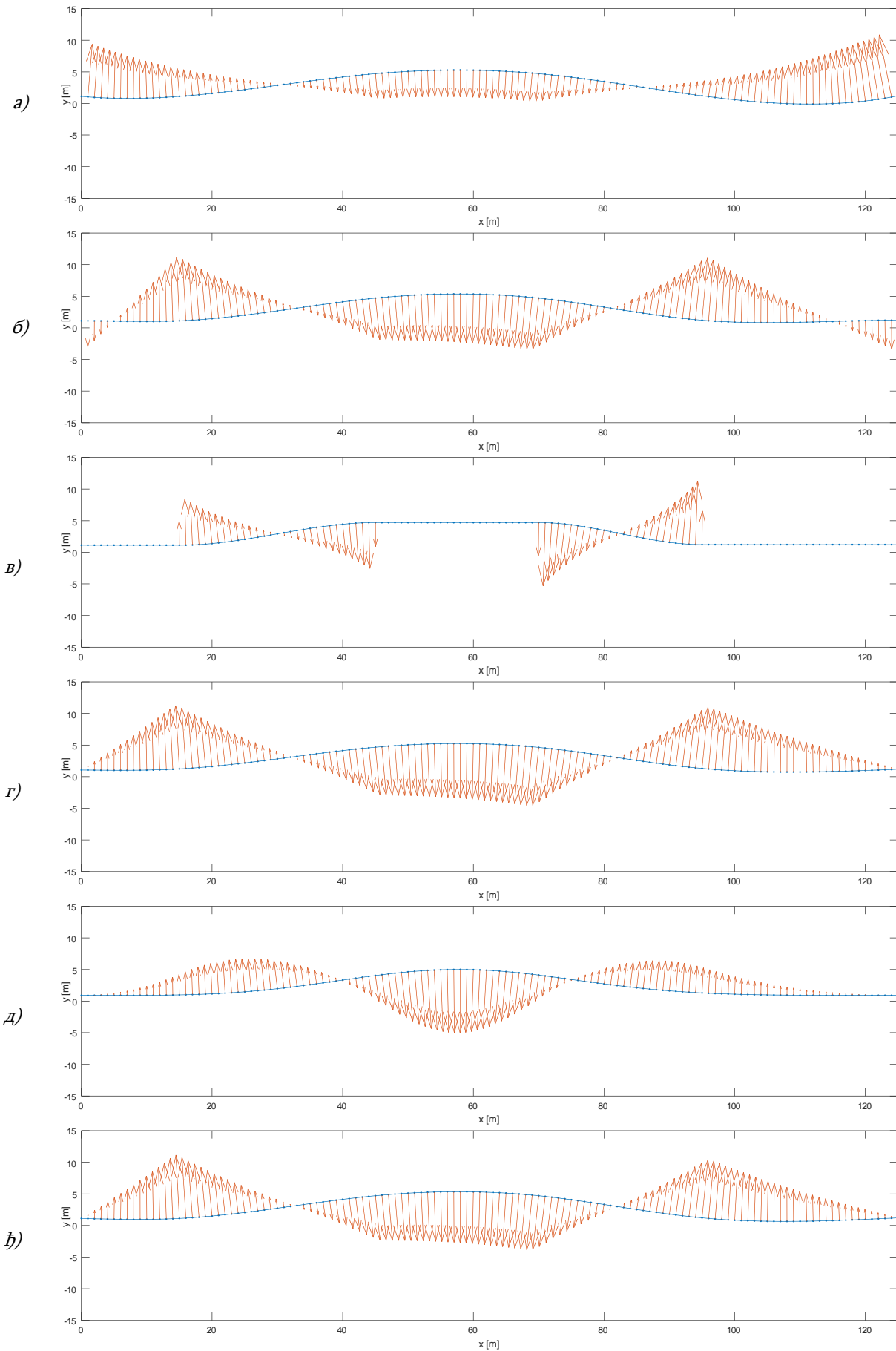
Слике 4.5 и 4.6 приказују, редом, промену полупречника кривине и закривљености дуж подужне осе полигона за све криве приказане на слици 4.4, а на основу прорачуна у програмском пакету *MATLAB*. Најмање вредности полупречника кривине за сваку од осам кривих, заправо реципрочне вредности највећих закривљености, приказане су и у табели 4.2.

Путање конструисане глатким кубним сплајном, Б-сплајном и глатким Б-сплајном се могу додатно „подешавати” променом припадајућих параметара. Аутор сматра да је, методом покушаја и грешака, дошао до оптималних вредности ових параметара, а они су и коришћени за исцртавање приказаних путања и наведени у табели 4.2.

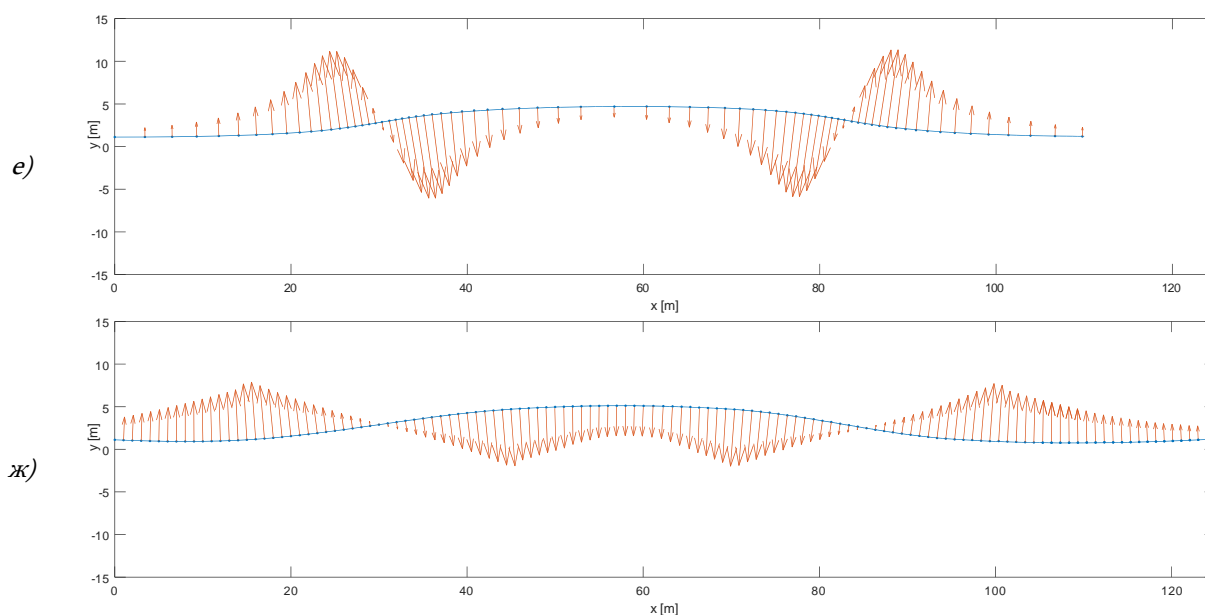




Слика 4.5 Полупречник кривине



**Слика 4.6** Закривљеност кривине (дата црвеним стрелицама)



Слика 4.6 Закривљеност кривине (дата црвеним стрелицама) (наставак)

Треба напоменути да су тачке које одређују Безјеове криве дефинисане на другачији начин у односу на све остале криве из дате анализе, што се и може видети на слици 4.4. Прва контролна тачка налази се на средини ширине на почетку прве деонице (што је случај и код осталих кривих). Друга контролна тачка се налази на истој  $y$  координати као и прва тачка (ово обезбеђује поклапање тангенте на путању у првој тачки са правцем вектора брзине пре уласка у виртуелни полигон), док је  $x$  координата одређена крајем друге деонице. Четврта контролна тачка се налази на средини ширине слободног простора у суседној саобраћајној траци, на средини дужине треће деонице. Трећа контролна тачка је постављена у односу на четврту на сличан начин као што је друга постављена у односу на прву, опет са циљем обезбеђивања саосности тангенте на криву (овога пута на излазу из прве половине путање) са осом суседне саобраћајне траке. Друга половина путање заправо представља још једну Безјеову криву, конструисану у огледалу у односу на прву половину, али уз другачији однос контролних тачака, дефинисан виртуелним полигоном. Додатна разлика је и та што се последња контролна тачка налази на средини дужине последње деонице полигона, а не на њеном крају. До положаја контролних тачака аутор је, слично као до претходно описаних параметара кривих, дошао у више итерација. Треба напоменути да овде нема потребе за применом Де Кастелжуове теореме, пошто су тангенте на путање у последњој тачки прве половине и првој тачки друге половине саосне. Ово значи да возило може прећи из прве у другу половину путање без промене правца. Оваквим начином дефинисања путање заобилази се мана Безјеових крива (њихова непогодност за промену путање у случају потребе, пошто је за њихово конструисање потребно унапред познавати број контролних тачака).

Из претходно приказаног може се закључити да кубни сплајн, глатки Б-сплајн и модификовани Акима сплајн нису погодни за исцртавање путање, пошто се тангента на ове криве у почетним тачкама не поклапа са правцем вектора брзине возила. Б-сплајн и глатки кубни сплајн су се такође показали као неодговарајући, а разлог је њихово одступање од прве дефинисане тачке (у којој се возило налази на почетку проласка кроз полигон). Прекидни кубни Ермитеов интерполациони полином карактеришу високе

вредности закривљености, што га такође чини неодговарајућим за исцртавање полигона. Иако се погледом на слику 4.4 може учинити да је уклештени кубни сплајн погодан за исцртавање путање, он би захтевао од возила скретање у супротну страну од смера промене саобраћајне траке, а пре саме промене (детаљније описано у поглављу 5), па се и он мора искључити као опција. Стога ће се за исцртавање путање користити Безјеове криве.

Поређење различитих кривих за конструисање путања аутономних возила вршено је и у ранијим истраживањима. У [121], на пример, поређени су кружни лукови, полиноми петог и седмог степена, Безјеова крива, синусоида и клотоида као криве за дефинисање путање приликом једноструке промене саобраћајне траке. Криве су, поред закривљености, оцењиване и на основу додатна два параметара. Први је површина између путање и праве линије по којој би се кретало возило средином изворне саобраћајне траке на правцу (када не би било потребе за променом траке). Други је однос пређеног пута и промене у координате. Резултати ове анализе дати су у табели 4.3 са јединим циљем да се покаже да поменута додатна два параметра у великој мери корелирају са закривљеношћу, што оправдава приступ оцене погодности криве на основу полупречника кривине.

**Табела 4.3** Упоредна анализа различитих кривих за дефинисани маневар промене саобраћајне траке [121]

Крива	$\kappa$ [m <sup>-1</sup> ]	Површина између путање и праве линије [m <sup>2</sup> ]	Однос пређеног пута и промене у координате [-]
Кружни лукови	0,0038	9,5	1,0023
Полином петог степена	0,0055	10,65	1,0025
Безјеова крива	0,0055	10,65	1,0025
Сегмент синусоиде	0,0059	11,51	1,0026
Полином седмог степена	0,0071	12,87	1,0028
Клотоида	0,0076	11,85	1,0025

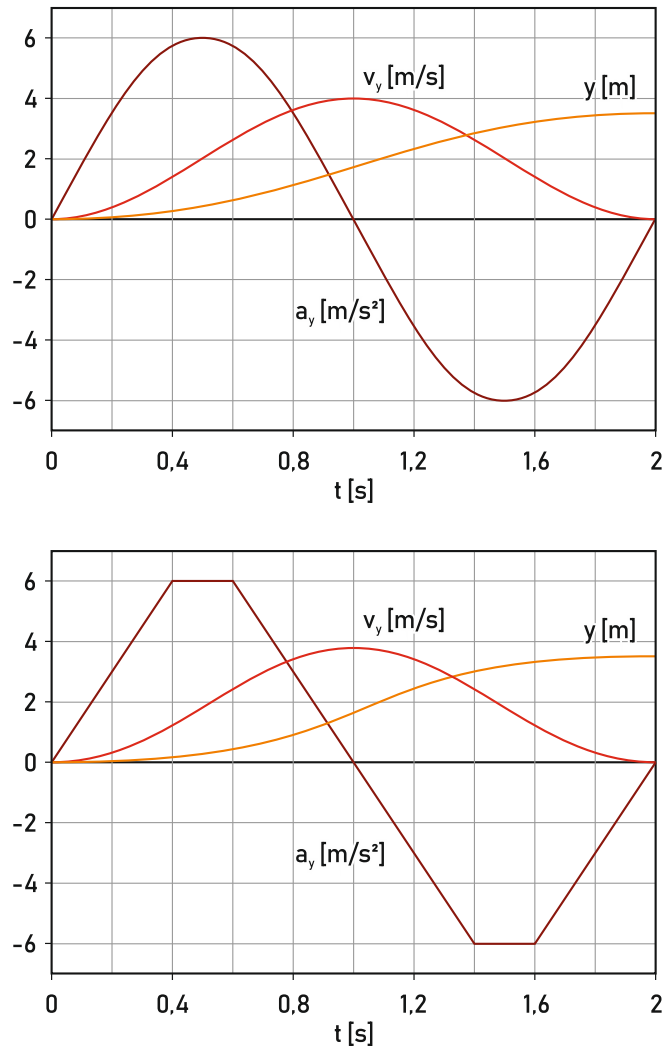
Треба напоменути да су вредности полупречника кривине, односно закривљености, приказане у табели 4.2 и на сликама 4.5 и 4.6 израчунате само за полигон дефинисан стандардом *ISO 3888-1*. Ово је учињено због тога што се може сматрати да овакав полигон одговара типичном маневру двоструке промене саобраћајне траке (и да управо зато и представља део поменутог стандарда). Претпоставља се да би релативни однос закривљености осам кривих остао довољно сличан и у свим осталим могућим конфигурацијама полигона.

#### 4.4. Одређивање трајекторије

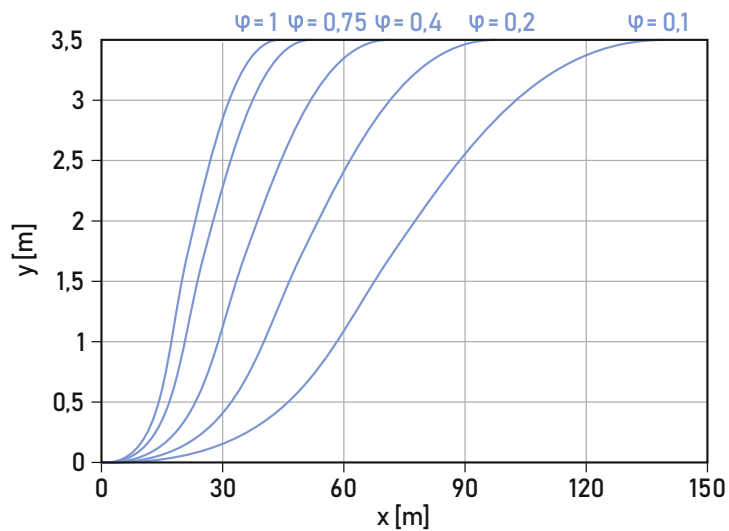
Избор оптималне путање је потребан, али не и довољан за описивање кретања аутономног возила – у анализу се мора укључити и временска димензија, а самим тим и брзина и убрзање.

У неким истраживањима се трајекторија формира на основу профила бочног убрзања [121,122], као што је приказано на слици 4.7. Овакав приступ, због основне

претпоставке ове дисертације да путању (и део трајекторије) одређује универзални полигон, није прихватљив.



Слика 4.7 Синусоидни (горе) и трапезоидни (доле) профил бочног убрзања и резултујућа бочна брзина и путања [121,122]



Слика 4.8 Оптимална путања за промену саобраћајне траке при брзини од 65 миља на час у зависности од коефицијента приањања [123]

Оптимална путања за промену саобраћајне траке може се изабрати и на основу (процењеног) остваривог приањања, као што је то учињено у студији [123] чији је део приказ са слике 4.8.

Трајекторије за пролазак возила кроз полигоне дефинисане овом дисертацијом ће бити дефинисане на два начина – коришћењем Безјевих кривих и на основу путања дефинисаних у самосталним *Adams Car* симулацијама, уз константну брзину (исту ону којом се возило кретало на почетку маневра).

#### 4.5. Процена коефицијента приањања и угла повођења

Коефицијент приањања у великој мери утиче на понашање возила и могућност извођења маневара, како у подужном, тако и у попречном правцу. Вероватноћа да се достигне граница приањања у подужном правцу је много већа у случају кочења, него у случају убрзавања, јер очекивани маневри не захтевају високе вредности убрзања. Међутим, свако, па и најмање, искоришћење приањања у подужном правцу смањује расположиво приањање у попречном правцу, које је веома битно за могућност извођења маневара промене саобраћајне траке.

Коефицијент приањања је веома променљива величина која зависи од великог броја утицајних чинилаца. На сликама 4.9 до 4.12 приказани су резултати истраживања коефицијента приањања на немачким путевима [124]. Вредности коефицијента приањања приказане су у зависности од врсте и стања (сува, наквашена, мокра, покривена снегом, покривена ледом) подлоге, врсте пнеуматика (летњи, зимски) и брзине кретања возила. За очекивати је да на путевима у Србији, на пример, вредности коефицијента приањања варирају још више.

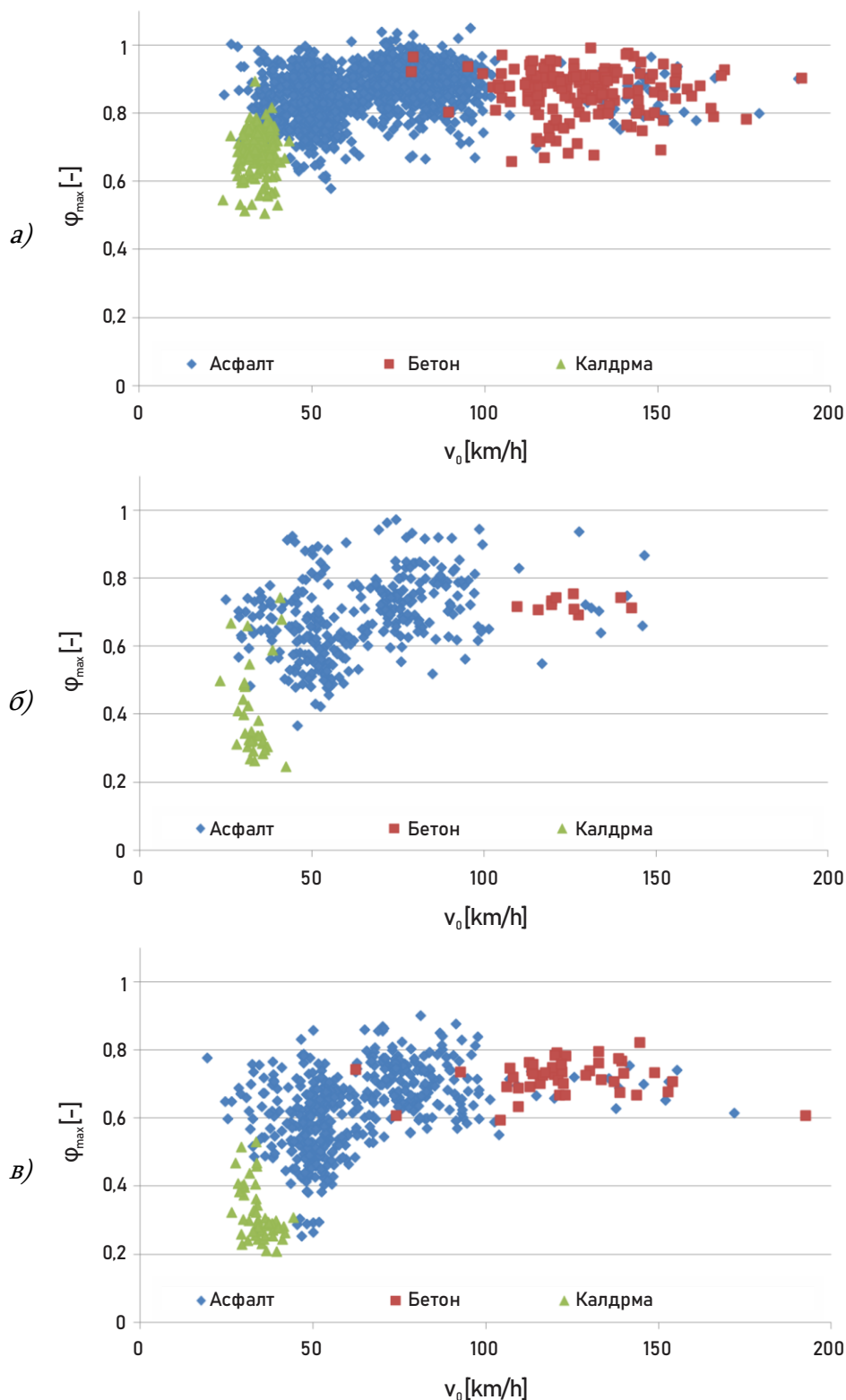
На приказаним сликама се може видети да коефицијент приањања варира од веома ниских вредности (за пут покривен углачаним ледом) до вредности од приближно 1. Ово у пракси значи да максимално оствариво успорење може бити и преко десет пута мање од очекиваног (у случају када возило наиђе на део пута покривен ледом или неком другом материјом која у великој мери може смањити коефицијент приањања – уље, песак, блато...). Треба нагласити да је немогуће (барем са тренутно расположивом технологијом) предвидети коефицијент приањања на деоницама пута испред.

Препознавање тренутног коефицијента приањања између пнеуматика и подлоге такође представља велики изазов, а избор и извођење правовремене и праве реакције на измерену вредност још већи. Томе у прилог иде и чињеница да, као што је раније напоменуто, УН правилници 79 и 152 не захтевају да системи чије функционисање дефинишу буду у стању да свој задатак обаве успешно када подлога није сува и када је не карактерише висока вредност коефицијента приањања.

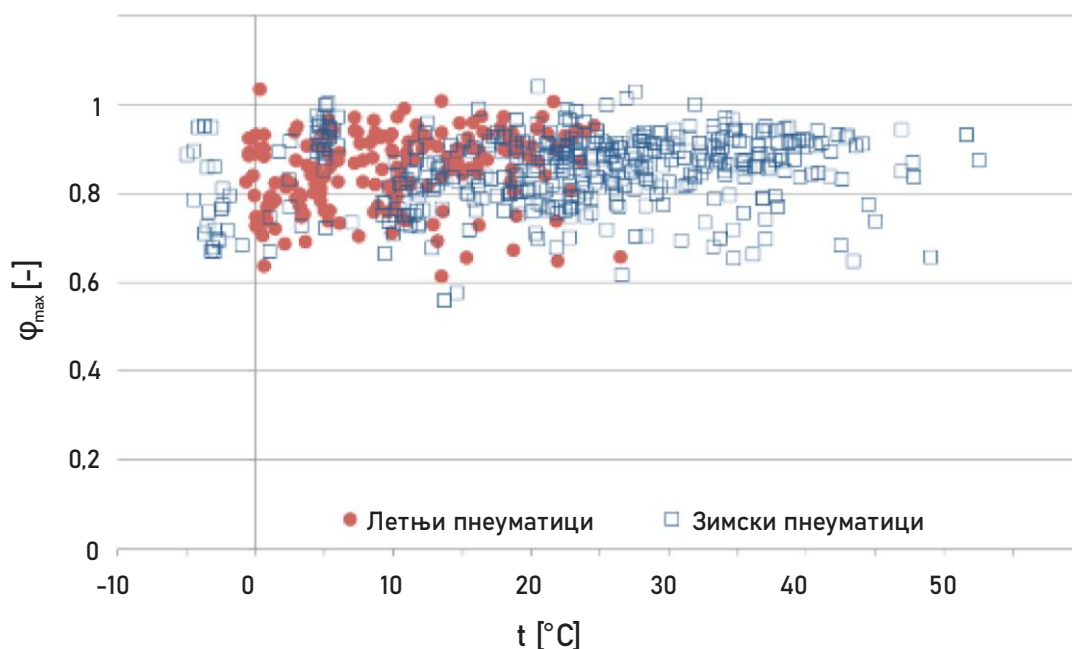
У уобичајеним условима вожње клизање тачкова је у линеарној зони (зависност коефицијента приањања и клизања је линеарног карактера – видети леви део дијаграма приказаног на слици 4.16) и нема много утицаја на понашање возила. Коефицијент приањања је потребно процењивати само у одређеним случајевима, а према неким ауторима може се прецизно процењивати само на основу маневара који укључују променљиво попречно кретање [125]. Када се не процењује, подразумева се његова висока вредност, зато што се сматра уобичајеном (за добру подлогу и повољне услове). Поред тога, усвајање ниске вредности би узроковало превисоке вредности процењеног угла



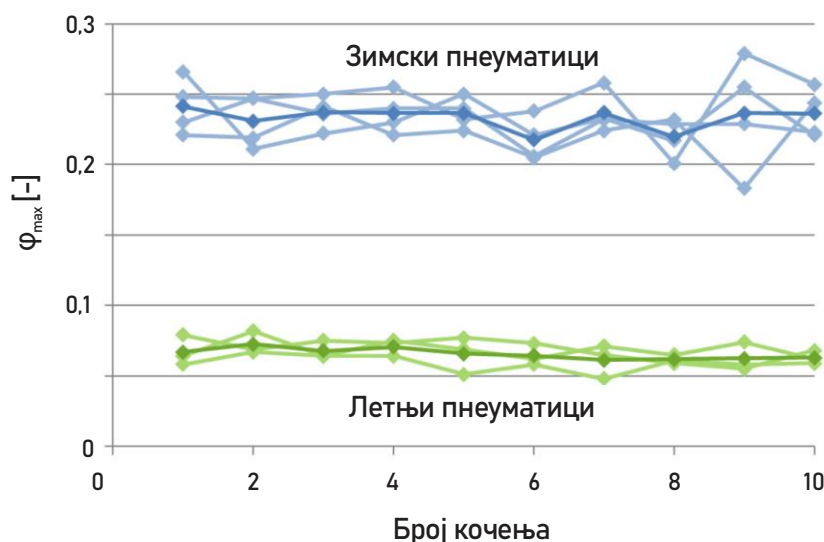
повођења (о овоме ће бити речи касније у тексту). Према истим ауторима, процена треба да почне када измерене вредности бочног убрзања и угаоне брзине вијугања пређу граничне вредности, али и у случају активирања система за контролу стабилности (али не у случају када се користи за корекцију подуправљања у устаљеном режиму).



Слика 4.9 Коefицијент приањања за: а) сув пут; б) наквашен пут; в) мокар пут [124]



Слика 4.10 Коефицијент пријањања за сув пут [124]

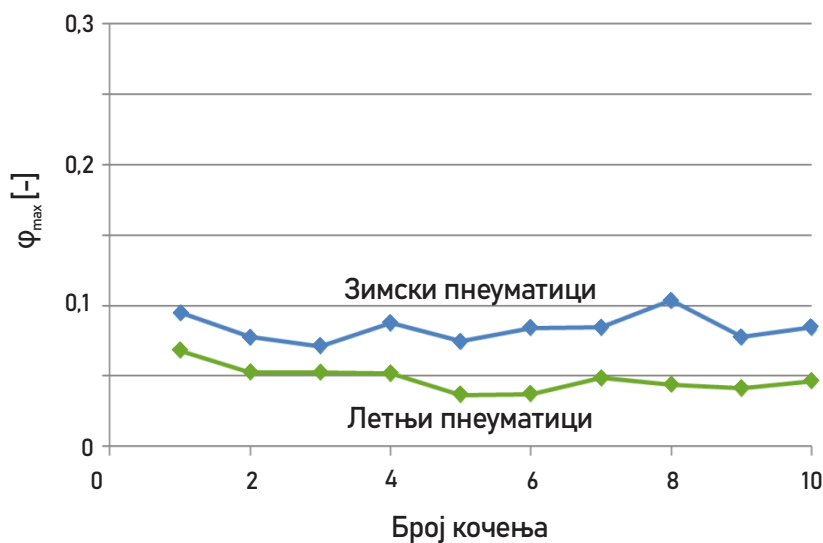


Слика 4.11 Коефицијент пријањања за пут покривен снегом и ледом [124]

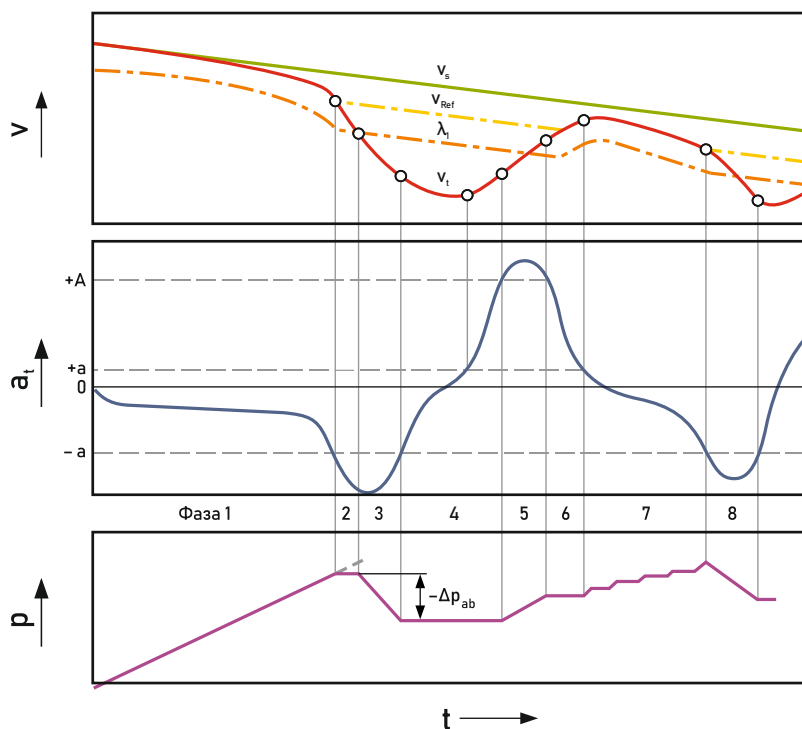
Алгоритми функционисања система за спречавање блокирања точкова су прилично сложени. Један општи приказ дат је на слици 4.13 [126]. Управо због ове сложености, предмет модела који се развија у оквиру дисертације неће бити управљање системом за кочење у смислу спречавања блокирања точкова (рачунаће се да такав систем већ постоји на возилу и да функционише независно од система који се развија).

Угао повођења има велики утицај на понашање возила. За његово мерење потребна је скупочена опрема, попут система заснованог на *Correxit* оптичком давачу (име потиче од енглеске речи *correlation*, пошто овај давач свој рад заснива на оптичкој корелацији, принципу сличном оном који користи оптички миш на вашем рачунару), који је 1982. године развила компанија *Corrsys-Datron* [127]. Поменути компанију је преузела фирма *Kistler*, а на слици 4.14 је приказан давач *Kistler Correxit S-350 Aqua* постављен на возило *BMW 650i*, учило које је компанија *BMW* донирала Машинском факултету Универзитета

у Београду, у тренутку извођења лабораторијских вежби на стази Националне возачке академије.



Слика 4.12 Коефицијент приањања за пут покривен углачаним ледом [124]



- $v_s$  – стварна брзина возила
- $v_{Ref}$  – референтна брзина возила (која одговара оптималној вредности проклизавања)
- $v_t$  – теоријска брзина (која одговара угаоној брзини точка када нема клизања)
- $\lambda_l$  – предефинисана граница клизања
- $a_t$  – тангентно убрзање/успоренење точка
- $p$  – притисак у кочном систему

Слика 4.13 Управљачки циклус система за спречавање блокирања точкава на подлози са високим коефицијентом приањања [126]



Слика 4.14 Давач Kistler Correvit S-350 Aqua постављен на предњи део возила

Угао повођења се може одредити и на основу поређења стварне путање возила и путање коју би узроковало дато закретање управљачких тачкова без утицаја повођења. За овакву анализу потребно је прецизно мерити угао закретања управљачких тачкова и позицију возила помоћу глобалног система за позиционирање [128,129].

Процена угла повођења (у зависности од брзине, попречног и подужног нагиба) тема је великог броја истраживања [130-134]. Треба напоменути да је већина ових истраживања везана за област аутоматског управљања и да су радови који су њихов резултат објављивани у часописима из управо ове области. У делу истраживања се за процену угла повођења користе вештачке неуронске мреже [135,136].

За симулацију понашања возила у циљу истраживања повођења често се користи програмски пакет *CarSim* [131,134,135].

Процена коефицијента приањања и угла повођења и узимање у обзир резултата ове процене се показало комплексним задатком за аутора дисертације. Показало се да је извођење маневра могуће и без узимања (барем не директног) у обзир угла повођења. Са друге стране, процена коефицијента приањања представља велики изазов и за тимове великих светских произвођача возила, па ће се оставити за нека будућа истраживања.

#### 4.5.1. Процена тренутне вредности коефицијента приањања

За разлику од случаја када се тачак погони и када се вредност клизања израчунава као

$$\lambda = \frac{v_t - v_s}{v_t} = 1 - \frac{v_s}{v_t} = 1 - \frac{v}{\omega_t \cdot r_d},$$

у случају кочења се оно израчунава као

$$\lambda = \frac{\omega_o - \omega_k}{\omega_o} = \frac{v_s - v_t}{v_s} = 1 - \frac{v_t}{v_s} = 1 - \frac{\omega_t \cdot r_d}{v},$$

где је:

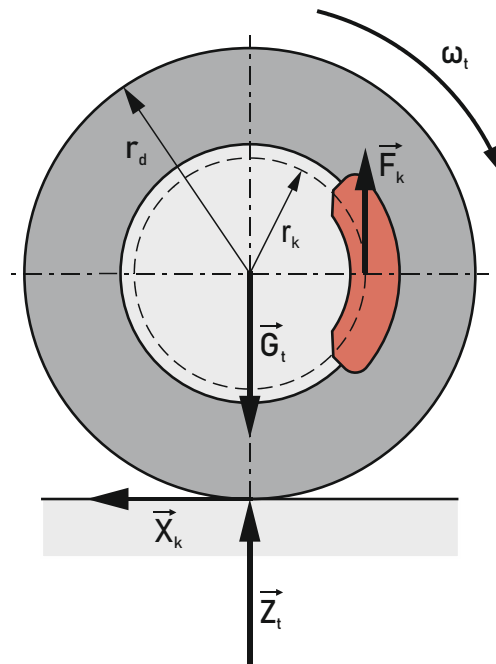
$\omega_t$  – угаона брзина тачка;

$r_d$  – динамички полупречник тачка;

$\omega_o$  – угаона брзина неутралног точка (који не проклизава);

$\omega_k$  – угаона брзина коченог точка.

Разлог за различит начин израчунавања клизања у ова два случаја јесте тај што је у случају кочења стварна (транслаторна) брзина точка већа од теоријске (коју би узроковало обртање точка без клизања) – супротно од случаја погона (код кочења точка клиза транслаторно, а код погона угаоно).



Слика 4.15 Кочени точак [137]

На основу слике 4.15 [137], могу се написати две основне једначине кретања коченог точка – прва:

$$-m \cdot \ddot{x} = X_k = Z_t \cdot \varphi,$$

одакле је

$$\ddot{x} = -g \cdot \varphi$$

и друга, уз занемаривање момента отпора котрљању:

$$-J_t \cdot \dot{\omega}_t = F_k \cdot r_k - X_k \cdot r_d,$$

где је  $r_k$  полупречник трења, а  $F_k$  сила кочења одређена изразом:

$$F_k = \mu_k \cdot p_k \cdot A_k,$$

где је:

$\mu_k$  – коефицијент трења између фрикционе облоге и коченог дела точка;

$p_k$  – притисак у кочном цилиндру;

$A_k$  – ефективна површина цилиндра.

На основу ових једначина, може се написати:

$$\dot{\omega}_t = -\frac{\mu_k \cdot p_k \cdot A_k \cdot r_k}{J_t} + \frac{m \cdot g \cdot \varphi \cdot r_d}{J_t},$$

односно у дискретном облику:

$$\frac{\omega_t(n) - \omega_t(n-1)}{\Delta t} + \frac{\mu_k \cdot p_k(n) \cdot A_k \cdot r_k}{J_t} = \frac{m \cdot g \cdot \varphi(n) \cdot r_d}{J_t},$$

одакле се може добити процењена тренутна вредност коефицијента приањања [137]:

$$\varphi(n) = \frac{J_t \cdot \frac{\omega_t(n) - \omega_t(n-1)}{\Delta t} + \mu_k \cdot p_k(n) \cdot A_k \cdot r_k}{m \cdot g \cdot r_d}.$$

#### 4.5.2. Процена целокупне карактеристике приањања

Поред тренутне вредности, битно је познавати и целокупну карактеристику приањања у зависности од клизања. Она се може претпоставити коришћењем неких од модела који описују понашање пнеуматика. Један од њих је Буркхартов модел, са коефицијентима наведеним у табели 4.4 [138]:

$$\varphi(\lambda) = c_1(1 - e^{-c_2\lambda}) - c_3\lambda.$$

**Табела 4.4** Коефицијенти за Буркхартов модел [138]

	$c_1$	$c_2$	$c_3$
Асфалт (сув)	1,2801	23,99	0,52
Асфалт (мокар)	0,857	33,822	0,347
Бетон (сув)	1,1973	25,168	0,5373
Калдрма (сува)	1,3713	6,4565	0,6691
Калдрма (мокра)	0,4004	33,708	0,1204
Снег	0,1946	94,129	0,0646
Лед	0,05	306,39	0

Да би се избегао нелинеарни проблем приликом решавања, може се увести поједностављење [136]:

$$\varphi(\lambda) = A\lambda + B\sqrt{\lambda},$$



па се целокупна карактеристика приањања (зависност коефицијента приањања од клизања за цео опсег вредности клизања) може претпоставити као:

$$\varphi(n) = A\lambda(n) + B\sqrt{\lambda(n)}.$$

Да би изнета анализа била довољно прецизна, потребно је узети у обзир и промену вертикалног оптерећења точка [137].

Често се користи проширени Буркхартов модел [138]:

$$\varphi(\lambda) = (c_1(1 - e^{-c_2\lambda}) - c_3\lambda) \cdot e^{-c_4\lambda \cdot v} \cdot (1 - c_5Z^2),$$

где је:

$c_4 = 0,002-0,004$  s/m – коефицијент утицаја већих брзина (<1 – смањује процењени коефицијент приањања);

$c_5 \approx 0,00015$  (1/kN)<sup>2</sup> – коефицијент утицаја већег оптерећења точка (<1 – смањује процењени коефицијент приањања).

Непрописни притисак у пнеуматцима такође може да смањи коефицијент приањања (занемарује се ако је разлика мања од 0,3 bar) [138].

Овде треба поменути можда и најпознатији модел који описује понашање пнеуматика – Пацејкин модел (такозвану „магичну формулу“) [139] (коефицијенти се, наравно, разликују од коефицијената Буркхартовог модела):

$$\varphi(\lambda) = c_1 \sin(c_2 \arctg((1 - c_4)c_3 \cdot \lambda + c_4 \arctg(c_3 \cdot \lambda))).$$

Пацејкин модел захтева велики број података о пнеуматцима и усложњава прорачун.

Још један често коришћени (на пример у [140]) модел је Дагофов модел [141]:

$$F_{yij} = -c_{yij} \operatorname{tg} \alpha_{ij} f(\lambda);$$

где је:

$$f(\lambda) = \begin{cases} (2 - \lambda)\lambda, & \lambda < 1; \\ 1, & \lambda \geq 1 \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{\varphi F_{zij}}{2c_{yij} |\operatorname{tg} \alpha_{ij}|};$$

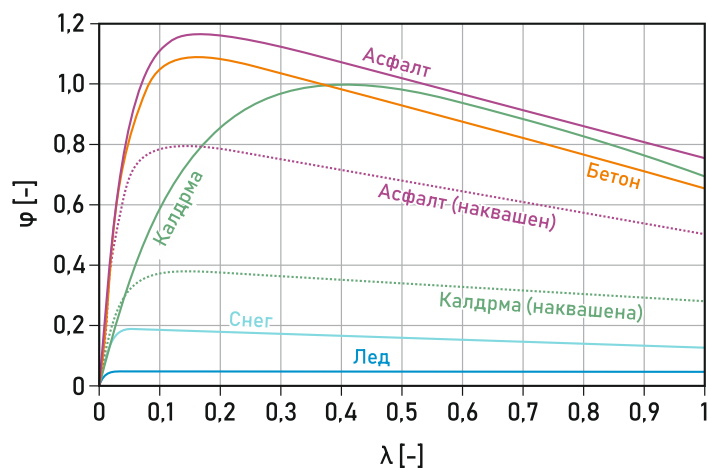
$c_{yij}$  – бочна крутост пнеуматика;

$\alpha$  – угао повођења.

За разлику од поменута три модела, који представљају статичке моделе, постоје и динамички модели пнеуматика, какав је, на пример, *LuGre* модел [142] (назив потиче од

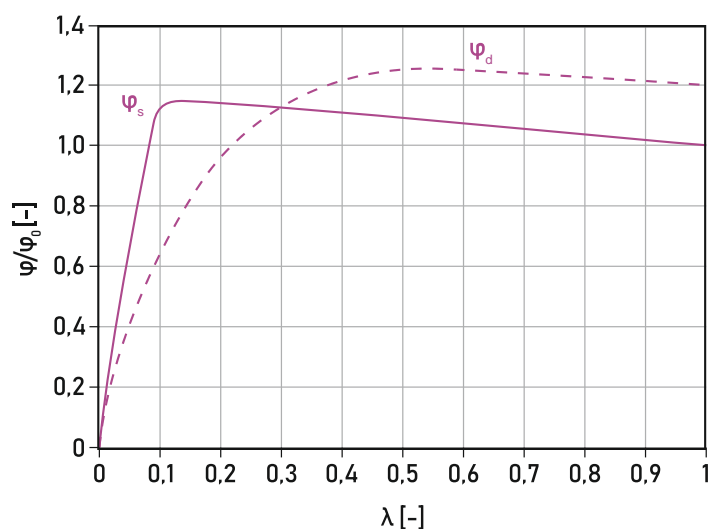
имена градова у којима су смештени универзитети са којих долазе аутори модела – Лунд и Гренобл).

Пример криве зависности коефицијента приањања од клизања је дат на слици 4.16. Може се видети да у областима ниских вредности клизања мале промене клизања узрокују велике промене коефицијента приањања.

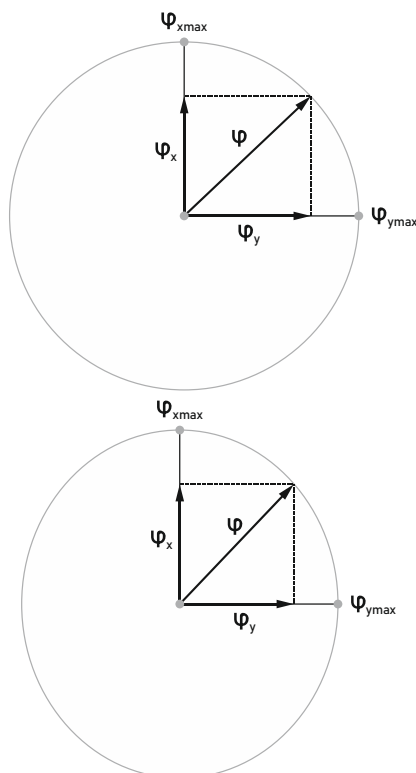


Слика 4.16 Зависност коефицијента приањања од клизања [138]

Криве приказане на слици 4.16 одговарају стационарним условима – не узимају у обзир промену нормалног оптерећења и транслаторне брзине точка. Слика 4.17 приказује један пример промене ове зависности на задњим точковима у случају кочења, када због смањења брзине и вертикалног оптерећења точкава долази до повећања максималне вредности коефицијента приањања [143]. На ординати дијаграма је дат однос коефицијента приањања и референтне стационарне вредности (при одређеној брзини и оптерећењу точка) – дијаграм је дат само оријентације ради, јер би другачији динамички услови (додатно оптерећење и повећана брзина, на пример) узроковали другачији карактер промене зависности коефицијента приањања од клизања.



Слика 4.17 Зависност коефицијента приањања од клизања у стационарним ( $\varphi_s$ ) и динамичким ( $\varphi_d$ ) условима [143]



Слика 4.18 Камов круг (горе), односно елипса приањања (доле) [138,143]

На слици 4.18 дата је зависност коефицијента приањања у подужном и бочном правцу (тзв. Камов круг), која важи уз претпоставку да је карактеристика приањања пнеуматика независна од правца клизања. Вредности коефицијента приањања у ова два правца се могу израчунати као:

$$\varphi_x = \varphi \frac{\lambda_x}{\lambda},$$

$$\varphi_y = \varphi \frac{\lambda_y}{\lambda}.$$

Због постојања шаре на газећем слоју, максимална вредност коефицијента приањања у попречном правцу је мања од максималне вредности у подужном правцу. Тако Камов круг постаје елипса:

$$\varphi_x = \varphi \frac{\lambda_x}{\lambda},$$

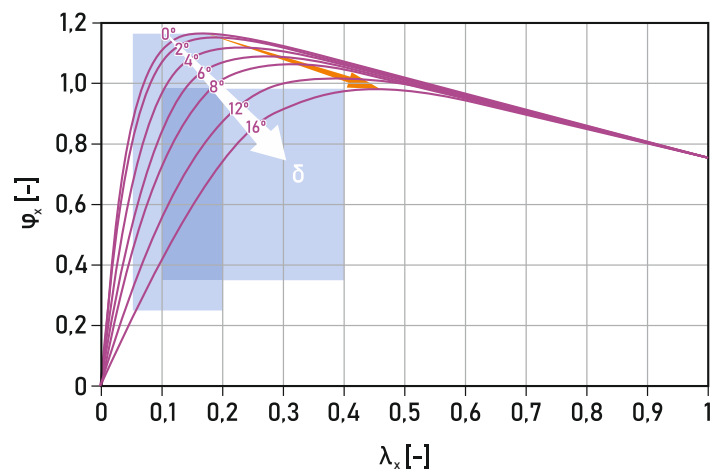
$$\varphi_y = k_\lambda \varphi \frac{\lambda_y}{\lambda},$$

где је  $k_\lambda = 0,9 \div 0,95$  за нископрофилне пнеуматике.

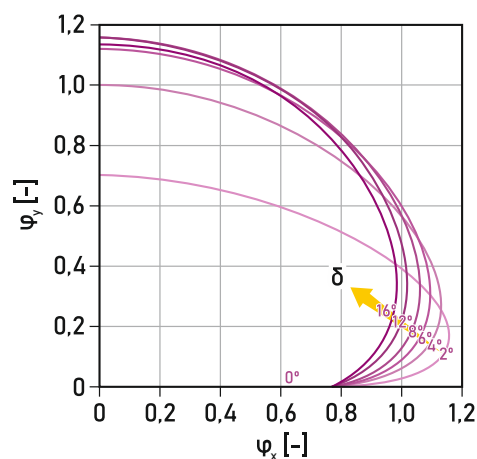
У екстремним ситуацијама, прорачунате силе приањања могу бити нереално велике. Како би се ова чињеница узела у обзир, уводи се фактор  $k_{um}$ :

$$k_{um} = \frac{\varphi \cdot Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}.$$

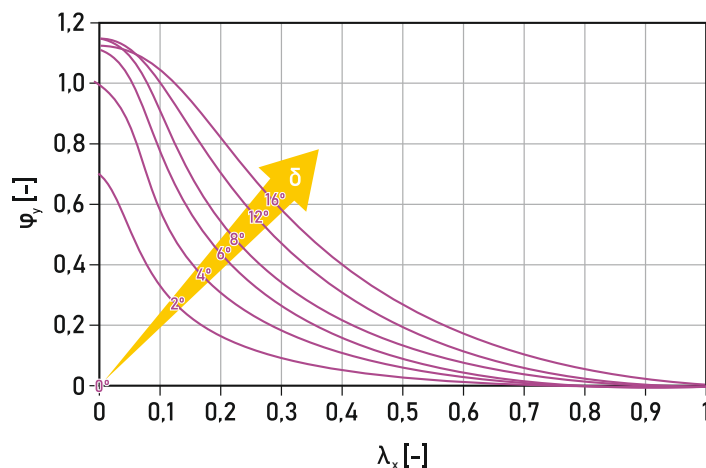
Коефицијент приањања зависи и од угла повођења. Ова зависност дата је на слици 4.19 [138]. Повећањем угла повођења смањује се максимална вредност коефицијента приањања. Утицај угла повођења на однос коефицијената приањања у подужном и бочном правцу је дата на слици 4.20 [138]. Без повођења нема ни попречног приањања. Са порастом угла повођења, расте његова вредност и већ за  $2^\circ$  износи  $\varphi_y = 0,7$ . Што је већи угао повођења, мања је подужна сила. За  $16^\circ$  је могуће остварити  $\varphi_x = 1$ . На слици 4.21 приказана је зависност попречног коефицијента приањања од подужног клизања и угла повођења [138].



**Слика 4.19** Зависност подужног коефицијента приањања од подужног клизања и угла повођења (за сув асфалт) – плавом бојом је означена област деловања система за спречавање блокирања тачкова [126,138]



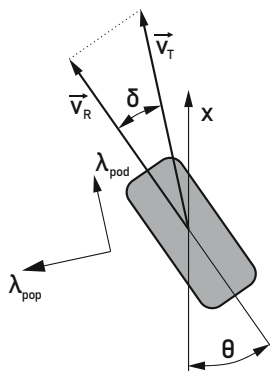
**Слика 4.20** Утицај угла повођења на зависност подужног и попречног коефицијента приањања (за сув асфалт) [138]



Слика 4.21 Зависност попречног коефицијента приађања од подужног клизања и угла повођења (за сув асфалт) [138]

### 4.5.3. Одређивање клизања

У Буркхартовом приступу подужно клизање се узима у смеру кретања точка (слика 4.22). Једначине које се користе за одређивање клизања дате су у табели 4.5.



Слика 4.22 Одређивање подужног клизања [138]

Табела 4.5 Једначине за израчунавање подужног и попречног клизања за случај кочења и погона

Клизање	Кочење	Погон
Подужно	$\lambda_{pod} = \frac{v_R \cdot \cos \delta - v_T}{v_T}$	$\lambda_{pod} = \frac{v_R \cdot \cos \delta - v_T}{v_R \cdot \cos \delta}$
Попречно	$\lambda_{pop} = \frac{v_R \cdot \sin \delta}{v_T}$	$\lambda_{pop} = \text{tg } \delta$
Укупно	$\lambda = \sqrt{\lambda_{pod}^2 + \lambda_{pop}^2}$	

### 4.5.4. Процена угла повођења

За процену угла повођења може се користити модел бицикла – узима се да су вредности угла повођења на левим и десним точковима једнаке.



$$\delta_p \approx -\frac{\omega \cdot l_p}{v_c} - \gamma + \theta,$$

$$\delta_z \approx \frac{\omega \cdot l_z}{v_c} - \gamma.$$

Ове једноставне једначине које одређују вредности угла повођења на предњим и задњим точковима дају добре резултате у ограниченом режиму кретања [138]. Највеће вредности угла повођења обично износе  $12 \div 18^\circ$  [143].

На основу слике 4.23, може се одредити и вредност тренутног полупречника закретања возила:

$$l = \overline{AD} + \overline{DB} = R_\delta (\operatorname{tg}(\theta - \delta_p) + \operatorname{tg}\delta_z),$$

$$R_\delta = \frac{l}{\operatorname{tg}(\theta - \delta_p) + \operatorname{tg}\delta_z}.$$

За мале вредности углова закретања и повођења може се написати:

$$R_\delta \approx \frac{l}{\theta - \delta_p + \delta_z}.$$



## 5. Управљачки модел

---

Генерисање и праћење могућих трајекторија у реалном времену је једна од главних препрека за извођење маневара на граници могућности аутономних возила. Две су највеће потешкоће [144]:

- Трајекторије генерисане сувише једноставним моделима нарушавају границе система (возила), док је израчунавање трајекторија помоћу сложених модела веома захтевно по питању рачунарске снаге, односно времена потребног за израчунавање;
- Несигурности из различитих извора (грешке мерења, процена коефицијента приањања, непоклапање понашања возача и модела...) могу спречити возило да прати жељену путању и задовољи безбедносне граничне услове.

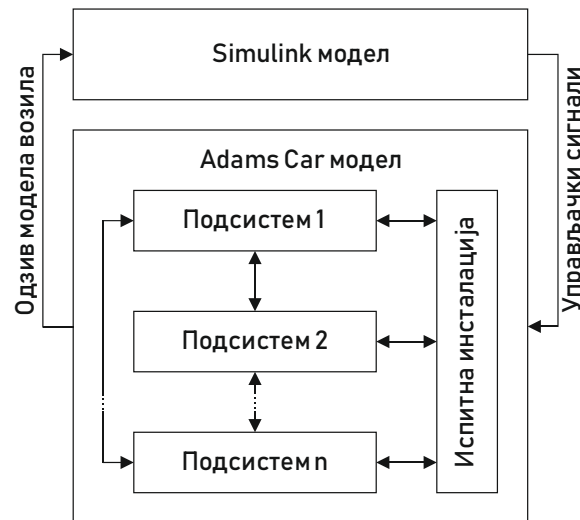
Задатак управљачког модела који ће бити описан у овом поглављу јесте да управља моделом возила, односно његовим системима – погонским агрегатом, системом за пренос снаге, системом за управљање и системом за кочење, са циљем успешог проласка кроз задате полигоне задатим брзинама.

### 5.1. Косимулација

Управљачки модел ће бити испитан коришћењем косимулације између програма *Simulink* и *Adams Car* (више о овоме дато је у поглављу 8). Шема система за извођење косимулације је приказана на слици 5.1.

Поменути приступ има предности у односу на симулације коришћењем модела бицикла и сличних јер *Adams Car* модел много прецизније описује понашање возила, узимајући у обзир већи број утицајних чиниоца (има већи број степени слободе). Косимулација коришћењем програма *MATLAB Simulink* и *Adams Car* је и раније коришћена у литератури, али за друге потребе (за симулацију понашања система за управљање приликом наилаaska на избочину на путу [145], односно за симулацију управљања мотоциклом његовим нагињањем [146]).

У *Simulink* модел се смешта *adams\_sub* блок (као на слици 5.2), који представља „возило” којим ће управљати *Simulink* модел шаљући му управљачке сигнале на основу излаза из *adams\_sub* блока, који се могу посматрати као сигнали са давача уграђених у возило.



Слика 5.1 Шема косимулације

Спроведене косимулације ће се користити за креирање управљачког модела који ће на што једноставнији могући начин управљати возилом у циљу проласка кроз дефинисане полигоне приликом избегавања препреке. *Adams Car* модел се не би могао користити за онлајн управљање возилом због времена потребног за израчунавање (заснива се на итерацијама које се спроводе у сваком тренутку који одговара реалном времену до откривања „потеза” који је најоптималнији у датом тренутку) – косимулација маневра промене саобраћајне траке у трајању од 15 секунди траје око два минута.

Планери за аутономна возила обично функционишу са учестаношћу од 10 Hz, као што је то случај са возилом *BOSS* [147] и *MIT*-јевим *Talos*-ом [148]. Учестаност на којој су спроведене симулације за потребе ове дисертације износи 200 Hz.

## 5.2. Преглед коришћених контролера за управљање аутономним возилима

У табели 5.1 дат је преглед метода коришћених у литератури за подужно („гасом” и кочницом) и попречно (точком управљача) управљање аутономним возилима. У табели нису приказане методе засноване на кинематици.

Табела 5.1 Методе коришћене за подужно и попречно управљање аутономним возилима.

Метода	Подужно	Попречно
<i>PI / PD / PID регулатор</i>	[149-154]	[145,155-158]
Управљање на основу предвиђања понашања модела ( <i>Model predictive control – MPC</i> )		[144,159,160]
Неуронска мрежа		[161,162]
Линеарни квадратни регулатор ( <i>Linear Quadratic Regulator – LQR, Linear Quadratic Control – LQC</i> )		[163]
Расплинута ( <i>fuzzy</i> ) логика	[164]	[85,162,164,165]
Управљање у клизном режиму ( <i>sliding mode control</i> )		[153]

## 5.3. Подужно управљање

Уобичајени приступ за подужно управљање је поделити контролер на унутрашњу петљу за гас и кочницу и спољну петљу за праћење брзине и убрзања [166]. Брзином се може

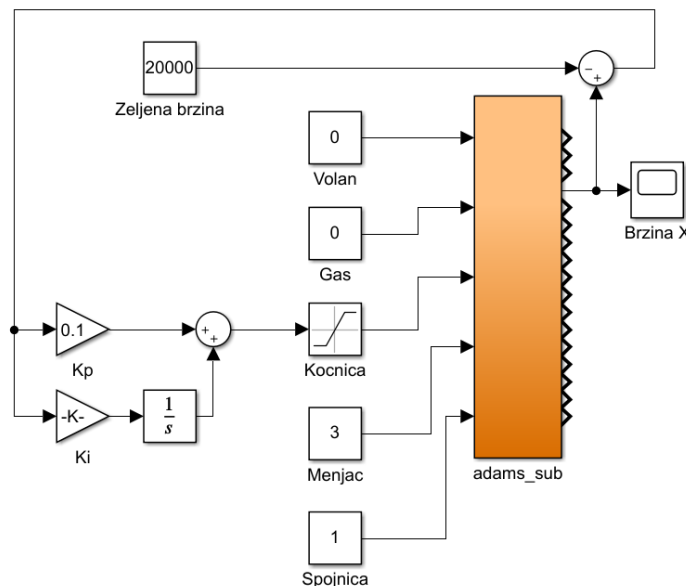
управљати „гасом” и кочењем (интелигентно управљање системом кочења описано је у [167]), али и аутоматским мењачем (што неће бити случај у симулацијама спроведеним за потребе ове дисертације).

За управљање брзином возила, као што је то случај са тзв. „темпоматом” (енгл. *cruise control*), често се користе *PID* регулатори. Треба напоменути да конвенционални „темпомати” управљају само „гасом”, док адаптивни „темпомати” (енгл. *adaptive/active cruise control*) управљају и системом за кочење (и аутоматским мењачем, уколико постоји на возилу).

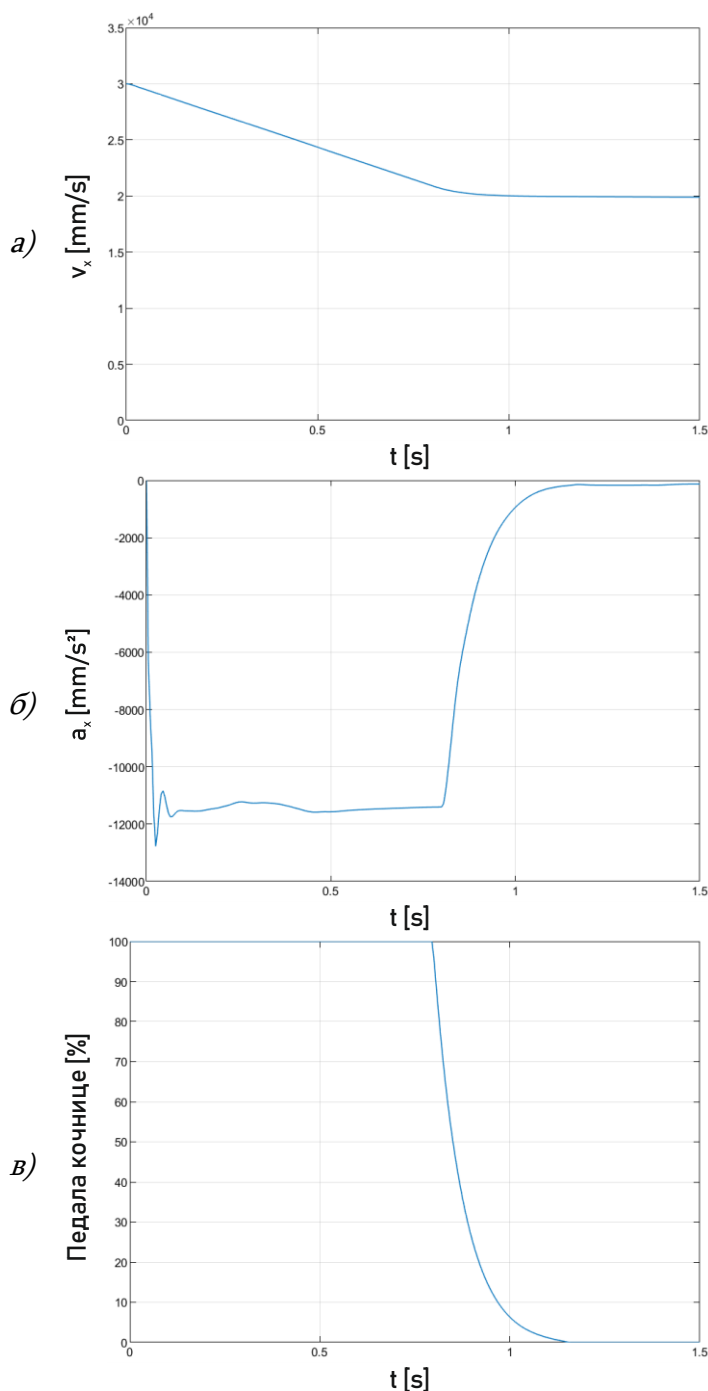
*PID* (*proportional-integral-derivative* – пропорционално-интегрално-деривативни) регулатори управљачки сигнал не генеришу само на основу пропорционалне зависности са грешком жељене излазне величине, већ и на основу интеграла сигнала грешке (за повећање тачности рада система у устаљеном стању, на пример код „темпомата” за одржавање константне брзине у стационарним условима [152]) и извода овог сигнала (за побољшање динамичких својстава система, односно квалитета његовог преносног одзива) [168]. Подешавање *PID* регулатора у неким случајевима може бити сложен задатак [169].

### 5.3.1. Кочење

На слици 5.2 приказан је модел развијен за потребе дисертације који се показао успешним у контролисању брзине помоћу кочења. У питању је *PI* (пропорционално-интегрални) регулатор који управљачки сигнал (положај команде кочнице) израчунава на основу разлике жељене и стварне брзине. Коefицијенти који су дали добар резултат су  $K_p = 0,1$  (пропорционални) и  $K_i = 0,001$  (интегрални коefицијент). Слика 5.3 приказује успешно успорење кочењем са брзине од 30 m/s до брзине од 20 m/s.



Слика 5.2 Модел управљања кочењем ( $K_p = 0,1$ ,  $K_i = 0,001$ )



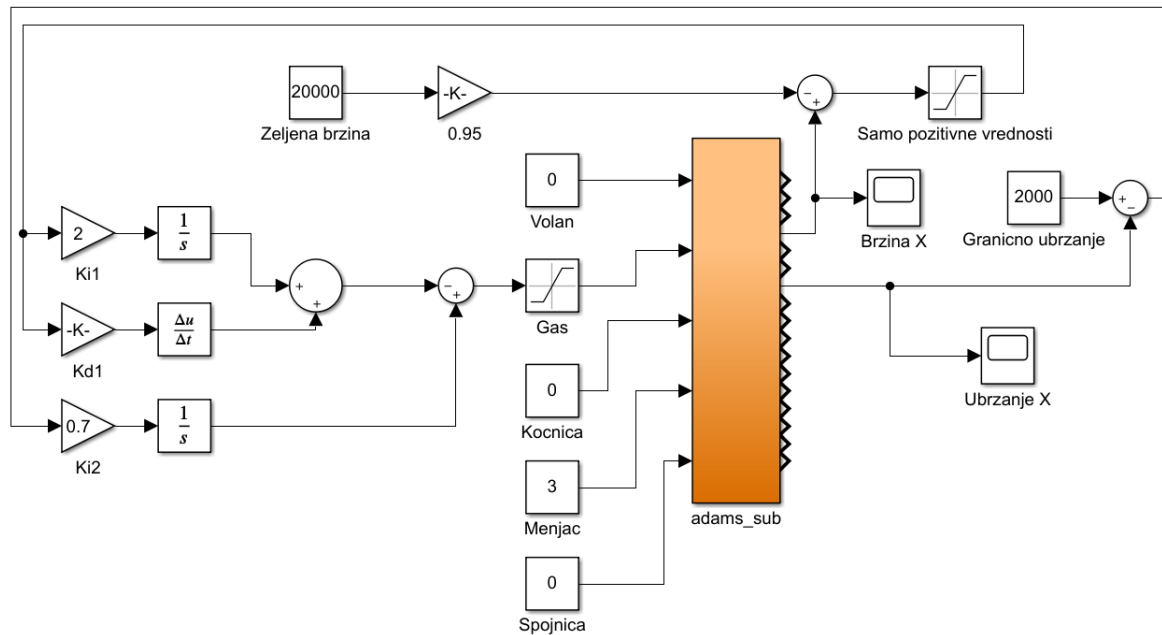
Слика 5.3 Кочење са 30 на 20 m/s: а) подужна брзина, б) подужно убрзање, в) педала кочнице

Овде треба нагласити да би управљање системом за кочење аутономног возила требало да узима у обзир и многе друге величине битне за процес кочења, као што је температура кочница, на пример [170].

### 5.3.2. Убрзање

Модел развијен за потребе дисертације којим се успешно може управљати брзином помоћу „гаса” приказан је на слици 5.4. У питању је  $ID$  (интегрално-деривативни) регулатор који управљачки сигнал (положај команде „гаса”) израчунава на основу разлике између задате и стварне брзине, али и ограниченог убрзања (због комфора, али и

безбедности), уз оптималне коефицијенте  $K_{i1} = 2$ ,  $K_{d1} = 0,005$  (деривативни коефицијент) и  $K_{i2} = 0,7$ . На слици 5.5 приказано је успешно убрзање од 10 до 20 m/s, без преласка задате границе подужног убрзања од 2 m/s<sup>2</sup>.



Слика 5.4 Модел управљања убрзањем ( $K_{i1} = 2$ ,  $K_{d1} = 0,005$ ,  $K_{i2} = 0,7$ )

Приказани модел не управља мењачким преносником, из разлога што маневри према описаним стандардима не захтевају промену степена преноса. Модел који би одлучивао о промени степена преноса би морао да узме у обзир већи број параметара [171].

#### 5.4. Попречно управљање

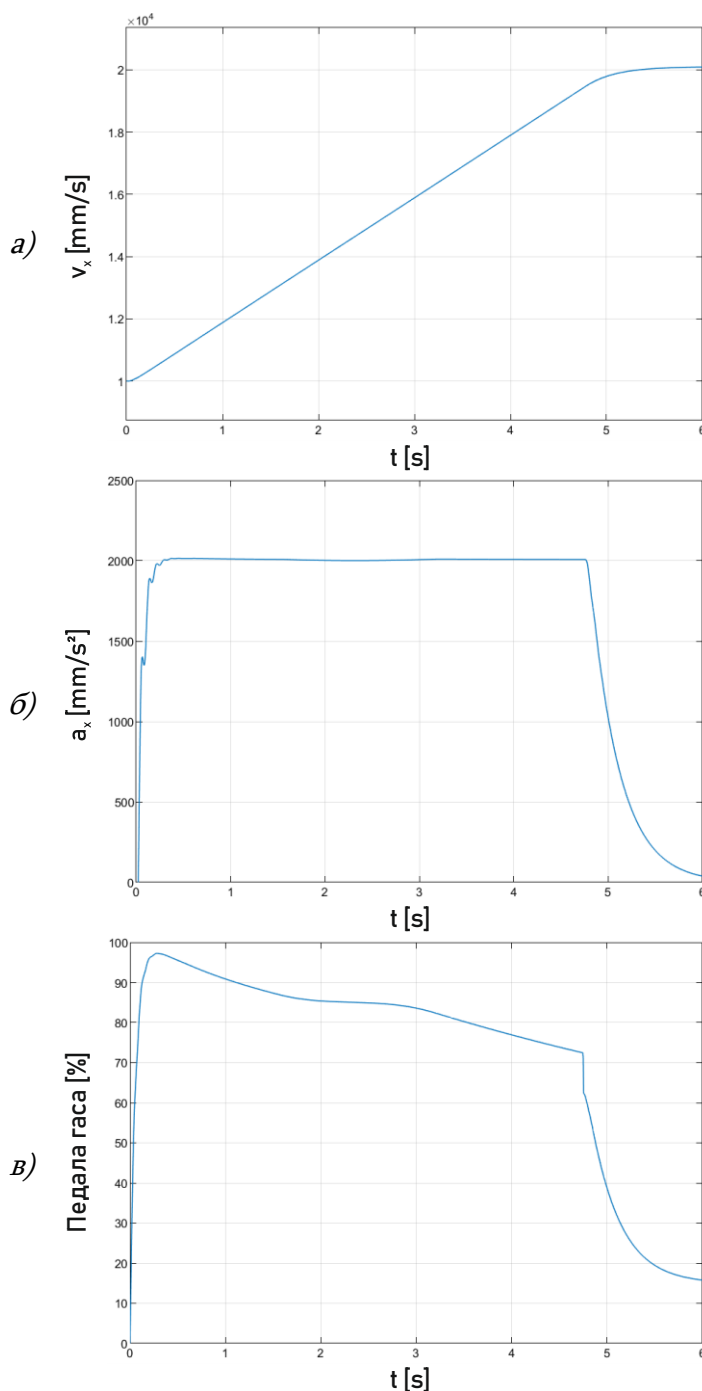
За разлику од подужног управљања, попречно управљање се показало као много већи изазов. Контролисање система за управљање при маневрима на граници могућности возила представља сасвим другачији изазов у односу на управљање роботима који се крећу малим брзинама (о чему се може прочитати у [172,173]).

Према [174], хеуристичке (искуствене) методе смањују комплексност проблема поједностављујући облике објеката и ограничавајући кретање возила на мање скупове. Међутим, већина метода генерише путање, а не трајекторије. Зато су геометријске методе одговарајуће углавном за примене при малим брзинама (при аутоматском паркирању, на пример).

Већина контролера приказаних у литератури је успешна у праћењу саобраћајних трака или возила испред на аутопуту (где су полупречници кривина велики, без потребе за наглим маневрима) [153], нарочито они који угао закретања тачкова повезују директном зависношћу са жељеном променом угла вијугања (за његове мале углове) [17], где се жељена промена угла вијугања унапред дефинише за дати маневар. Пропорционални регулатор је коришћен и у раније поменутом пројекту *ARGO* [175].

Процес управљања возилом од стране човека се састоји из три подмодела: планирања циљне путање, управне спреге и повратне спреге [176], а исто важи и за управљачку јединицу. Управна спрега се користи за формирање управљачког сигнала на

основу праћених параметара (брзине возила и закривљености пута испред, на пример), док је задатак повратне спреге да управљачки сигнал коригује на основу одступања од жељеног понашања (жељене путање, на пример).

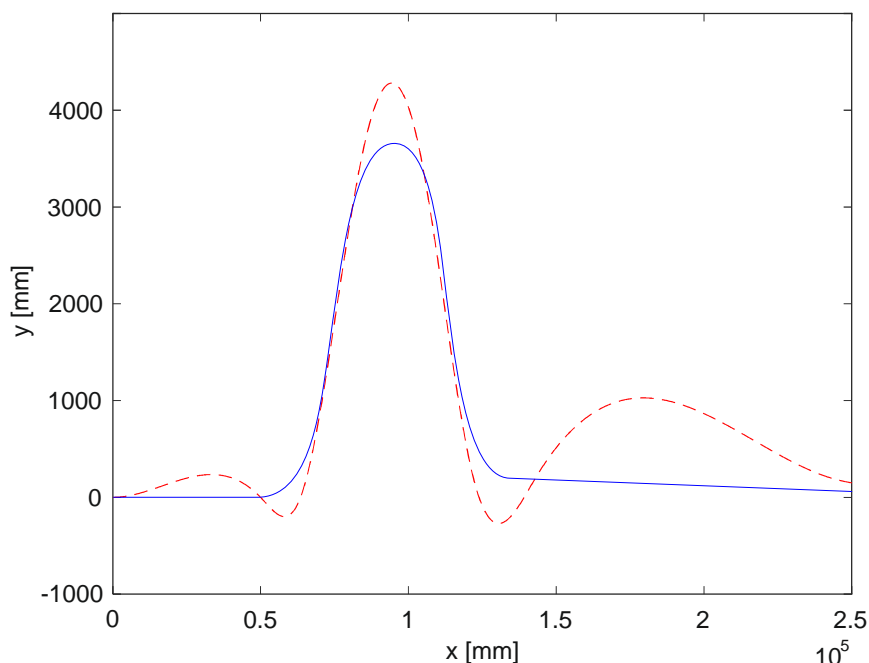


Слика 5.5 Убрзање са 10 на 20 m/s: а) подужна брзина, б) подужно убрзање, в) педала гаса

За потребе ове дисертације ће се циљна путања формирати на два начина – коришћењем Безјеових кривих и на основу путања генерисаних самосталним *Adams Car* симулацијама.

Предност Безјеових кривих у односу на уклештени кубни сплајн приликом формирања путање за пролазак кроз полигон према стандарду *ISO 3888-1* лако се може сагледати са слике 5.6 (за разлику од слике 4.4 на којој се ова предност не може тако лако уочити).

Путање генерисане самосталним *Adams Car* симулацијама се могу сматрати путањама „снимљеним” приликом маневара које је на полигону спровео увежбани професионални возач, те стога пожељним за пролазак кроз полигон.



**Слика 5.6** Путања према ISO 3888-1 генерисана уклештеним кубним сплајном (црвена испрекидана линија), односно Безјевим кривама (плава пуна линија)

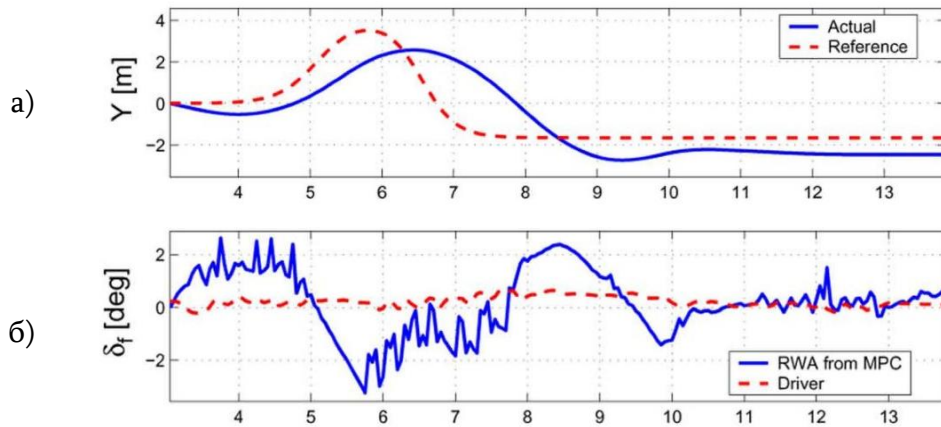
*PID* регулатори се често конструишу на основу упрошћених модела понашања возила, узимајући у обзир да се стварно понашање возила разликује од оног предвиђеног геометријским моделом (због повођења, инерције возила...) [175]. Неки аутори сматрају да је коришћење *PID* регулатора за попречно управљање возилом отежано јер одређивање оптималних коефицијената представља велики изазов [177], а они никако не могу бити константни – морају зависити од тренутног стања возила (на пример, у [156] стоји да коефицијент  $K_p$  мора да расте са порастом закривљености жељене путање, како би омогућио бржи динамички одзив, док мање вредности на правцу обезбеђују стабилност при већим брзинама). У прилог овоме можда иде и чињеница да је у [151] *PID* регулатор за „гас” прецизно описан и дефинисан, док о контролеру задуженом за закретање управљачких тачкова нису дати никакви детаљи, иако аутори тврде да је успешно примењен.

Шездесетих година у Јапану је за попречно управљање возилом коришћен контролер чији је управљачки сигнал представљао збир сигнала израчунатог *PD* регулатором на основу одступања од путање и сигнала израчунатог пропорционалним регулатором на основу грешке угла вијугања [175].

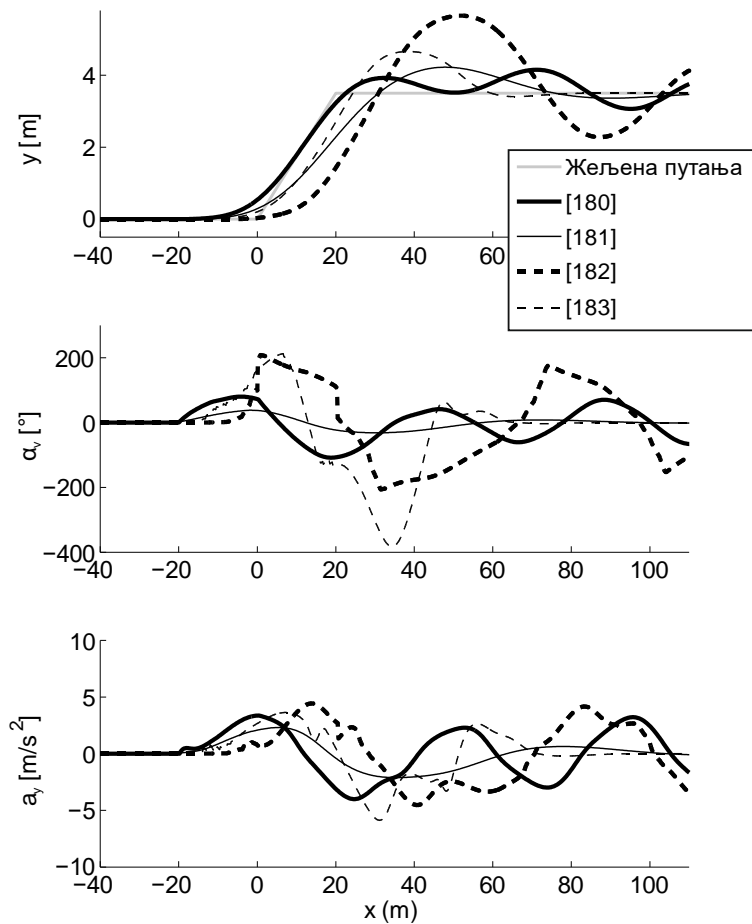
„Стенли” метода, коришћена за управљање истоименог, раније поменутог возила, представља нелинеарну повратну спрегу засновану на кинематици као функцији одступања од жељене путање (попречног одступања и угла вијугања). Перформансе ове методе нагло опадају при већим брзинама [178]. Слично, и возило „Пешчана олуја” које је учествовало на истим такмичењима (*DARPA Grand Challenge 2004/2005*) је користило једноставан модел управљања заснован на кинематици. На супротној страни, возило



„Газда”, победник такмичења „*DARPA Urban Challenge 2007*” је користило доста напреднији систем заснован на предвиђању понашања модела (*Model predictive control – MPC*) [175].



**Слика 5.7** Маневар при брзини од 19 m/s: а) бочна позиција (црвена испрекидана линија – жељена, плава пуна линија – остварена), б) угао управљачких тачкова (црвена испрекидана линија – угао који задаје возач, плава пуна линија – стварни угао који је резултат садејства возача и управљачке јединице) [160]



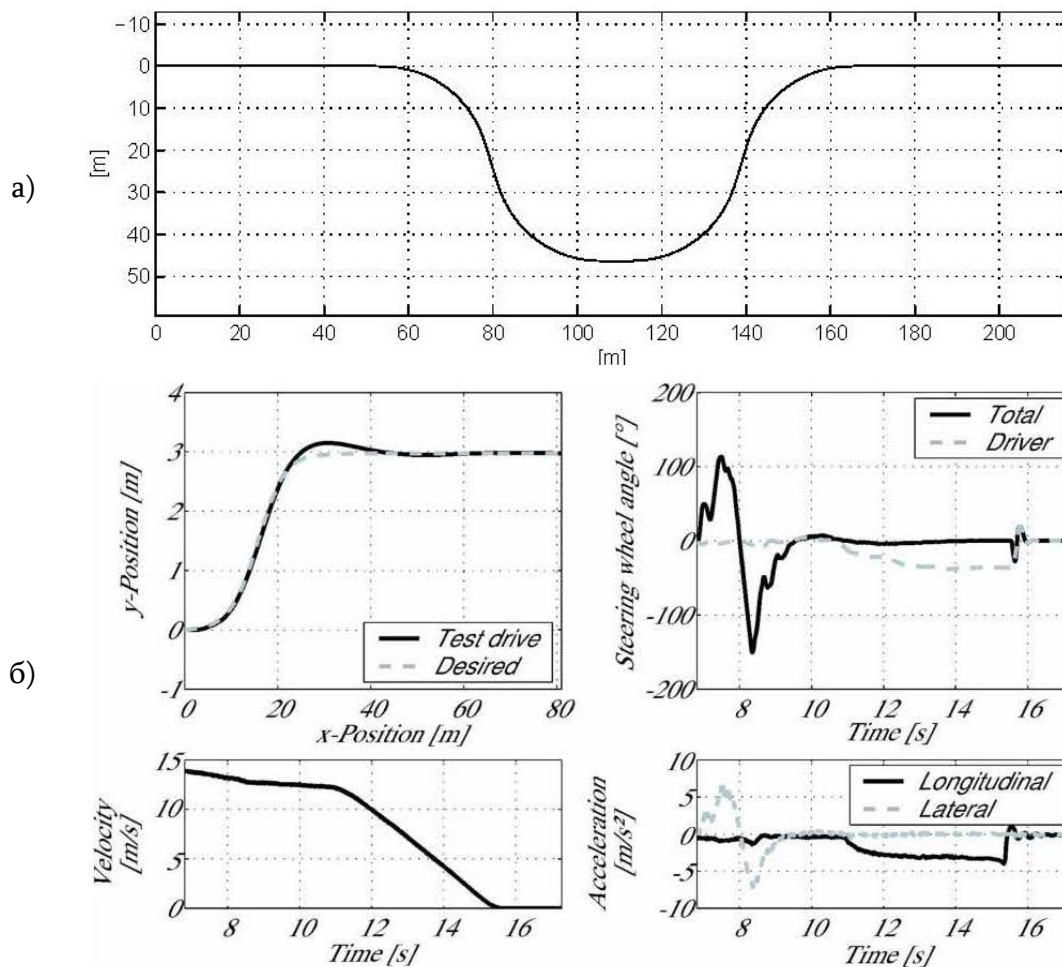
**Слика 5.8** Промена саобраћајне траке коришћењем различитих модела из литературе [179]

Да попречно управљање возилом представља велики изазов, говоре и резултати неколико истраживања. У првом од њих је возилом управљано на основу предвиђања понашања

модела у циљу двоструке промене саобраћајне траке. При брзини од 7 m/s возило је успевало да успешно прати задату путању, док при већим брзинама то није био случај (слика 5.7) [160].

Као резултат другог истраживања, на слици 5.8 дат је приказ симулације промене саобраћајне траке дуж 20 m (подужно растојање од планираног почетка до планираног завршетка маневра) при брзини од 20 m/s коришћењем различитих модела из литературе [179], уз приметно одступање од жељене путање.

Слика 5.9 приказује резултате још два истраживања као прилог чињеници да маневри на граници могућности возила јесу изазовни – под а) је представљен маневар који брзином од 18 m/s изводи болид Формуле 1 [182], много блажи од маневара који су тема ове дисертације, док је под б) приказан маневар једноструке промене саобраћајне траке, који започиње брзином од 14 m/s, а која се смањује до краја маневра до заустављања возила [184].



**Слика 5.9** Резултати два истраживања промене саобраћајне траке: а) путања возила [182], б) у смеру казаљке на сату, почевши од горњег левог угла: путања возила, зависност угла волана од времена, зависност брзине возила од времена, зависност подужног и попречног убрзања од времена [184]

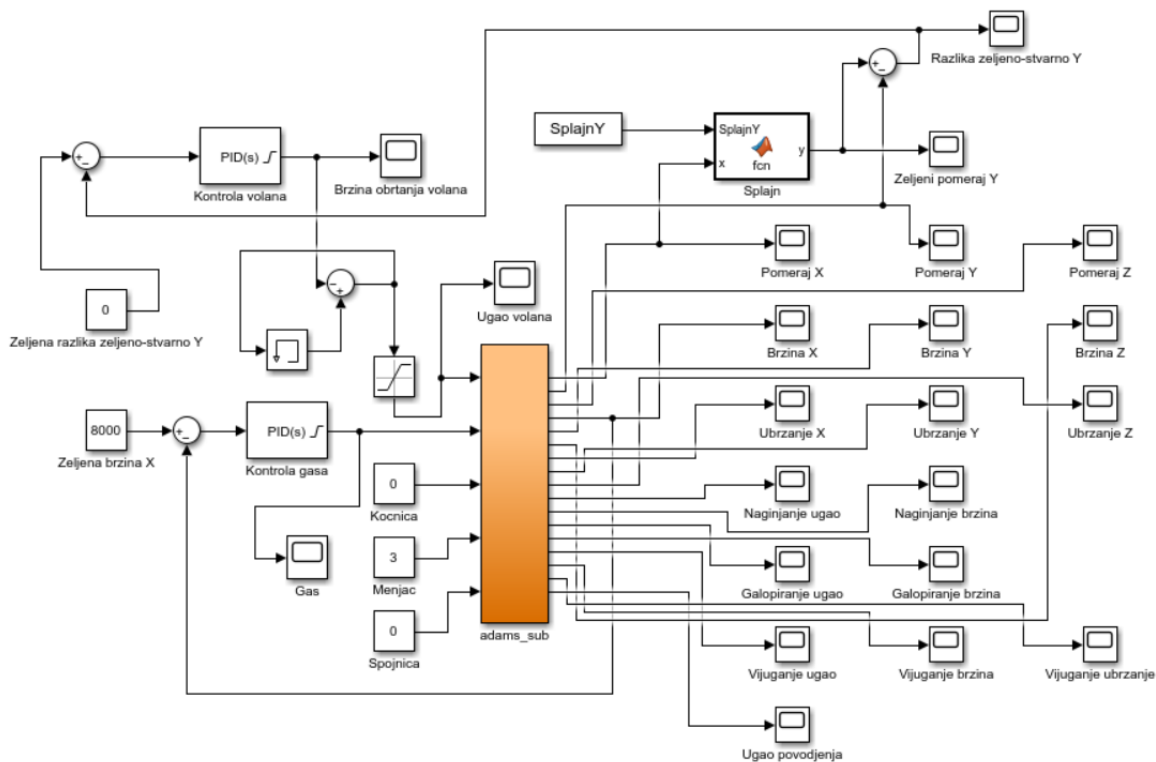
Табела 5.2 приказује преглед метода коришћених за попречно управљање [175] – оптимална (према ауторима прегледа) примена ових метода не укључује маневре који су предмет ове дисертације.

Табела 5.2 Преглед коришћених метода за попречно управљање [175]

Метода		Оптимална примена
Геометријски и кинематски модели	Проста потеря за тачком на жељеној путањи	Спора возња
	„Стенли”	„Глатка” возња аутопутем / маневри паркирања
	Ланчани кинематски модел	„Глатки” маневри паркирања
Линеарни квадратни регулатор са управном спрегом		„Глатка” градска возња већим брзинама
Линеарни квадратни регулатор са погледом унапред		Возња аутопутем релативно непроменљивом брзином

### 5.4.1. Верзија контролера 1

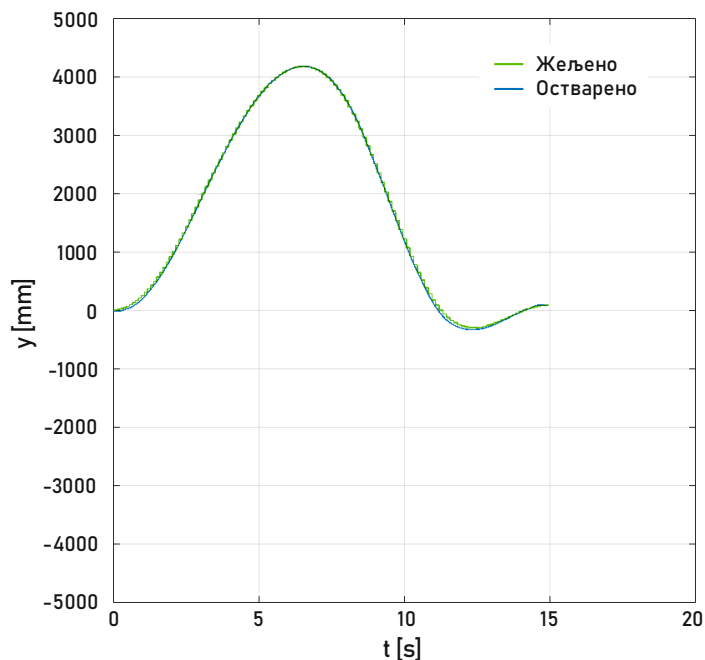
На слици 5.10 приказан је косимулациони модел заснован на *PID* регулаторима, развијен за потребе дисертације, који даје задовољавајуће резултате када је у питању праћење задате путање (при мањим брзинама), што се може видети на сликама 5.11 и 5.12 за маневар промене саобраћајне траке који почиње брзином од 10 m/s при чему се брзина током маневра смањује на 8 m/s.



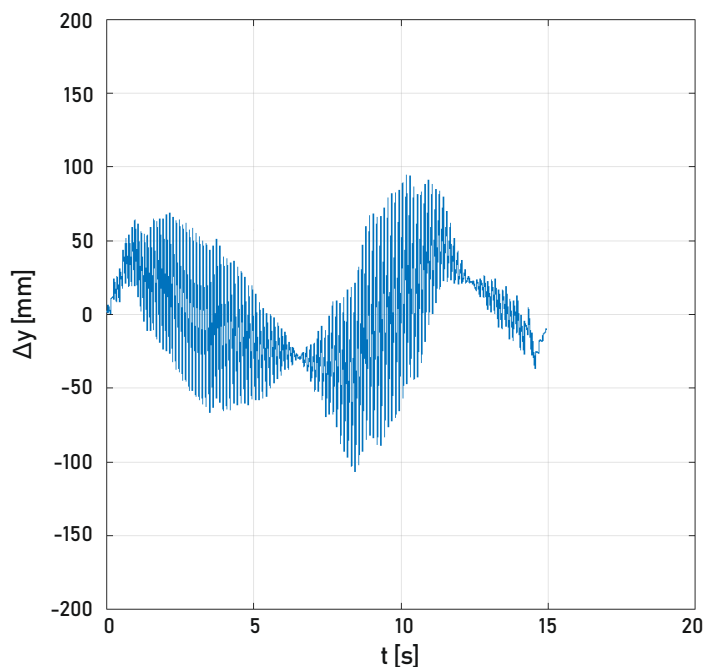
Слика 5.10 Почетни модел управљања возилом

У приказаном моделу, *PID* регулатори се користе за управљање педалом „гаса” и тачком управљача. Педалом „гаса” се управља променом њеног положаја у зависности од жељене брзине, док се тачком управљача управља променом угаоне брзине обртања „волана” у зависности од одступања стварне од жељене путање. У овом моделу, директно управљање положајем (углом закретања) „волана” у зависности од истог или других параметара (бочног убрзања, рецимо) није дало жељене резултате (у том тренутку је аутор

дисертације сматрао да такав модел не би добро представљао реално возило, пошто угао закретања точка управљача није могуће тренутно променити са  $60^\circ$  на  $120^\circ$ , на пример, али се касније показало да успешан модел управљања положај точка управљача мења на начин који је остварив и који је скоро идентичан начину на који би то чинио возач, чак и када му се директно задаје његов положај).



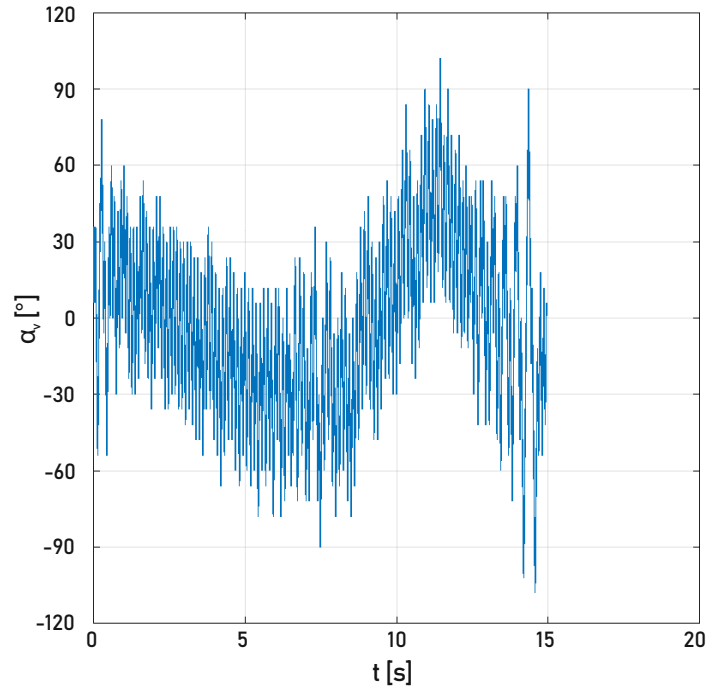
*Слика 5.11 Жељени и остварени бочни померај коришћењем почетног модела*



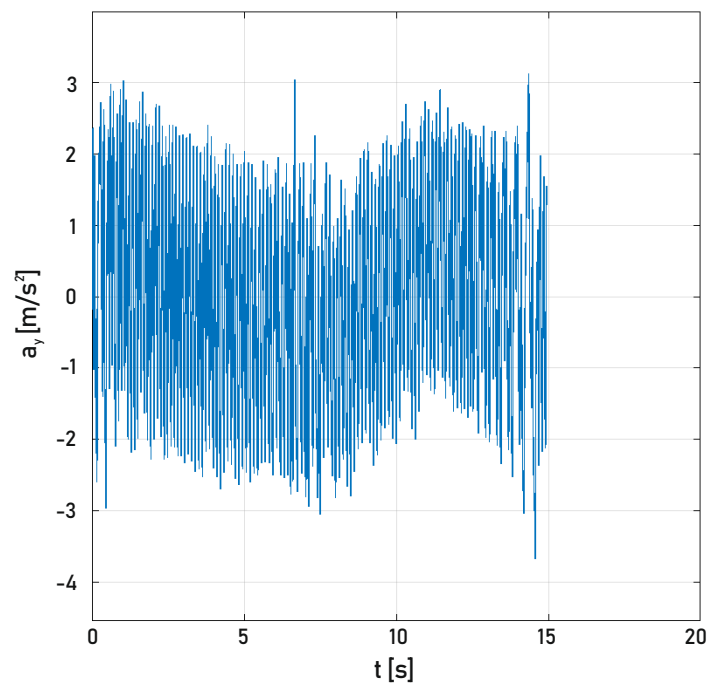
*Слика 5.12 Разлика између жељеног и оствареног бочног помераја коришћењем почетног модела*

Иако се показао добро по питању праћења задате путање (уз поклапање жељене и стварне путање у великој мери приказано на слици 5.11, односно мале вредности одступања двају путања приказано на слици 5.12), приказани модел узрокује (односно захтева) сувише

променљиво закретање „волана” приказано на слици 5.13 – промена његовог угла није „глатка” као што би била када би возилом управљао човек. Овакво понашање точка управљача узрокује и сувише велике вредности бочног убрзања (за дати маневар) приказане на слици 5.14.

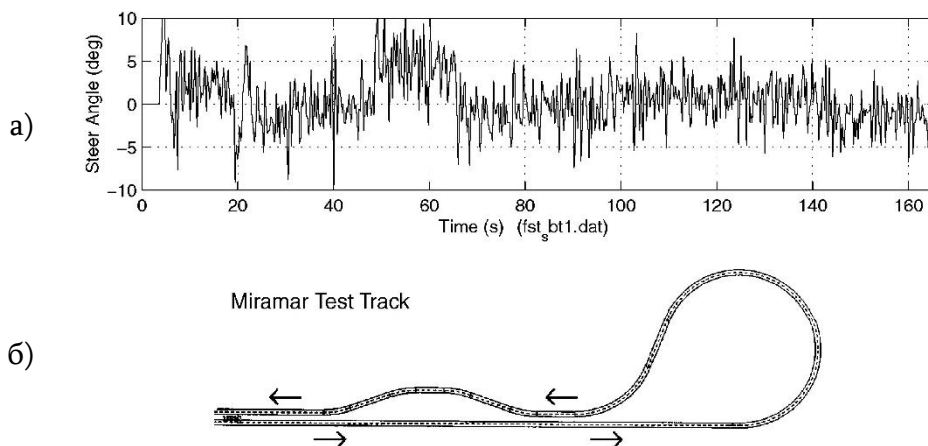


Слика 5.13 Угао точка управљача

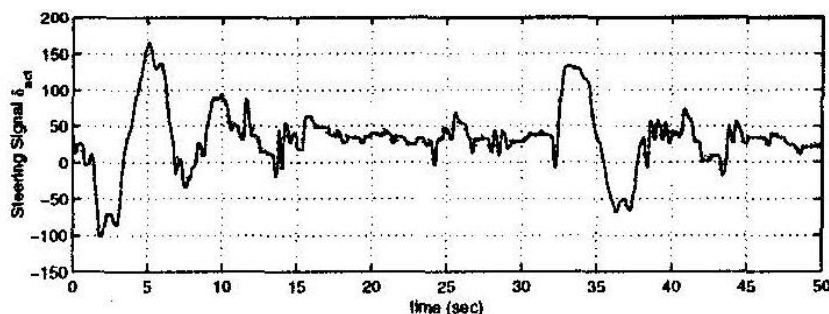


Слика 5.14 Остварено бочно убрзање

Слично понашање система за управљање дају и модели приказани у [185] и [186] (слике 5.15 и 5.16).



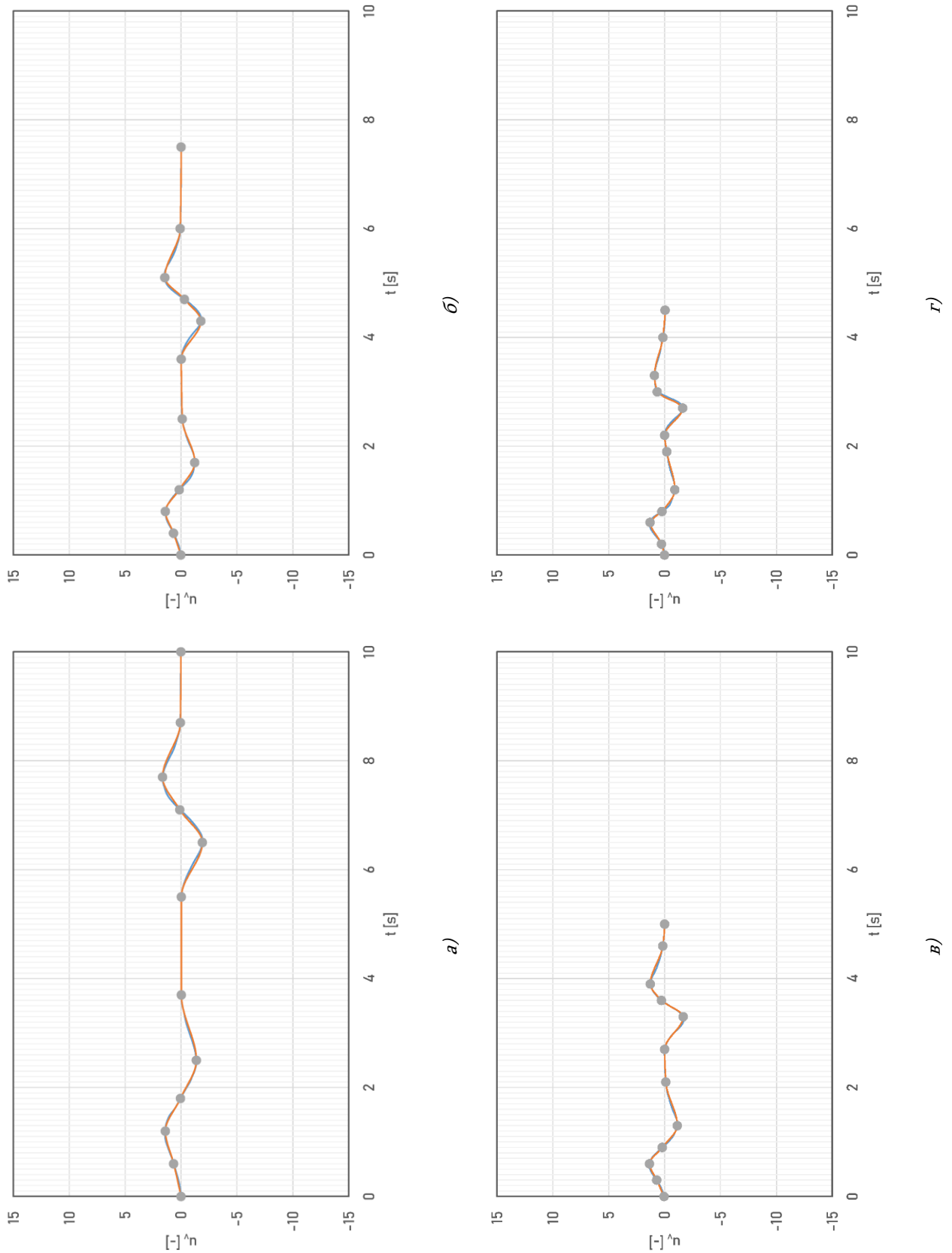
Слика 5.15 Резултат полигонског испитивања при брзинама до 174 km/h: а) Угао управљачких тачкова у зависности од времена, б) Путања [185]



Слика 5.16 Угао управљачких тачкова у зависности од времена приликом маневра двоструке промене саобраћајне траке [186]

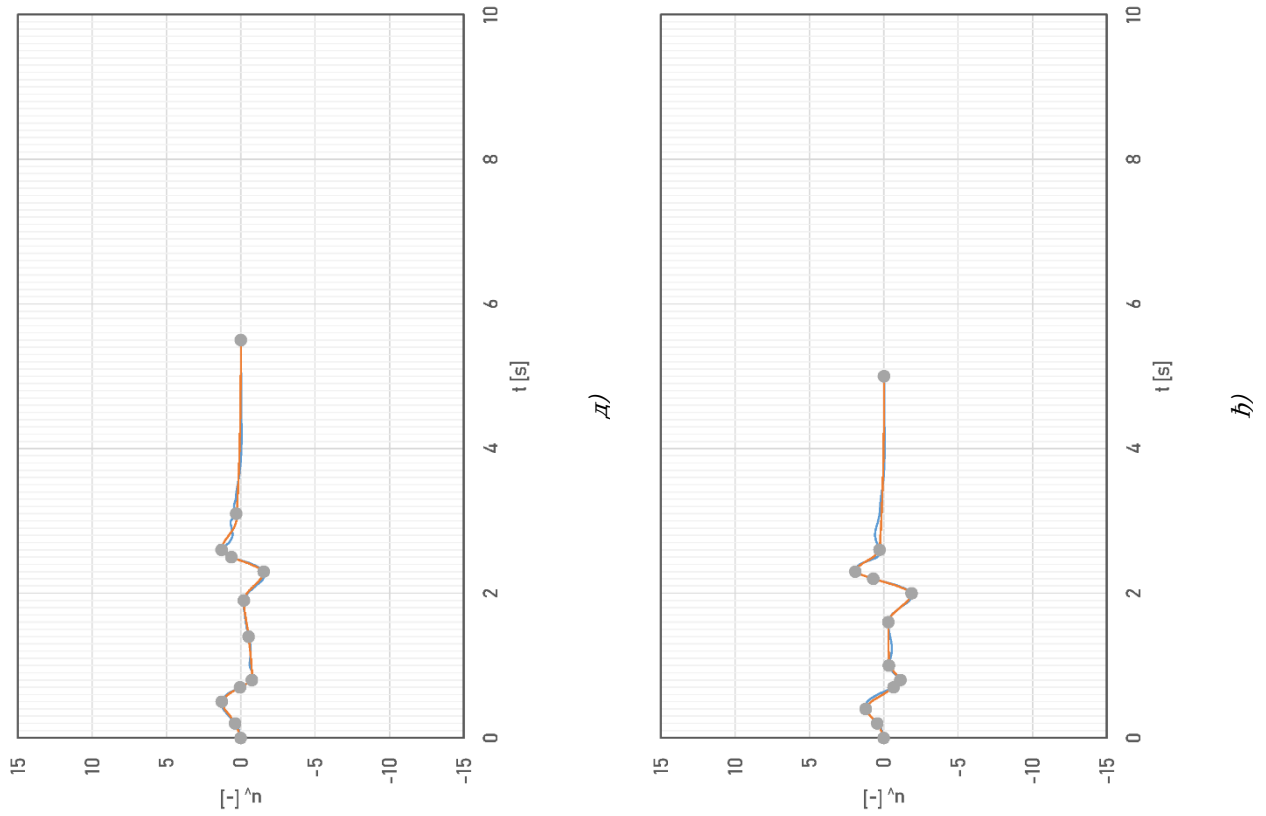
#### 5.4.2. Верзија контролера 2

Следећа идеја аутора дисертације за развој контролера је била да се у програму *Adams Car* спроведу симулације почевши од брзине од 10 m/s, у корацама од по 5 m/s, до максималних брзина при којима се могу савладати полигони према *ISO 3888-1* и *ISO 3888-2*. Резултат тако спроведених симулација су познати управљачки сигнали (за тачак управљача и „гас“) који успешно могу „спровести“ возило кроз задате полигоне. Како ти сигнали (приказани плавим линијама на сликама 5.17 до 5.20) имају сличан облик (на пример, сигнал команде тачка управљача при брзини од 10 m/s на полигону *ISO 3888-1* „личи“ на сигнал команде тачка управљача при брзини од 20 m/s на полигону *ISO 3888-2*, сигнал команде „гаса“ при брзини од 10 m/s на полигону *ISO 3888-1* „личи“ на сигнал команде „гаса“ при брзини од 35 m/s на истом полигону, итд.) изабране су карактеристичне тачке тих сигнала (сиве тачке на сликама 5.17 до 5.20), чији се вертикални (положај команде) и хоризонтални (време) положај могу скалирати интерполацијом по времену и димензијама полигона, након чега би се сплајн интерполацијом тако добијених тачака добио одговарајући управљачки сигнал за било коју жељену брзину и димензије полигона из опсега (наранџасте линије на сликама 5.17 до 5.20 представљају сигнале добијене сплајн интерполацијом за брзине и полигоне за које су спроведене симулације).

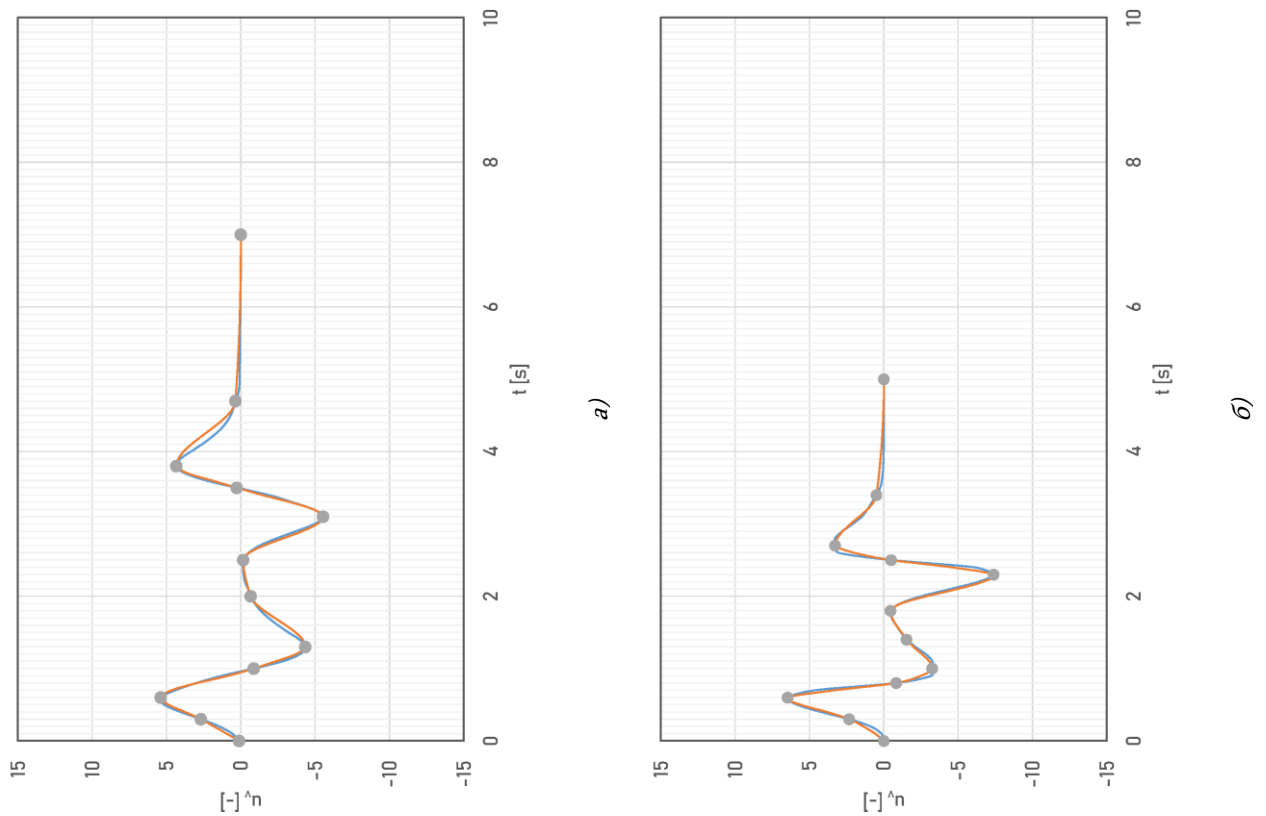


**Слика 5.17** ISO 3881-1 команда волана: а) 10 m/s, б) 15 m/s, в) 20 m/s, г) 25 m/s (плава линија – Adams Car; наранџаста линија – сплајн; опсег команде  $-12 \div 12$  одговара углу волана  $-720 \div 720^\circ$ )

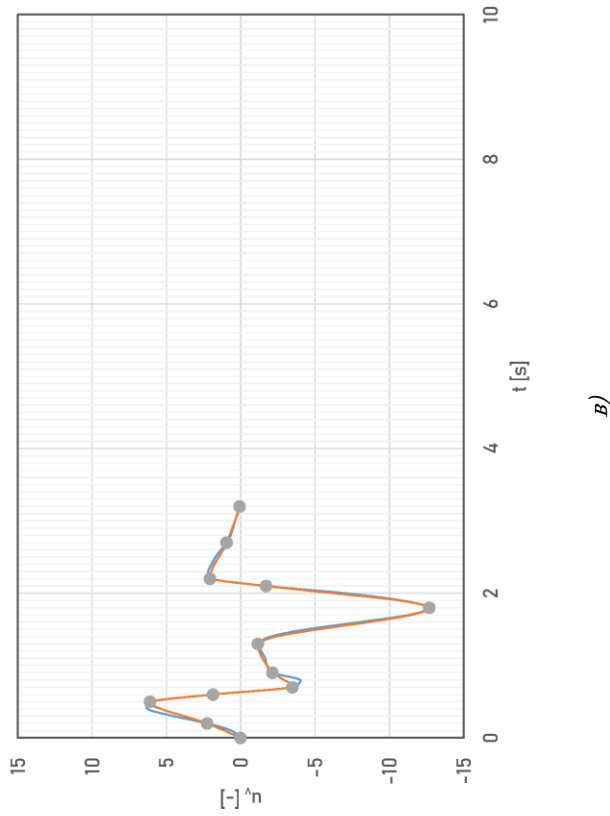




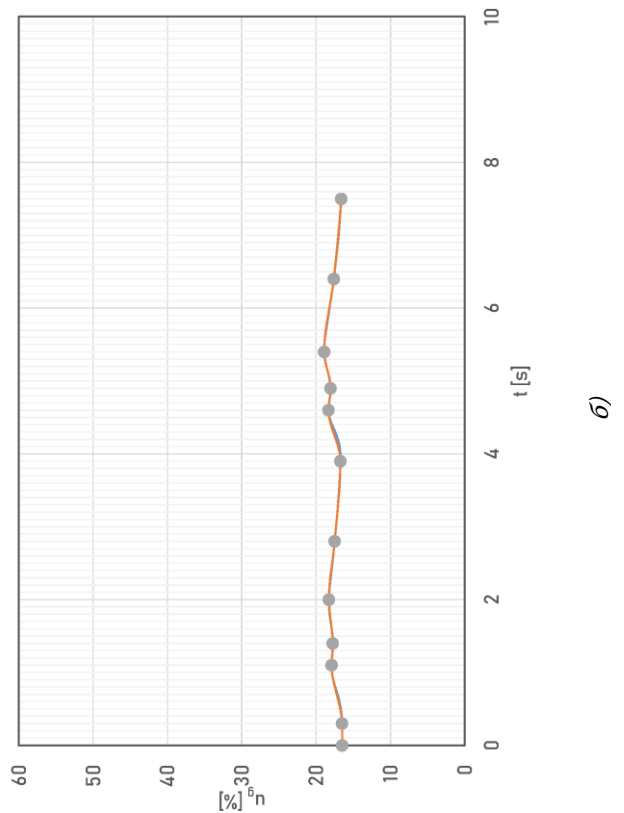
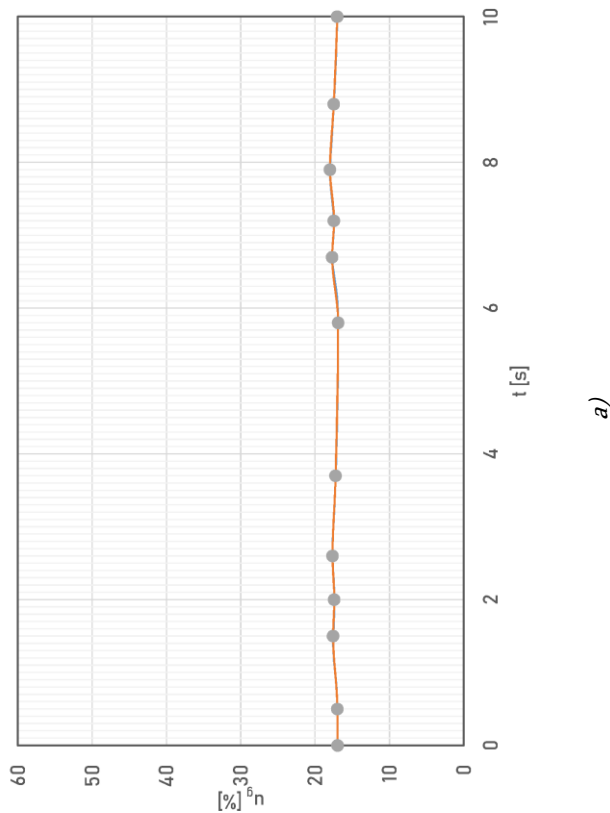
Слика 5.17 ISO 3881-1 команда волана: д) 30 m/s, ѓ) 35 m/s (плава линија – Adams Car; наранџаста линија – сплајн; опсег команде -12÷12 одговара углу волана -720÷720°) (наставак)



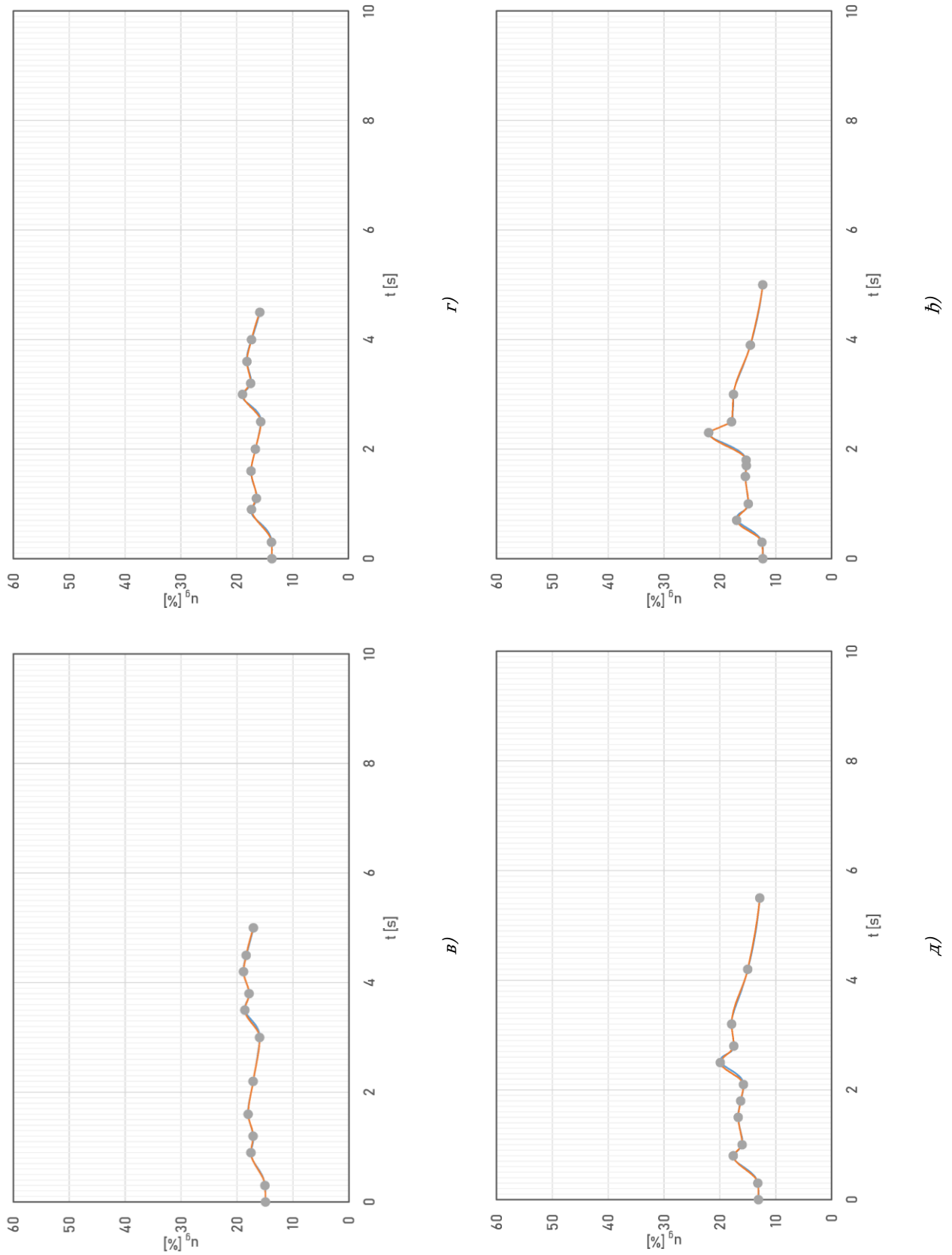
Слика 5.18 ISO 3881-2 команда волана: а) 10 m/s, б) 15 m/s (плава линија – Adams Car; наранџаста линија – сплајн; опсег команде -12÷12 одговара углу волана -720÷720°)



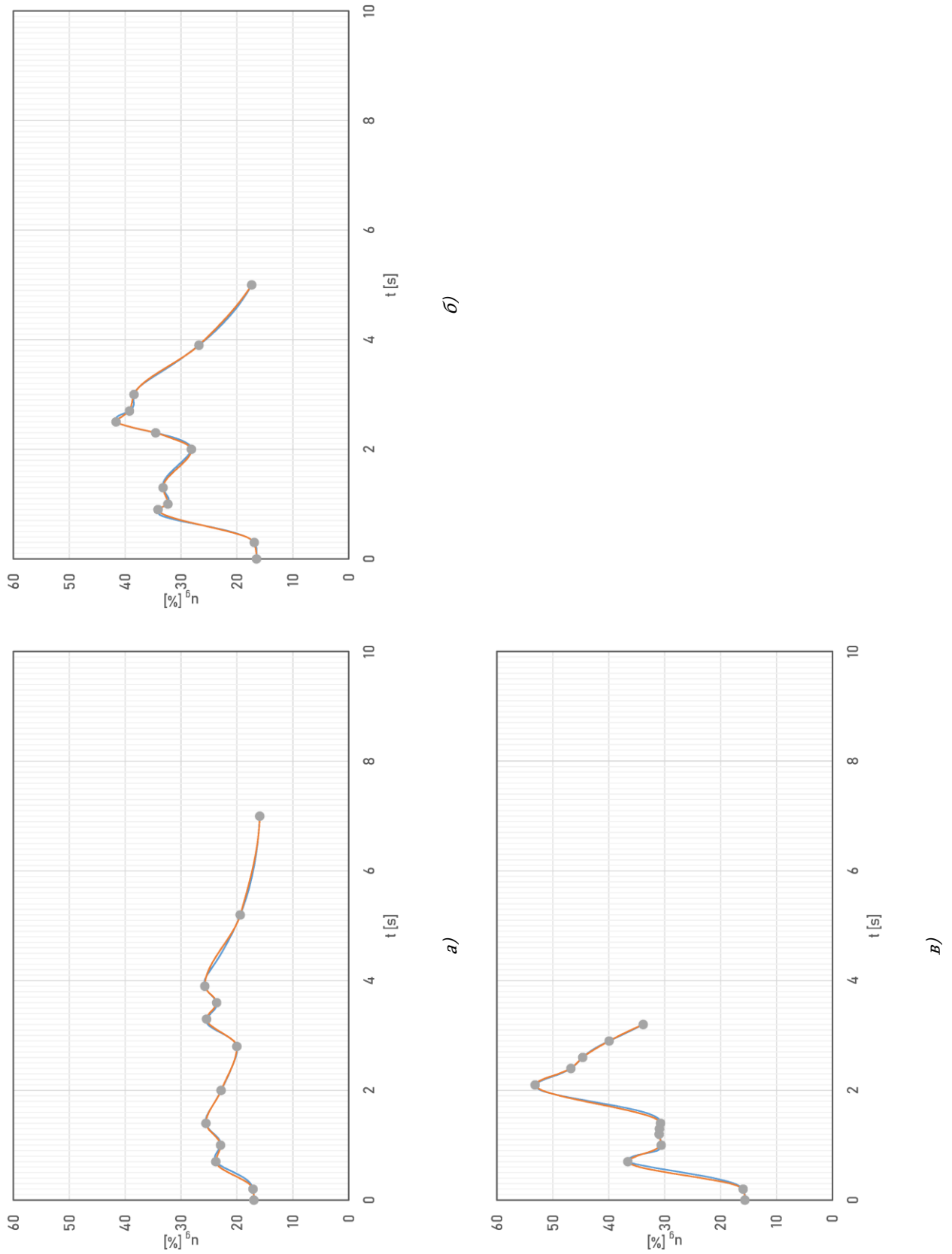
Слика 5.18 ISO 3881-2 команда волана: в) 20 m/s (плава линија – Adams Car; наранџаста линија – сплајн; опсег команде -12÷12 одговара углу волана -720÷720°) (наставак)



Слика 5.19 ISO 3881-1 команда „гаса”: а) 10 m/s, б) 15 m/s (плава линија – Adams Car; наранџаста линија – сплајн)

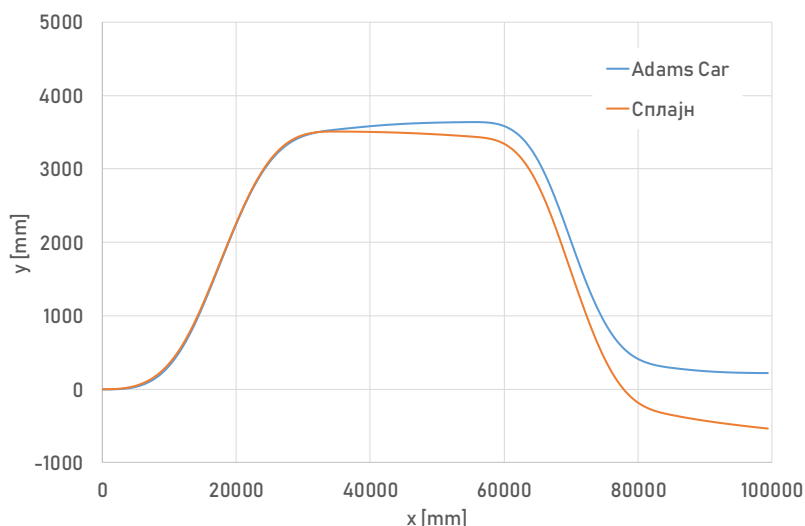


Слика 5.19 ISO 3881-1 команда „гаса“: в) 20 m/s, г) 25 m/s, д) 30 m/s, ђ) 35 m/s (плава линија – Adams Car; наранџаста линија – сплајн) (наставка)



Слика 5.20 ISO 3881-2 команда „гаса”: а) 10 m/s, б) 15 m/s, в) 20 m/s (плава линија – Adams Car – наранџаста линија – сплајн)

Ова идеја се није показала добром, јер овакав приступ не само да није могао да се користи за генерисане сигнала за „непознате” вредности брзина и димензија полигона, већ је узроковао и грешке за „познате” комбинације. Иако се може учинити да оригинални сигнали на сликама 5.17а) и 5.19а) не одступају много од оних добијених интерполацијом, ова два сигнала резултују прилично великим разликама у постигнутој путањи, чак и при најмањој брзини и на најмање захтевном полигону (слика 5.21).

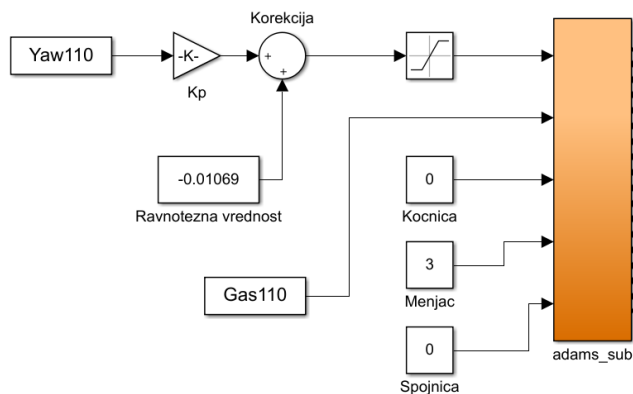


Слика 5.21 Остварене путање на полигону према ISO 3881-1 при брзини од 10 m/s

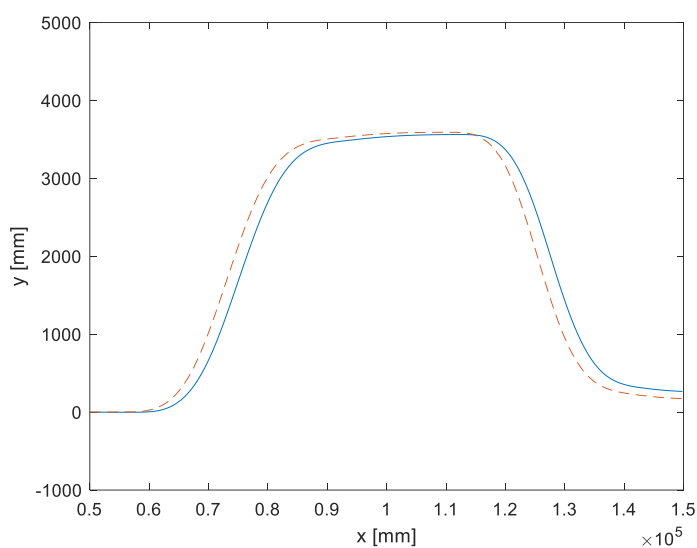
Покушаји да се ова разлика коригује тако што ће се управљачки сигнали генерисати додавањем сигнала генерисаних на основу одступања од жељене путање (односно угла или брзине вијугања) управљачком сигналу добијеном сплајн интерполацијом нису дали резултате. Управљање возилом при оштрим маневрима (какви дефинитивно јесу они дефинисани стандардима ISO 3888-1 и ISO 3888-2) захтева „глатку” промену угла точка управљача – свака нагла промена или почетно одступање може довести до губитка стабилности услед покушаја кориговања ових „погрешних потеза”.

#### 5.4.3. Верзија контролера 3 (коначна)

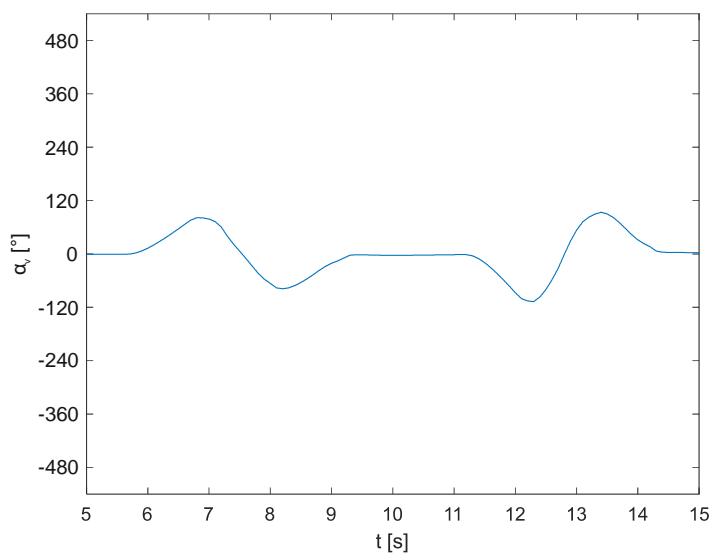
Модел развијен за потребе дисертације којим се кренуло ка коначној верзији је био модел са отвореном петљом (слика 5.22), заснован на [158], код кога је управљачки сигнал (положај точка управљача) директно пропорционалан жељеној брзини вијугања, а која је позната на основу раније спроведене самосталне Adams Car симулације. Коefицијент пропорционалности зависи од брзине возила (за 10 m/s  $K_p = 0,105$ , за 20 m/s  $K_p = 0,06$ ). За разлику од модела датог у [158], угао бочног клизања возила није коришћен за генерисање управљачког сигнала – показало се да нема утицаја на однос жељеног угла точка управљача и брзине вијугања возила. Резултати симулације на полигону ISO 3888-1 при 10 m/s дати су на сликама 5.23 (путања возила) и 5.24 (угао „волана”).



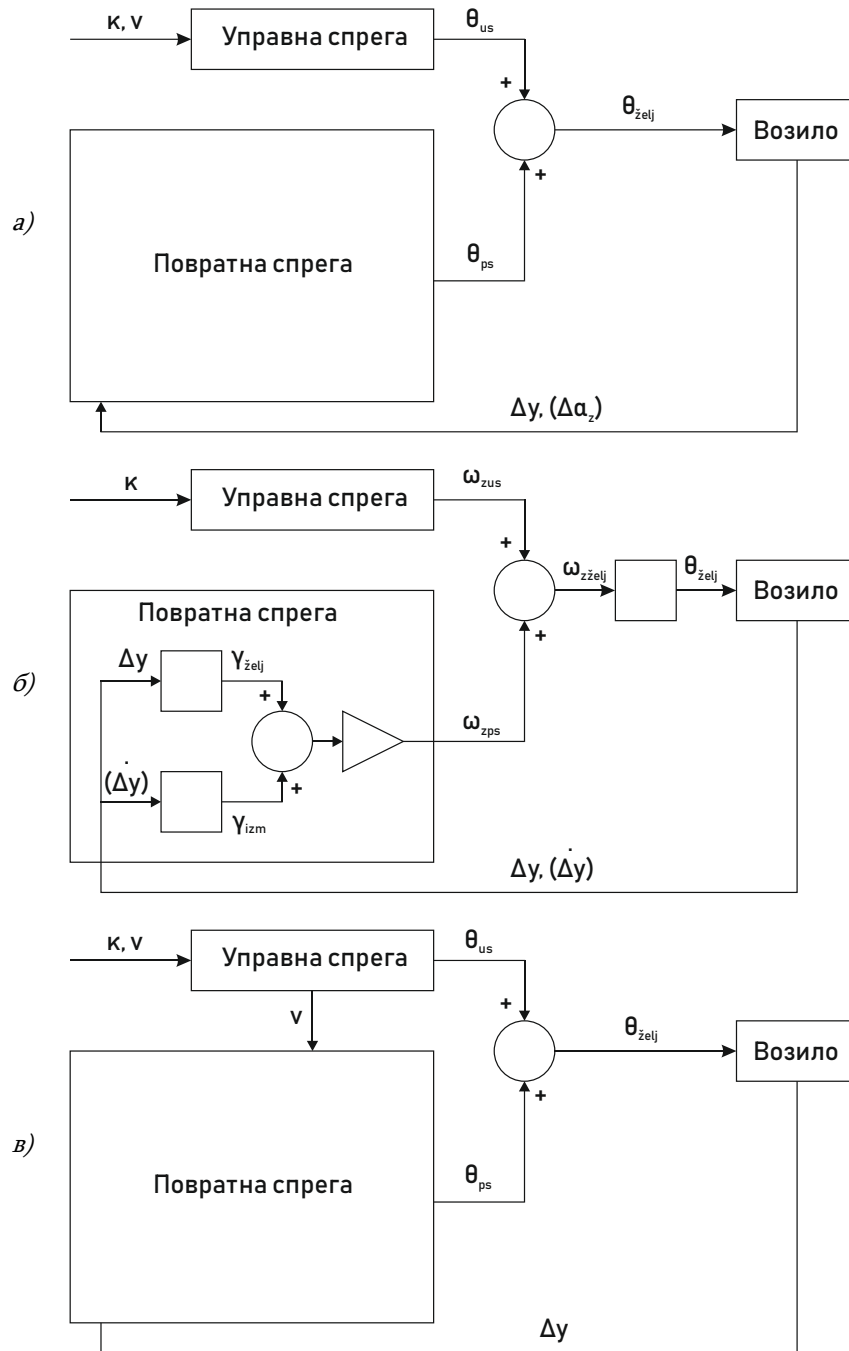
Слика 5.22 Модел управљања на основу задате брзине вијугања отвореном петљом ( $K_p = 0,105$ )



Слика 5.23 Путања остварена моделом са отвореном петљом (плава пуна линија – стварна, црвена испрекидана линија – жељена) – ISO 3888-1 при 10 m/s



Слика 5.24 Угао волана остварена моделом са отвореном петљом – ISO 3888-1 при 10 m/s



Слика 5.25 Модели управљања са повратном спрегом: а) [187], б) [188], в) [184]

Мана овог модела је што не постоји повратна спрега и начин да се за сваку могућу комбинацију брзине возила и димензије полигона генерише референтна зависност брзине вијугања од времена. Стога се приступило изради модела са повратном спрегом – неки од приступа из литературе су дати на слици 5.25, уз следеће ознаке:

- $k$  – закривљеност путање;
- $v$  – брзина возила;
- $\theta$  – угао управљачких тачкова;
- $y$  – попречни положај возила;
- $\Delta y$  – пројектовано одступање од путање;
- $\Delta \alpha_z$  – грешка угла вијугања;



$\omega_z$  – угаона брзина вијугања;

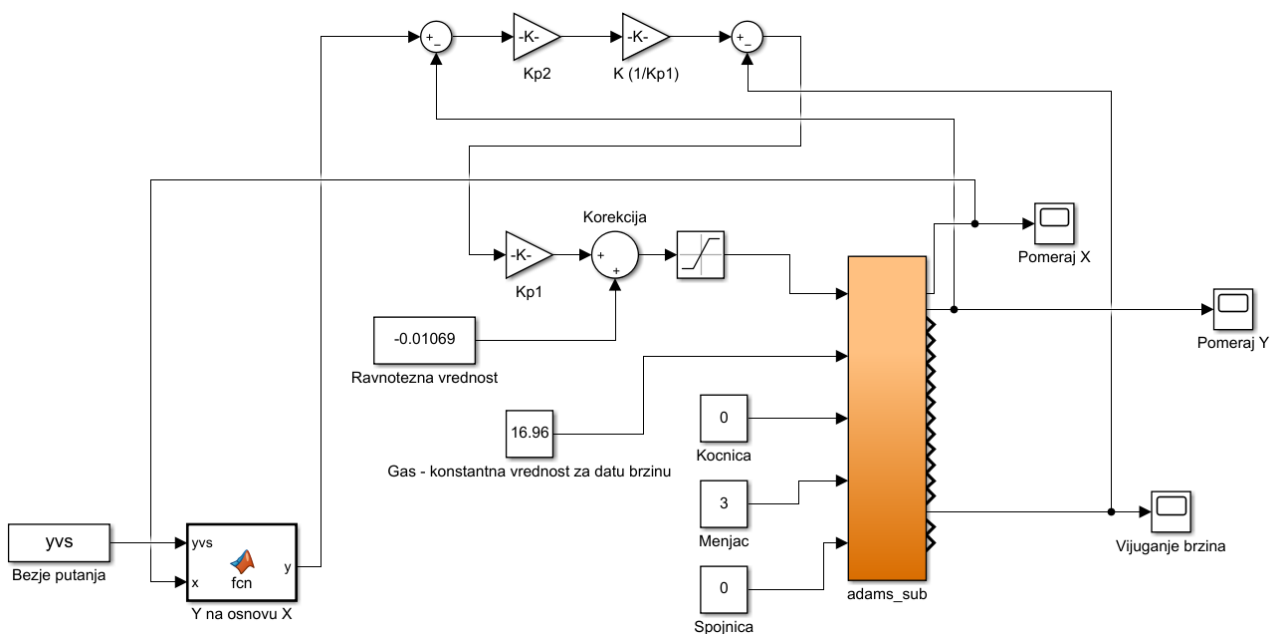
$u_s$  – управна спрега;

$p_s$  – повратна спрега;

$ž_{elj}$  – жељена вредност;

$izm$  – измерена вредност.

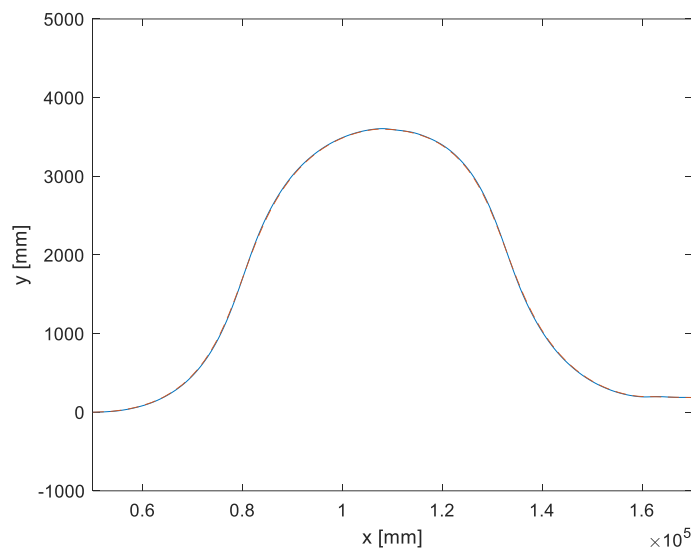
За потребе дисертације је израђен модел који управљачки сигнал (жељену брзину вијугања, односно угао точка управљача) формира на основу одступања од  $u$  координате, након чега га коригује на основу разлике жељене и стварне брзине вијугања, као што је то учињено у [157]. Проблем овог модела (приказаног на слици 5.26) је тај што функционише само при мањим брзинама (слике 5.27 и 5.28), док већ при брзини од 20 m/s на полигону према *ISO 3888-1* возило губи стабилност (слике 5.29 и 5.30). Жељена путања означена је испрекиданом црвеном, док је стварна означена плавом пуном линијом. Закретање „волана” је у моделу ограничено на  $-360^\circ \div 360^\circ$ , што се може видети на слици 5.30.



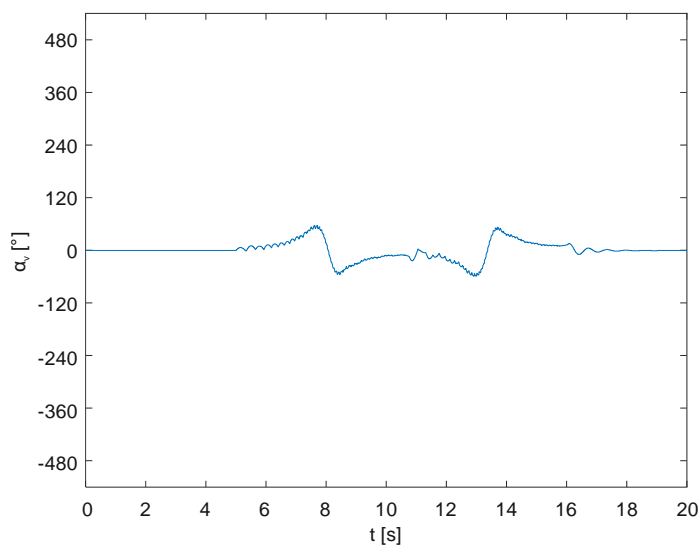
Слика 5.26 Модел са затвореном петљом (одступање од жељене у координате)

До губитка стабилности долази зато што модел захтева превелике углове закретања точкава управљача да би кориговао одступање од  $u$  координате. Модел не узима у обзир угао возила у односу на тангенту на путању у референтној тачки (који је битан, као што је наведено у [163]), а осим тога „касно реагује” – тек када је дошло до одступања, а не унапред, како би то чинио човек. Из тог разлога је одлучено да се возилом управља на основу пројектованог одступања од жељене путање  $u_g$ , приказаног на слици 5.31, које се посматра на удаљености  $l_u$  испред предње осовине возила, које је дефинисано као производ подужне брзине возила и времена  $t_p$ . Неке од препорука које је аутор дисертације пронашао у литератури за одређивање „тачке гледања унапред“ (тачке у којој се посматра одступање од жељене путање на основу ког се генеришу управљачки сигнали), путем времена које би протекло при тренутној брзини возила до доласка возила у дату тачку или путем растојања од возила до те тачке су:

- Време од 1 s [182];
- Време од 1,4 s за 72 km/h [177];
- Растојање од  $I_p + I_u = 12$  m [157];
- Растојање мора бити зависно од брзине возила [188];
- Растојање мора бити квадратна функција брзине возила [187].



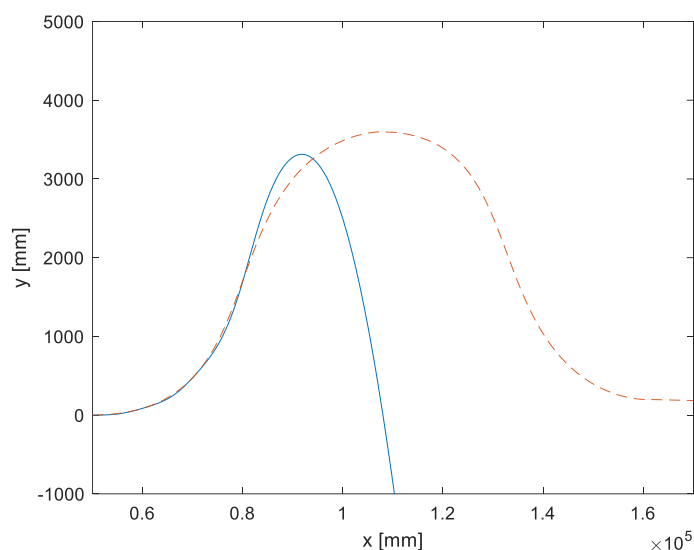
**Слика 5.27** Путања возила на полигону према ISO 3888-1 при брзини од 10 m/s



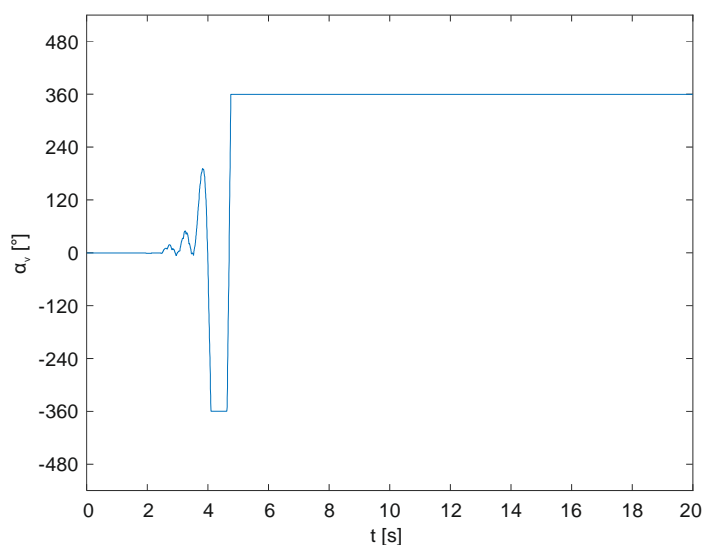
**Слика 5.28** Угао волана на полигону према ISO 3888-1 при брзини од 10 m/s

Као што је тешко замислити да би човек користио само једну тачку коју види кроз ветробранско стакло за доношење одговарајуће одлуке, тако је тешко очекивати од управљачке јединице да донесе исправну одлуку само на основу одступања у једној тачки [151]. Стога неки истраживачи предлажу да се пројектовано одступање прати у већем броју тачака испред возила [176,181,184], као што је приказано на сликама 5.32 и 5.34. Управљачки сигнал се може генерисати и на основу пондерисаних растојања од жељене путање [176,182], као што је приказано на слици 5.33. Аутор ове дисертације је испробао овај приступ, али је наишао на проблеме када се возило нашло у ситуацији у којој ова одступања нису истог знака (као што је приказано на слици 5.35) – тада би ова одступања

„радила једно против другог” (возило би скренуло на основу одступања са једним предзнаком, што би додатно повећало одступања са другим предзнаком и тако би се направио „зачарани круг” вијугања возила.

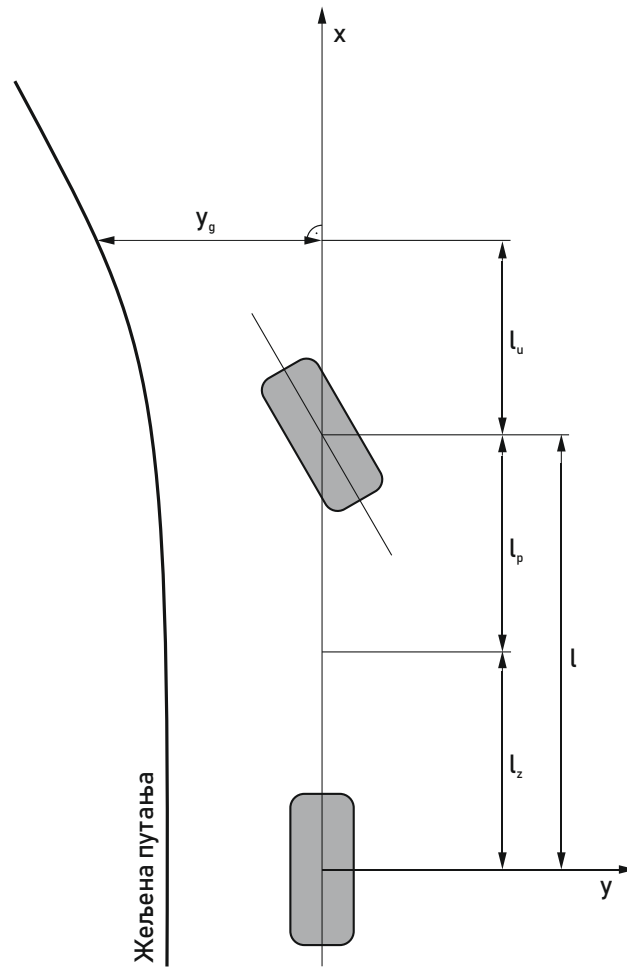


**Слика 5.29** Путања возила на полигону према ISO 3888-1 при брзини од 20 m/s

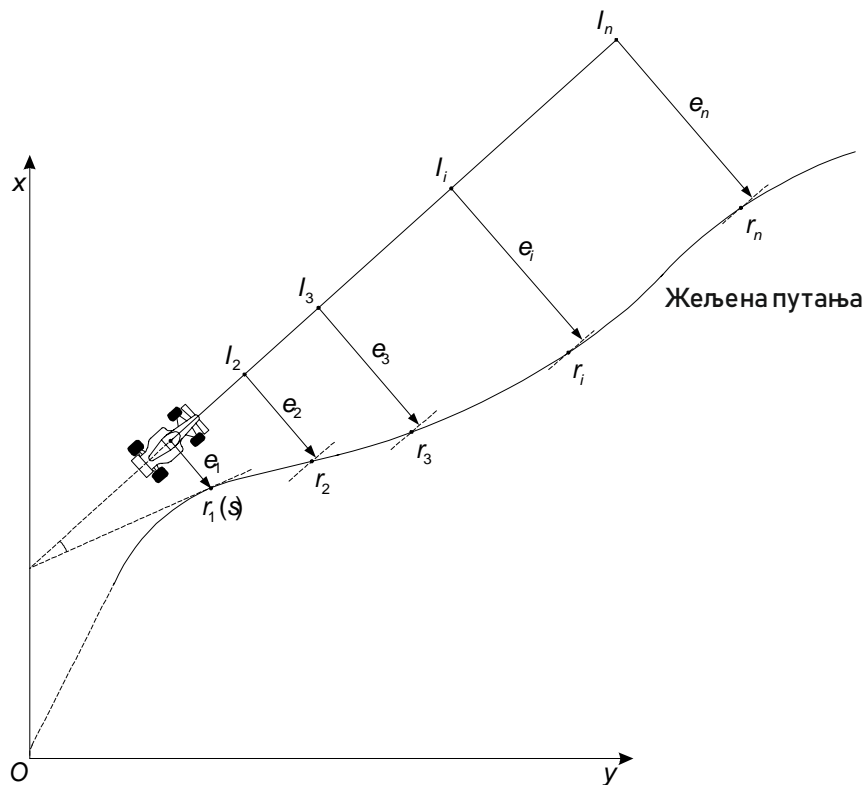


**Слика 5.30** Угао волана на полигону према ISO 3888-1 при брзини од 20 m/s

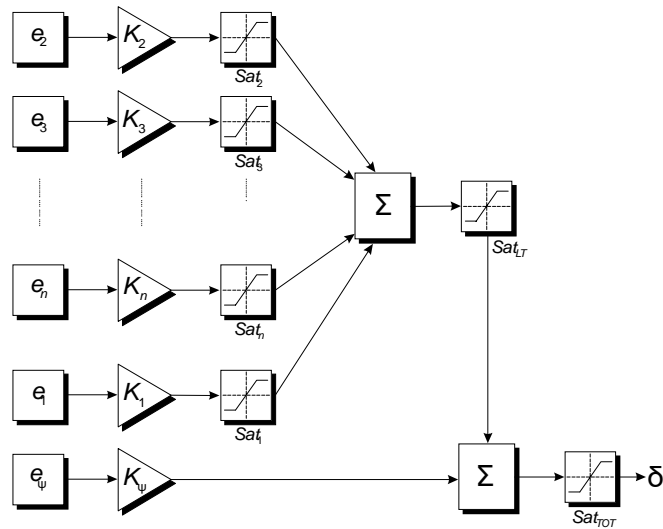
Стога је одлучено да се за генерисање сигнала користи растојање у само једној тачки испред возила. Веома је битно направити правилан избор растојања на ком се одређује растојање од жељене путање – уколико је сувише испред возила, није погодно деловати на основу информације у тренутку њеног добијања, а информација ће бити изгубљена до тренутка у ком може бити корисна; уколико је сувише близу возила, узроковаће лоше управљање (модел ће заличити на модел који функционише на основу тренутног одступања), нарочито при већим брзинама [151].



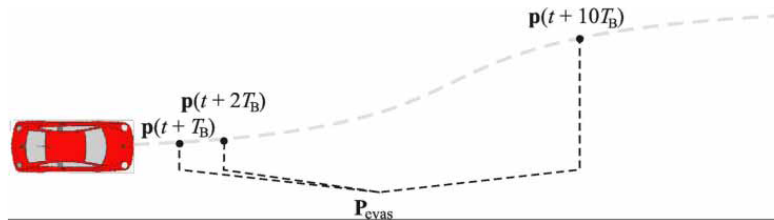
Слика 5.31 Пројектовано одступање од жељене путање



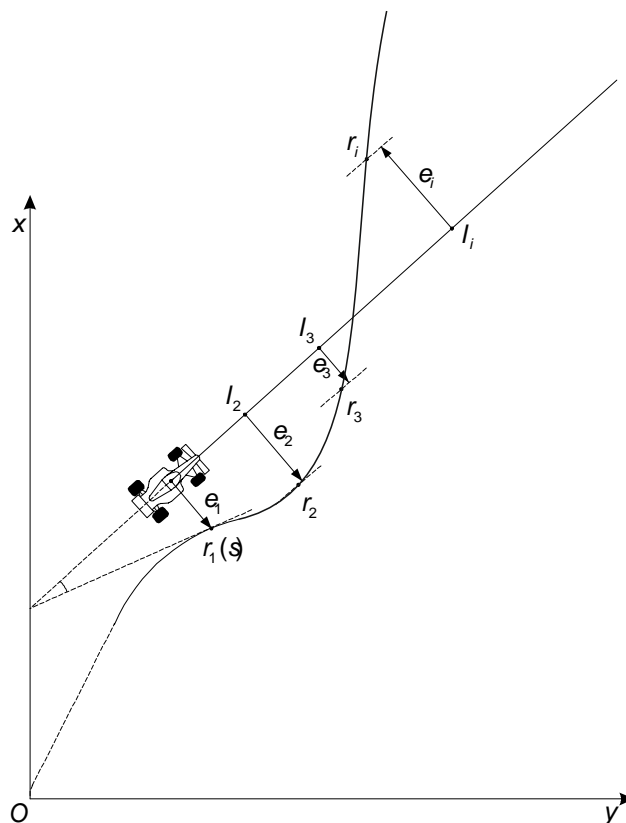
Слика 5.32 Пројектована одступања од жељене путање [182]



Слика 5.33 Генерисање управљачког сигнала на основи пондерисаних растојања приказаних на слици 5.32 [182]



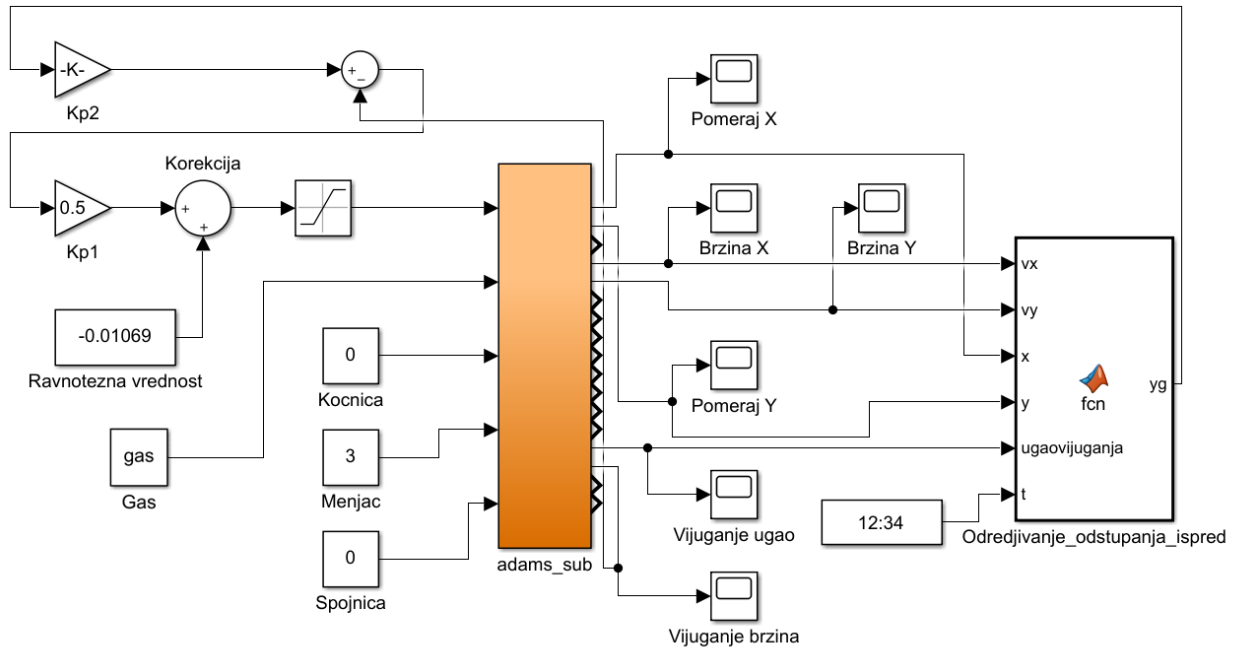
Слика 5.34 Планирање избегавања препреке на основу три тачке на путањи испред [184]



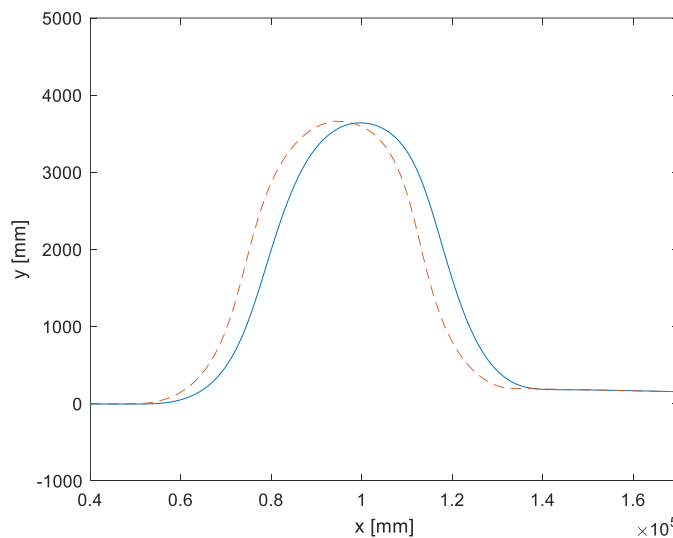
Слика 5.35 Приказ ситуације у којој се приступ са више тачака гледања унапред показује неупотребљивим

Коначни модел који је резултат ове дисертације, заснован на [157], приказан је на слици 5.36. Разлике које је аутор дисертације увео у односу на модел на ком је заснован су следеће:

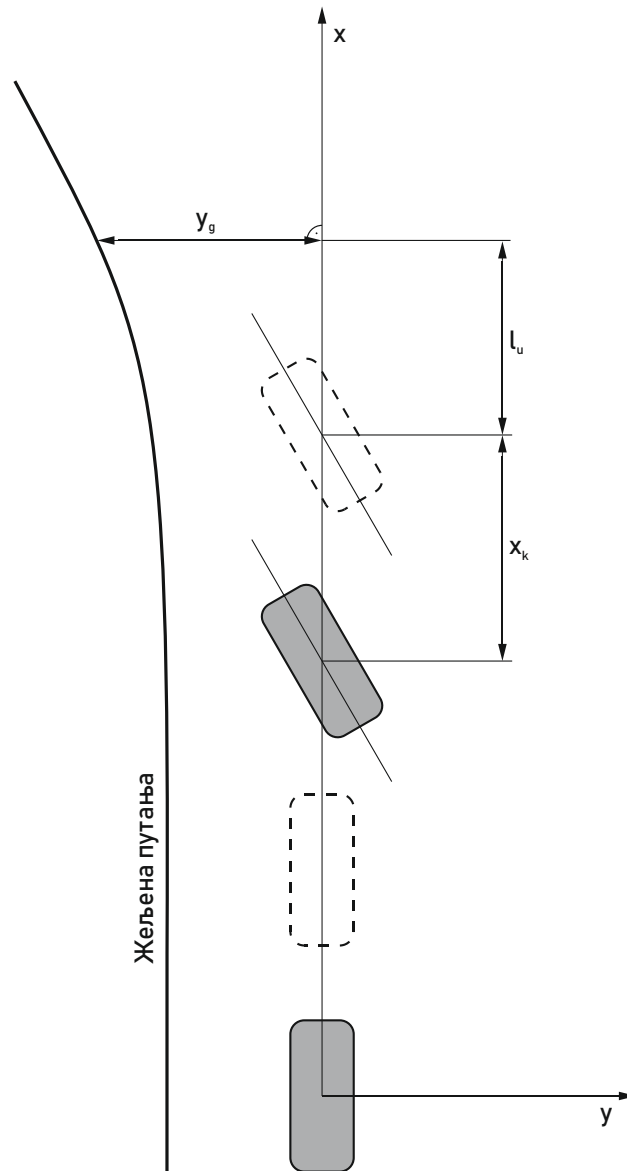
- Измењени модел укључује само пропорционалне регулаторе, што га поједностављује;
- Коefицијенти су променљиви и зависе од брзине и димензија полигона;
- Уведена је корекција због одзива система (оригинални модел је намењен за блаже маневре).



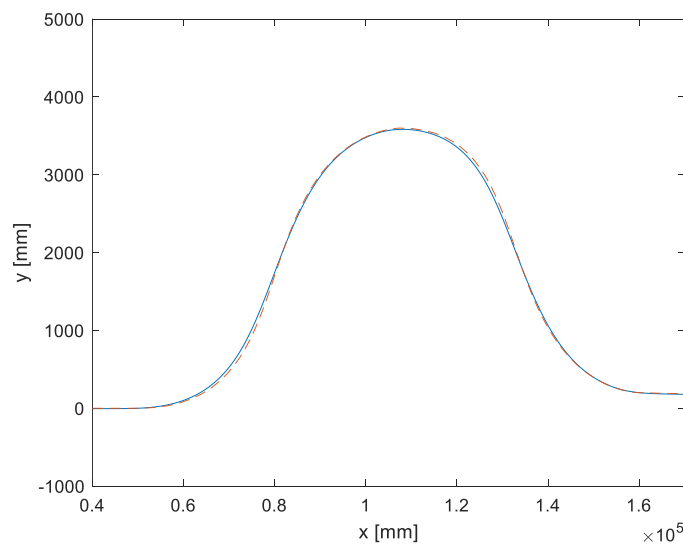
Слика 5.36 Коначни модел



Слика 5.37 Путања возила коришћењем коначног модела на полигону ISO 3888-1 при брзини од 10 m/s за  $x_k = 0$  т (црвена испрекидана линија – жељена, плава пуна линија – остварена)



Слика 5.38 Пројектовано одступање од жељене путање са корекцијом одзива



Слика 5.39 Путања возила коришћењем коначног модела на полигону ISO 3888-1 при брзини од 10 m/s за  $x_k = 5$  m (црвена испрекидана линија – жељена, плава пуна линија – остварена)

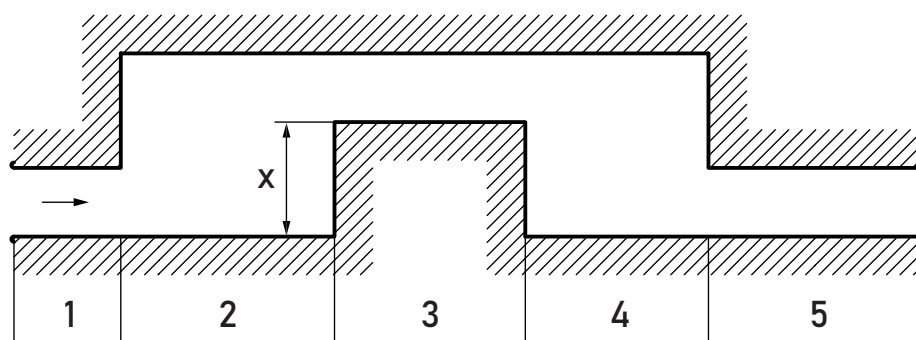
Да би се кориговало кашњење скретања возила приказано на слици 5.37, уведен је параметар  $x_k$  (слика 5.38) који представља растојање испред возила у односу на које се посматра одступање од жељене путање испред. Правилним избором овог параметра, кашњење се елиминише (слика 5.39).

Резултати симулација дати су у следећем поглављу, заједно са коришћеним коефицијентима.



## 6. Резултати симулација

У табели 6.2 приказани су резултати симулација спроведених на три полигона – *ISO 3888-1*, *ISO 3888-2* и полигону 3 (слика 6.1), који представља „срдину“ између ова два полигона (табела 6.1).



Слика 6.1 Полигон 3

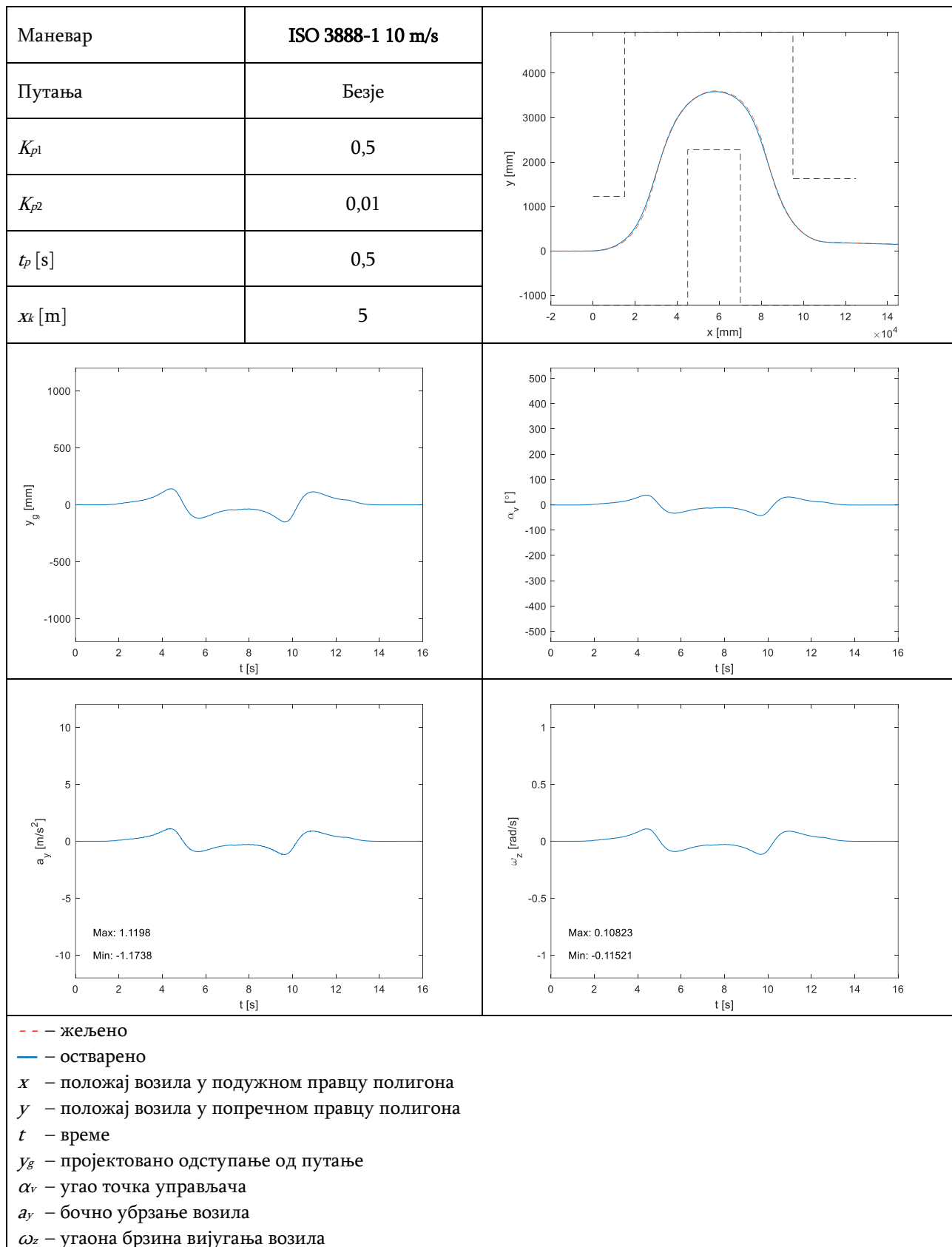
Табела 6.1 Мере полигона 3

Деоница	Дужина [m]	Ширина [m]
1	13,5	$1,1b + 0,25$
2	21,75	
3	18	$1,1b + 0,625$
4	18,75	
5	21	$(1,3b + 0,25 + \min(1,3b + 0,25; 3))/2$
$x$		$0,55b + 2,375$

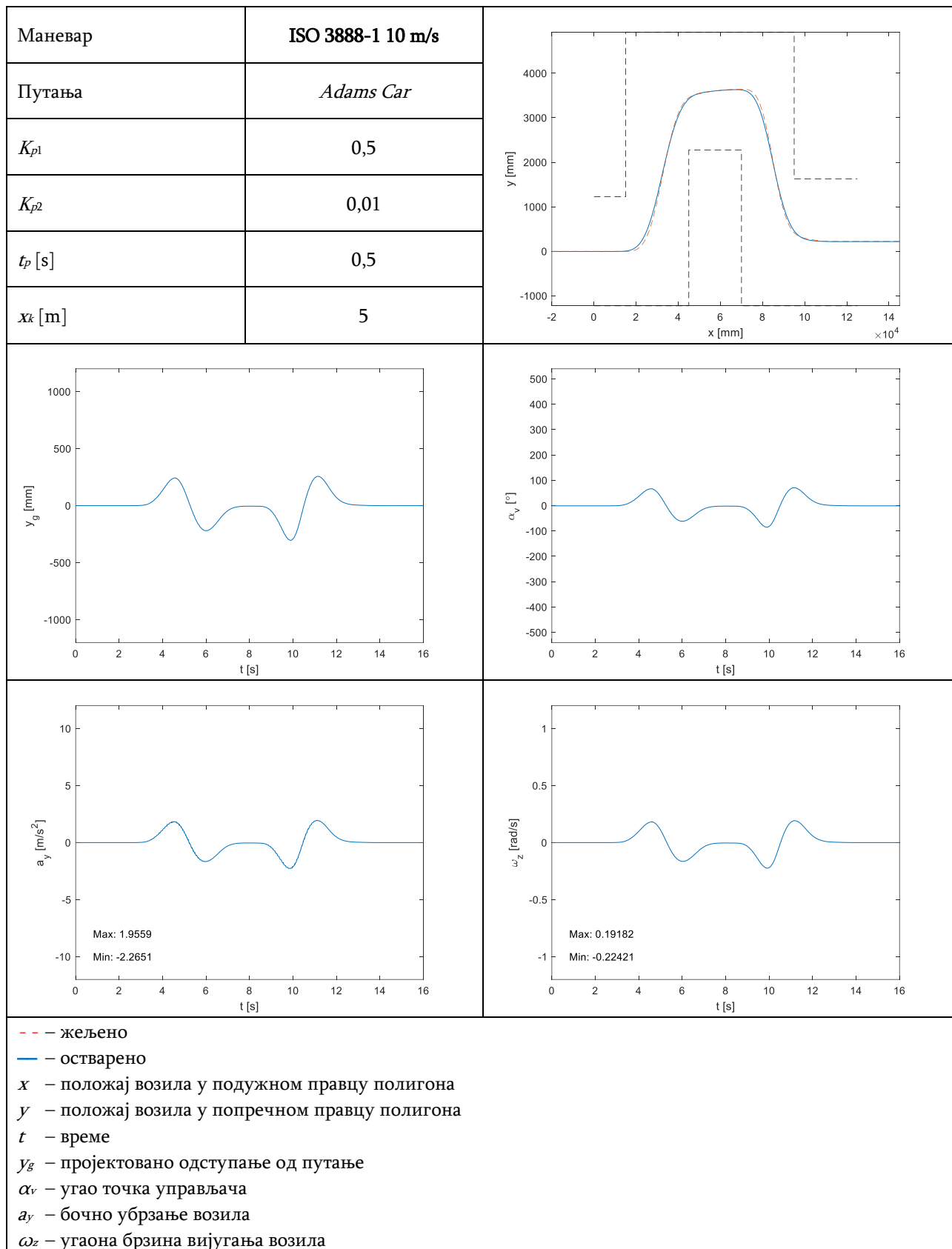
$b$  – ширина возила

Симулације су спроведене за све брзине за које су спроведене и самосталне симулације у програму *Adams Car* у циљу припреме модела – 10, 15, 20, 25, 30 и 35 m/s за *ISO 3888-1* и 10, 15 и 20 m/s за *ISO 3888-2*. Поред ових брзина, симулације су спроведене и за вредности брзина које се налазе између наведених. За полигон 3 су коришћене брзине од 10 до 30 m/s, у корацима од 2,5 m/s. За сваку комбинацију брзине и полигона, симулације су спроведене за жељену путању формирану коришћењем Безјеових кривих и за путању која је излаз из *Adams Car* самосталне симулације.

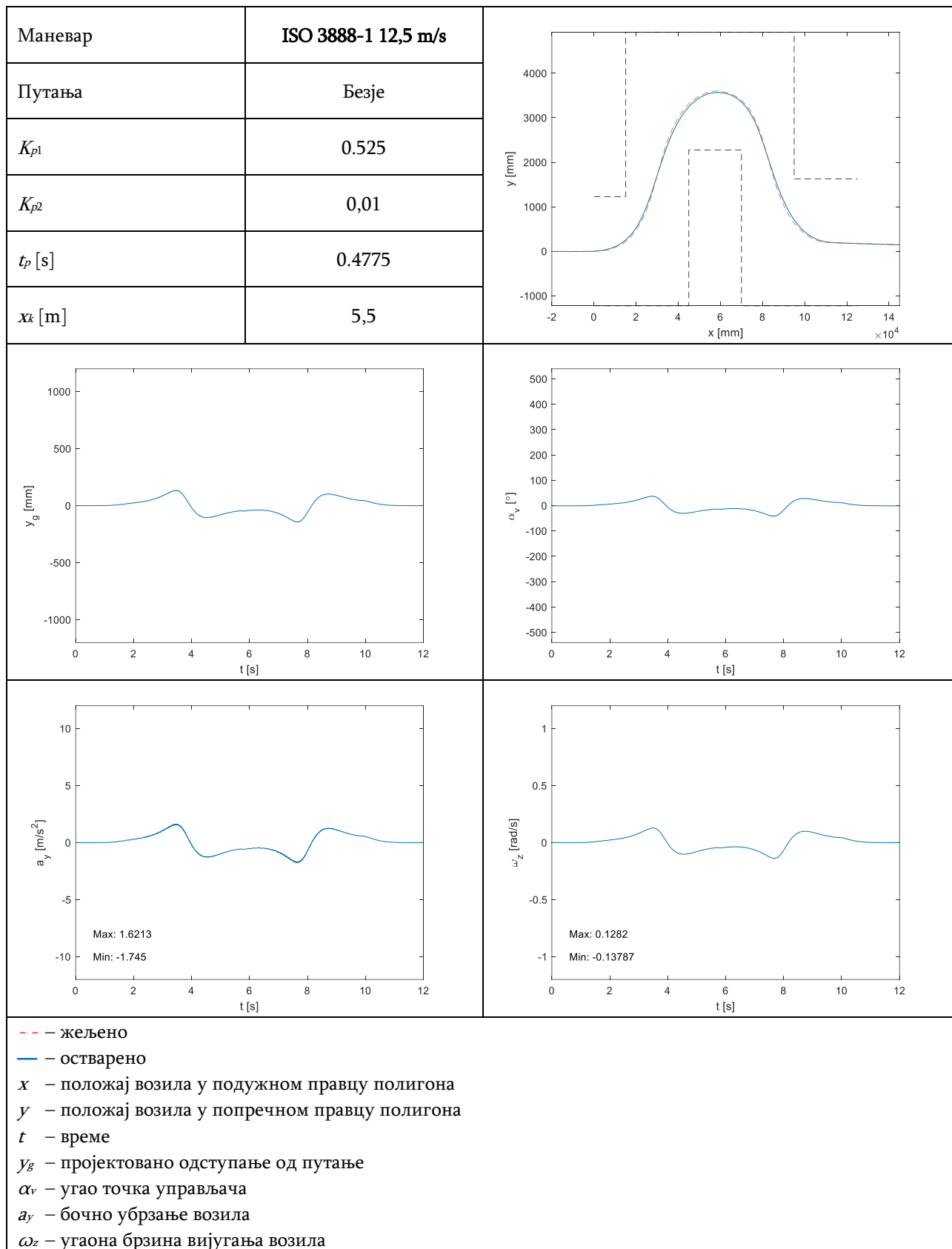
Табела 6.2 Резултати симулација



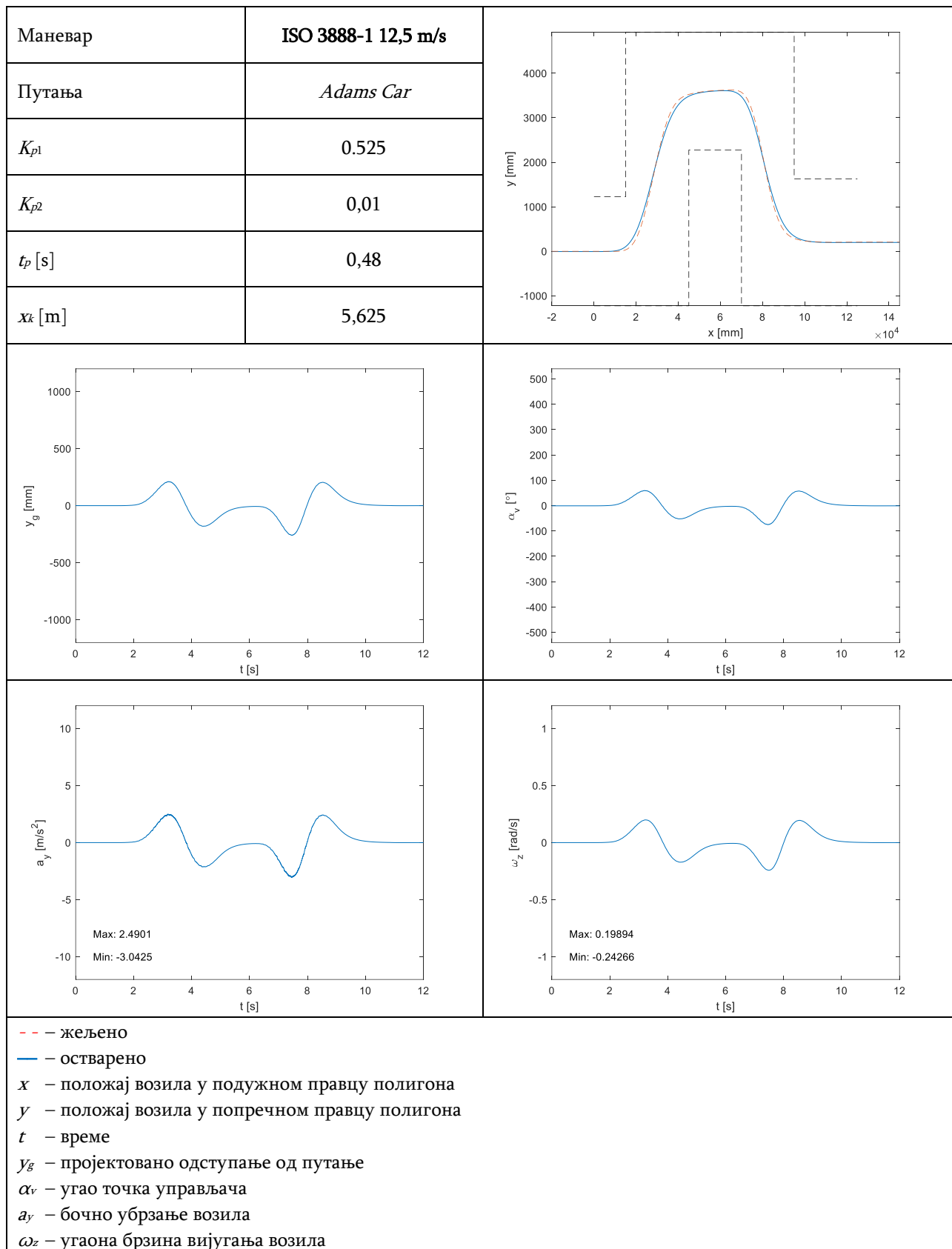
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



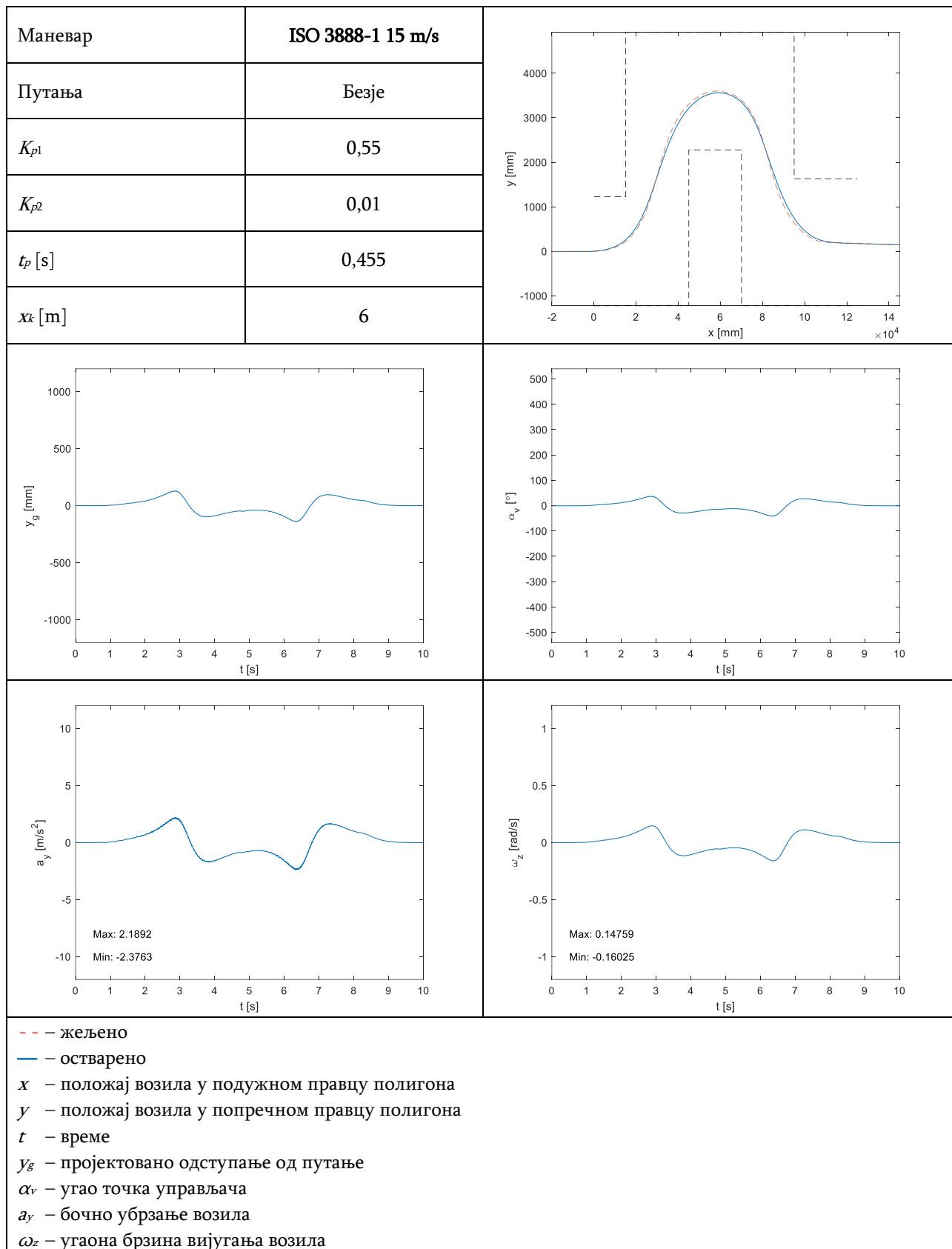
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



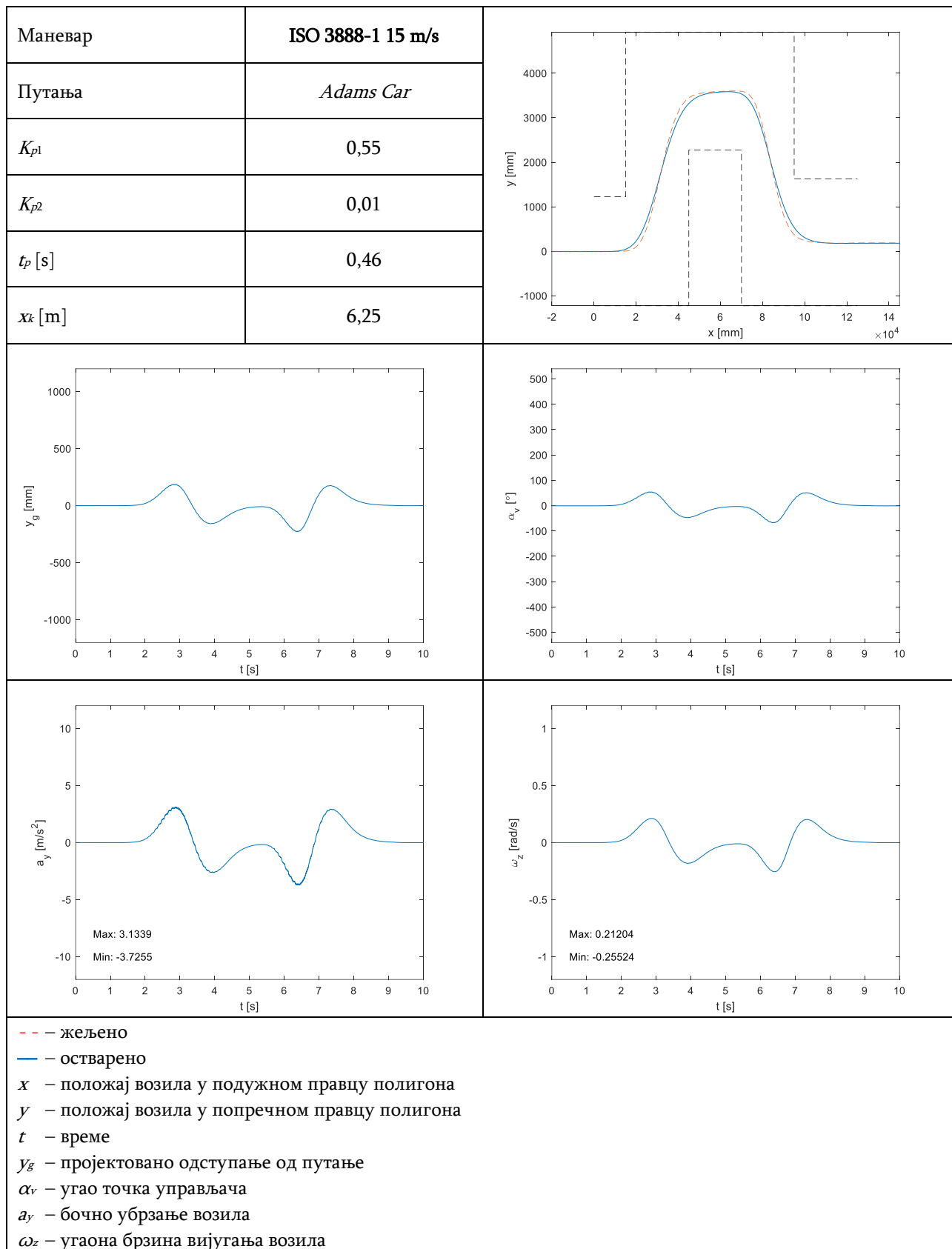
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



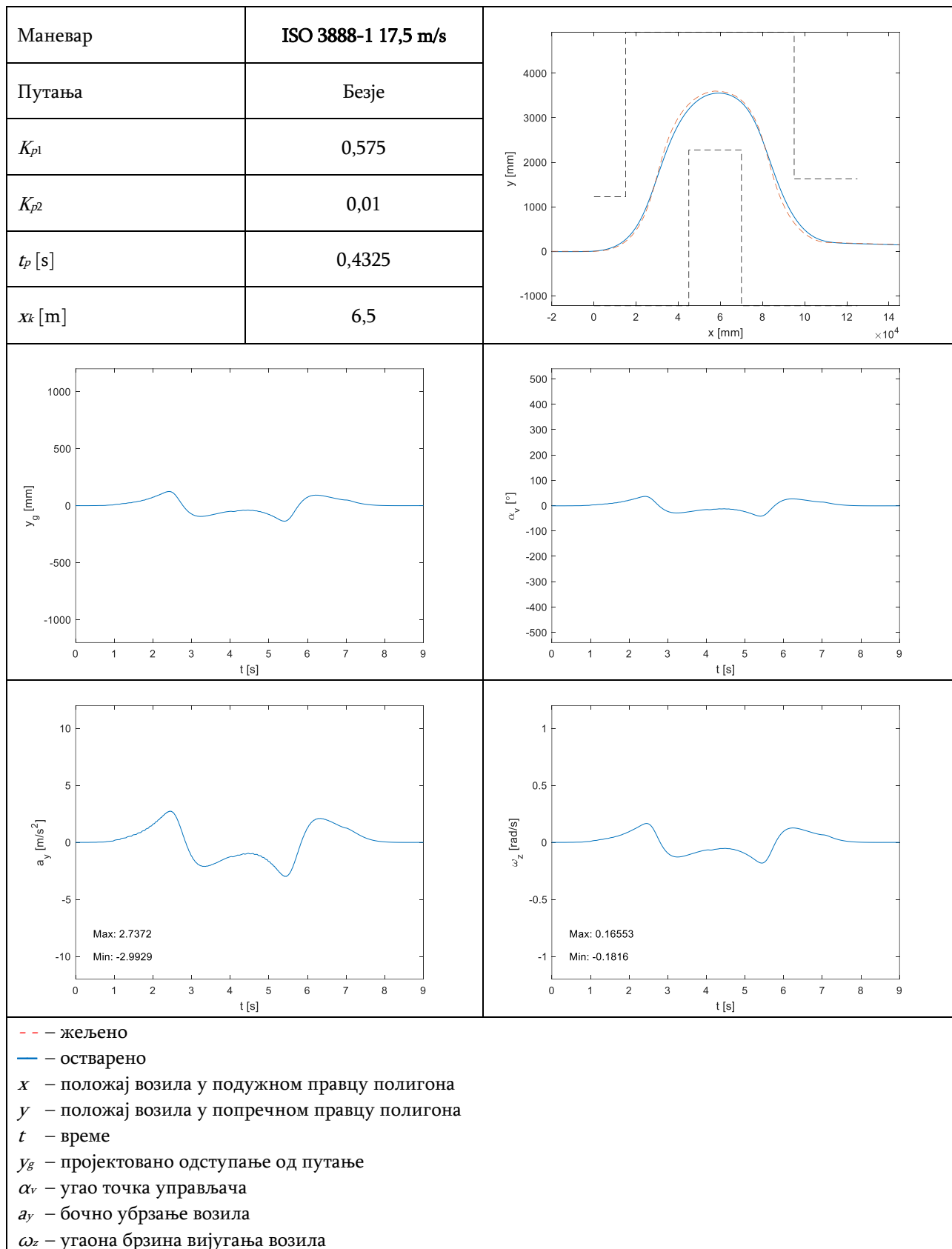
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)

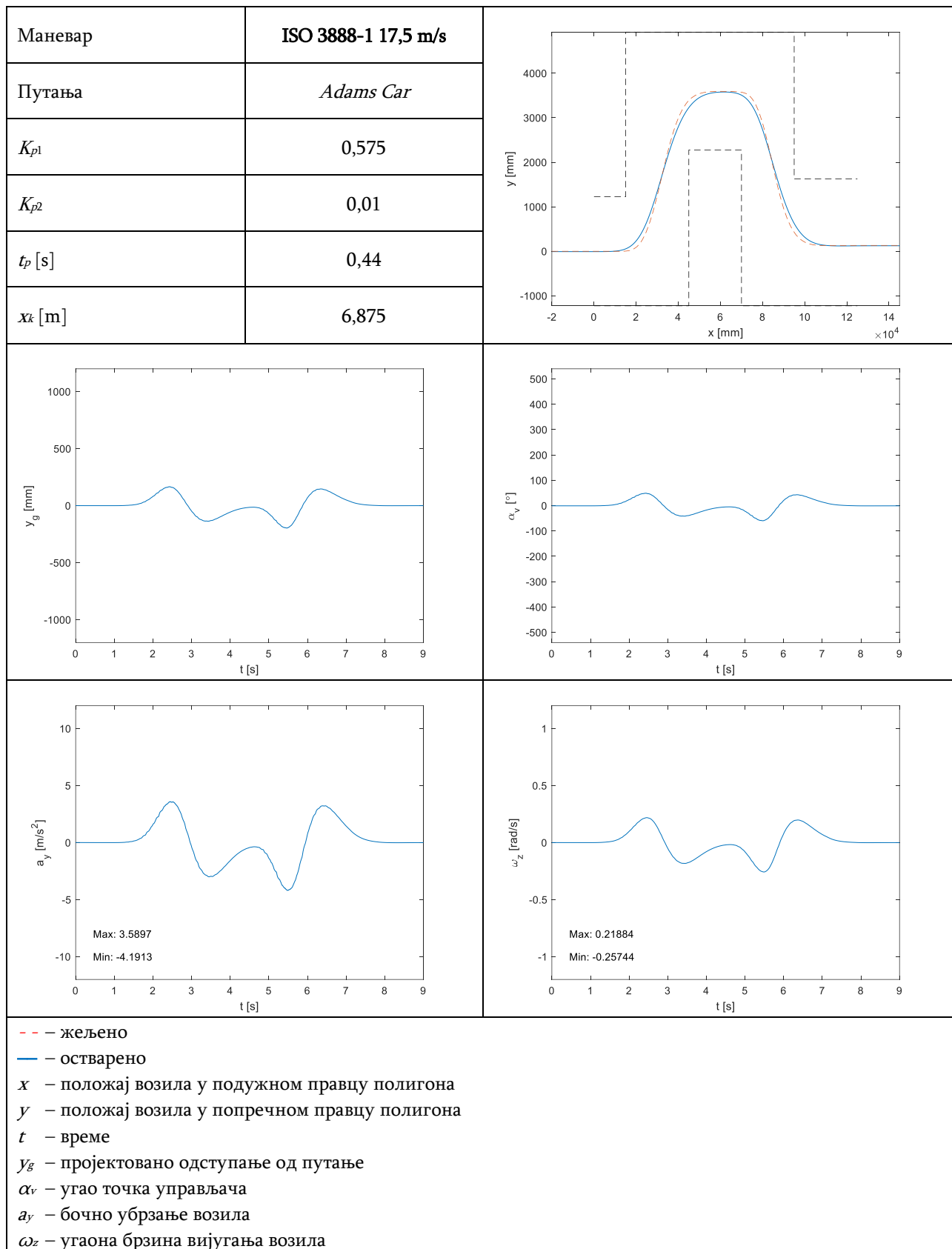


Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)

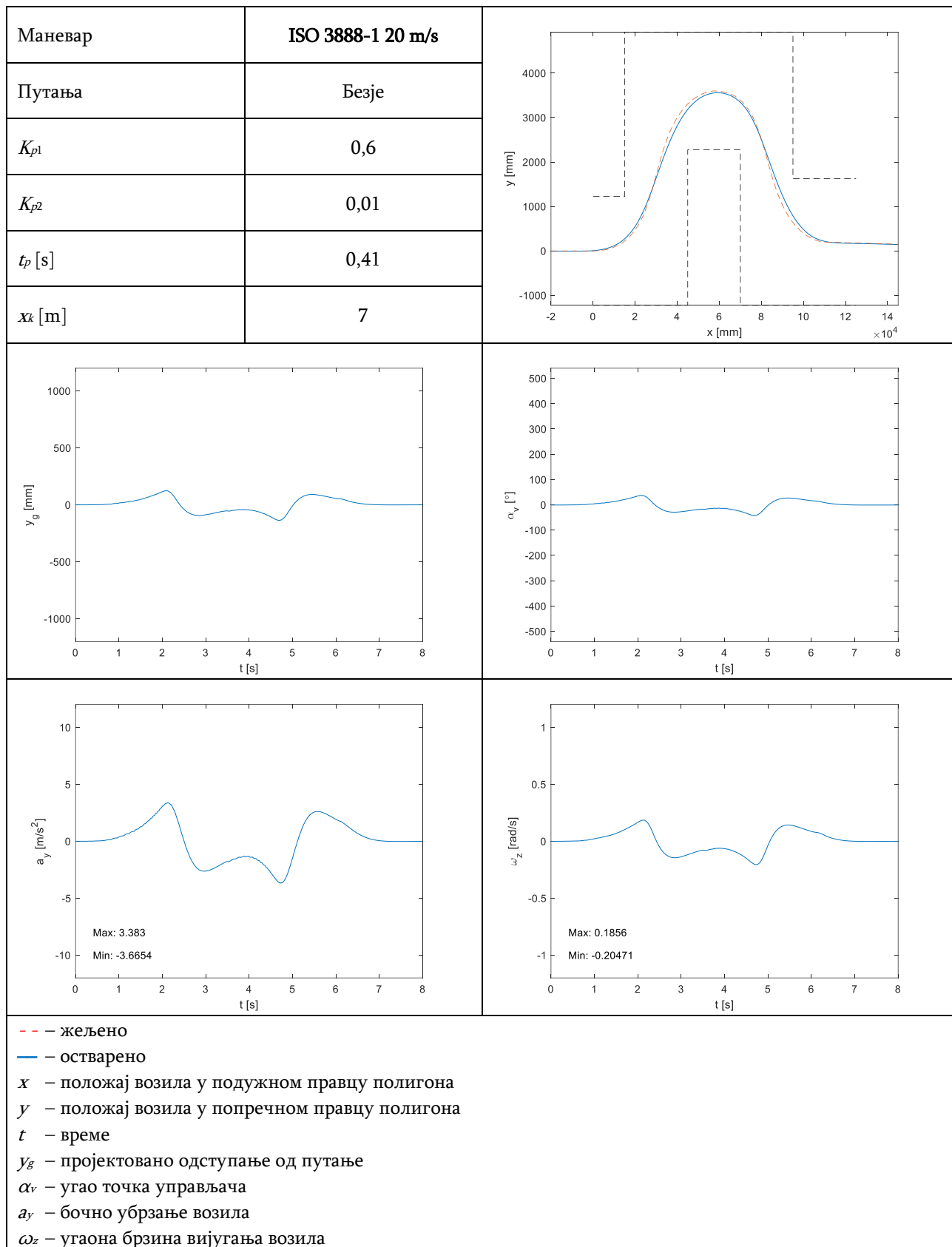




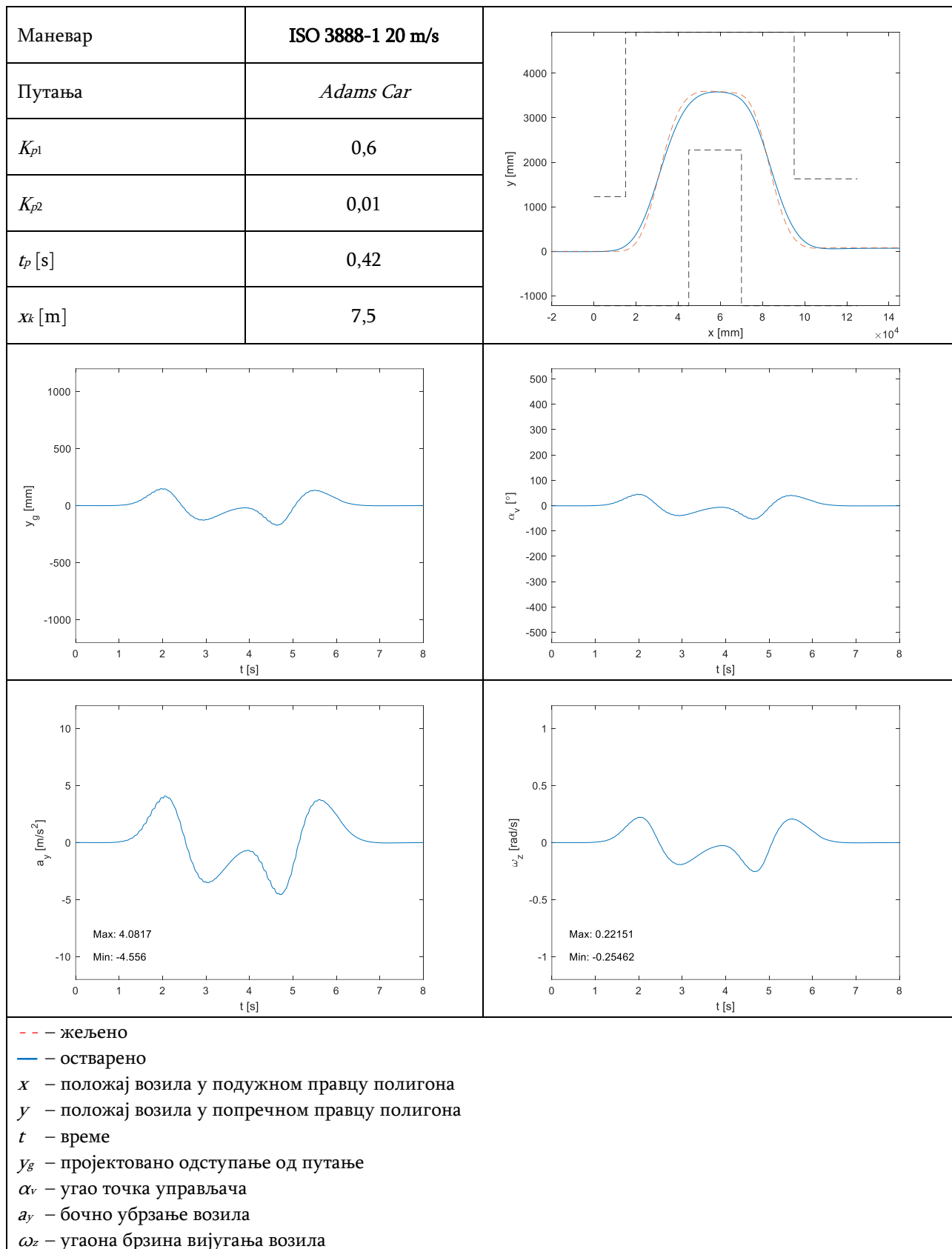
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



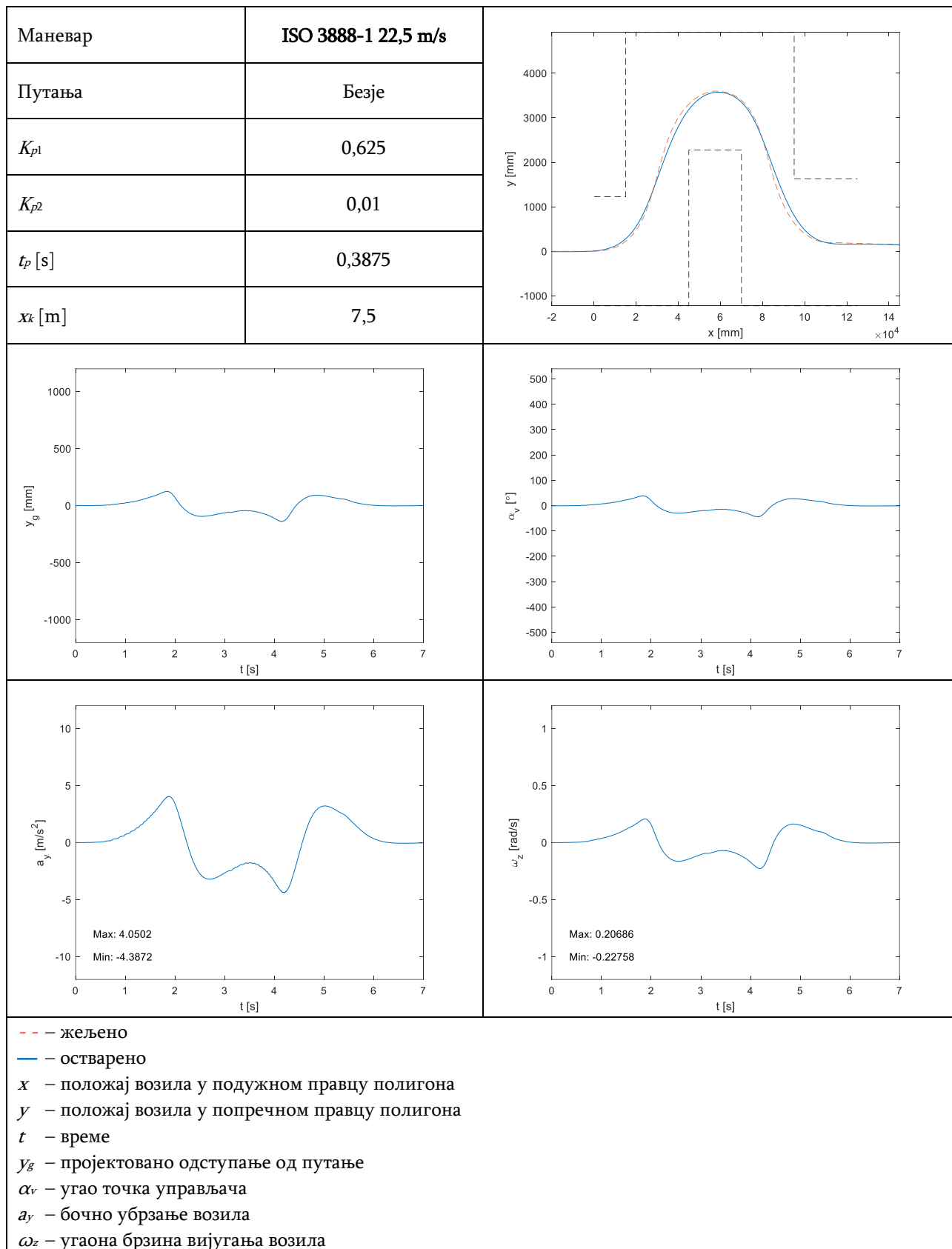
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



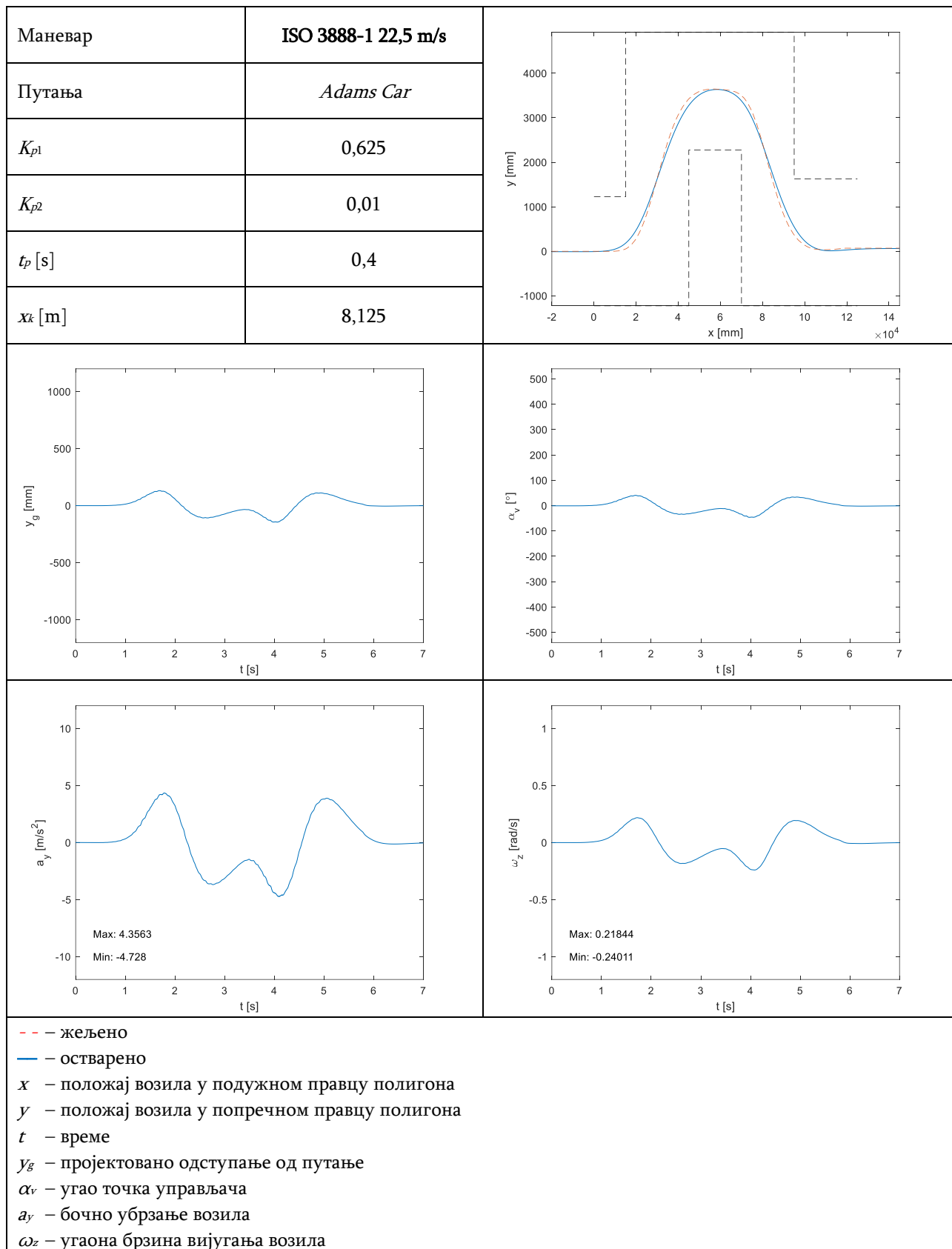
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



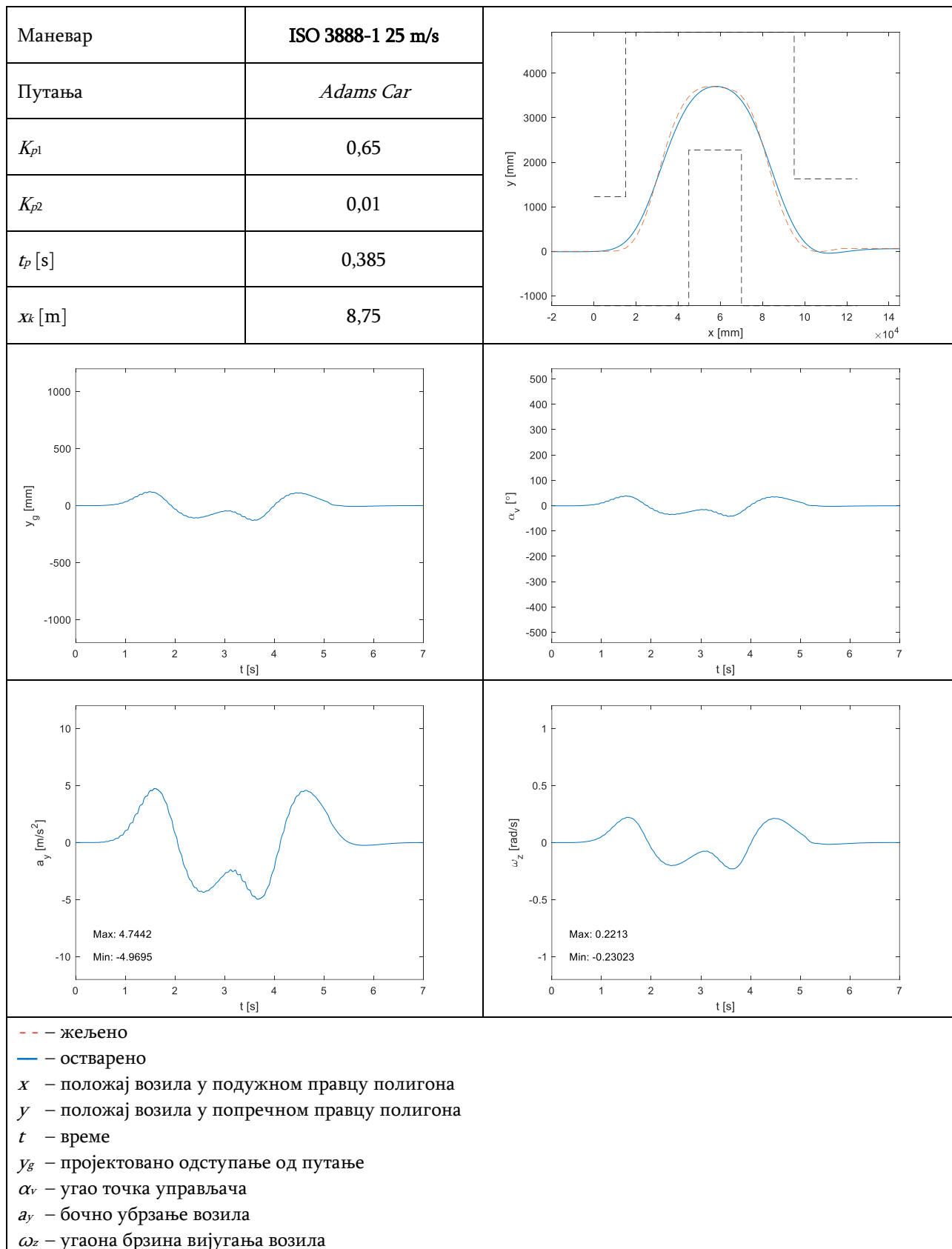
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



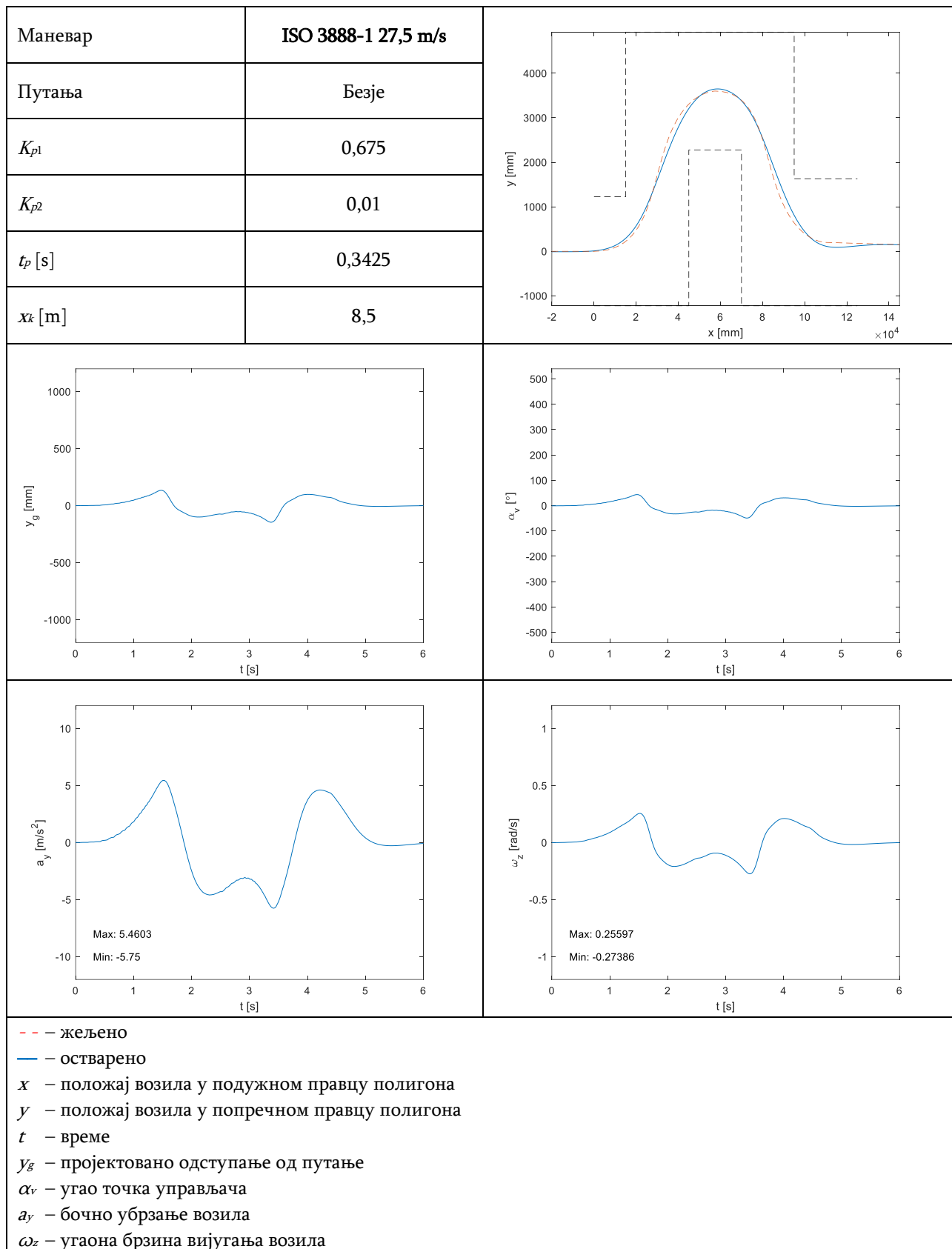
**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

Маневар	ISO 3888-1 25 m/s	
Путања	Безје	
$K_{P1}$	0,65	
$K_{P2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,365	
$x_k$ [m]	8	
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> — положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> — положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> — време  <math>y_g</math> — пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> — угао точка управљача  <math>a_y</math> — бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> — угаона брзина вијугања возила                 </p>		

Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)

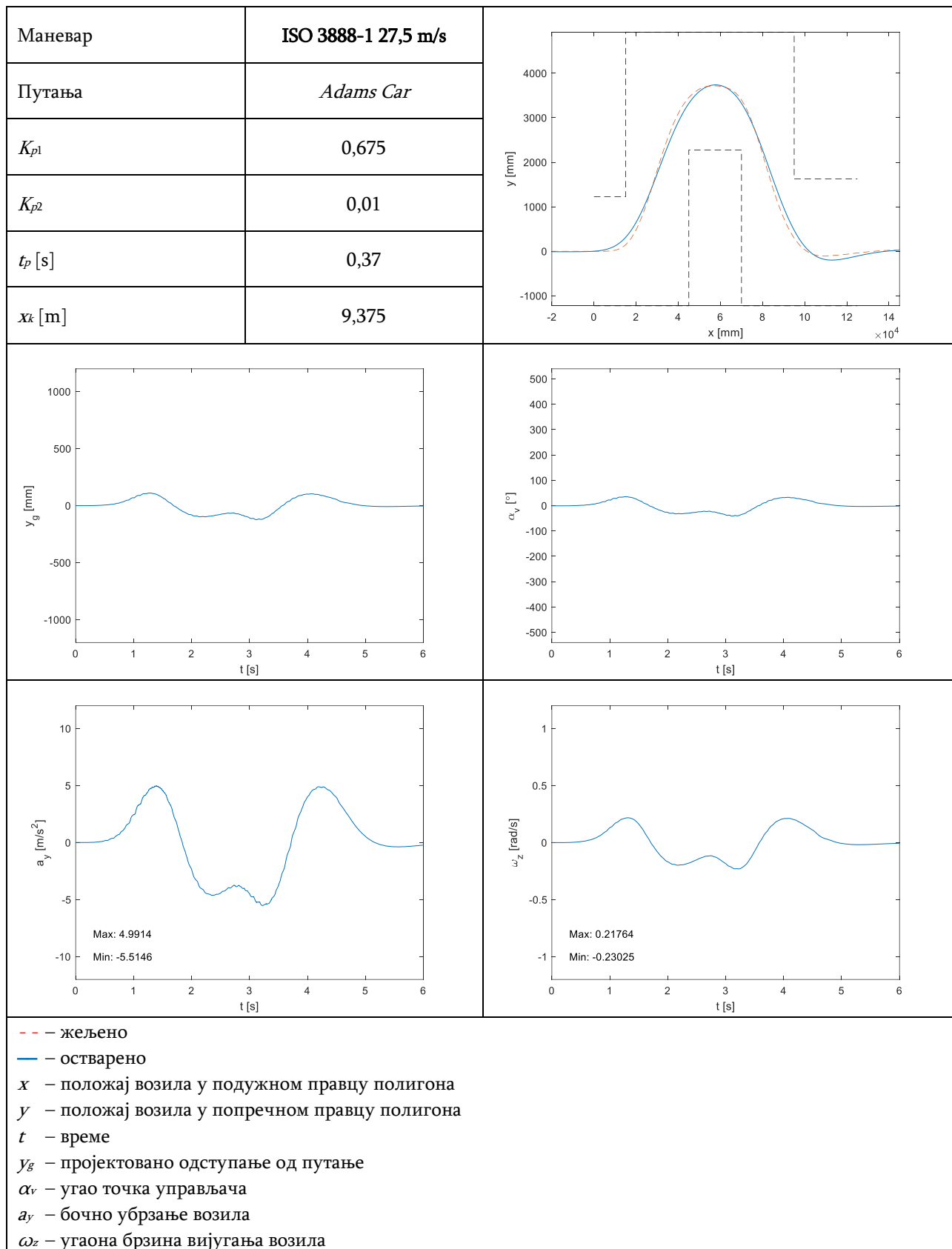


Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)

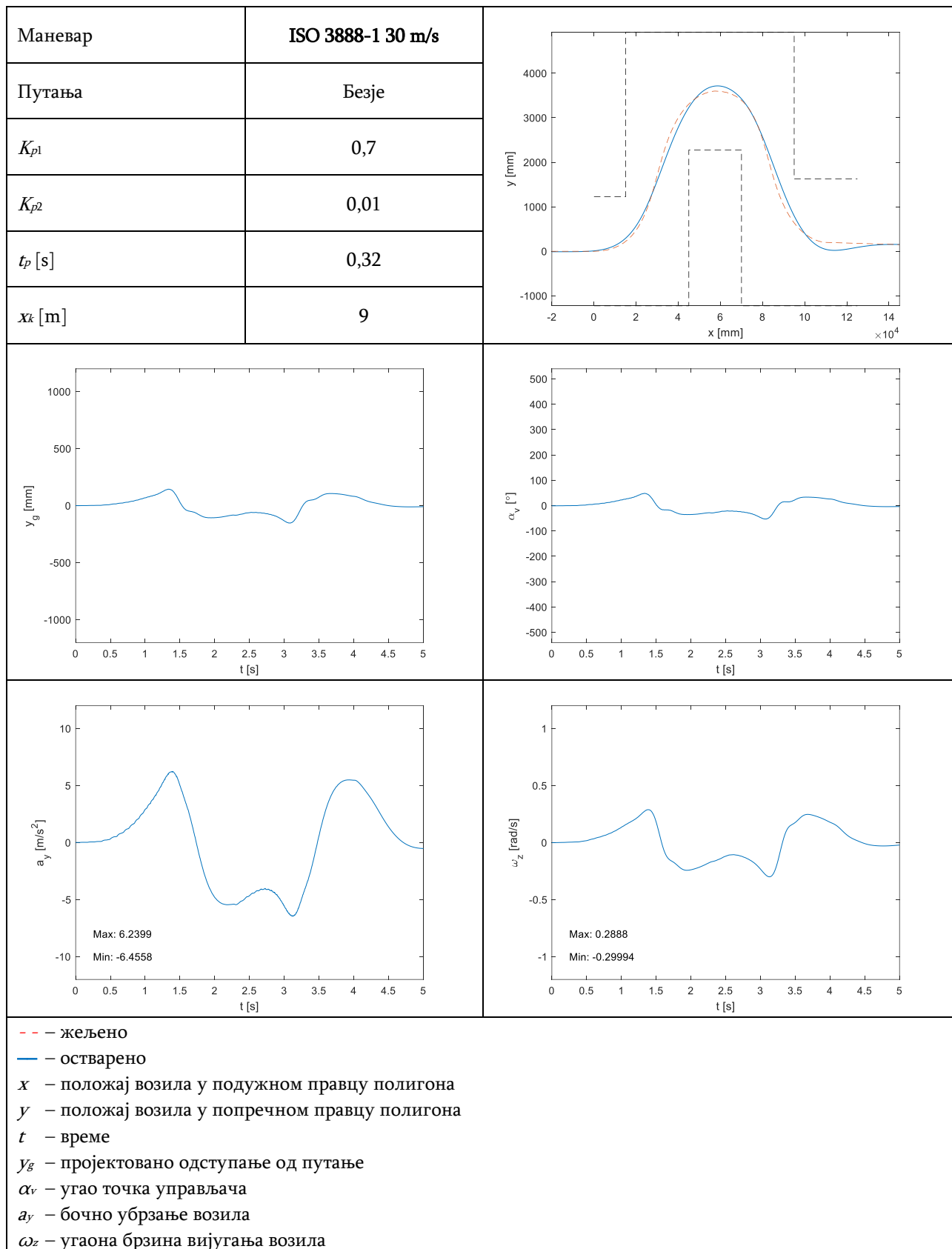




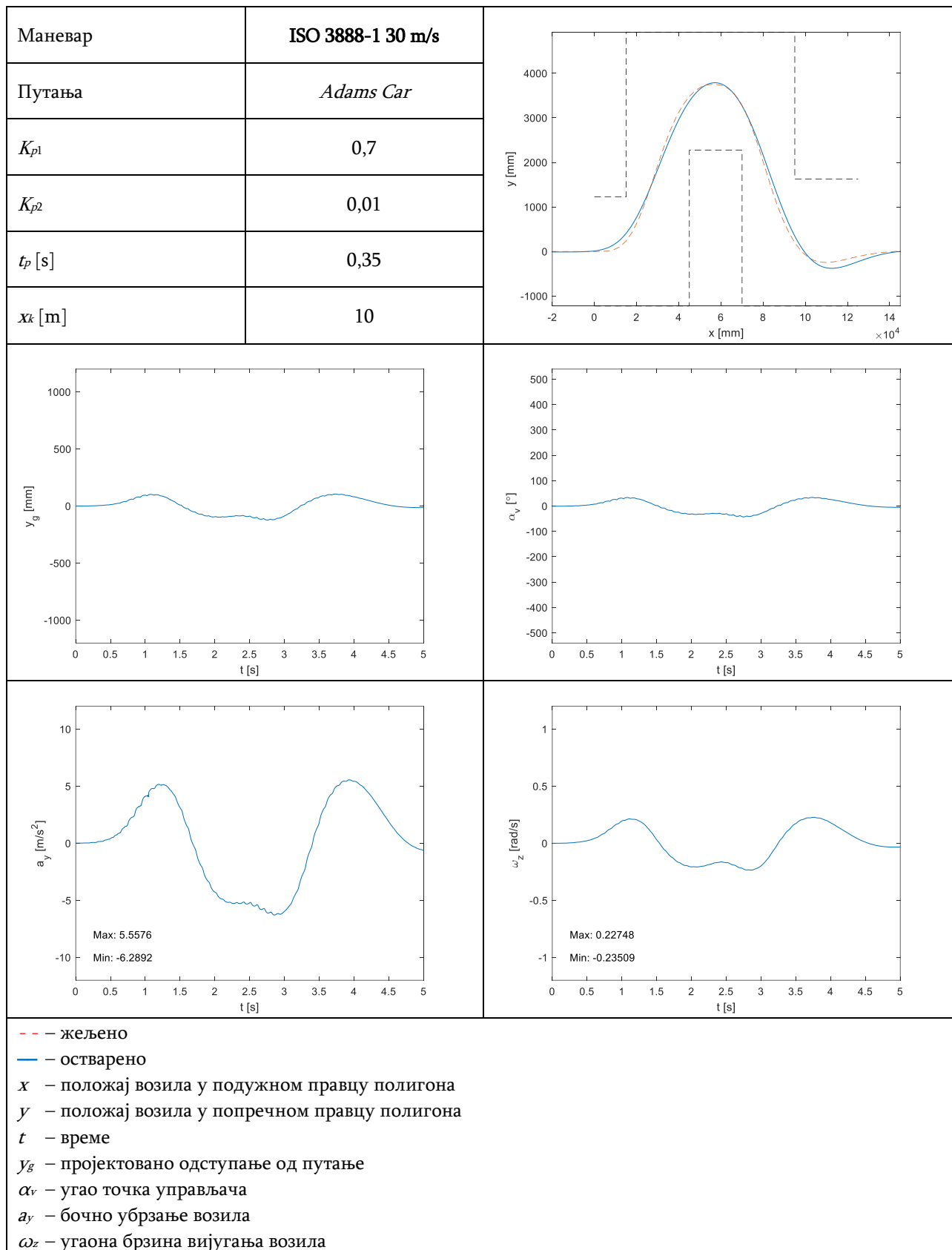
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



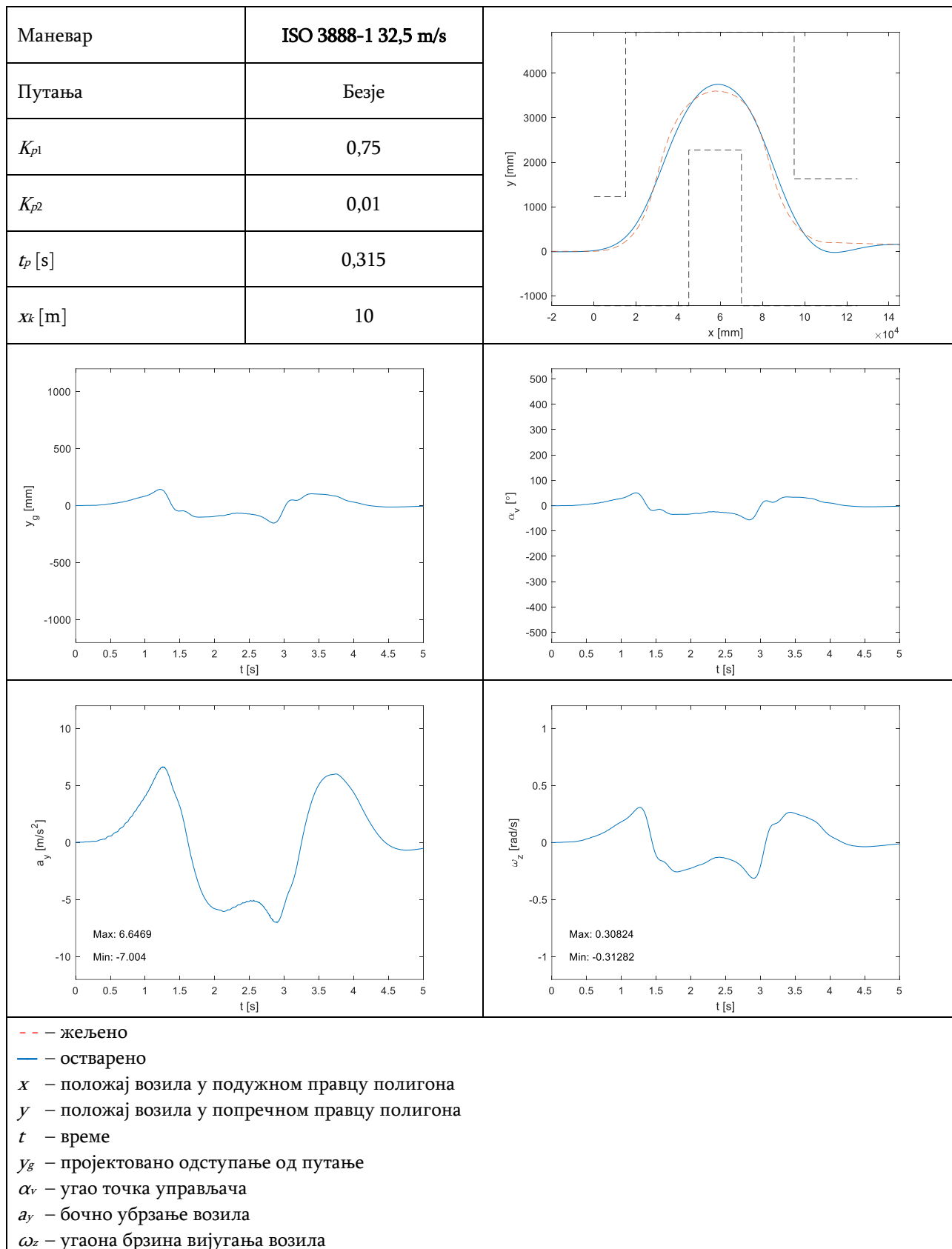
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



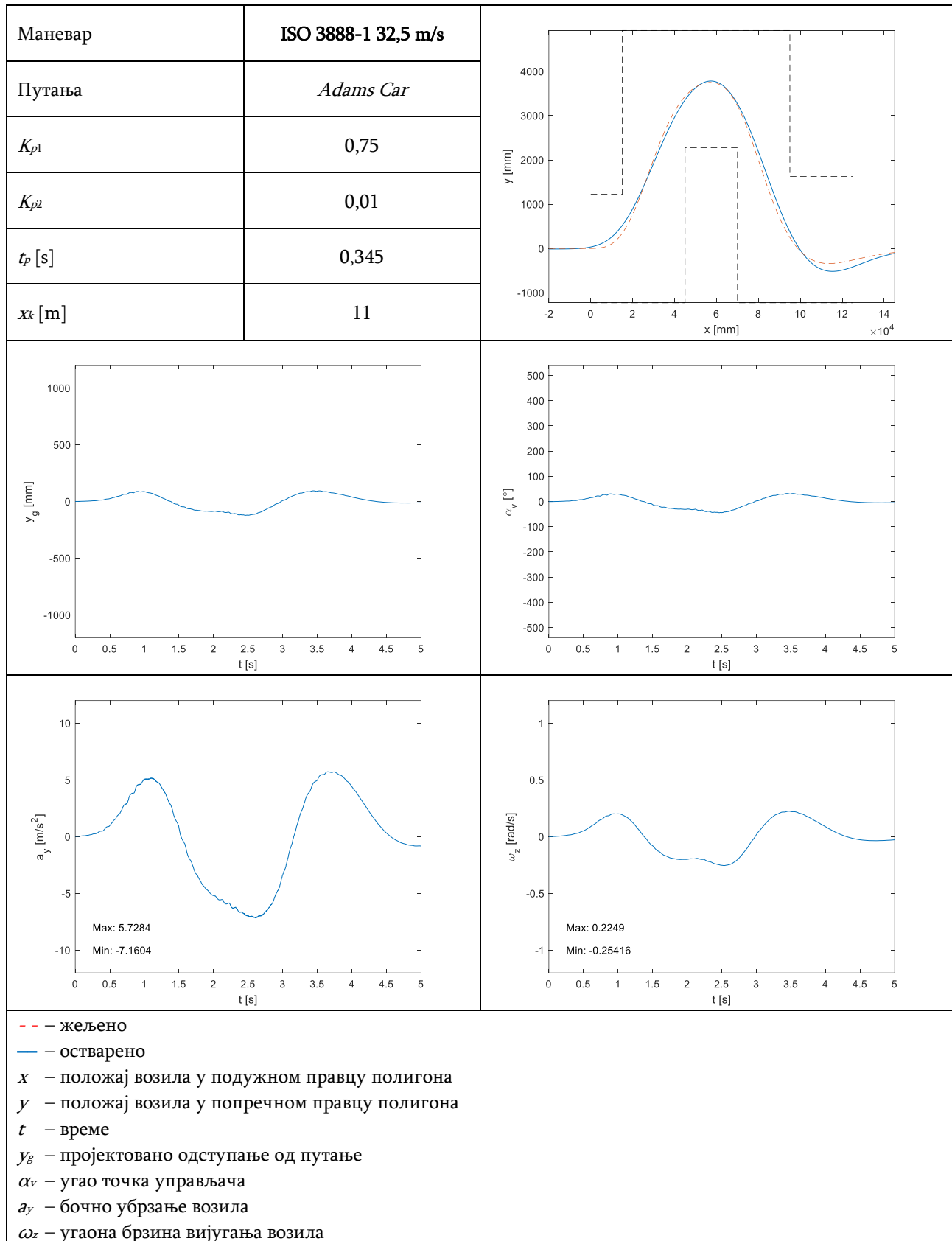
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



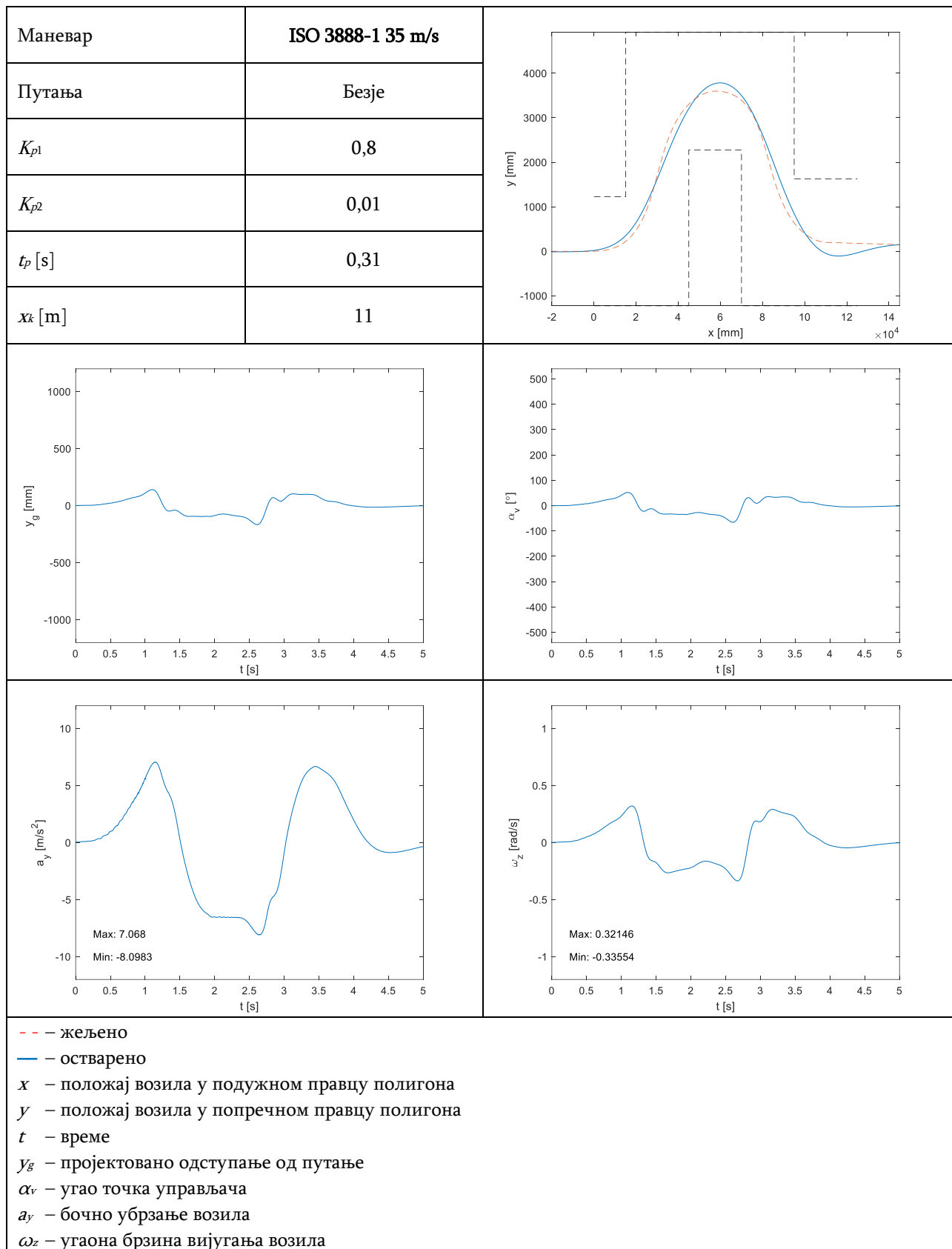
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



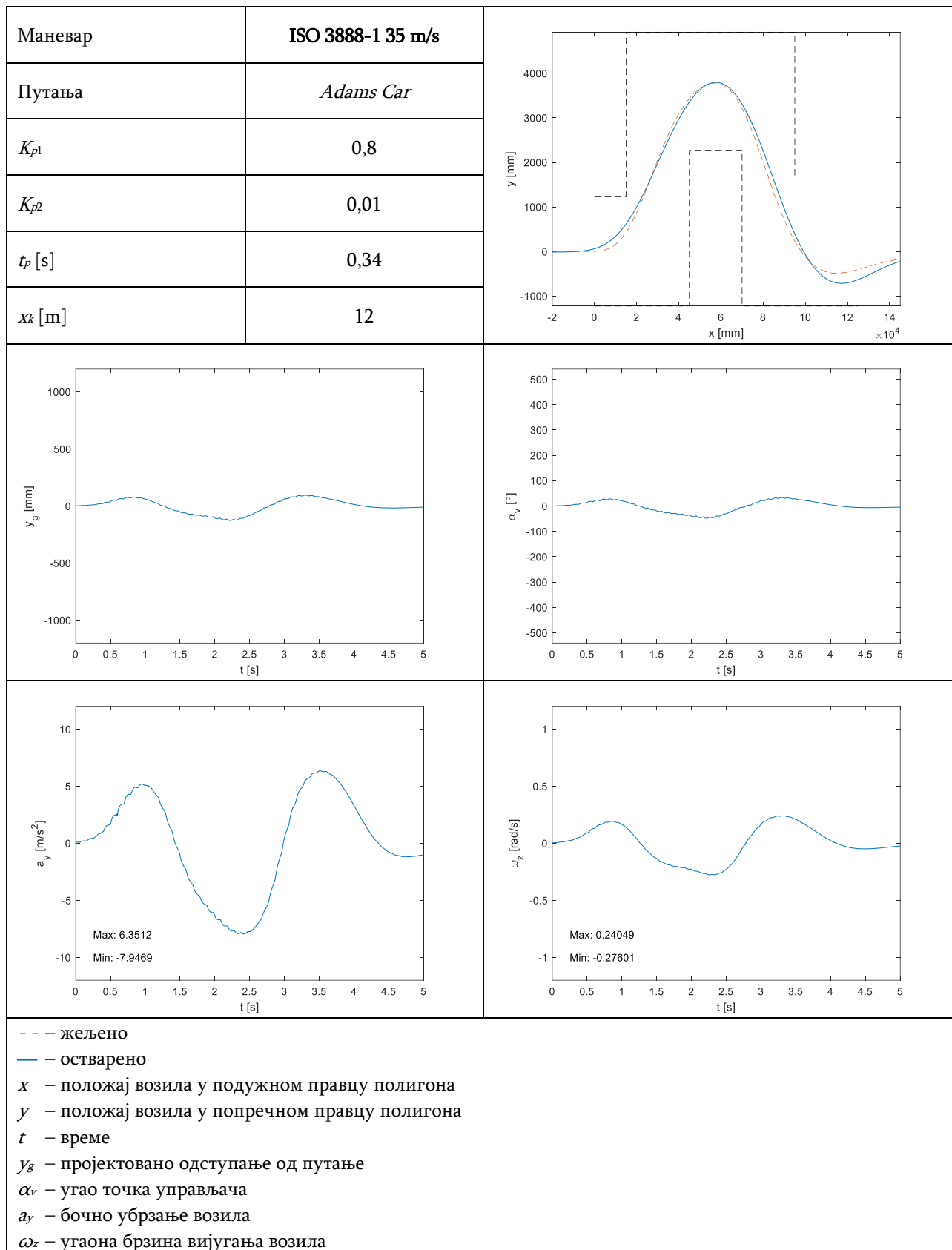
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)

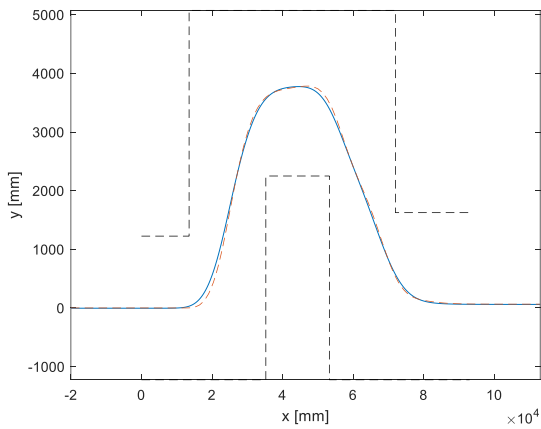
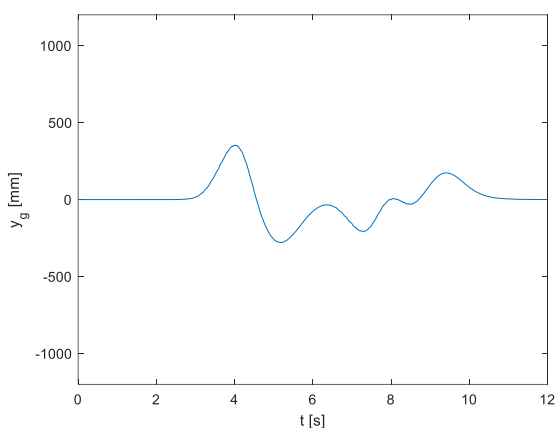
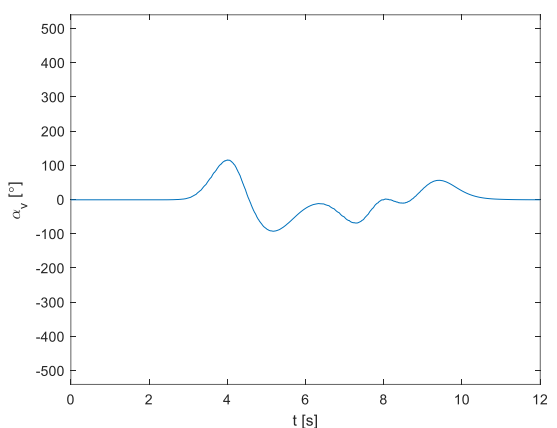
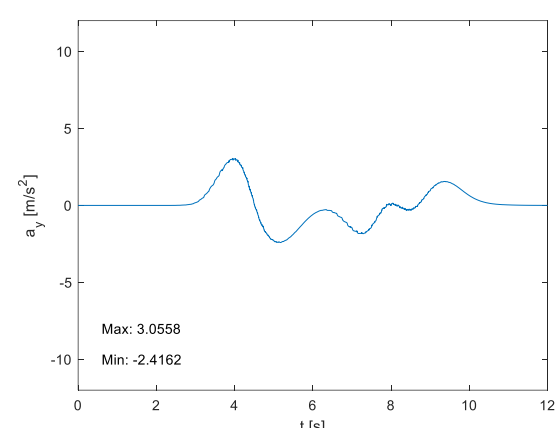
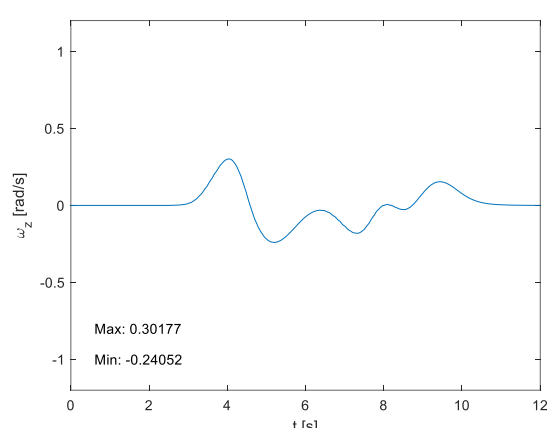


**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

Маневар	<b>3 10 m/s</b>	
Путања	Безје	
$K_{p1}$	0,6	
$K_{p2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,45	
$x_k$ [m]	4,5	
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> – положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> – положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> – време  <math>y_g</math> – пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> – угао точка управљача  <math>a_y</math> – бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> – угаона брзина вијугања возила                 </p>		



**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

Маневар	<b>3 10 m/s</b>	
Путања	<i>Adams Car</i>	
$K_{p1}$	<b>0,6</b>	
$K_{p2}$	<b>0,01</b>	
$t_p$ [s]	<b>0,45</b>	
$x_k$ [m]	<b>4,5</b>	
		
		
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> – положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> – положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> – време  <math>y_g</math> – пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> – угао точка управљача  <math>a_y</math> – бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> – угаона брзина вијугања возила                 </p>		

**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

Маневар	<b>3 12,5 m/s</b>	
Путања	Безје	
$K_{P1}$	0,6375	
$K_{P2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,42625	
$x_k$ [m]	5	
<p>                     - - - - - жељено                      — — — остварено  <math>x</math> – положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> – положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> – време  <math>y_g</math> – пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> – угао точка управљача  <math>a_y</math> – бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> – угаона брзина вијугања возила                 </p>		

**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

Маневар	<b>3 12,5 m/s</b>	
Путања	<i>Adams Car</i>	
$K_{p1}$	0,6375	
$K_{p2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,43375	
$x_k$ [m]	5,1875	
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> — положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> — положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> — време  <math>y_g</math> — пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> — угао точка управљача  <math>a_y</math> — бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> — угаона брзина вијугања возила                 </p>		

**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

Маневар	<b>3 15 m/s</b>	
Путања	Безје	
$K_{p1}$	0,675	
$K_{p2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,4025	
$x_k$ [m]	5,5	
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> — положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> — положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> — време  <math>y_g</math> — пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> — угао точка управљача  <math>a_y</math> — бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> — угаона брзина вијугања возила                 </p>		

Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)

Маневар	3 15 m/s	
Путања	Adams Car	
$K_{p1}$	0,675	
$K_{p2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,4175	
$x_k$ [m]	5,875	
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> — положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> — положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> — време  <math>y_g</math> — пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> — угао точка управљача  <math>a_y</math> — бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> — угаона брзина вијугања возила                 </p>		

**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

Маневар	<b>3 17,5 m/s</b>	
Путања	Безје	
$K_{p1}$	0,7125	
$K_{p2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,37875	
$x_k$ [m]	6	
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> — положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> — положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> — време  <math>y_g</math> — пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> — угао точка управљача  <math>a_y</math> — бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> — угаона брзина вијугања возила                 </p>		

**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

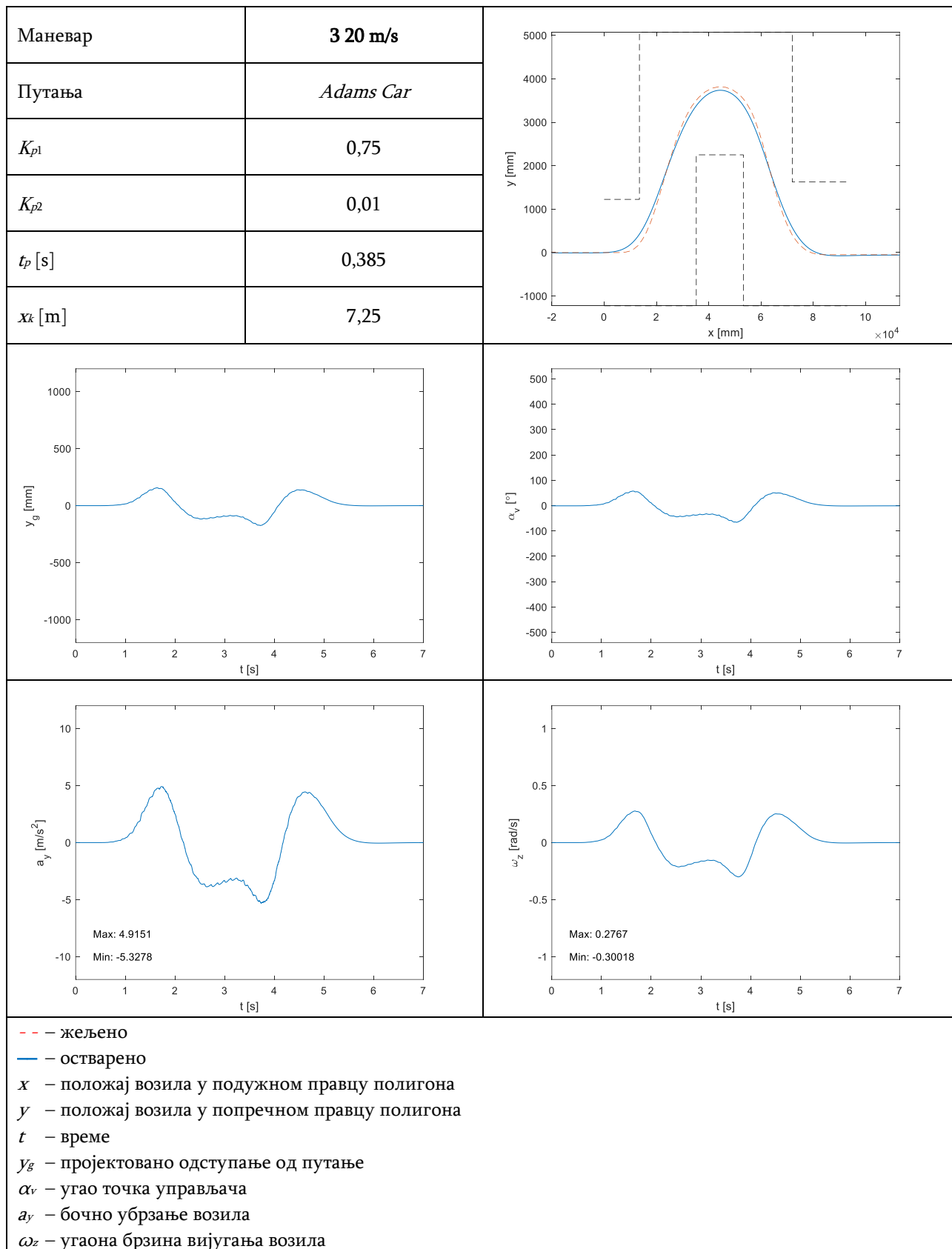
Маневар	<b>3 17,5 m/s</b>	
Путања	<i>Adams Car</i>	
$K_{p1}$	0,7125	
$K_{p2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,40125	
$x_k$ [m]	6,565	
<p>                     - - - - - жељено                      — — — остварено  <math>x</math> — положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> — положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> — време  <math>y_g</math> — пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> — угао точка управљача  <math>a_y</math> — бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> — угаона брзина вијугања возила                 </p>		

**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

Маневар	<b>3 20 m/s</b>	
Путања	Безје	
$K_{p1}$	0,75	
$K_{p2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,355	
$x_k$ [m]	6,5	
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> — положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> — положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> — време  <math>y_g</math> — пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> — угао точка управљача  <math>a_y</math> — бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> — угаона брзина вијугања возила                 </p>		



Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



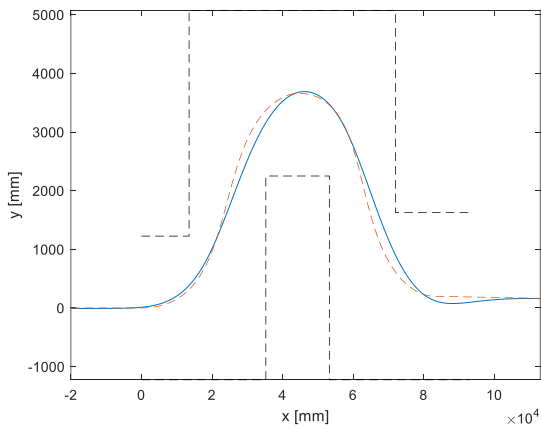
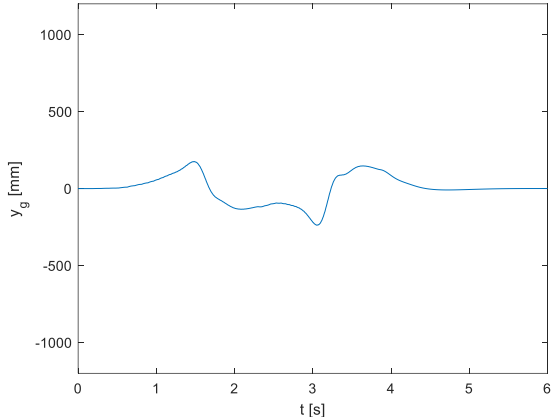
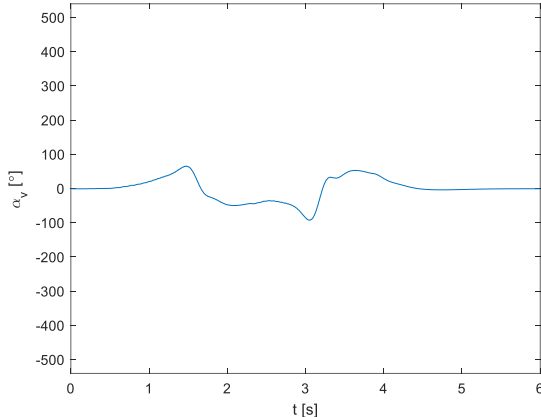
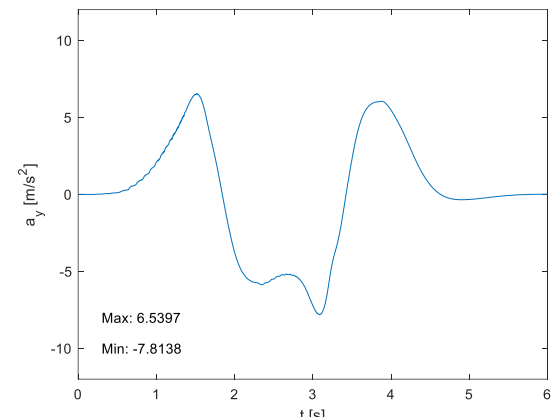
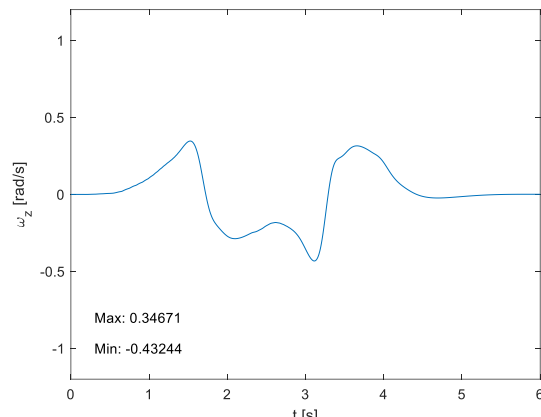
**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

Маневар	<b>3 22,5 m/s</b>	
Путања	Безје	
$K_{p1}$	0,7625	
$K_{p2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,34375	
$x_k$ [m]	6,75	
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> — положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> — положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> — време  <math>y_g</math> — пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> — угао точка управљача  <math>a_y</math> — бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> — угаона брзина вијугања возила                 </p>		

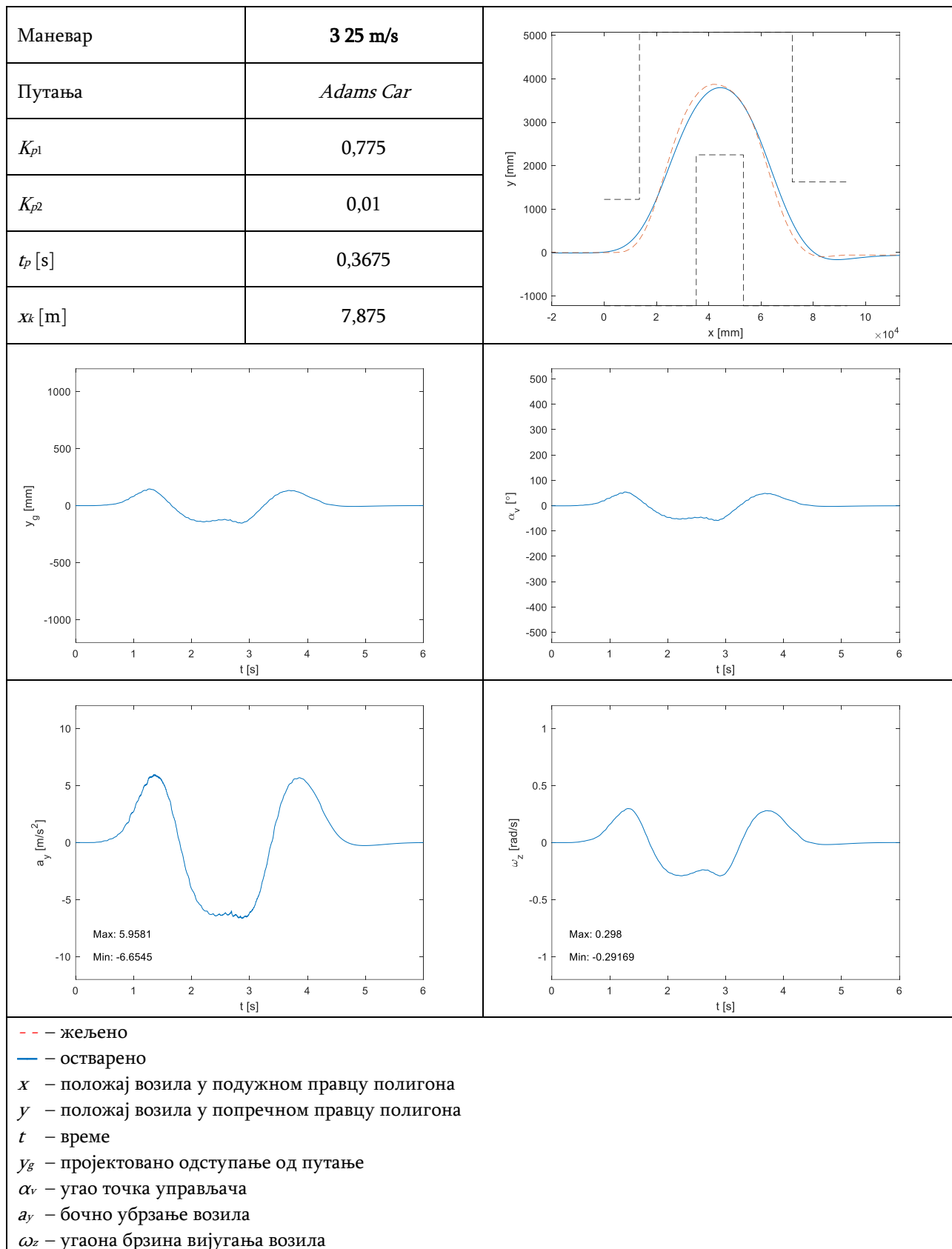
**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

Маневар	<b>3 22,5 m/s</b>	
Путања	<i>Adams Car</i>	
$K_{p1}$	0,7625	
$K_{p2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,37625	
$x_k$ [m]	7,5625	
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> – положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> – положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> – време  <math>y_g</math> – пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> – угао точка управљача  <math>a_y</math> – бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> – угаона брзина вијугања возила                 </p>		

**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

Маневар	<b>3 25 m/s</b>	
Путања	Безје	
$K_{p1}$	0,775	
$K_{p2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,3325	
$x_k$ [m]	7	
		
		
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> — положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> — положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> — време  <math>y_g</math> — пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> — угао точка управљача  <math>a_y</math> — бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> — угаона брзина вијугања возила                 </p>		

Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

Маневар	<b>3 27,5 m/s</b>	
Путања	Безје	
$K_{p1}$	0,7875	
$K_{p2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,32125	
$x_k$ [m]	7,25	
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> – положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> – положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> – време  <math>y_g</math> – пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> – угао точка управљача  <math>a_y</math> – бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> – угаона брзина вијугања возила                 </p>		

**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

Маневар	<b>3 27,5 m/s</b>	
Путања	<i>Adams Car</i>	
$K_{p1}$	0,7875	
$K_{p2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,35875	
$x_k$ [m]	8,1875	
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> – положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> – положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> – време  <math>y_g</math> – пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> – угао точка управљача  <math>a_y</math> – бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> – угаона брзина вијугања возила                 </p>		

**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

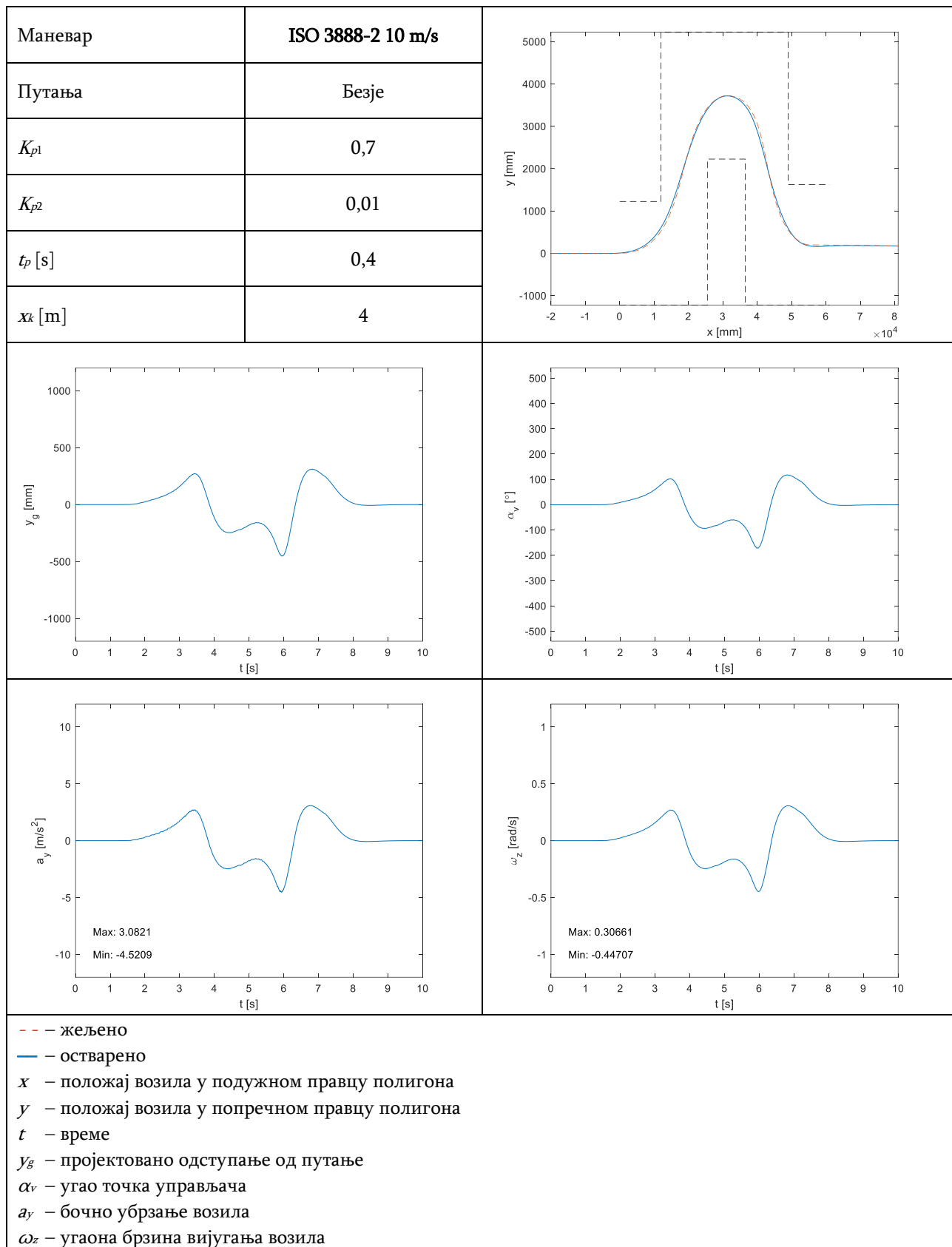
Маневар	<b>3 30 m/s</b>	
Путања	Безје	
$K_{P1}$	<b>0,8</b>	
$K_{P2}$	<b>0,01</b>	
$t_p$ [s]	<b>0,31</b>	
$x_k$ [m]	<b>7,5</b>	
<p>                     --- жељено                      — остварено  <math>x</math> — положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> — положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> — време  <math>y_g</math> — пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> — угао точка управљача  <math>a_y</math> — бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> — угаона брзина вијугања возила                 </p>		



**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

Маневар	<b>3 30 m/s</b>	
Путања	<i>Adams Car</i>	
$K_{p1}$	<b>0,8</b>	
$K_{p2}$	<b>0,01</b>	
$t_p$ [s]	<b>0,35</b>	
$x_k$ [m]	<b>8,5</b>	
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> — положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> — положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> — време  <math>y_g</math> — пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> — угао точка управљача  <math>a_y</math> — бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> — угаона брзина вијугања возила                 </p>		

Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



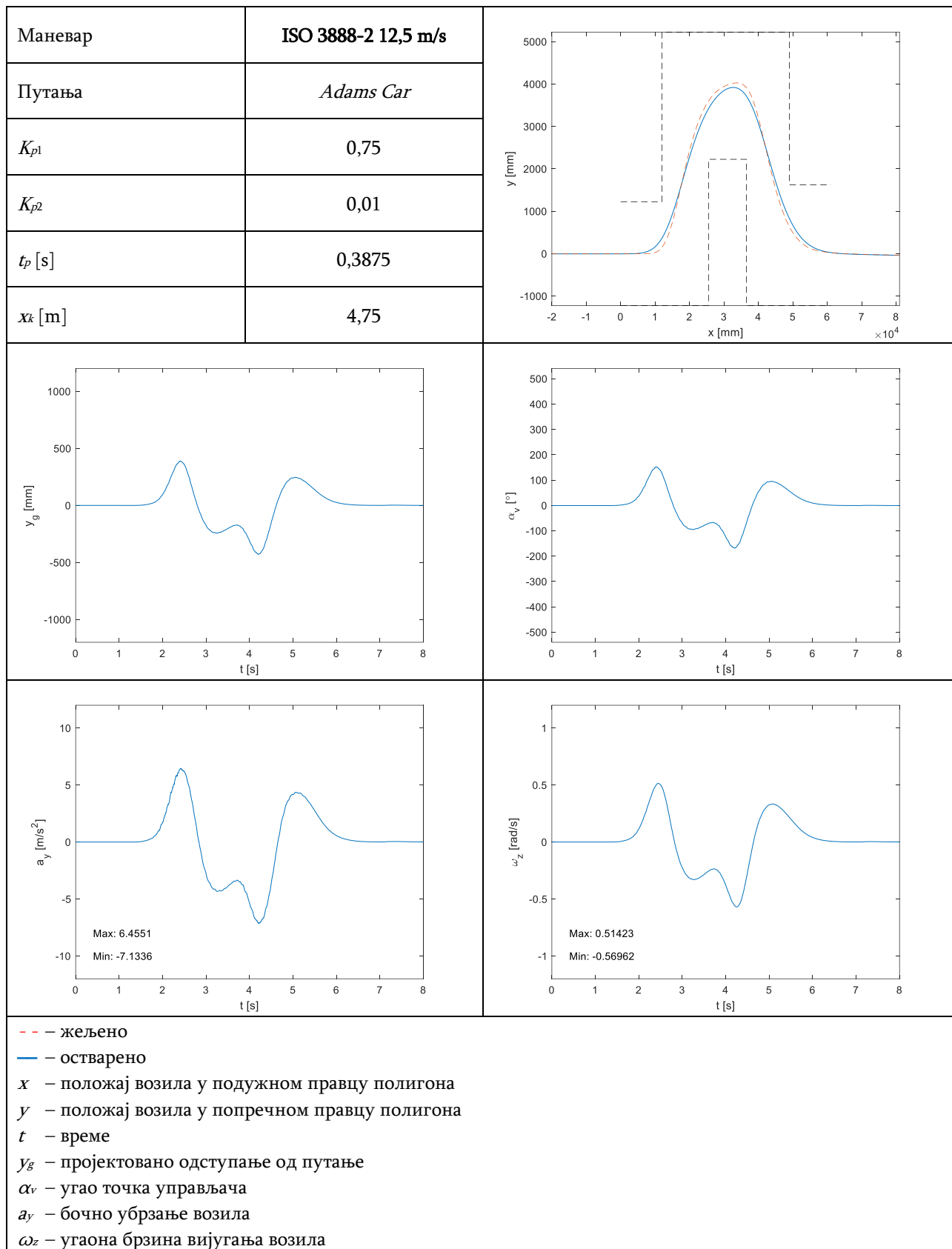
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)

Маневар	ISO 3888-2 10 m/s	
Путања	Adams Car	
$K_{p1}$	0,7	
$K_{p2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,4	
$x_k$ [m]	4	
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> — положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> — положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> — време  <math>y_g</math> — пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> — угао точка управљача  <math>a_y</math> — бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> — угаона брзина вијугања возила                 </p>		

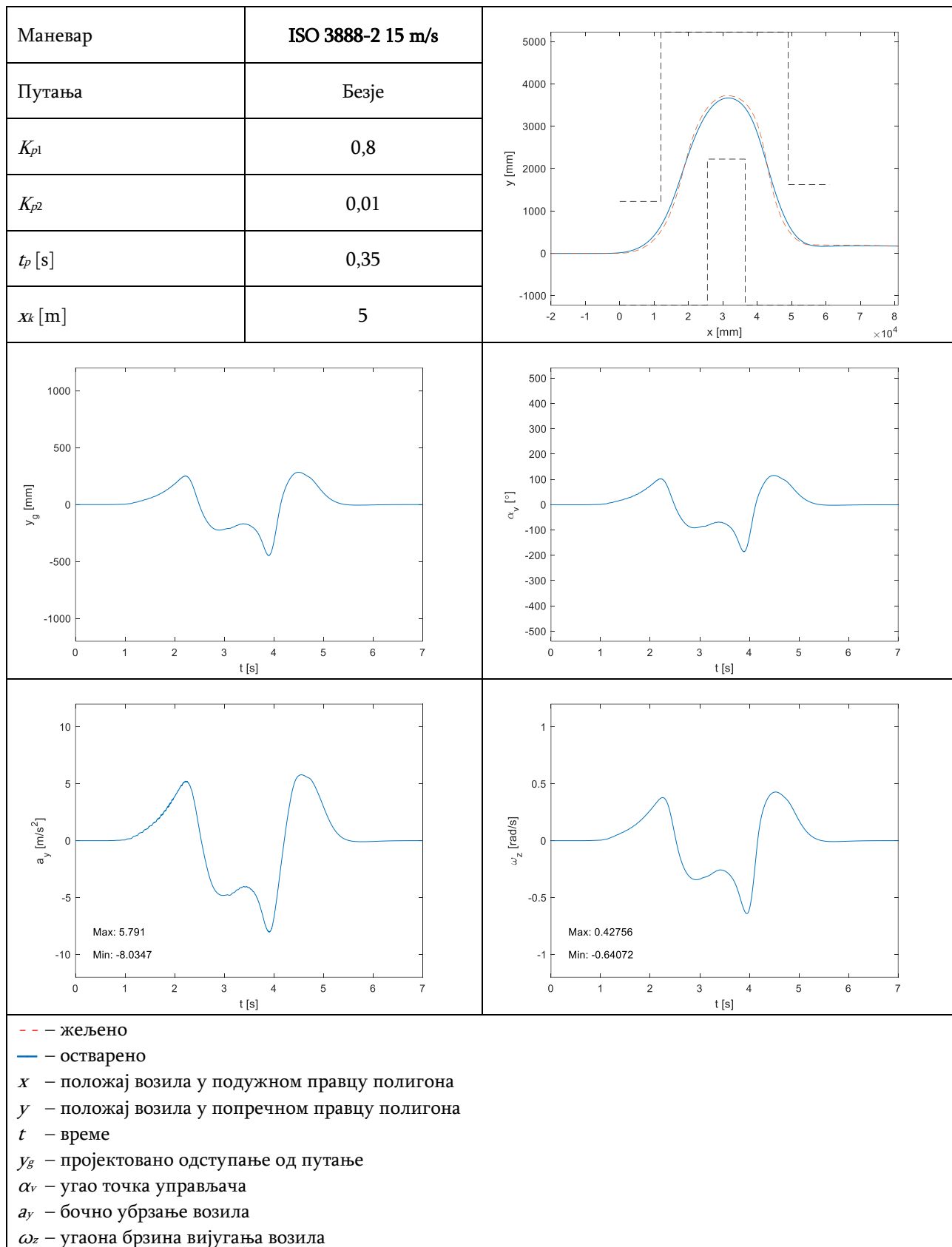
**Табела 6.2** Резултати симулација (наставак)

Маневар	ISO 3888-2 12,5 m/s	
Путања	Безје	
$K_{P1}$	0,75	
$K_{P2}$	0,01	
$t_p$ [s]	0,375	
$x_k$ [m]	4,5	
<p>                     - - - жељено                      — остварено  <math>x</math> — положај возила у подужном правцу полигона  <math>y</math> — положај возила у попречном правцу полигона  <math>t</math> — време  <math>y_g</math> — пројектовано одступање од путање  <math>\alpha_v</math> — угао точка управљача  <math>a_y</math> — бочно убрзање возила  <math>\omega_z</math> — угаона брзина вијугања возила                 </p>		

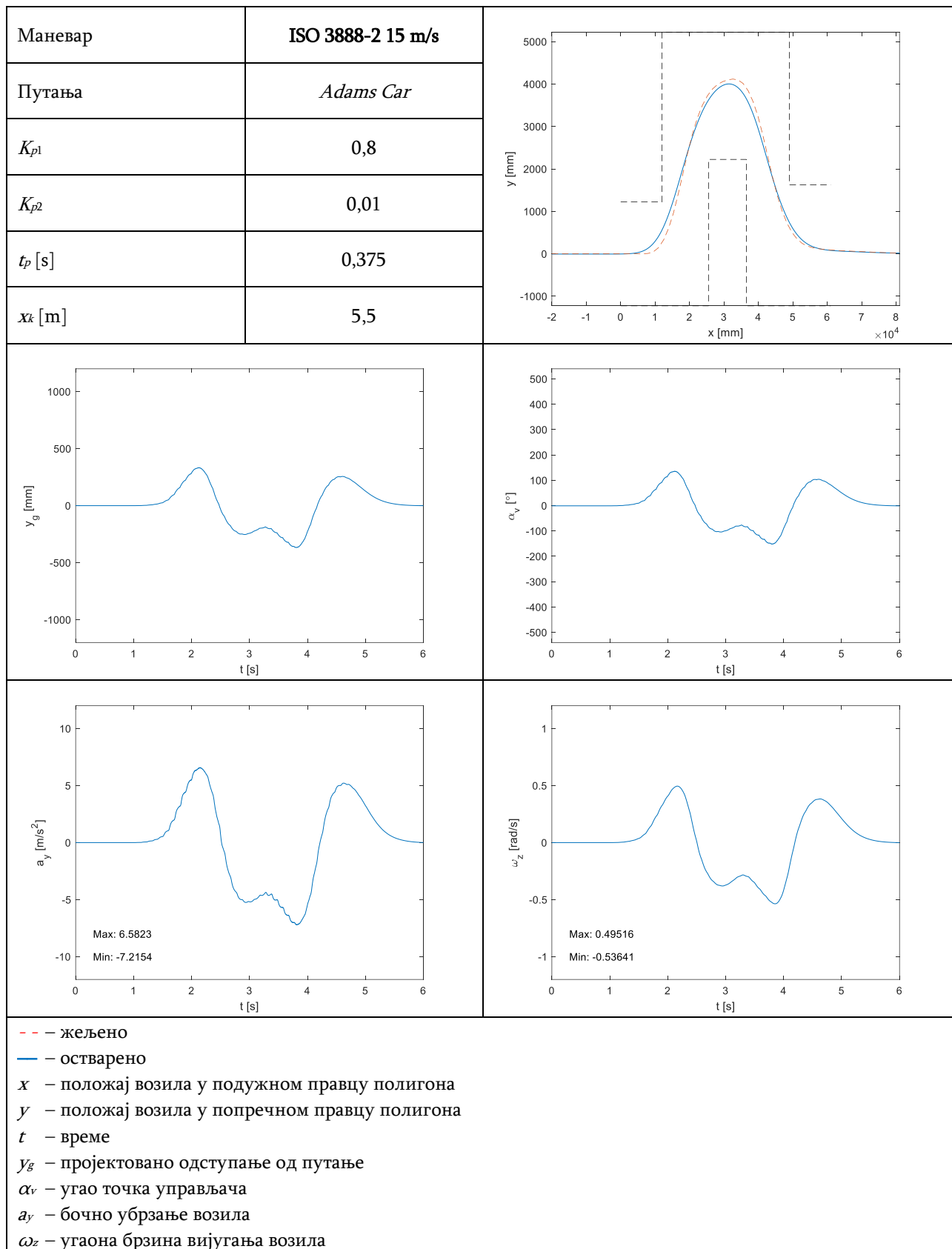
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



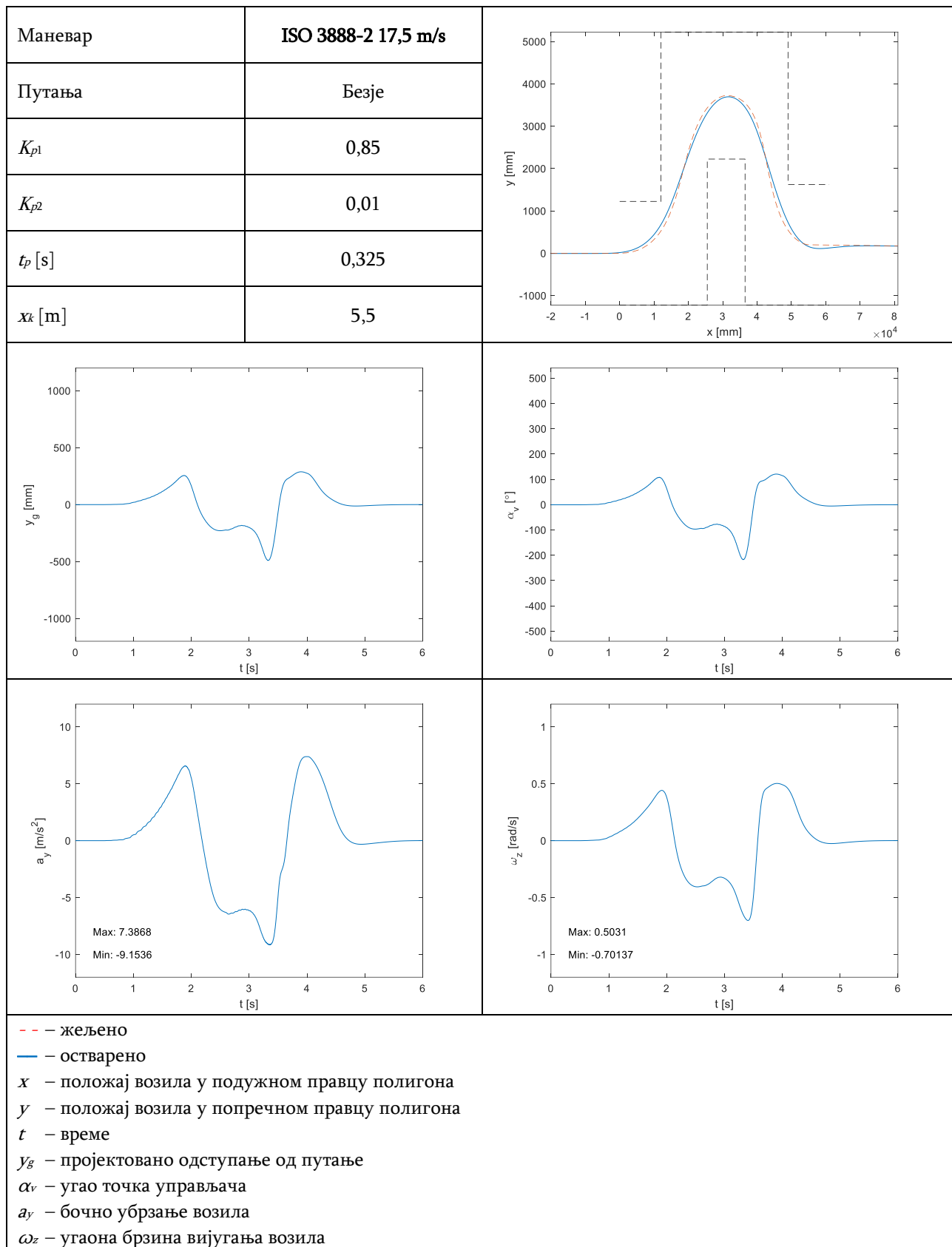
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)



Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)

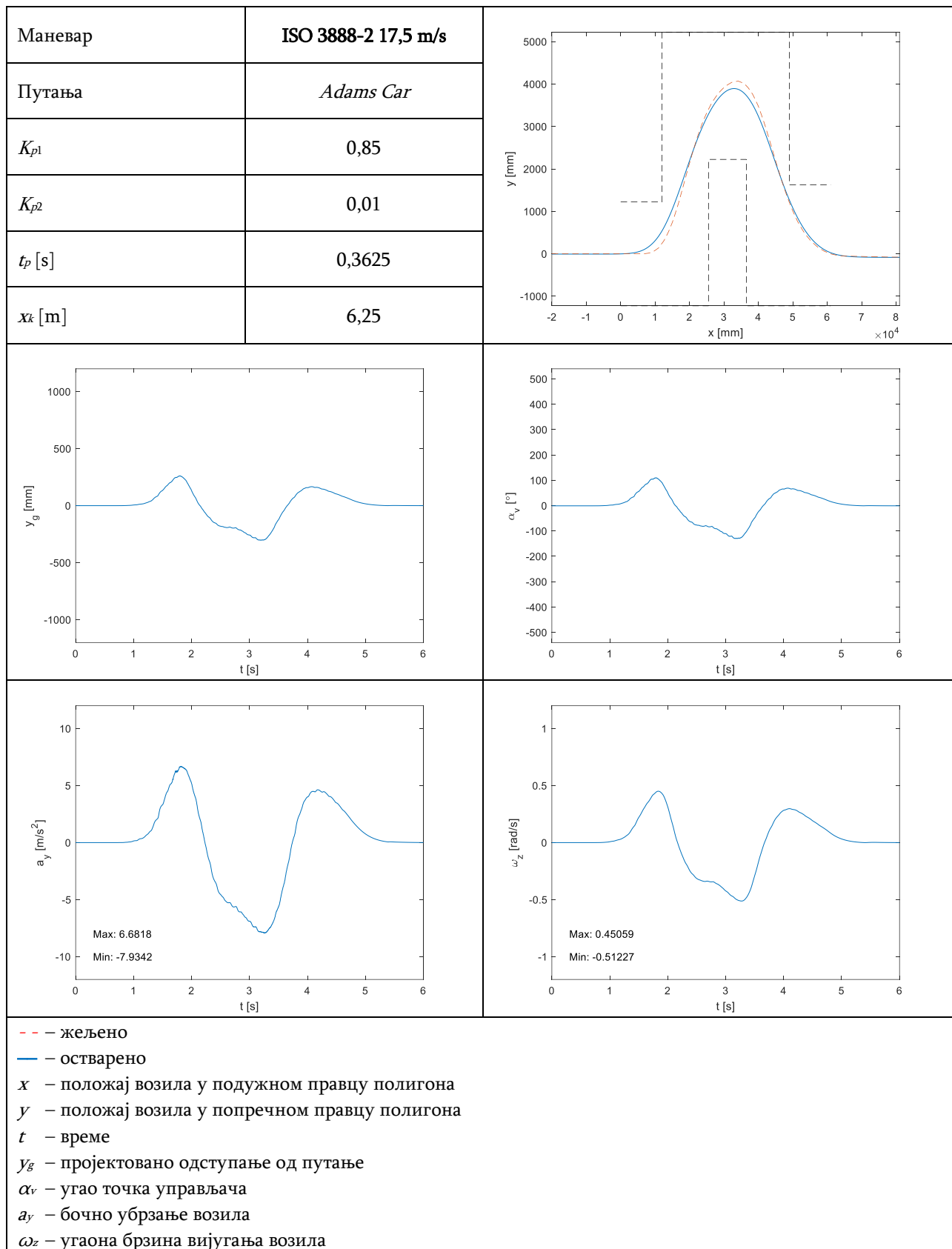


Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)

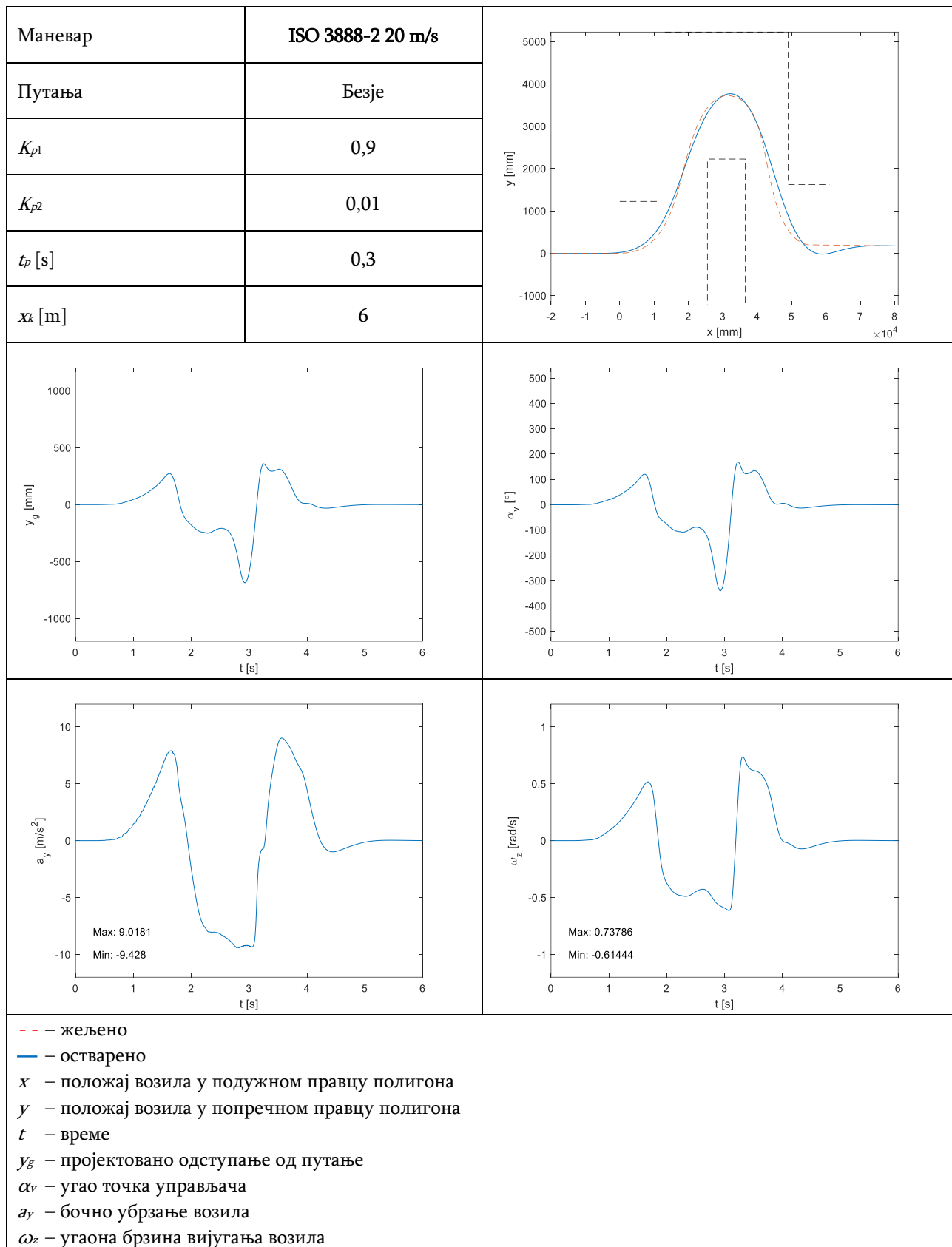




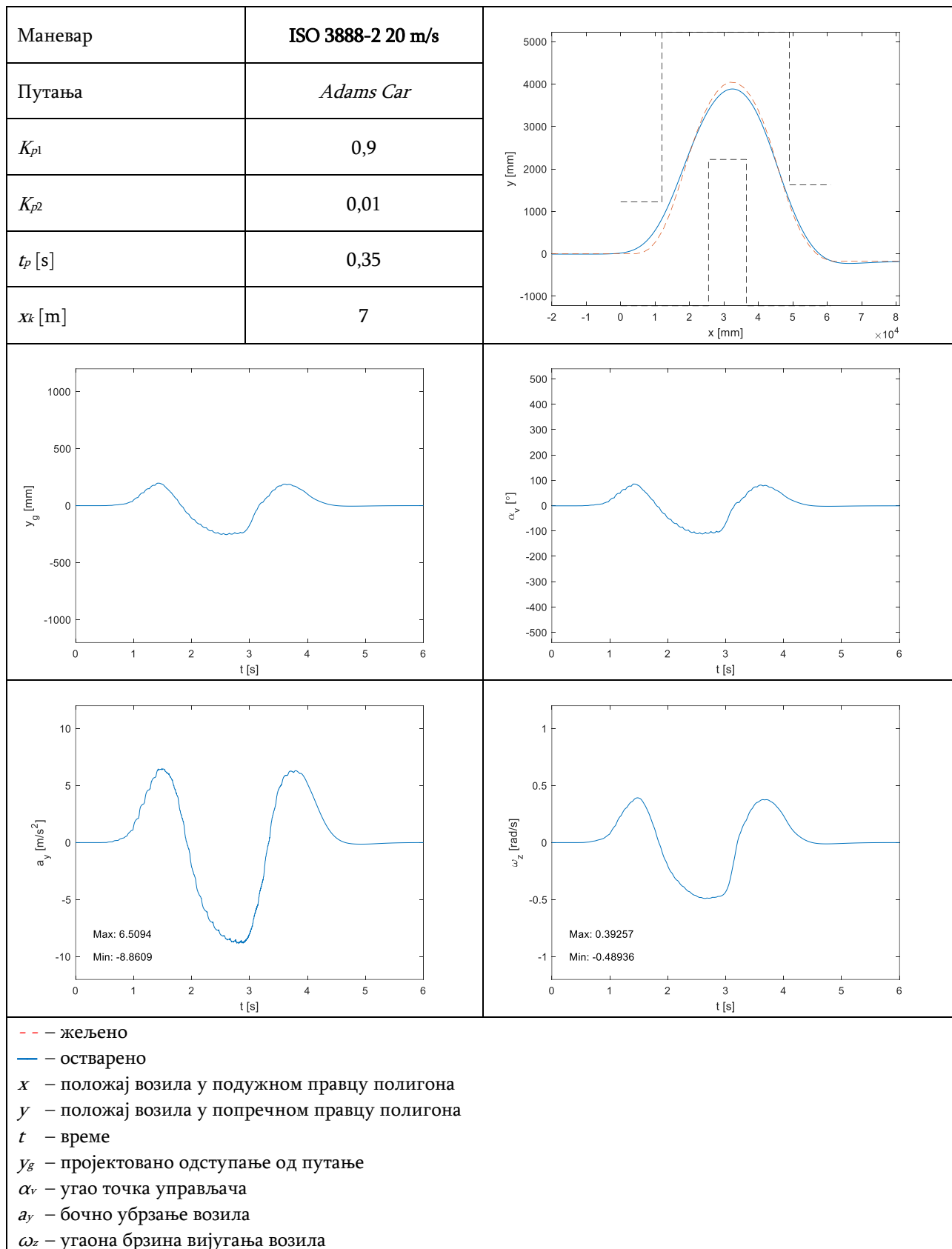
Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)

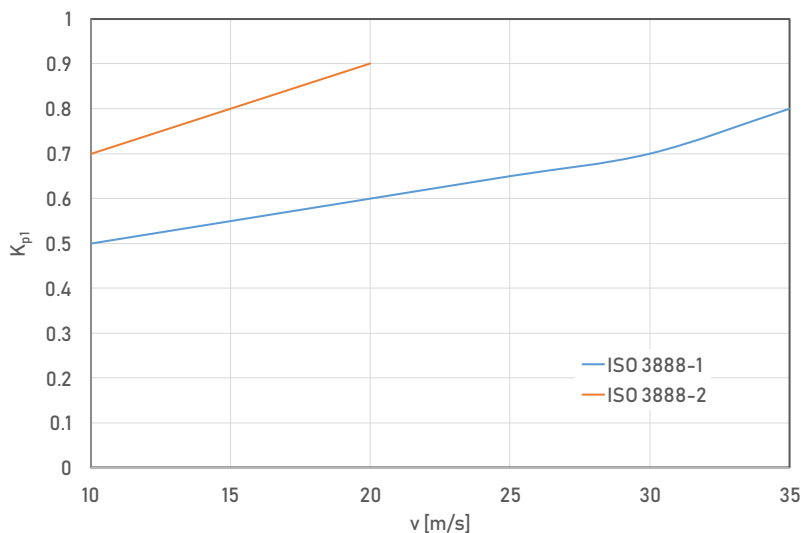


Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)

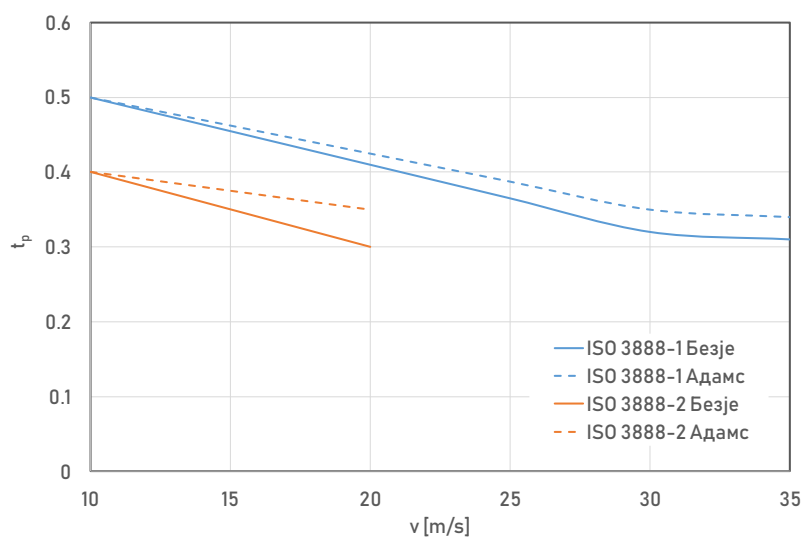


Табела 6.2 Резултати симулација (наставак)

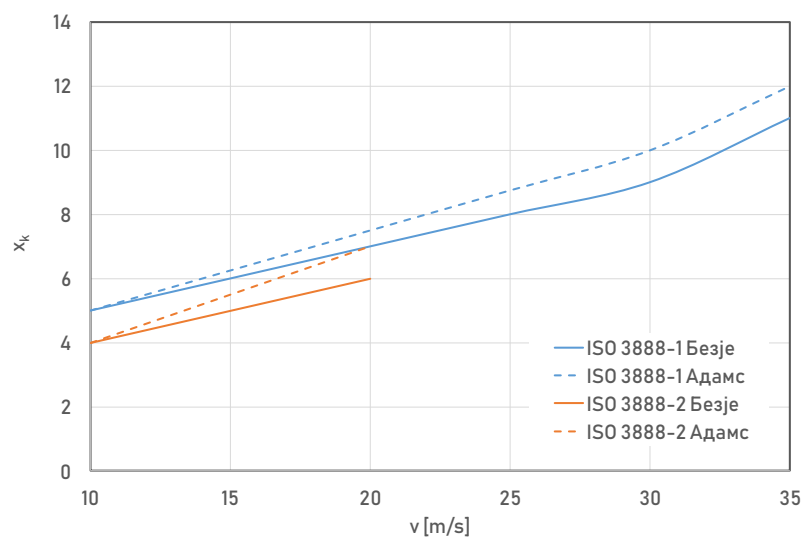




Слика 6.2 Зависност параметра  $K_{p1}$  од брзине проласка кроз полигон



Слика 6.3 Зависност параметра  $t_p$  од брзине проласка кроз полигон



Слика 6.4 Зависност параметра  $x_k$  од брзине проласка кроз полигон

Параметри коришћени за симулације дати су на сликама 6.2 до 6.4. Оптималне вредности параметара су одређене итерацијама за полигоне према стандардима *ISO 3888-1* и *ISO 3888-2* и брзине возила од 10 m/s до максималне брзине којом се може проћи кроз задати полигон у корацама од 5 m/s. За остале вредности брзина и димензија полигона, вредности параметара се добијају интерполацијом вредности параметара за познате брзине и димензије полигона. Уколико се израчунавају параметри за полигон чије су димензије између полигона према стандардима *ISO 3888-1* и *ISO 3888-2*, за брзине веће од 20 m/s (што представља максималну брзину којом је било могуће проћу кроз полигон према *ISO 3888-2*), за потребе интерполације се узимају вредности параметара за полигон према *ISO 3888-2* које одговарају брзини од 20 m/s.

Да би се доказала оправданост оваквог приступа, спроведене су симулације за брзине из средине интервала од 5 m/s и за полигон 3, са вредностима параметара добијеним горе описаном методом.

“Лети, баш зато што је немогуће.  
Јер, премда је летети немогуће, човек  
ипак може полетети зато што није  
могуће да замисли оно што је немогуће.”

Борислав Пекић

## 7. Закључна разматрања

---

### 7.1. Анализа резултата спроведених симулација

Након извршених симулација, спроведена је анализа резултата приказаних у претходном поглављу. Поред успешности праћења задате путање, анализа обухвата и избор параметара модела и њихов утицај на његову успешност у вођењу возила кроз задати полигон.

#### 7.1.1. Оптималне путање

На основу дијаграма који приказују путање возила приликом спроведених симулација у претходном поглављу, може се закључити да су путање формиране на основу Безјеових кривих и оне које су формиране на основу самосталних *Adams Car* симулација успешне у савладавању задатих полигона.

Међутим, уколико се у обзир узму и параметри динамичког понашања возила (бочно убрзање и угаона брзина вијугања возила), може се закључити следеће:

За полигон према *ISO 3888-1*:

- Путање формиране на основу Безјеових кривих узрокују мање вредности убрзања и угаоних брзина при брзинама до 22,5 m/s;
- При брзинама већим или једнаким 25 m/s путање формиране на основу самосталних *Adams Car* симулација дају мање вредности убрзања и угаоних брзина.

За полигон 3:

- Путање формиране на основу Безјеових кривих узрокују мање вредности убрзања и угаоних брзина при брзинама до 15 m/s;
- При брзини од 17, 5 m/s путање формиране на основу Безјеових кривих узрокују мање вредности убрзања и угаоне брзине вијугања у позитивном смеру, док су ове вредности у негативном смеру мање за путање формиране на основу *Adams Car* симулација;
- При брзинама већим или једнаким 20 m/s путање формиране на основу самосталних *Adams Car* симулација дају мање вредности убрзања и угаоних брзина.

За полигон према *ISO 3888-2*:

- Путање формиране на основу Безјеових кривих узрокују мање вредности убрзања и угаоних брзина при брзинама до 12,5 m/s;
- При брзини од 15 m/s путање формиране на основу Безјеових кривих узрокују мање вредности убрзања и угаоне брзине вијугања у позитивном смеру, док су ове вредности у негативном смеру мање за путање формиране на основу *Adams Car* симулација;
- При брзинама већим или једнаким 17,5 m/s путање формиране на основу самосталних *Adams Car* симулација дају мање вредности убрзања и угаоних брзина.

Може се закључити да је путање засноване на Безјеовим кривама боље бирати при мањим брзинама, док путање формиране на основу *Adams Car* симулација дају боље резултате при већим брзинама – ово се можда најбоље може видети на дијаграму који представља путању возила при брзини возила од 30 m/s на полигону 3.

### 7.1.2. Успешност праћења задате путање

Грешке између жељених и остварених путања су минималне и омогућавају пролазак возила кроз полигон без контакта са његовим границама (осим у поменутом случају када се на полигону 3 возило креће брзином од 30 m/s по путањи формираној на основу Безјеових кривих, када би модел свакако изабрао путању засновану на *Adams Car* симулацији).

Овде треба поменути да приказани дијаграми зависности пројектованог одступања од путање  $y_g$  од времена нису мерило одступања стварне од жељене путање и да се оно најбоље може сагледати са већ поменутих дијаграма који представљају путању возила на полигонима.

### 7.1.3. Зависност параметара модела од брзине и димензија полигона

Слике 6.2 до 6.4 приказују зависност параметара модела од брзине извођења маневра и димензија полигона. На основу датих приказа могу се извести следећи закључци:

Параметар  $K_{pl}$ :

- Расте са порастом брзине;
- Расте са умањењем димензија полигона, односно „поштравањем” маневра, што је у складу са претходним наводима у тексту;
- Не зависи од начина формирања путање.

Параметар  $t_p$ :

- Опада с порастом брзине (док производ ове вредности и брзине возила, који представља растојање „тачке гледања унапред” од возила, расте);
- Опада са умањењем димензија полигона, односно „поштравањем” маневра, на сличан начин као што возач смањује растојање „тачке гледања унапред” у „оштријим” кривинама;

- Спорије опада код путања дефинисаних на основу самосталних *Adams Car* симулација у односу на путање засноване на Безјеовим кривама, што је у складу са претходним наводом да су путање генерисане на основу *Adams Car* симулације повољније при већим брзинама, односно да захтевају мање „оштре” маневре.

Параметар  $x$ :

- Расте са порастом брзине, што је у складу са претходним наводима;
- Опада са умањењем димензија полигона, односно „пооштравањем” маневра, слично као и параметар  $t_p$ ;
- Брже расте са порастом брзине код путања дефинисаних на основу самосталних *Adams Car* симулација у односу на путање засноване на Безјеовим кривама, што је у складу са наведеним за параметар  $t_p$ .

#### 7.1.4. Утицај на динамичко понашање возила

Маневри који се изводе моделом који је резултат дисертације не узрокују бочна убрзања и угаоне брзине вијугања које би превазишле границе могућности возила (барем не на подлози са добрим приањањем). У тачки 7.1.1. је дата анализа утицаја избора путање на ове величине које представљају мерило динамичког понашања возила приликом двоструке промене саобраћајне траке. Поред наведеног, развијени модел узрокује „глатко” командовање тачком управљача (што има великог утицаја на изнад поменуте величине), баш као што би то чинио и човек, за разлику од неких модела приказаних у литератури.

#### 7.2. Допринос развијеног модела

Аутор дисертације није пронашао у литератури моделе који су ефикасно успевали да спроведу двоструку промену саобраћајне траке на границама маневривости возила – већина приказаних модела је развијена за промену саобраћајне траке на аутопуту маневрима који су далеко од граница могућности возила. Стога аутор ове дисертације сматра да је управо највећи допринос развијеног модела његова могућност да возило успешно „спроведе” кроз полигон који омогућава возилу избегавање препреке на путу испред, а на границама могућности возила и подлоге. Поред тога, развијени модел је једноставан, рачунарски незахтеван и лако прилагодљив било ком возилу.

#### 7.3. Могућа унапређења система у будућности

Спроведене косимулације могу послужити за креирање базе података изводљивих маневара, која се може користити за одлучивање о маневру – кочење до заустављања/судара, кочење ради успоравања пре скретања или скретање.

Будући модели, да би представљали унапређење модела који је резултат ове дисертације, требало би да узму у разматрање следеће:

- Могућност „онлајн” корекције путање у случају изненадне промене неке од димензија полигона или промена услова приањања;
- Утицај оптерећења возила (празно/пуно) на његово динамичко понашање;
- Процењени коефицијент приањања, у мери у којој је то изводљиво.



Да би возило било потпуно аутономно, потребно га је оспособити и за остале задатке као што су пролазак кроз раскрсницу [189], препознавање саобраћајних знакова [190] и самостално паркирање [191]. Аутономно возило треба оспособити и за неке од операција које нису често помињане у литератури, као што је звучно упозорење пешака у случају опасности [192].

Посебни проблеми на које треба обратити пажњу приликом развоја аутономних возила представљају приватност возача и путника [193], али и сајбербезбедност [194,195], али они превазилазе обим ове дисертације.

Оставља се и могућност да возило, на основу података са уграђених давача [196] „учи” о утицају изабраних маневара (па макар се радило и о најједноставнијим) на карактеристике понашања возила битне за безбедност, економичност и проток саобраћаја.

Како би се стекао увид у комплексност управљања аутономним возилом, овде ће се као пример навести да се софтвер за управљање раније поменути возилом „Газда” састојао од 300000 линија кода подељеног у 14000 модула. На његовом развоју је четрнаест месеци радило преко двадесет програмера [197]. То имплицира да је за наведена могућа побољшања модела потребно уложити доста времена и труда, а аутор дисертације се нада да ће се наћи истраживачи који ће успети да оду корак даље.

„Све што сањате је фантастика,  
све што постигнете је наука.  
Читава историја човечанства је  
ништа друго до научна фантастика.”

Реј Бредбери

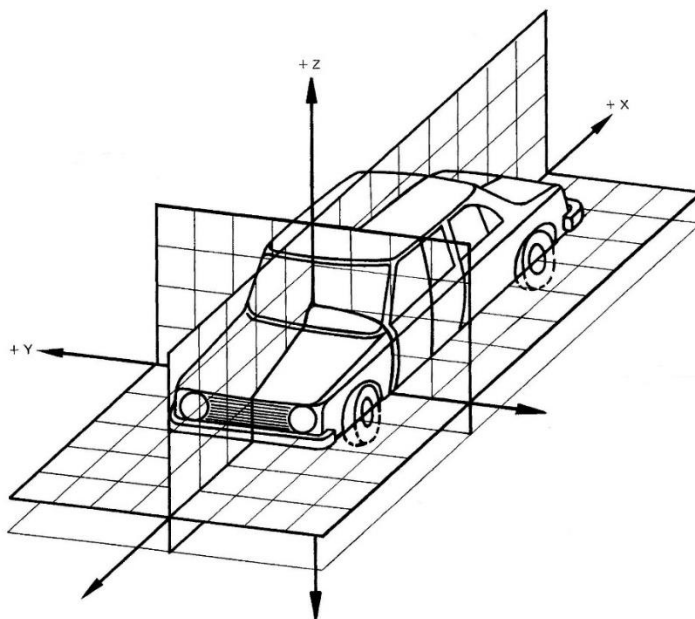
## 8. Прилози

---

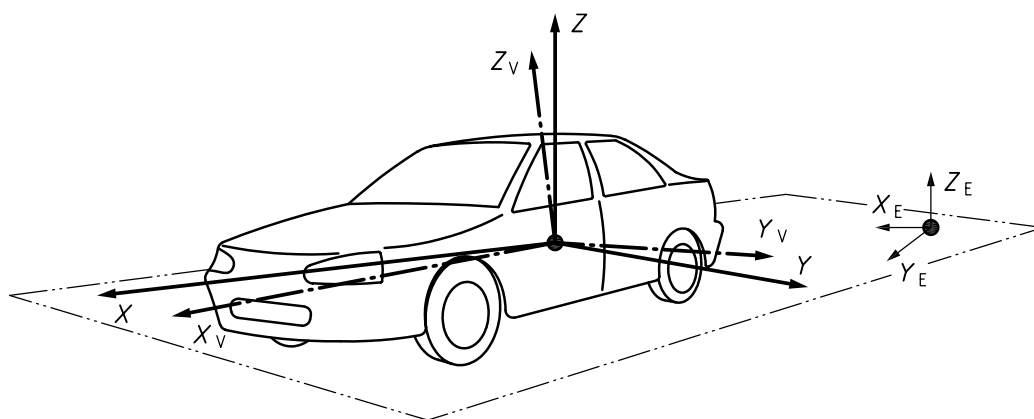
## ПРИЛОГ 1

## КООРДИНАТНИ СИСТЕМ И ОЗНАКЕ

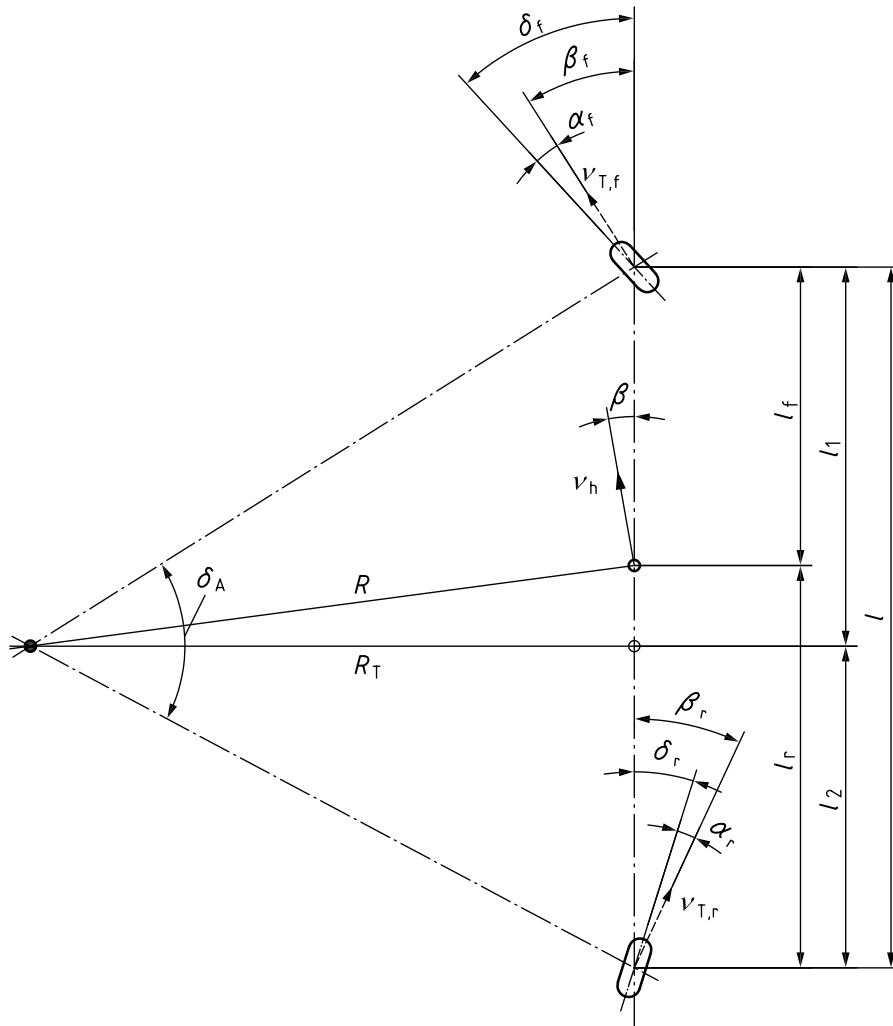
За потребе ове дисертације коришћени су координатни систем и ознаке усвојени на Катедри за моторна возила и коришћени у оквиру предмета Динамика возила. На сликама 8.1 до 8.3 биће информативно приказани координатни системи и неке од ознака према стандардима ISO 4130 [198] и ISO 8855 [199].



Слика 8.1 Координатни систем према стандарду ISO 4130 [198]



Слика 8.2 Координатни систем према стандарду ISO 8855 [199]

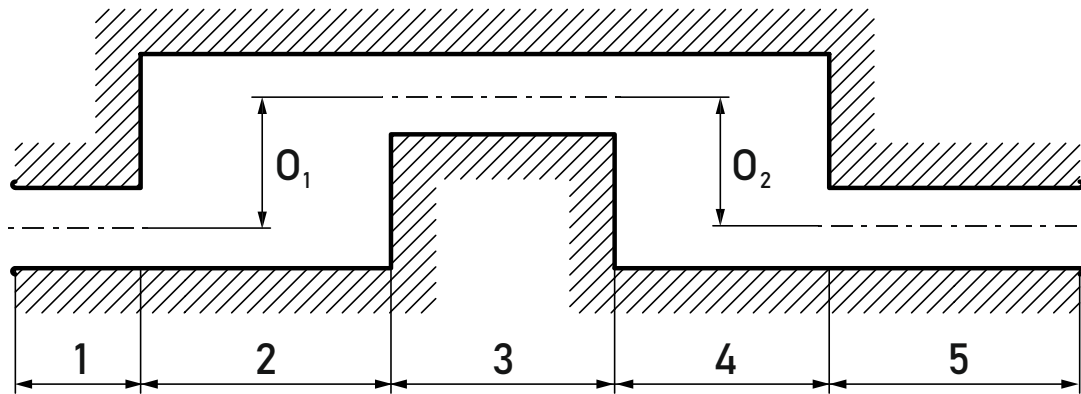


Слика 8.3 Ознаке на слици 4.23 према стандарду ISO 8855 [199]

## ПРИЛОГ 2

ДИМЕНЗИЈЕ ПОЛИГОНА У ПРОГРАМУ *Adams Car*

Слика 8.4 приказује подразумеване димензије три различита полигона за маневар двоструке промене саобраћајне траке у програму *Adams Car*.



Димензија [m]	<i>ISO</i>	<i>Moose</i>	<i>VDA</i>
1	60	50+6	50+12
2	30	13,5	13,5
3	25	11	11
4	25	13,5	12,5
5	30	6	12
$O_1$	3,586	4	3,25
$O_2$	3,414	4	4

Слика 8.4 Подразумеване димензије полигона у програму *Adams Car*

## ПРИЛОГ 3

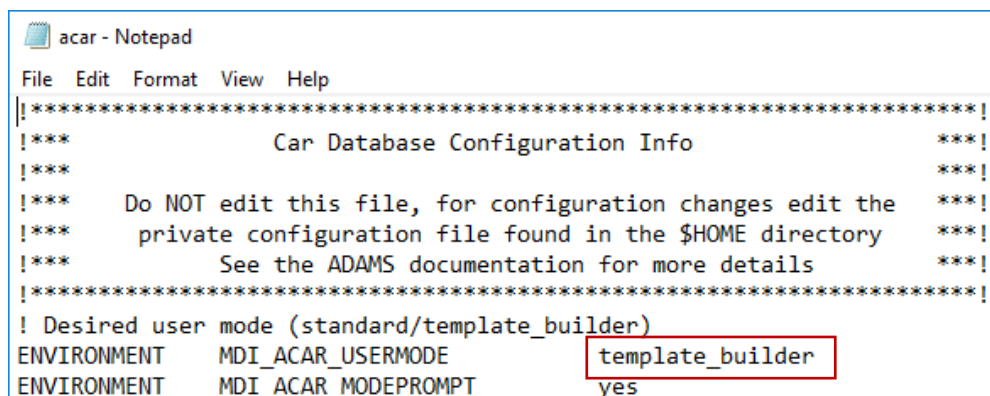
УПУТСТВО ЗА КОСИМУЛАЦИЈУ КОРИШЋЕЊЕМ СОФТВЕРСКИХ ПАКЕТА *Adams Car 2018.1* И *MATLAB Simulink R2021a*

Косимулација коришћењем пакета *Adams Car* и *MATLAB Simulink* се спроводи тако што се у *Simulink* модел смешта унапред припремљени *Adams* блок, коме се прослеђују управљачки сигнали за модел возила, а из ког је излаз одзив понашања возила, који се може користити (у затвореној петљи) за кориговање управљачких сигнала. Симулација понашања возила се не спроводи у самом *Adams* блоку, већ овај блок све време трајања косимулације комуницира са програмом *Adams Car* – шаље му улазе и прима излазе. *Adams Car* модел се састоји од више подсистема и може укључивати испитну инсталацију (*Test Rig*). У примеру приказаном у овом упутству испитна инсталација се може посматрати као робот који мења возача у извођењу жељеног маневра.

### 1. Омогућавање напредног режима, односно режима конструктора предложака у пакету *Adams Car* (једнократно)

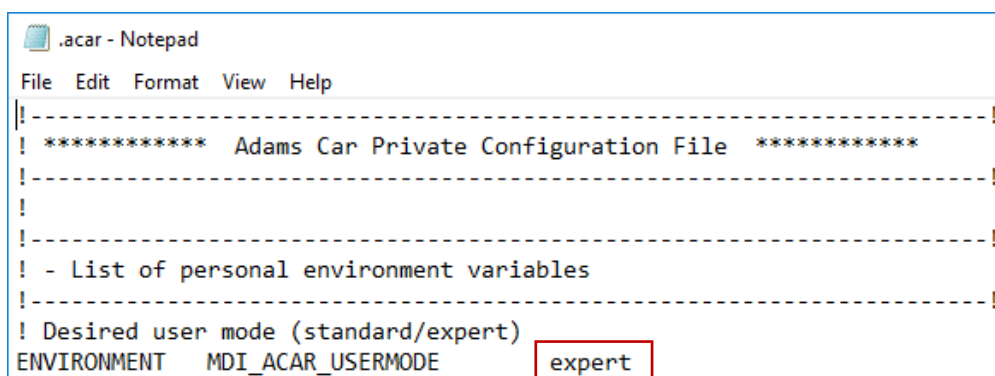
Да би се омогућио рад у напредном режиму који омогућава измену предложака које користе подсистеми потребно је изменити две текстуалне датотеке у којима су записани параметри конфигурације програма, према приказаним сликама:

<фасцикла са програмима (c:\Program Files)\MSC.Software\Adams\2018\_1\acar\acar.cfg



```
acar - Notepad
File Edit Format View Help
|*****|
|***          Car Database Configuration Info          ***|
|***          ***|
|*** Do NOT edit this file, for configuration changes edit the ***|
|*** private configuration file found in the $HOME directory ***|
|*** See the ADAMS documentation for more details ***|
|*****|
! Desired user mode (standard/template_builder)
ENVIRONMENT MDI_ACAR_USERMODE      template_builder
ENVIRONMENT MDI_ACAR_MODEPROMPT   yes
```

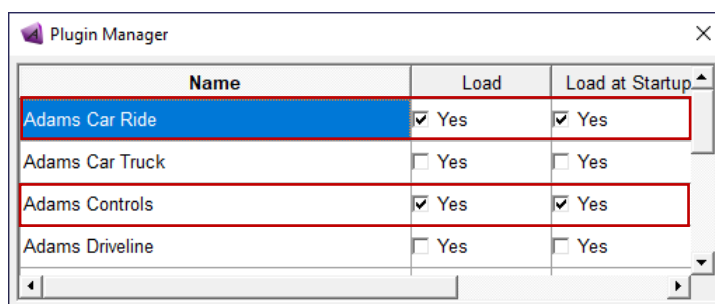
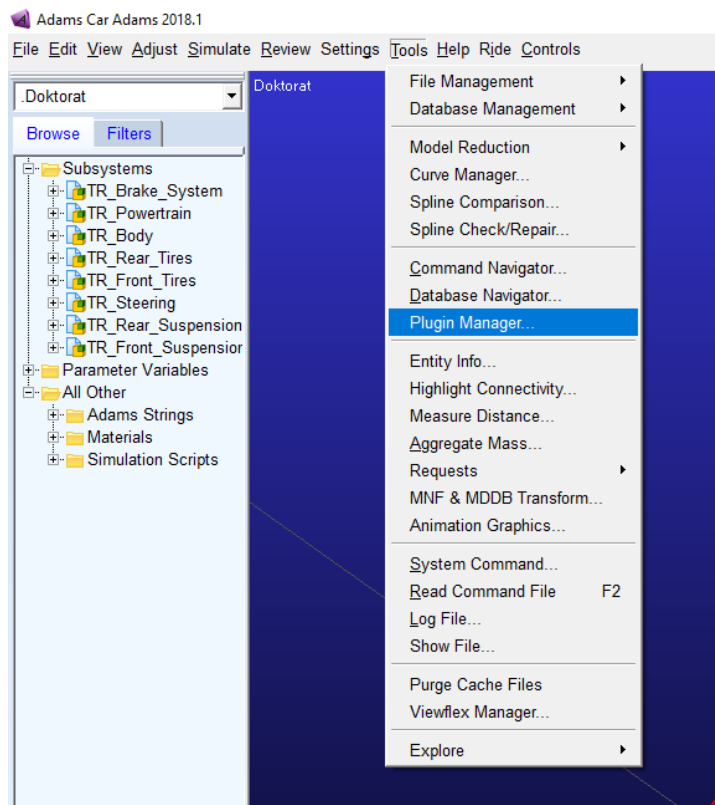
<фасцикла корисника (c:\Users\<име корисника>)\.acar.cfg



```
.acar - Notepad
File Edit Format View Help
|-----|
|***** Adams Car Private Configuration File *****|
|-----|
|
|-----|
| - List of personal environment variables
|-----|
! Desired user mode (standard/expert)
ENVIRONMENT MDI_ACAR_USERMODE      expert
```

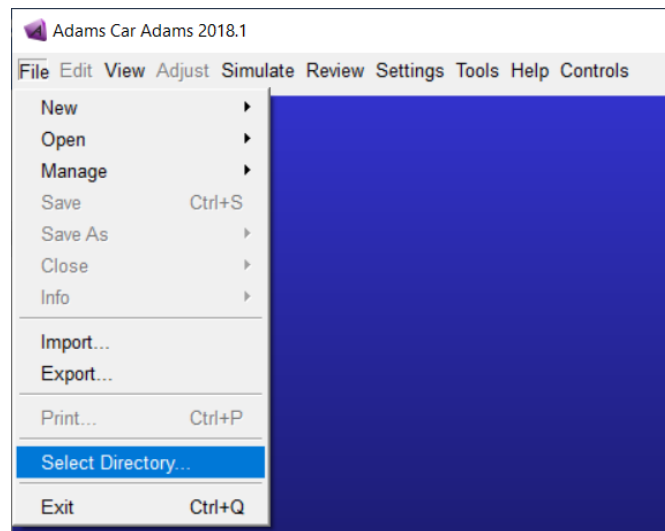
## 2. Укључивање потребних програмских додатака (једнократно)

Да би се спровела косимулација, потребно је укључити програмске додатке *Adams Controls* и *Adams Car Ride*, на начин приказан на доњим сликама (ово ће бити случај и у већем делу наставка овог упутства).



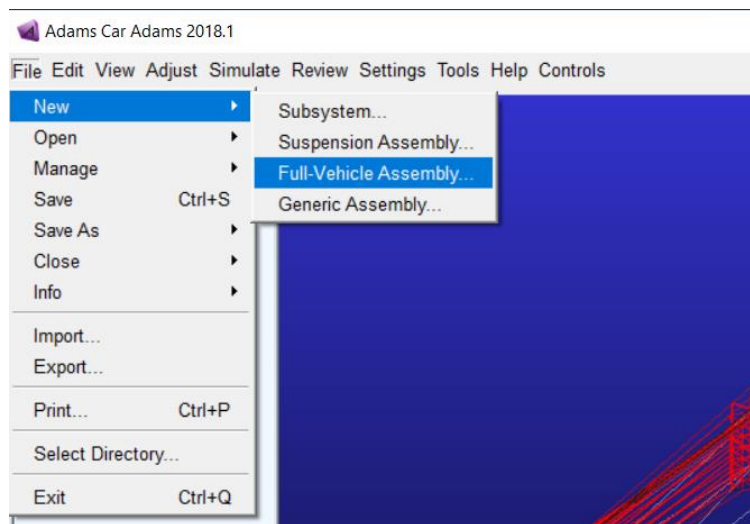
## 3. Одабир радне фасцикле

Потребно је одабрати радну фасциклу у коју ће *Adams Car* чувати датотеке потребне за спровођење косимулације.

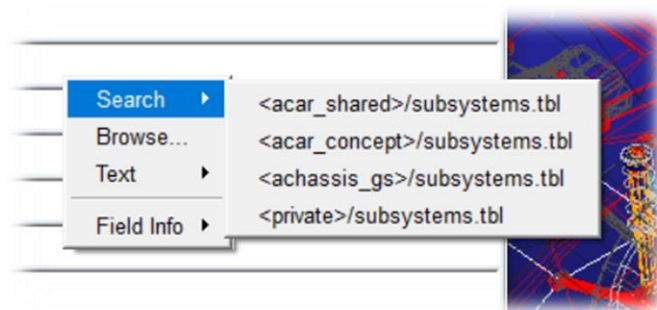


## 4. Избор модела за спровођење косимулације

### 4.1. Креирање склопа возила

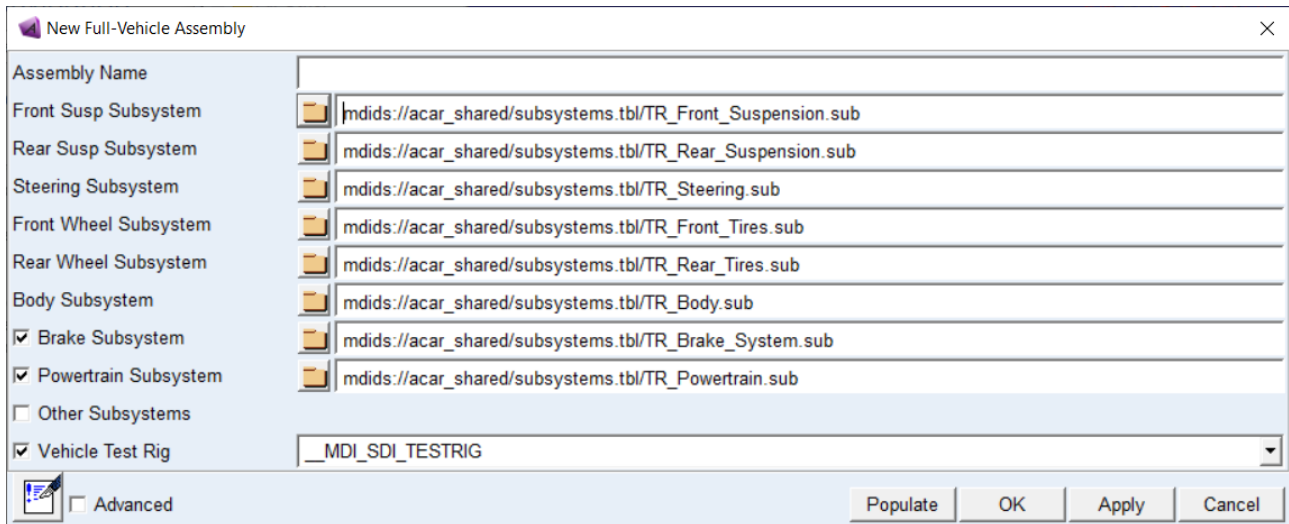


Десни клик у поља > Search > <acar\_shared>/subsystems.tbl

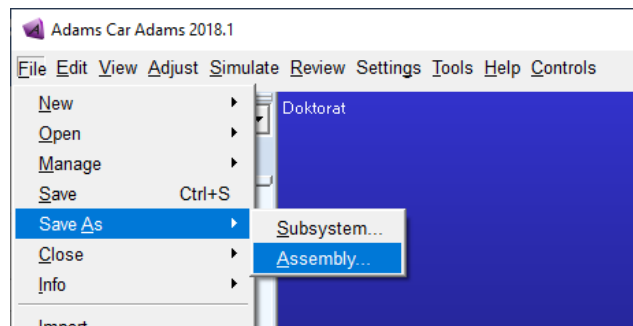


На доњој слици су приказани подсистеми који чине модел (склоп) са којим је могуће спровести симулацију.

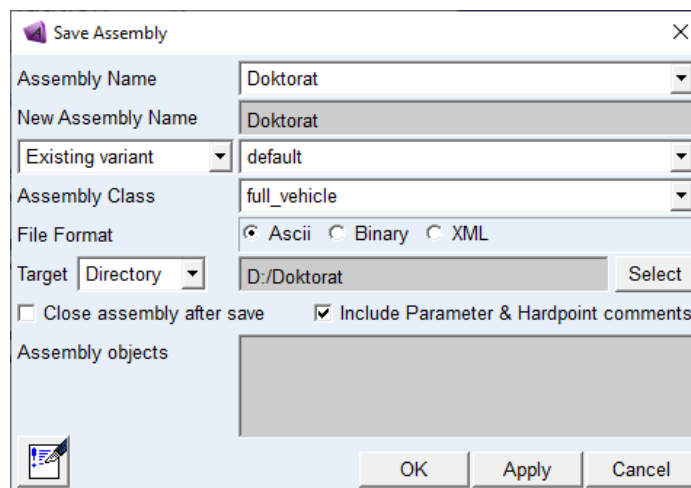




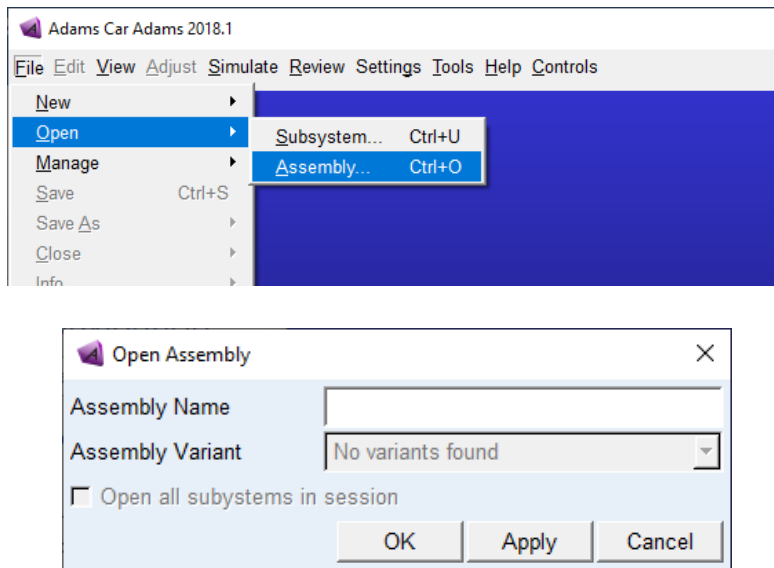
Овако креиран модел се може снимити у базу података или (како је то овде приказано) у одговарајућу фасциклу.



**Target: Directory**



## 4.2. Учитавање модела (склопа)

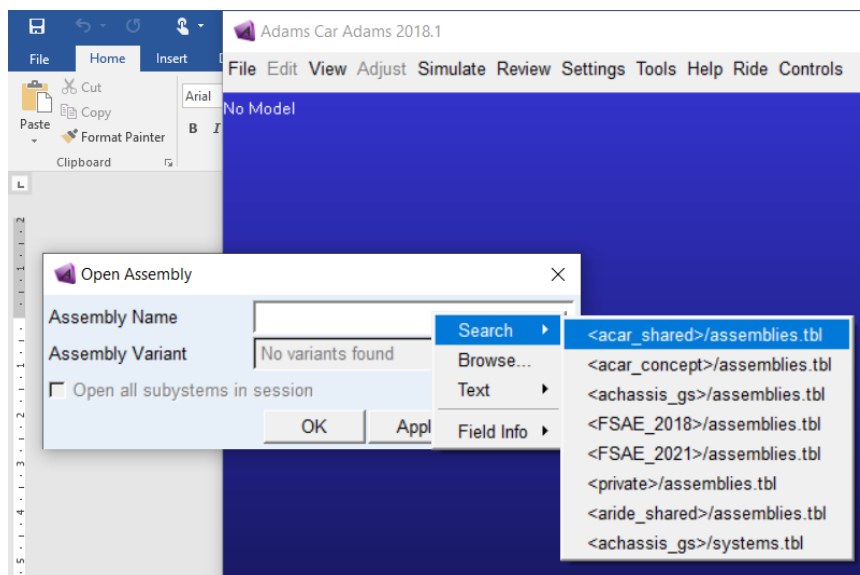


Ако се учитава склоп снимљен у фасцикли:

Десни клици у поље > Browse

Ако се учитава склоп снимљен у бази података:

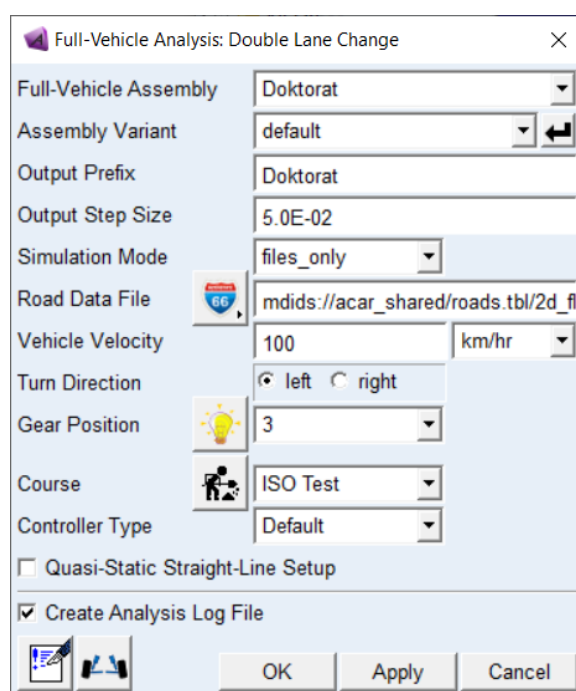
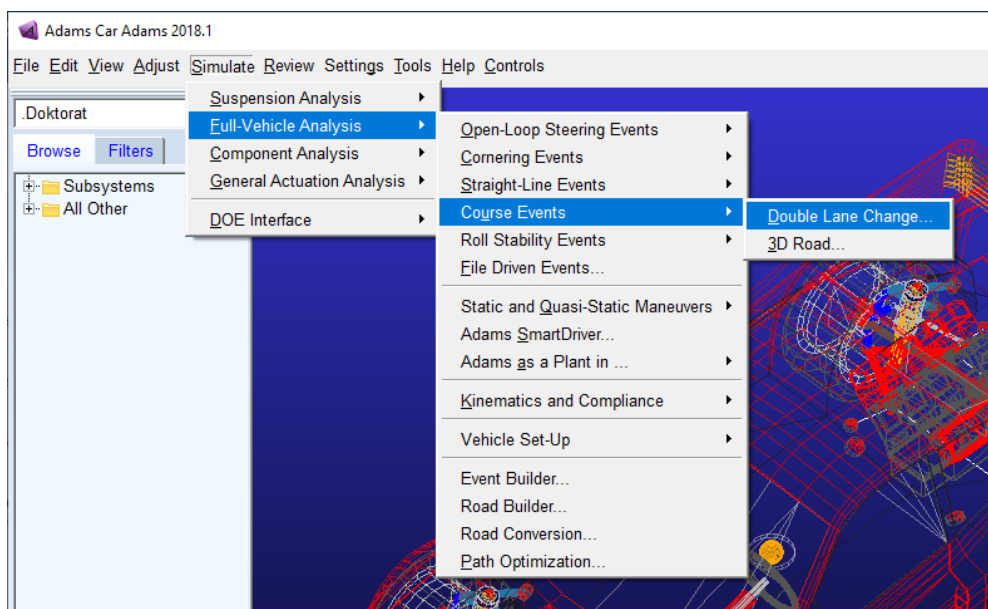
Десни клици у поље > Search



Овде приказана симулација ради са моделом **MDI\_Demo\_Vehicle.asy** који долази уз програм, док се не може извести са моделом **MDI\_Demo\_Vehicle\_1t.asy**.

## 5. Спровођење самосталне симулације у пакету *Adams Car*

Да би се омогућила косимулација, прво је потребно спровести самосталну симулацију у пакету *Adams Car* како би се извели потребни подаци. У овом случају је то симулација маневра двоструке промене саобраћајне траке (*Double Lane Change*).



**Output Prefix** – први део назива излазних датотека (за дати маневар се аутоматски додаје наставак `_dlc`)

**Output Step Size** – према неким изворима [200] треба да се поклапа са вредношћу променљиве `Communication interval` (подразумевано 0,005 s) у ADAMS Plant блоку у програму *Simulink* (касније ће бити приказано); симулације спроведене за потребе ове

дисертације су функционисале и са подразумеваном вредношћу 0,1; свакако мора бити производ целог броја и временског корака коришћеног за симулацију *Simulink* модела (подразумевано 0,005 s)

**Simulation Mode:** *files\_only* – да би излаз из симулације биле датотеке потребне за подешавање косимулације

**Vehicle Velocity** – (почетна) брзина извођења маневра

**Turn Direction** – смер промене траке

**Gear Position** – (почетни) степен преноса мењачког преносника

**Quasi-Static Straight-Line Setup** – иако се програмски додаток *Adams Controls* може користити само за динамичке догађаје [200], а не за квазистатичке, овде је у питању само почетно подешавање правца. Симулације спроведене за потребе ове дисертације су извођене са квазистатичком почетном поставком.

Спровођењем симулације у радној фасцикли се стварају следеће датотеке (под условом да се модел зове *Doktorat*):

```
Doktorat_dlc.acf
Doktorat_dlc.adm
Doktorat_dlc.dcd
Doktorat_dlc.inf
Doktorat_dlc.log
Doktorat_dlc.m
Doktorat_dlc.xml
Doktorat_dlc_controls.acf
```

Датотека са екстензијом *.xml* дефинише предметни маневар. Променом неких од параметара у њој се може утицати на сам маневар, на пример:

*initialSpeed*="10000" – почетна брзина при извођењу маневра [mm/s]

*abortTime*="10.8" – тренутак завршетка маневра [s]

## 6. Извоз улаза и излаза за косимулацију

*Adams Controls* и *Simulink* комуницирају користећи променљиве стања (*state variables*). Све улазне и излазне променљиве морају бити дефинисане као *Adams* променљиве стања. Уколико косимулација то захтева, потребно је направити нове променљиве стања, односно изменити постојеће. Ово је могуће само у режиму конструктора предложака (*Template Builder Mode*, у који се улази избором при покретању програма или притиском на тастер F9 у стандардном режиму) изменом предложака који се користе за дати модел.

Првобитно је потребно установити које предлошке користе подсистеми коришћеног модела. Ово се чини прегледом текстуалне датотеке са детаљима о жељеном подсистему:

Tools > Entity Info > избор подсистема

У доњој табели су дати предлошци које користи модел **MDI\_Demo\_Vehicle.asy**.

Подсистем	Предложак
TR_Front_Suspension.sub	_double_wishbone.tpl
TR_Rear_Suspension.sub	_double_wishbone.tpl
TR_Steering.sub	_rack_pinion_steering.tpl
TR_Front_Tires.sub	_handling_tire.tpl
TR_Rear_Tires.sub	_handling_tire.tpl
TR_Body.sub	_rigid_chassis.tpl
TR_Brake_System.sub	_brake_system_4wdisk.tpl
TR_Powertrain.sub	_powertrain.tpl

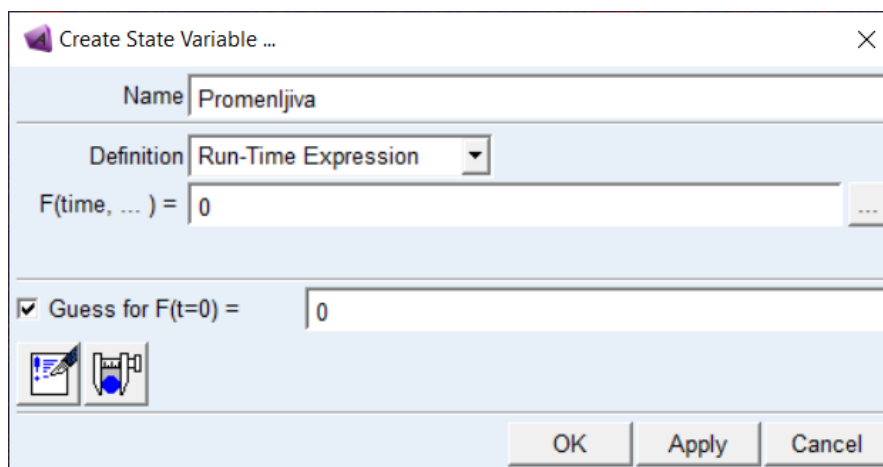
Након преласка у режим конструктора предложака потребно је изабрати предложак који је потребно изменити:

File > Open > Search > <acar\_shared>/templates.tbl > избор жељеног предлошка

Тада се може створити нова променљива:

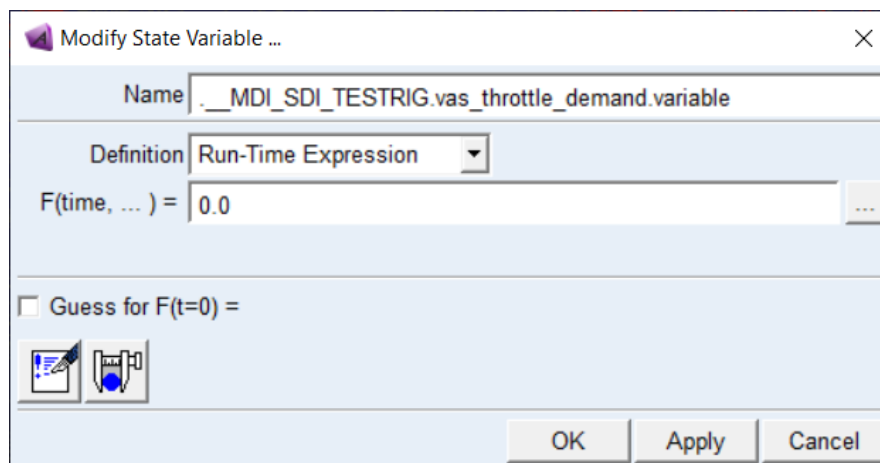
Build > System Element > State Variable > New

$F(\text{time}, \dots)$  – овде се уноси функција за израчунавање променљиве на основу других променљивих ако је у питању излазна променљива; ако је у питању променљива која треба да представља улаз у *Adams Car* модел, функцији се обавезно додељује вредност 0 (у сваком кораку косимулације променљива добија вредност нула пре него што јој се додели релевантна излазна вредност из *Simulink-a*)



Осим стварања нове променљиве, одговарајуће променљиве стања је могуће добити и изменом постојећих променљивих:

Build > System Element > State Variable > Modify



`.__MDI_SDI_TESTRIG` (*SDI – standard driver interface, MDI – machine driver interface*) је један од подсистема модела коришћеног за потребе ове дисертације и представља испитну инсталацију – роботизованог возача. За овај подсистем су везане следеће променљиве које су већ подешене тако да могу бити улази у *Adams Car* модел у косимулацији и које представљају довољан скуп управљачких сигнала:

```
testrig.vas_steering_demand.variable
testrig.vas_throttle_demand.variable
testrig.vas_brake_demand.variable
testrig.vas_gear_demand.variable
testrig.vas_clutch_demand.variable
```

Уколико се стварају нове променљиве или модификују постојеће, потребно је верификовати променљиве које управљају *Adams Car* моделом, а које зависе од променљивих стања које представљају улазе у *Adams Car* модел.

Edit > Modify

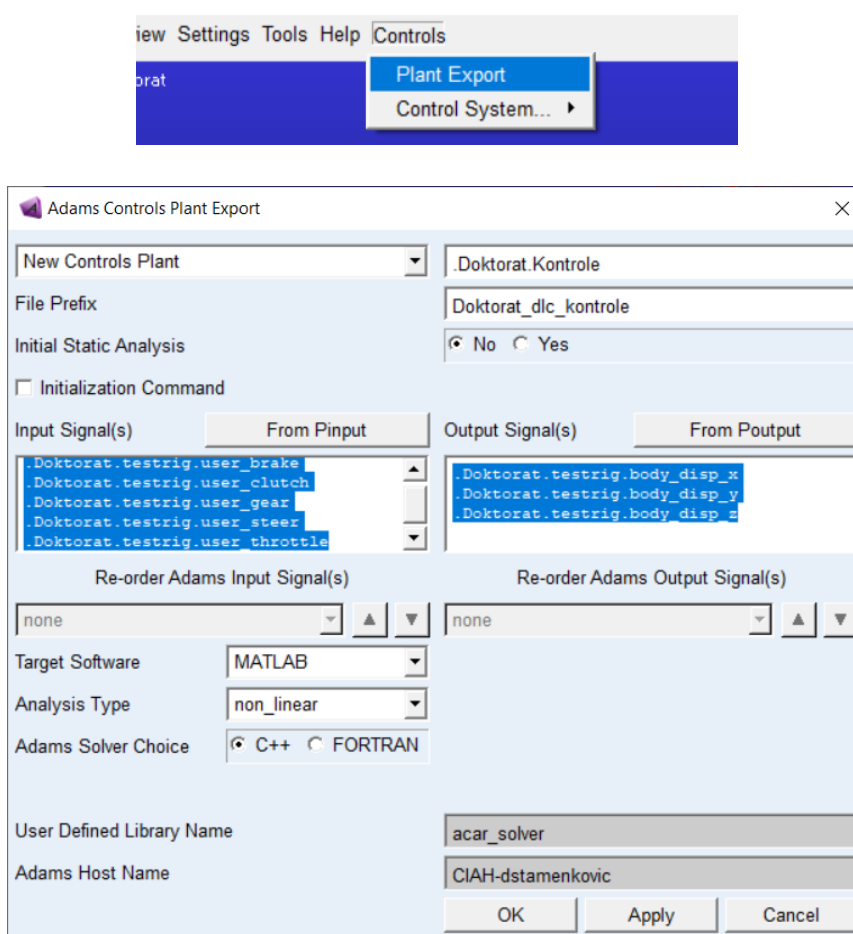
За овде приказани модел, променљива `.__MDI_SDI_TESTRIG.jfs_steering_wheel_torque.force` је дефинисана функцијом `VARVAL(.__MDI_SDI_TESTRIG.vas_steering_demand.variable)`, где је `VARVAL` функција која променљивој додељује вредност друге променљиве. Остале улазне променљиве у *Adams Car* модел се прослеђују одговарајућим подсистемима (за погон, пренос снаге и кочење), према доњој табели. Тако се, на пример, променљива `.mdi_demo_vehicle.tr_brake_system.left_front_brake_torque_var`, која одговара кочном моменту левог предњег точка, рачуна помоћу следеће функције:

```
2.0 *.MDI_Demo_Vehicle.TR_Brake_System.pvs_front_piston_area*
(.MDI_Demo_Vehicle.TR_Brake_System.pvs_front_brake_left_side_bias)
*.MDI_Demo_Vehicle.TR_Brake_System.pvs_front_brake_bias
*VARVAL(.MDI_Demo_Vehicle.TR_Brake_System.cis_brake_demand_adams_id)
*.MDI_Demo_Vehicle.TR_Brake_System.demand_to_authority_scale
*.MDI_Demo_Vehicle.TR_Brake_System.force_to_pressure_cnvt
*.MDI_Demo_Vehicle.TR_Brake_System.pvs_front_brake_mu
*.MDI_Demo_Vehicle.TR_Brake_System.pvs_front_effective_piston_radius
*STEP(VARVAL(.MDI_Demo_Vehicle.TR_Brake_System.left_front_wheel_omega),
-
.MDI_Demo_Vehicle.TR_Brake_System.velocity_step_threshold,1,.MDI_Demo_Vehicle.TR_Brake_System.velocity_step_threshold,-1)
```

где је `.MDI_Demo_Vehicle.TR_Brake_System.cis_brake_demand_adams_id` променљива која своју вредност добија од испитне инсталације (*cis* – *communicator input single*).

Изаз из испитне инсталације ( <i>cos</i> – <i>communicator output single</i> )	Улаз у подсистеме ( <i>vas</i> – <i>variable actuator single</i> )
<code>._MDI_SDI_TESTRIG.cos_throttle_demand</code>	<code>._MDI_SDI_TESTRIG.vas_throttle_demand.variable</code>
<code>._MDI_SDI_TESTRIG.cos_brake_demand</code>	<code>._MDI_SDI_TESTRIG.vas_brake_demand.variable</code>
<code>._MDI_SDI_TESTRIG.cos_clutch_demand</code>	<code>._MDI_SDI_TESTRIG.vas_clutch_demand.variable</code>
<code>._MDI_SDI_TESTRIG.cos_transmission_demand</code>	<code>._MDI_SDI_TESTRIG.vas_gear_demand.variable</code>

Када су дефинисане све потребне променљиве стања, могу се извести излази и улази у *Adams Car* модел. Да би се то спровело, потребно је вратити се у стандардни режим коришћења софтвера.



## Дефинисање улаза:

### 1. начин

Десни клик у поље Input Signal(s) > ADAMS\_variable > Browse > бирају се жељени улази

## 2. начин

У поље се копирају називи променљивих, уколико су унапред познати:

```
.Doktorat.testrig.vas_steering_demand.variable  
.Doktorat.testrig.vas_throttle_demand.variable  
.Doktorat.testrig.vas_brake_demand.variable  
.Doktorat.testrig.vas_gear_demand.variable  
.Doktorat.testrig.vas_clutch_demand.variable
```

.Doktorat. – Doktorat је назив коришћеног модела

или

```
testrig.vas_steering_demand.variable  
testrig.vas_throttle_demand.variable  
testrig.vas_brake_demand.variable  
testrig.vas_gear_demand.variable  
testrig.vas_clutch_demand.variable
```

## 3. начин

From Pinput (Plant input) > бирају се унапред спремни улази (уколико постоје) – ако поред имена стоји *OFF* то је знак да улази нису активни

### Дефинисање излаза:

#### 1. начин

Десни клик у поље Output Signal(s) > ADAMS\_variable > Guesses

#### 2. начин

У поље се копирају називи променљивих, уколико су унапред познати.

#### 3. начин

From Poutput > модел > testrig > plant\_output\_body\_info

**File Prefix** – назив излазне .m датотеке, а касније и подразумевани назив .adm датотеке (улаза у *Adams* блок у *Simulink*-у) и излазне датотеке из *Simulink* симулације – ако се као File Prefix стави исти назив као за Output Prefix код покретања *Adams Car* симулације, не постоји потреба да се касније ручно уноси веза ка .adm датотеци у блоку ADAMS Plant

**Target Software:** MATLAB

Ствара се датотека <File Prefix>.m (у датом примеру Doktorat\_dlc\_kontrola.m – овако ће се називати у даљем делу текста).



Неке од променљивих које се дефинишу у њој су:

`ADAMS_host = 'СИАН-dstamenkovic'` ; – назив рачунара на ком се покреће косимулација (уколико се врши на другом рачунару потребна је измена овог параметра)

`ADAMS_cwd = 'D:\Doktorat'` ; – радна фасцикла (уколико се промени локација датотека потребна је измена овог параметра)

`ADAMS_prefix = 'Doktorat_dlc_kontrola'` ; – узима вредност унету у поље File Prefix и користи се за позивање `.adm` датотеке из ADAMS Plant блока у *Simulink*-у

## 7. Креирање *Simulink* модела

Покреће се *MATLAB* и као активна фасцикла се поставља иста фасцикла која је коришћена као радна у *Adams Car* софтверу.

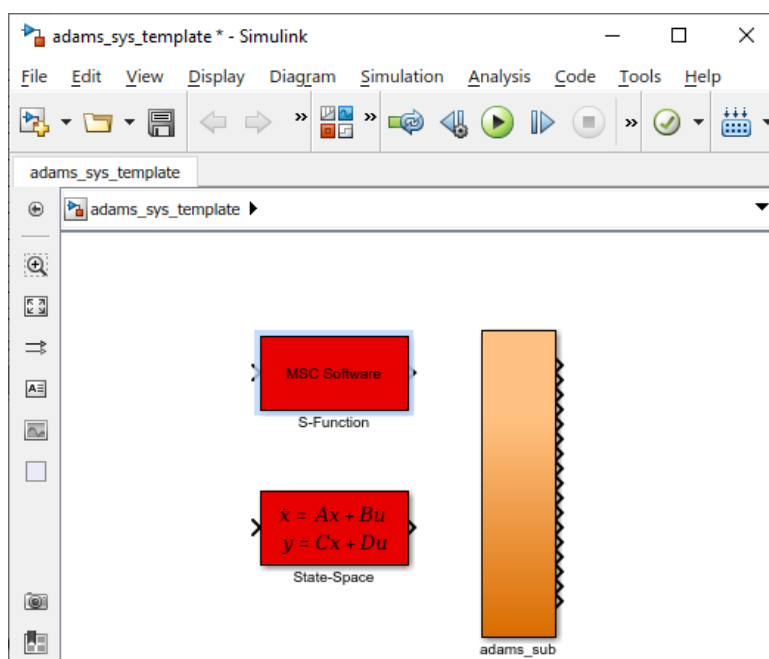
Командни прозор > `Doktorat_dlc_kontrola`

Ово покреће *MATLAB* програм генерисан приликом извоза контрола (`Doktorat_dlc_kontrola.m`), те потребне променљиве заузимају простор у радној меморији *MATLAB*-а (*workspace*). Може бити корисно да се у овај програм додају команде за читавање осталих променљивих које се користе приликом симулације.

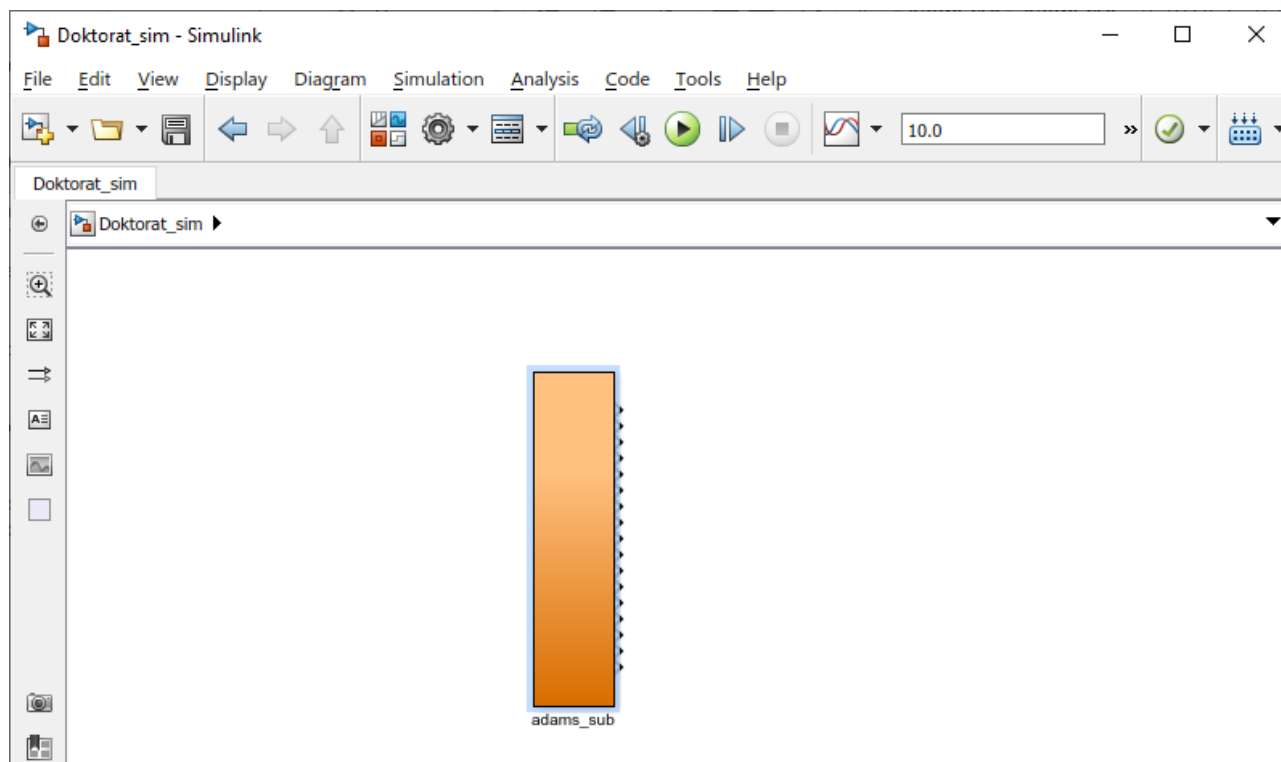
Командни прозор > `adams_sys`

Стварају се три блока у *Simulink* окружењу:

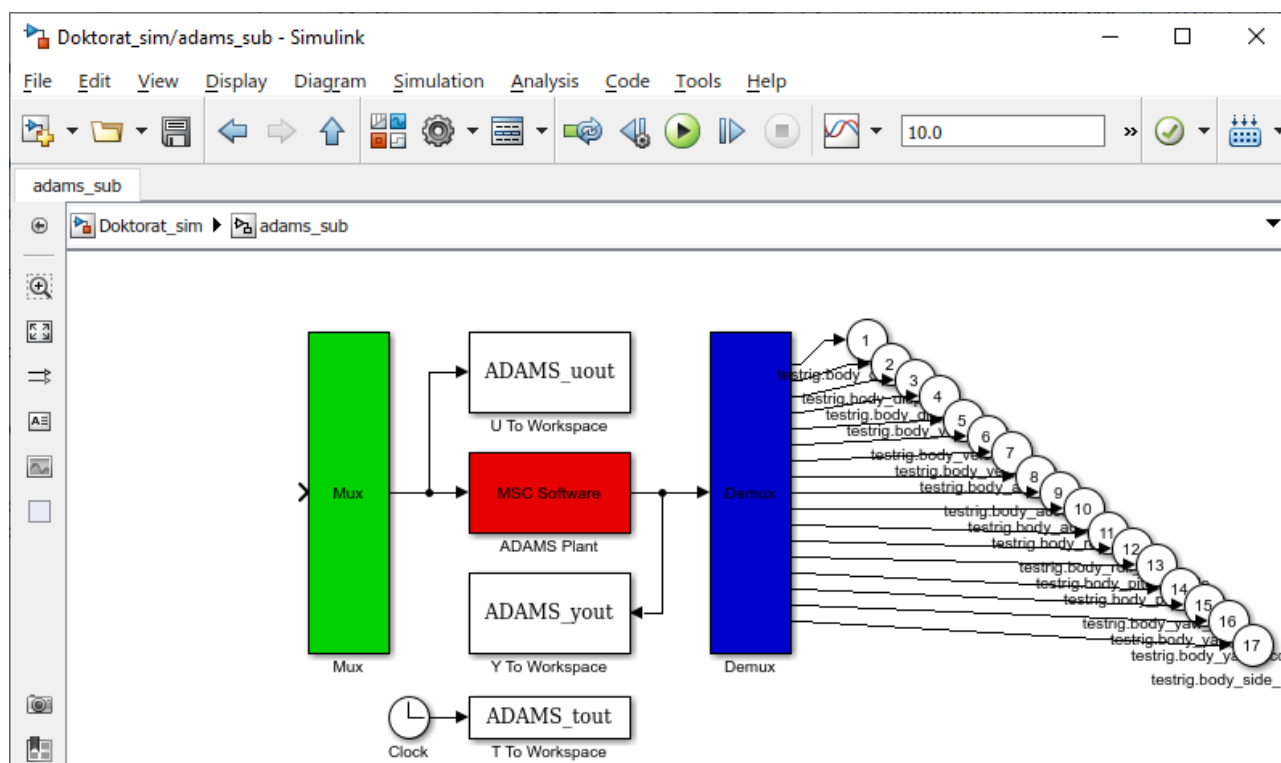
- S-Function – користи се за нелинеарну анализу
- State-Space – намењен за линеарну анализу
- `adams_sub` – обухвата блок S-Function и припадајуће излазе



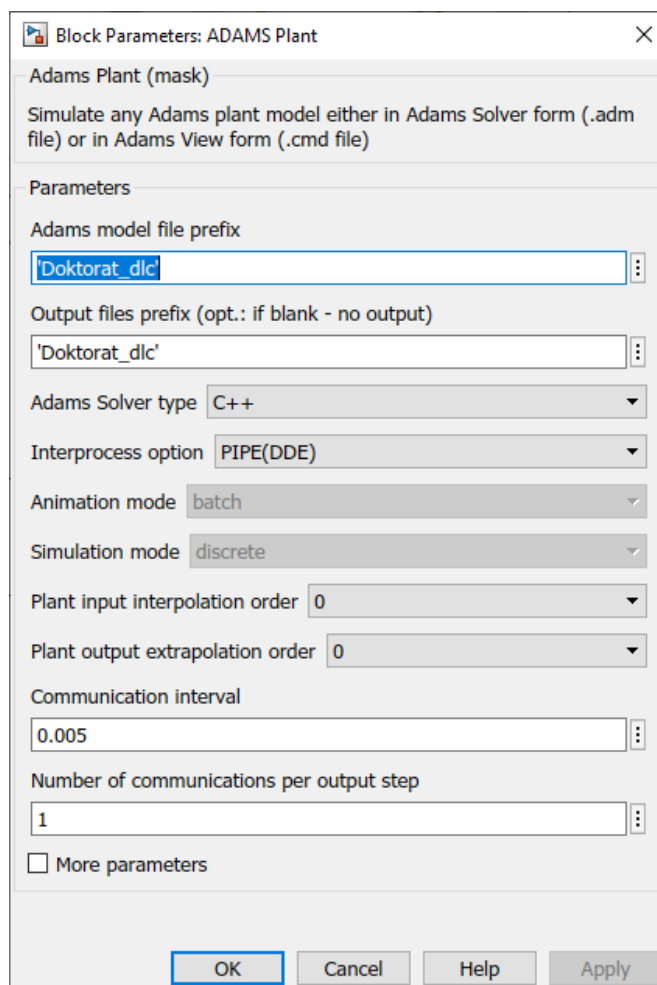
Блок `adams_sub` се копира у нови *Simulink* модел који се даље развија по потреби. Модел је потребно снимити под другим именом у односу на `.m` датотеке, на пример `Doktorat_sim.slx`.



Двокликом на блок `adams_sub` се улази дубље у структуру самог блока приказану на доњој слици (повратак на шему модела у целини је могућ коришћењем навигационог менија – на доњој слици `Doktorat_sim > adams_sub`).



Двоклик на MSC Software ADAMS Plant блок отвара прозор за подешавања самог блока.



**Adams model file prefix** – подразумевана вредност је ADAMS\_prefix; ова вредност се не мора променити под условом да су .adm и .m датотека генерисана приликом извоза контрола истог назива и да је поменута .m датотека пре почетка симулације у *Simulink*-у покренута у *MATLAB*-у (а то је свакако обавеза) како би се вредност променљиве ADAMS\_prefix учитала у радну меморију; уколико ово није случај овој променљивој је потребно доделити вредност која одговара имену .adm датотеке (на пример 'Doktorat\_dlc' – са једноструким знацима навода)

**Output files prefix** – подразумевана вредност је ADAMS\_prefix; представља назив излазних датотека из симулације

**Communication interval** – раније поменути временски интервал комуникације *Simulink*-а са *Adams Car* софтвером

Редослед улаза и излаза у adams\_sub блок мора одговарати претходно дефинисаном редоследу (приликом извоза контрола), у овом примеру:

1. управљање
2. „гас”
3. кочење

4. степен преноса
5. главна спојница

Улазна величина (testrig.vas_???)		Јед.	Опсег	Напомена
Точак управљача	steering_demand.variable	-	-12 ÷ 12	Одговара опсегу -720÷720 (математички смер – видети следећу слику)
				Равнотежна вредност: -0.01069
				Преносни однос система за управљање (угао закретања волана / тачкова): 24
„Гас”	throttle_demand.variable	%	0 ÷ 100	
Кочница	brake_demand.variable	%	0 ÷ 100	
Степен преноса	gear_demand.variable	-	1, 2, 3, 4, 5, 6	1 – први с.п. ... 6 – шести с.п.
Главна спојница	clutch_demand.variable	-	0 ÷ 1	0 – укључена 1 – искључена



Изразна величина		Јед.
testrig.body_disp_x	Померај	подужни
testrig.body_disp_y		попречни
testrig.body_disp_z		вертикални
testrig.body_velocity_x	Брзина	подужна
testrig.body_velocity_y		попречна
testrig.body_velocity_z		вертикална
testrig.body_acce_x	Убрзање	подужно
testrig.body_acce_y		попречно
testrig.body_acce_z		вертикално
testrig.body_roll_angle	Угао	нагињања
testrig.body_pitch_angle		галопирања
testrig.body_yaw_angle		вијугања
testrig.body_roll_rate	Угаона брзина	нагињања
testrig.body_pitch_rate		галопирања
testrig.body_yaw_rate		вијугања
testrig.body_yaw_acce	Угаоно убрзање вијугања	rad/s <sup>2</sup>
testrig.body_side_slip_angle	Угао бочног клизања возила (у сл. 4.23, β сл. 8.3)	rad

Назив улазног блока у *adams\_sub* је небитан – ако је дефинисано да је први улаз *testrig.vas\_steering\_demand.variable*, блок се може звати рецимо и *Braking*, али ће и даље одговарати управљању.

У горњим табелама су прецизније дефинисане улазне и излазне величине у *Adams Car* модел.

**НАПОМЕНЕ:**

- Ако се *Simulink* модел покреће накнадно, претходно се у *MATLAB*-у мора покренути иста *.m* датотека која је покренута и приликом стварања *adams\_sub* блока
- *Adams Car* не мора бити покренут да би косимулација функционисала

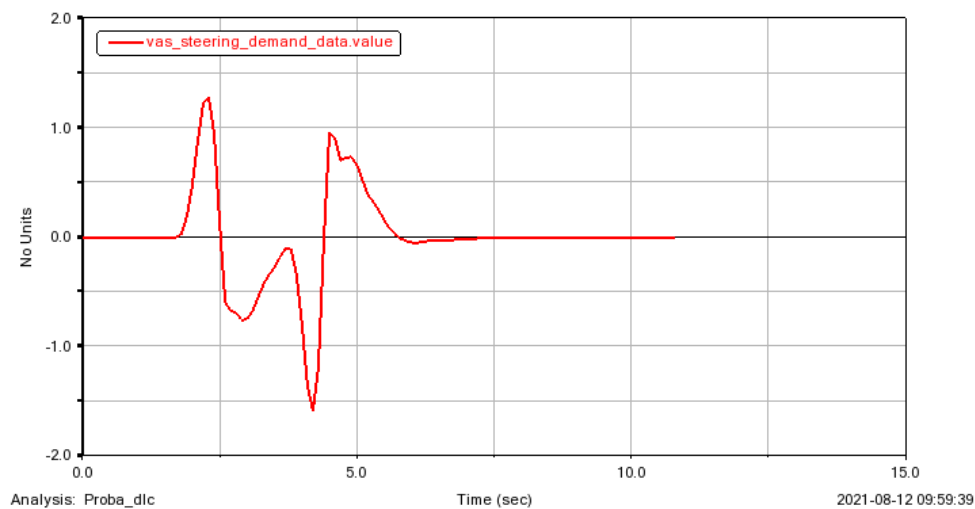
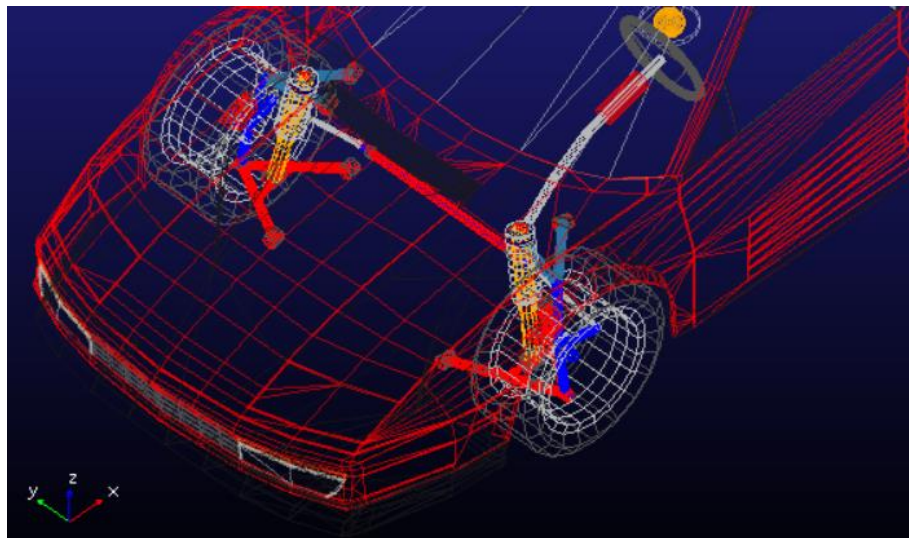
**ДОДАТНА ЛИТЕРАТУРА:**

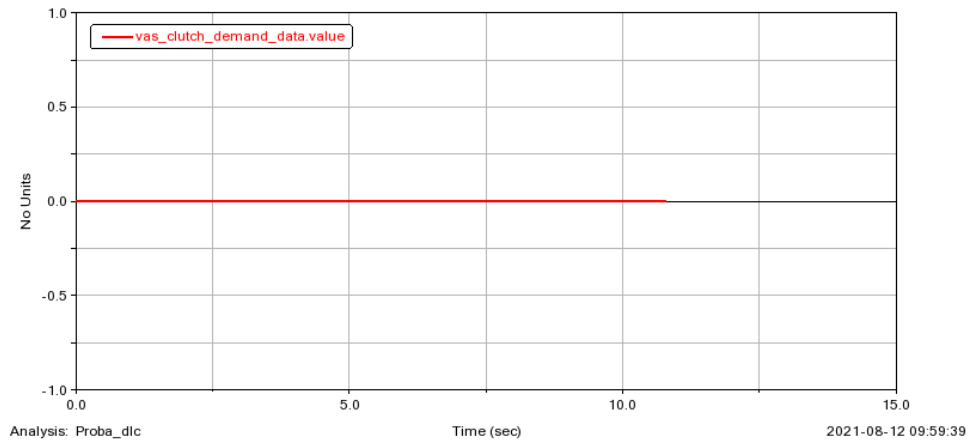
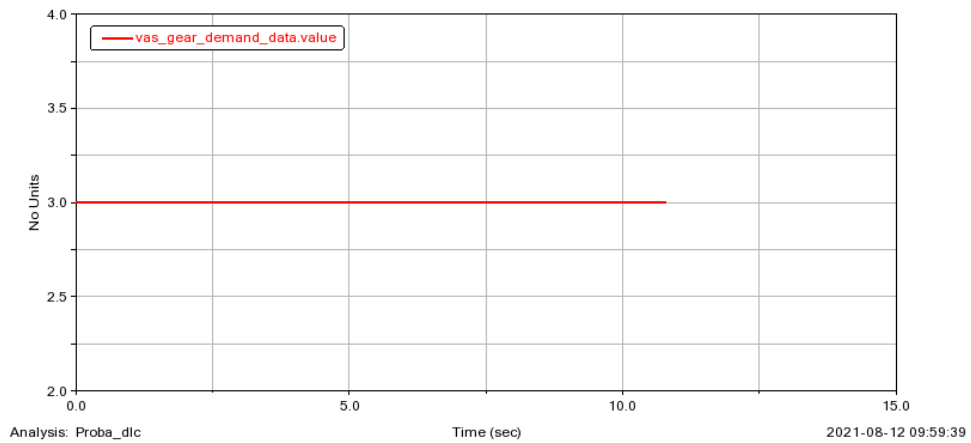
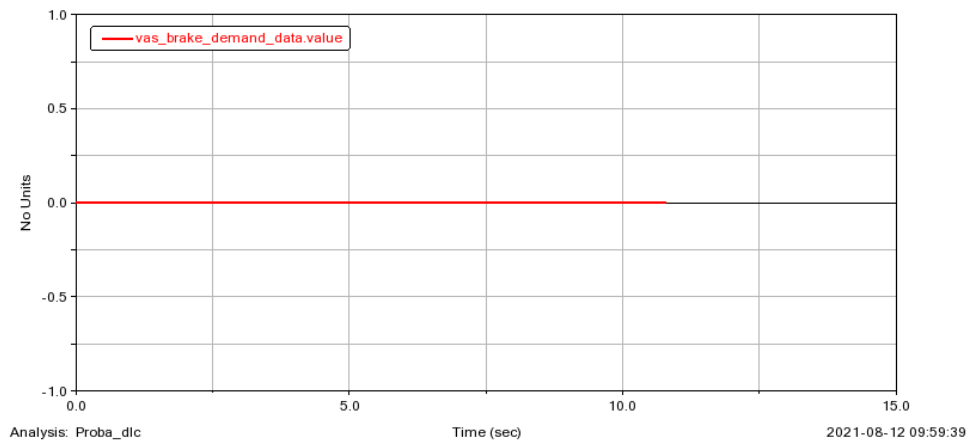
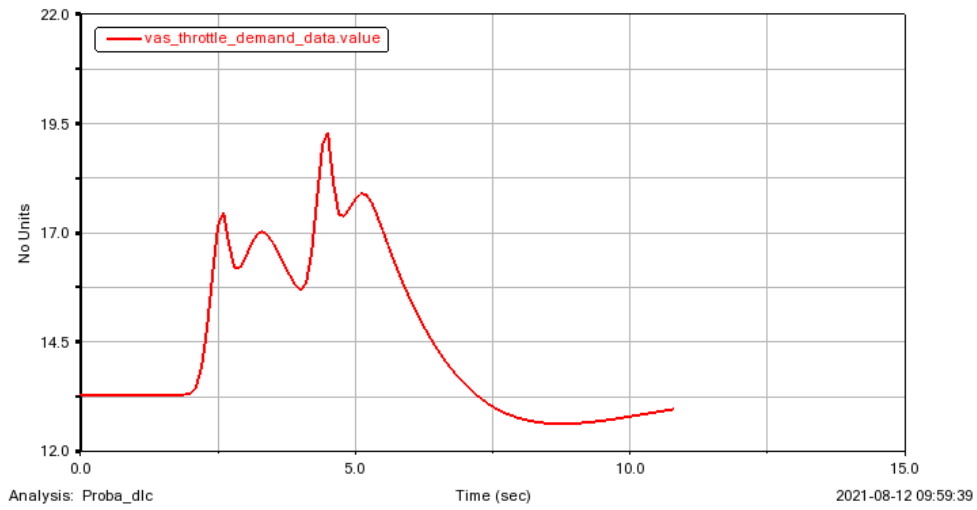
[201-206]

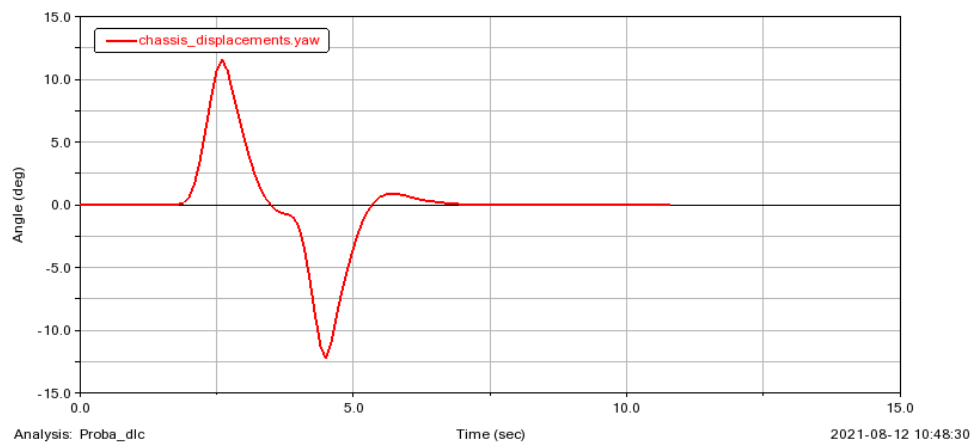
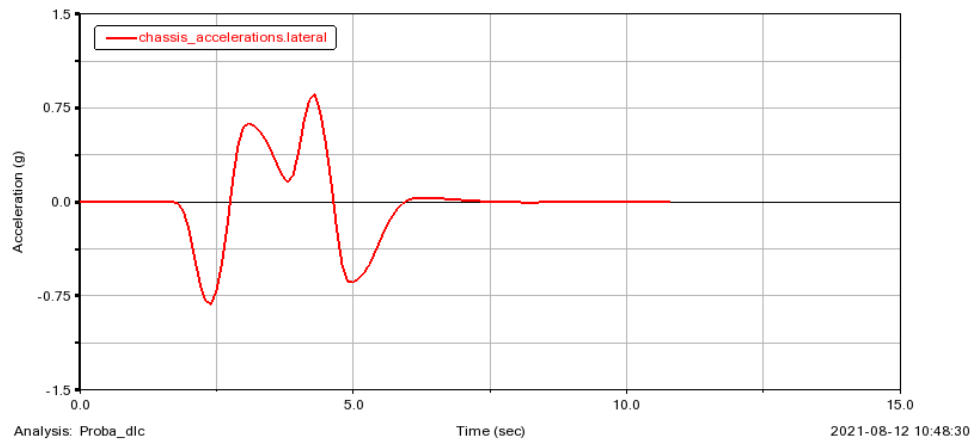
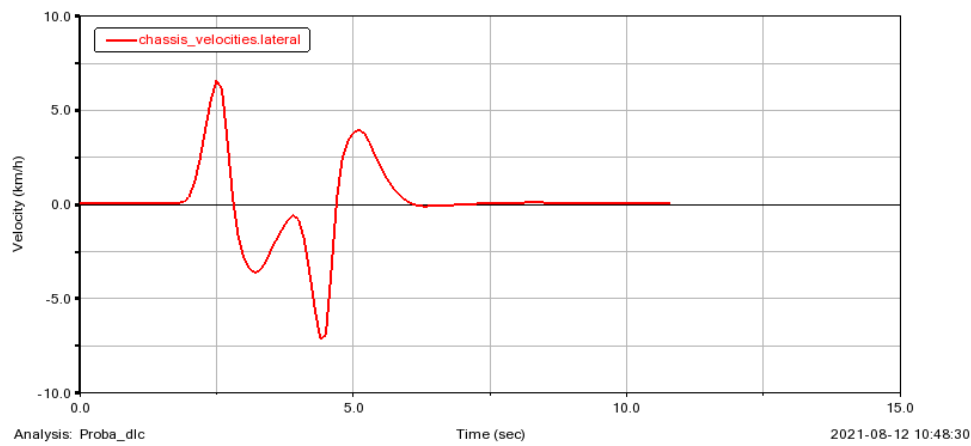
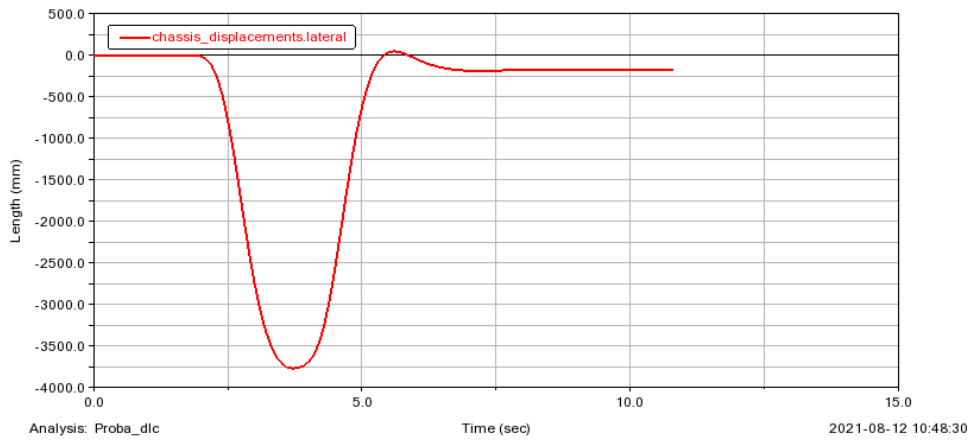
## ПРИЛОГ 4

УЛАЗНЕ И ИЗЛАЗНЕ ВЕЛИЧИНЕ ПРИЛИКОМ ИЗВОЂЕЊА САМОСТАЛНЕ *Adams Car* СИМУЛАЦИЈЕ

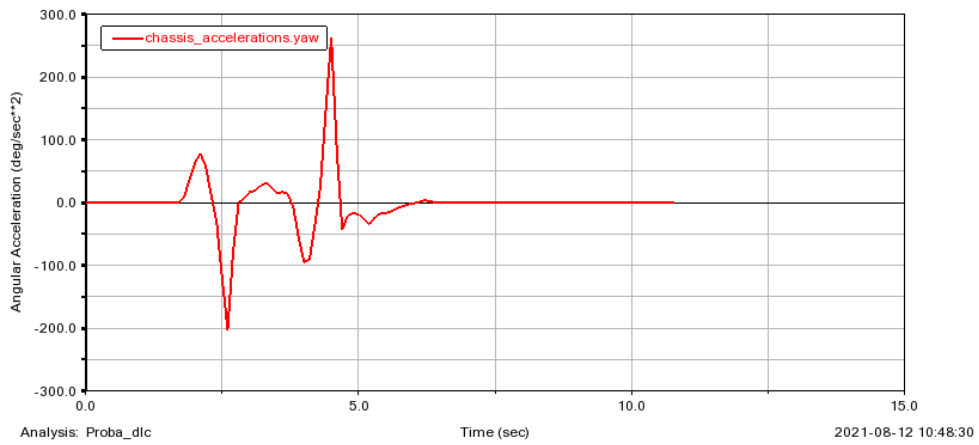
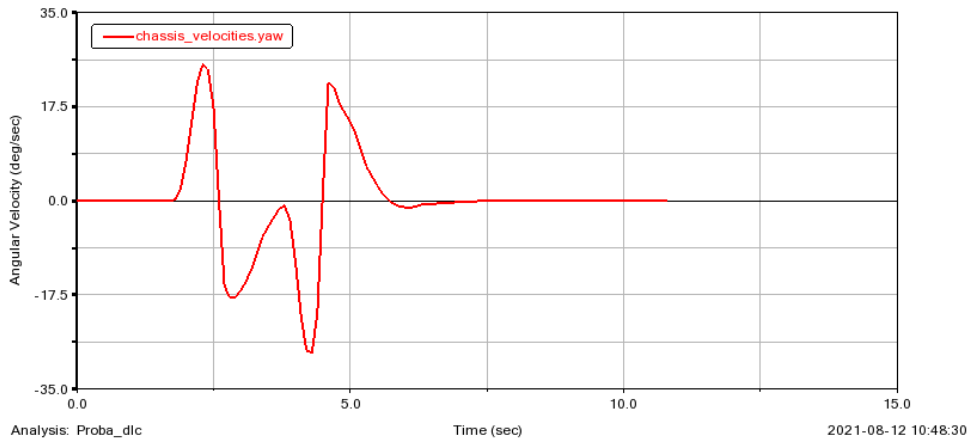
Овде ће се као пример дати зависности од времена вредности свих управљачких и одабраних излазних величина из *Adams Car* модела приликом извођења самосталне *Adams Car* симулације двоструке промене саобраћајне траке при брзини од 100 km/h у трећем степену преноса. Дата је и слика која показује оријентацију координатног система у *Adams Car* окружењу.









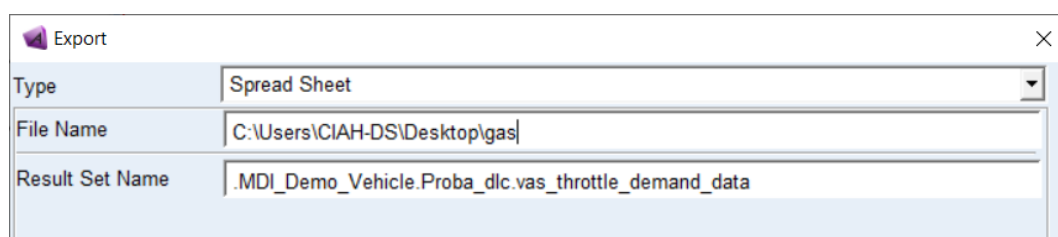


## ПРИЛОГ 5

ВАЛИДАЦИЈА КОСИМУЛАЦИЈЕ (ПОРЕЂЕЊЕ СА САМОСТАЛНОМ *Adams Car* СИМУЛАЦИЈОМ)

Ради провере усаглашености *Adams Car – Simulink* косимулације са самосталном *Adams Car* симулацијом, потребно је након спроведене симулације у пакету *Adams Car* извести временске зависности једина два (у овом случају) променљива улаза (управљања и „гаса”) у две одвојене текстуалне .tab датотеке.

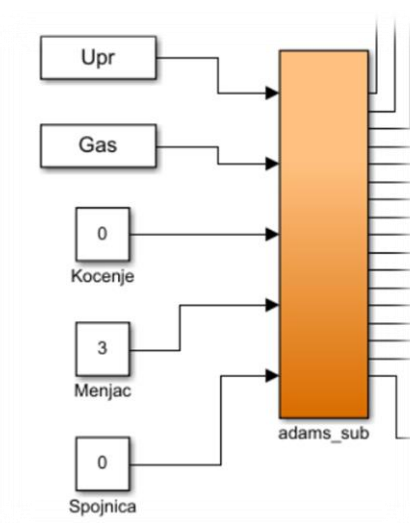
Review > Postprocessing Window > File > Export > Spreadsheet



Тако створене датотеке је потребно ручно „дотерати” у текстуалном едитору брисањем редова који претходе подацима, али и брисањем вишка редова који одговарају истом тренутку времена (почетном) и празних редова на крају документа.

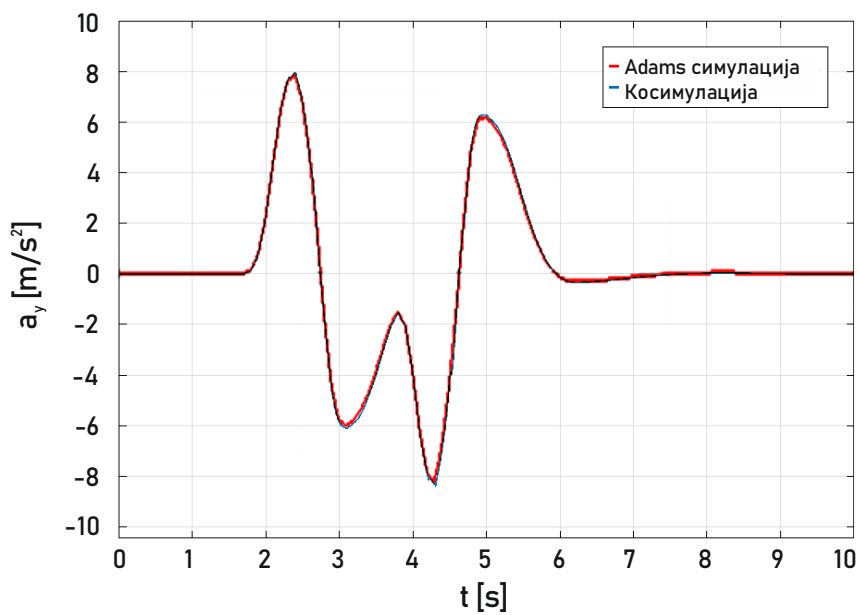
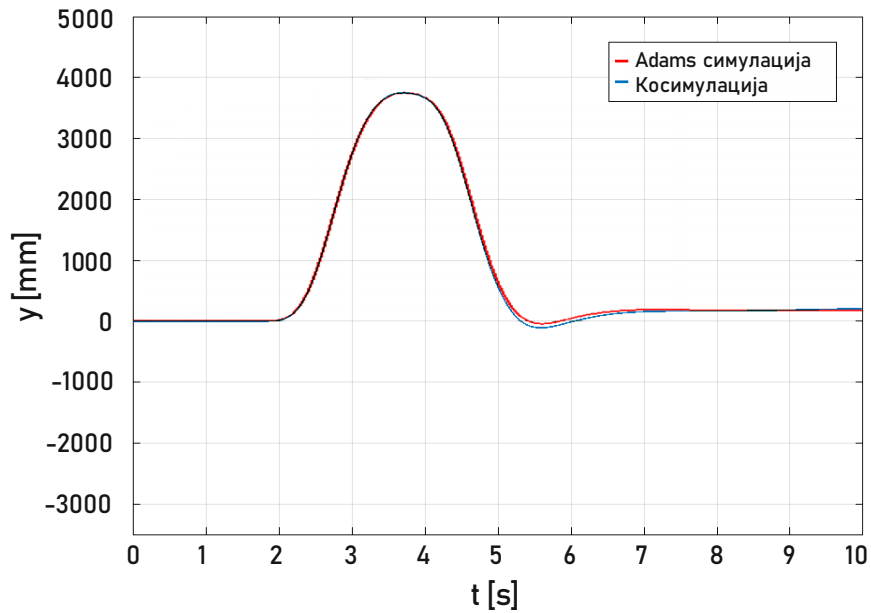
MATLAB > Import Data > Output Type: Numeric Matrix > Import Selection

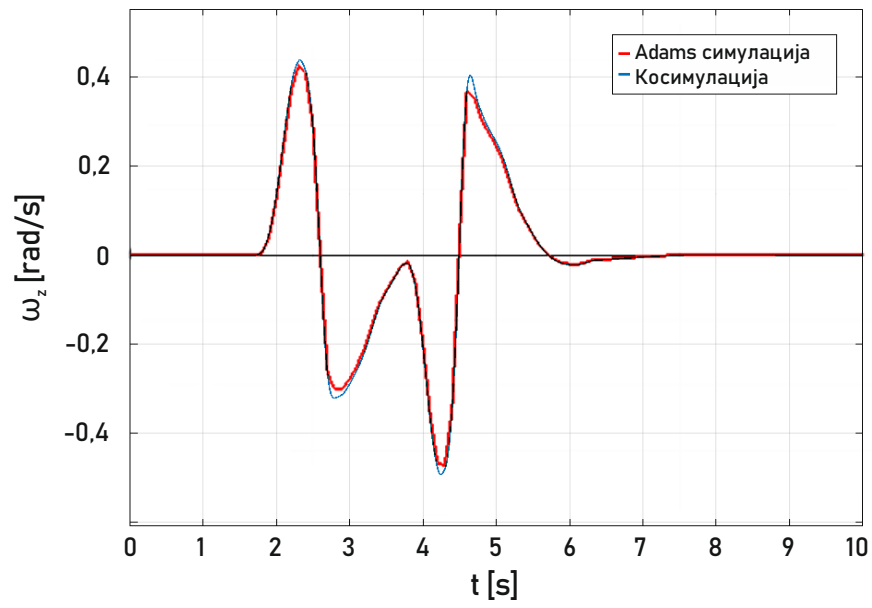
Тада се у радној меморији *MATLAB*-а стварају матрице са именима две текстуалне датотеке. Ове матрице се могу користити као улази у *Simulink* модел употребом блока From Workspace (подаци се могу увести и директно из датотека употребом блока From File), при чему се блокови морају назвати именима матрица.



На горњој слици дат је приказ улаза у *Adams Car* модел, док су испод дати прикази временских зависности изабраних излазних величина (бочног померања, бочног убрзања

и угаоне брзине вијугања) из косимулације двоструке промене саобраћајне траке брзином од 100 km/h у трећем степену преноса, а за улазе у *Adams Car* модел који одговарају управљачким сигнаlima какви се шаљу у оквиру самосталне *Adams Car* симулације при истој брзини и у истом степену преноса и који су приказани раније.





Може се видети да се резултати косимулације поклапају у великој мери са самосталном симулацијом у програму *Adams Car*.

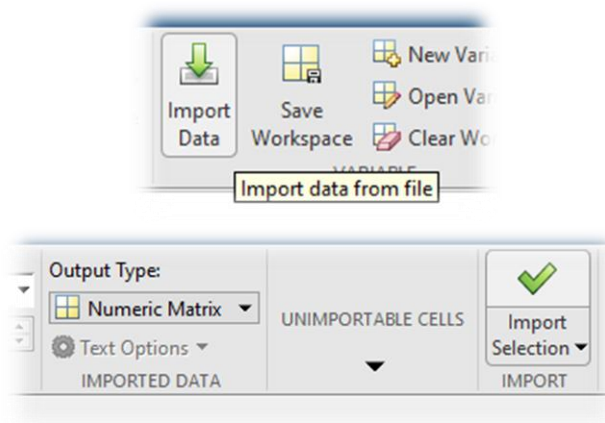
## ПРИЛОГ 6

## УВОЗ СИГНАЛА ИЗ ТЕКСТУАЛНИХ ДАТОТЕКА

Приликом спровођења косимулације, може се јавити потреба да се сигнал (на пример управљачки) увезе из текстуалне датотеке. Тада је потребно спремити текстуалну датотеку у којој су подаци о времену и одговарајућим вредностима променљиве дати по колонама, на пример:

```
0.0    -0.46
0.1     2.96
0.2    11.17
0.3    23.63
0.4    39.92
...
```

У оквиру *MATLAB* програмског окружења потребно је изабрати опцију Import Data, одабрати жељену текстуалну датотеку и увести је као бројну матрицу (Numeric Matrix), не као табелу. Тада се у радну меморију смешта матрица која име преузима од текстуалне датотеке (а које се накнадно може променити).



Тако спреmlена матрица се може позвати у *Simulink* моделу коришћењем блока From Workspace.

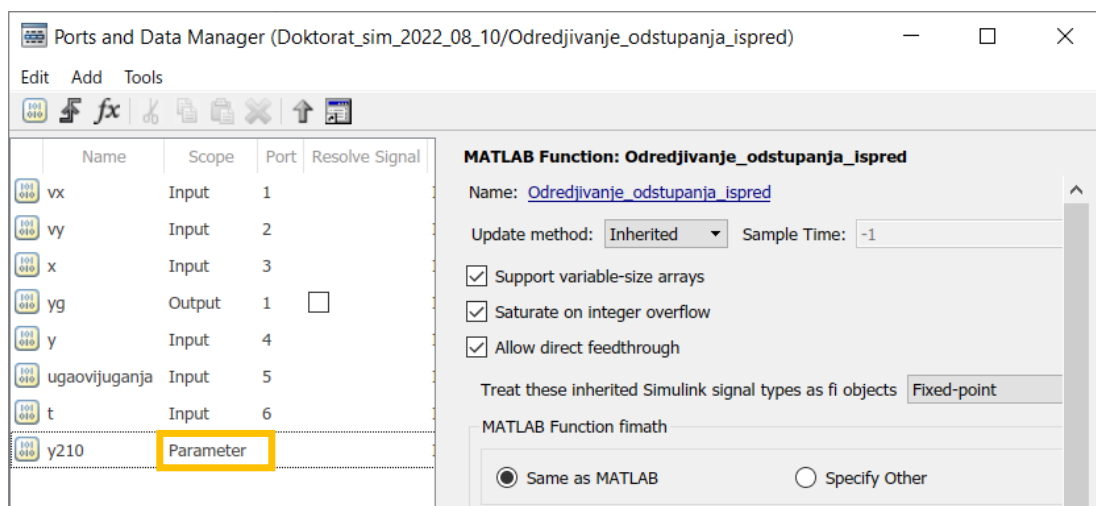
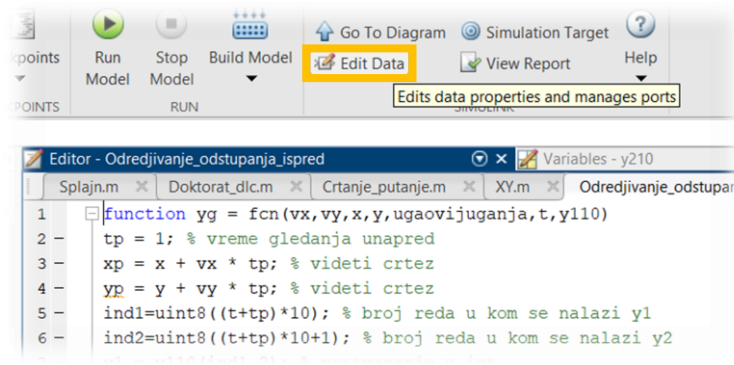


Подаци се могу позивати и директно из датотеке коришћењем блока From File. За потребе предметне дисертације, подаци су увезени у радну меморију, која је потом сачувана и учитавана пре покретања симулација (довољно је једно учитавање након покретања *MATLAB*-а).

## ПРИЛОГ 7

КОРИШЋЕЊЕ ПРОМЕНЉИВИХ ИЗ РАДНЕ МЕМОРИЈЕ У *MATLAB* БЛОКУ

Да би променљива из радне меморије могла да се користи у оквиру *MATLAB* блока, потребно је подесити да буде параметар, а не улаз (дат је пример за променљиву *y110*).



## ПРИЛОГ 8

### ПРЕПОРУКЕ ЗА УБРЗАЊЕ *MATLAB Simulink* СИМУЛАЦИЈЕ

Све симулације за потребе ове дисертације спроведене су на рачунару следећих спецификација:

- *Windows 10 x64*;
- *Intel Core i5-3350P 3.1 GHz* 4 језгра;
- *12 Gb RAM*.

Оријентације ради, за симулацију маневра који траје 15 s коришћењем коначне верзије модела потребно је око 2 минута. За једну од претходних верзија модела, која је очигледно била сувише компликована, за исти маневар је било потребно око 25 минута – коришћење рачунара бољих перформанси (*Intel Core i7-9850H 2.6 GHz* 6 језгара, *32 Gb RAM*) је ово време смањило на 14 минута, што и даље представља превелику разлику у односу на коначни модел. За убрзање симулације коришћењем *Simulink* модела могу се користити следеће препоруке [207]:

- Скратити време трајања симулације на најмању одговарајућу меру;
- Повећати временски корак вршења симулације (уколико то не утиче на тачност) – мора бити количник временског корака *Adams Car* модела (подразумевано 0,005 s) и целог броја;
- Смањити број алгебарских петљи (видети [208]);
- Када год је могуће, избегавати употребу *MATLAB* блокова и користити *Math Function* блокове;
- Када год је могуће, избегавати употребу блокова за позивање стања неког од сигнала уз претходног корака симулације (*Memory*);
- Опција *Fast Restart*, која се у неким случајевима користи за прескакање компајлирања након итеративних измена параметара модела, није могла бити коришћена за модел израђен за потребе ове дисертације.

## Литература

---

- [1] <http://www.computerhistory.org/atcm/where-to-a-history-of-autonomous-vehicles>, Weber M., Where to? A history of autonomous vehicles, приступано 1.12.2015.
- [2] Kotsanas K., Ancient Greek Technology – The Inventions of the Ancient Greeks – Research, Study and Construction, Athens: Kotsanas Museum, 2018.
- [3] Kröger F., *Das automatisierte Fahren im gesellschaftsgeschichtlichen und kulturwissenschaftlichen Kontext*, Autonomes Fahren (Maurer M., Gerdes J., Lenz B., Winner H., eds), Berlin: Springer-Verlag, 2015, 41-67
- [4] Geddes N., Magic Motorways, New York: Random House, 1940.
- [5] Schwarz C., Thomas G., Nelson K., McCrary M., Schlarman N., Powell M., Towards Autonomous Vehicles, Iowa City: The University of Iowa, 2013.
- [6] Stevens A., Connected and automated vehicles: Development in the UK, International Driverless Cars Conference, Adelaide, 2015.
- [7] Forrest A., Konca M., Autonomous Cars and Society, Worcester: Worcester Polytechnic Institute, 2007.
- [8] Cox I., Wilfong G. Autonomous Robot Vehicles, New York: Springer-Verlag, 1990.
- [9] <https://www.eurekanetwork.org/project/id/45>, Programme for a european traffic system with highest efficiency and unprecedented safety, приступано 11.5.2020.
- [10] Pomerleau D., ALVINN: An Autonomous Land Vehicle in a Neural Network - Technical Report ALP-77, Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1989.
- [11] Thorpe C., Hebert M.H., Kanade T., Shafer S.A. (1988) *Vision and navigation for the Carnegie-Mellon Navlab*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 10(3), 362-373
- [12] Bertozzi M. et al., The VisLab intercontinental autonomous challenge: 13,000 km, 3 months, no driver, 17<sup>th</sup> World Congress on ITS, Busan, 2010.
- [13] Thrun, S. (2010) *Toward robotic cars*, Communications of the ACM 53(4), 99-106
- [14] Bird D., Beal, C., Thomson A., Vinson C., New Technology & Innovation – Report 2 – Autonomous Mining Equipment, 2014.
- [15] Jootel P.S. et al., SAfe Road TRains for the Environment Final Report, 2012.
- [16] Blagojević I., Mitić S., Stamenković D., Popović V. (2019) *The future (and the present) of motor vehicle propulsion systems*, Thermal Science 23(Suppl. 5), S1727-S1743
- [17] Franke U., Bottiger F., Zomotor Z., Seeberger D., Truck platooning in mixed traffic, Intelligent Vehicles '95. Symposium, Detroit, 1995.
- [18] <https://www.nissanusa.com/experience-nissan/news-and-events/self-driving-autonomous-car.html>, Self driving autonomous car – Nissan USA, приступано 20.4.2020.
- [19] <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/A-pioneer-goes-into-retirement.xhtml?oid=13078961>, A pioneer goes into retirement, приступано 20.4.2020.



- [20] <https://www.nytimes.com/2015/03/20/business/elon-musk-says-self-driving-tesla-cars-will-be-in-the-us-by-summer.html>, Elon Musk says self-driving Tesla cars will be in the U.S. by summer, приступано 20.4.2020.
- [21] <https://group.volvocars.com/company/innovation/autonomous-drive>, Autonomous driving, приступано 20.4.2020.
- [22] <https://www.bbc.com/news/technology-20910769>, Toyota previews self-driving car, приступано 20.4.2020.
- [23] [http://www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/content/en/innovation/research\\_vehicles/automatic\\_gti.html](http://www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/content/en/innovation/research_vehicles/automatic_gti.html), Automatic GTI, приступано 20.4.2020.
- [24] <https://waymo.com>, Waymo, приступано 20.4.2020.
- [25] <http://www.digitaltrends.com/cars/australia-autonomous-cars-rules>, Aussies start discussing legal and insurance issues raised by autonomous cars, приступано 22.5.2016.
- [26] <https://www.nytimes.com/2015/11/14/business/google-driverless-car-is-stopped-by-california-police-for-going-too-slowly.html>, Google driverless car is stopped by California police for going too slowly, приступано 20.4.2020.
- [27] <https://www.cnet.com/news/dash-cam-showed-fatal-tesla-crash-in-china>, Dashcam shows fatal Tesla Model S crash in China, приступано 20.4.2020.
- [28] <https://www.nytimes.com/2018/03/19/technology/uber-driverless-fatality.html>, Self-driving Uber car kills pedestrian in Arizona, приступано 20.4.2020.
- [29] Convention on Road Traffic, Economic Commission for Europe, 1968.
- [30] Report of the sixty-eighth session of the Working Party on Road Traffic Safety, UNECE, 2014.
- [31] Connected Automated Driving Roadmap, ERTRAC, 2019.
- [32] <https://www.bbc.com/news/technology-23330681>, Driverless cars to be tested on UK roads by end of 2013, приступано 23.10.2015.
- [33] La Nouvelle France Industrielle, Gouvernement de la République française, 2014.
- [34] <http://www.swisscom.ch/en/about/medien/press-releases/2015/05/20150512-MM-selbstfahrendes-Auto.html>, Swisscom reveals the first driverless car, приступано 21.5.2016.
- [35] Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015.
- [36] УН правилник бр. 79 – Једнообразни технички услови за хомологацију возила у погледу система за управљање (Rev.4/Amend.6)
- [37] <http://sciencepolicy.duke.edu/node/3667>, Volvo Drive Me: An autonomous driving research project, приступано 18.2.2016.
- [38] Акциони план за спровођење стратегије одрживог урбаног развоја Републике Србије до 2030. године за период од 2021. до 2022. године, Влада Републике Србије, 2021.
- [39] <https://www.ghsa.org/state-laws/issues/autonomous%20vehicles>, State laws: Autonomous vehicles, приступано 12.6.2022.

- [40] Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicle, US National Highway Traffic Safety Administration, 2013.
- [41] SAE J3016 2018-06 – Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles
- [42] <http://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/self-driving/japans-plan-to-speed-selfdriving-cars>, Japan's plan to speed self-driving cars, приступано 15.5.2016.
- [43] Ueyama T., Society 5.0 – Where we come from, where go, STS Forum, Kyoto, 2017.
- [44] [http://www.koreatimes.co.kr/www/news/biz/2016/03/123\\_199840.html](http://www.koreatimes.co.kr/www/news/biz/2016/03/123_199840.html), Hyundai Motor to test self-driving car on local roads, приступано 20.4.2020.
- [45] [http://www.xinhuanet.com/english/2019-12/30/c\\_138667107\\_2.htm](http://www.xinhuanet.com/english/2019-12/30/c_138667107_2.htm), Beijing adds area for self-driving vehicle tests with passengers, приступано 20.4.2020.
- [46] Motor Vehicles (Trials of Automotive Technologies) Amendment Act 2016, Government of South Australia, 2016.
- [47] Јоцић Д., Идентификација и препознавање окружења возила помоћу вештачких неуронских мрежа, мастер рад, Универзитет у Београду, Машински факултет, 2017.
- [48] Ивковић Н., Развој програма за препознавање саобраћајних знакова за употребу у моторним возилима, мастер рад, Универзитет у Београду, Машински факултет, 2019.
- [49] <https://boschfuturemobility.com>, Bosch Future Mobility Challenge, приступано 23.3.2022.
- [50] Fazlollahtabar H., Saidi-Mehrabad M., Autonomous Guided Vehicles: Methods and Models for Optimal Path Planning, Cham: Springer, 2015.
- [51] Stamenković D., Popović V., Vorotović G. Brief history of autonomous vehicles (in Serbian), XI International Symposium on Research and Design in Commerce and Industry, Belgrade, 2015.
- [52] Stamenković D., Popović V., Blagojević I., A brief review of strategies used to control an autonomous vehicle, 2<sup>nd</sup> Maintenance Forum 2017, Bečići, 2017.
- [53] Chen J., Zhao P., Liang H., Mei T. (2014) *Motion planning for autonomous vehicle based on radial basis function neural network in unstructured environment*, Sensors 14(9), 17548-17566
- [54] Jochem T., Pomerleau D., Thorpe C., Vision-based neural network road and intersection detection and traversal, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 95, Pittsburgh, 1995.
- [55] Miljković Z., Vuković N., Mitić M., Babić B. (2013) *New hybrid vision-based control approach for automated guided vehicles*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 66(1), 231-249
- [56] Stamenković D., Popović V., Vorotović G., Lane detection algorithm using image processing for autonomous vehicle model, Euromaintenance 2016, Athens, 2016.

- [57] Stamenković D., Popović V. (2013) *Warranty optimisation based on the prediction of costs to the manufacturer using neural network model and Monte Carlo simulation*, International Journal of Systems Science 46(3), 535-545
- [58] Pomerleau D., *Neural network based autonomous navigation*, Vision and Navigation: The Carnegie Mellon Navlab (Thorpe C., ed), Boston: Kluwer Academic Publishers, 1990, 83-93
- [59] Levenberg K. (1944) *A method for the solution of certain non-linear problems in least squares*, Quarterly of Applied Mathematics 2(2), 164-168
- [60] Marquardt D. (1963) *An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters*, SIAM Journal on Applied Mathematics 11(2), 431-441
- [61] Popović V., Stamenković D., *System approach to vehicle suspension system control in CAE environment*, Handbook of Vehicle Suspension Control Systems (Liu H., Gao H., Li P., eds), Stevenage: The Institution of Engineering and Technology, 2013, 303-326
- [62] Alahi A., Bierlaire M., Vandergheynst P. (2014) *Robust real-time pedestrians detection in urban environments with low-resolution cameras*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies 39, 113-128
- [63] Jonsson M., Wiberg P.-A., Wickström N., Vision-based low-level navigation using a feed-forward neural network, International Workshop on Mechatronical Computer Systems for Perception and Action MCPA '97, Pisa, 1997.
- [64] Autonomous Driving – Moonshot Project with Quantum Leap from Hardware to Software & AI Focus, Deloitte, 2019.
- [65] Franck H., Franck D., Mathematical Methods for Accident Reconstruction – A Forensic Engineering Perspective, Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [66] <https://www.mathworks.com/products/automated-driving.html>, MATLAB Automated driving toolbox, приступано 15.12.2021.
- [67] Gibson J.J., Crooks L.E. (1938) *A theoretical field-analysis of automobile-driving*, The American Journal of Psychology 51(3), 453-471
- [68] <https://www.gidas.org>, Gidas in-depth accident study, приступано 28.4.2020.
- [69] Mordue G., Anders Y., Wu F. (2020) *The looming challenges of regulating high level autonomous vehicle*, Transportation Research Part A 132, 174-187
- [70] Foot P. (1967) *The problem of abortion and the doctrine of the double effect*, Oxford Review 5, 5-15
- [71] Pasanen E., Driving Speeds and Pedestrian Safety, Helsinki: Helsinki University, 1990.
- [72] Gold C., Beherrschbarkeit Hochautomatisierter Fahrzeugführung – Zwischen Übernahmezeit und Zeitbudget, 2. Expertendialog HDT, Essen, 2016.
- [73] [https://www.zf.com/products/en/cars/products\\_30987.html](https://www.zf.com/products/en/cars/products_30987.html), Emergency steering control, приступано 28.4.2020.
- [74] Zeeb K., Buchner A., Schrauf M. (2015) *What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving*, Accident Analysis & Prevention 78, 212-221

- [75] Gold C., Damböck D., Lorenz L., Bengler K. (2013) *Take over! How long does it take to get the driver back into the loop?*, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 57(1), 1938-1942
- [76] Hergeth S., Lorenz L., Vilimek R., Krems J.F. (2016) *Keep Your Scanners Peeled*, Human Factors 58(3), 509-519
- [77] Lorenz L., Kerschbaum P., Schumann J., Designing take over scenarios for automated driving, Human Factors and Ergonomics Society 58<sup>th</sup> Annual Meeting, Chicago, 2014.
- [78] Petermann-Stock I., Hackenberg L., Muhr T., Mergl C., *Wie lange braucht der Fahrer – eine Analyse zu Übernahmezeiten aus verschiedenen Nebentätigkeiten während einer hochautomatisierten Staufahrt*, 6. Tagung Fahrerassistenz – Der Weg zum automatischen Fahren, München, 2016.
- [79] Поповић В., Женева-Београд: Технички прописи у области хомологације возила, Београд: Универзитет у Београду, Машински факултет, 2015.
- [80] <https://www.unece.org>, Working party on automated/autonomous and connected vehicles – Introduction, приступано 6.5.2020.
- [81] УН правилник бр. 140 – Једнообразни технички услови за хомологацију путничких возила у погледу електронских система контроле стабилности (Rev.2/Add.139/Amend.3)
- [82] УН правилник бр. 152 – Једнообразни технички услови за хомологацију моторних возила у погледу напредног система за кочење у случају опасности за уградњу у возила врста М1 и N1 (Rev.1/Amend.3)
- [83] Закон о безбедности саобраћаја на путевима (Службени гласник Републике Србије 41/2009 ... 128/2020)
- [84] Milanés V. et al. (2012) *Intelligent automatic overtaking system using vision for vehicle detection*, Expert Systems with Applications 39(3), 3362-3373
- [85] Lee S.E., Olsen E.C.B., Wierwille W.W., *A Comprehensive Examination of Naturalistic Lane-Changes*, US National Highway Traffic Safety Administration, 2004.
- [86] Ammoun S., Nashashibi F., Laugeau C., *An analysis of the lane changing manoeuvre on roads: The contribution of inter-vehicle cooperation via communication*, 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, 2007.
- [87] *Compendium of Executive Summaries from the Maglev System Concept Definition Final Reports*, US Department of Transportation, 1993.
- [88] Ammoun S., Nashashibi F. (2010) *Design and efficiency measurement of cooperative driver assistance system based on wireless communication devices*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies 18(3), 408-428
- [89] ECE/TRANS/WP.29/GRVA/2019/26 – Proposal for amendments to the 03 series of amendments to UN Regulation No. 79 (steering equipment), Geneva: UNECE, 2019.
- [90] Informal document GRVA-05-59 – Proposal for amendments to GRVA-05-24, Geneva: UNECE, 2020.
- [91] Informal document GRVA-05-24-Rev.1 – Proposal for amendments to GRVA-05-24, Geneva: UNECE, 2020.

- [92] Sander U., Lubbe N., Prediction of accident evolution by diversification of influence factors in computer simulation - Opportunities for driver warnings in intersection accidents, Haus der Technik 2. Expertendialog: Methodenentwicklung für Aktive Sicherheit und Automatisiertes Fahren, Essen, 2016.
- [93] Informal document GRVA-05-36 – Motivation of cut-in Requirements - Additional explanation to paragraph 5.2.5.2., Geneve: UNECE, 2020.
- [94] Limpert R., Brake Design and Safety (3ed), Warrendale: SAE International, 2011.
- [95] Shiller, Z., Sundar S. (1998) *Emergency lane-change maneuvers of autonomous vehicles*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 120(1), 37-44
- [96] Horiuchi S., Okada K., Nohtomi S., Optimum steering and braking control strategies in obstacle avoiding maneuvers, 7<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC04, Arnhem, 2004.
- [97] Fujita Y., Aliuzawa K., Sato M., Radar Brake System, 1995 Annual Meeting of ITS America. Washington D.C., 1995.
- [98] Jurewicz C., Sobhani A., Woolley J., Dutschke J., Corben B. (2016) *Exploration of vehicle impact speed – injury severity relationships for application in safer road design*, Transportation Research Procedia 14, 4247-4256
- [99] Richards D.C., Relationship between Speed and Risk of Fatal Injury: Pedestrians and Car Occupants, Road Safety Web Publication No. 16, London: Department for Transport, 2010.
- [100] Tsoi A.H., Gabler H.C. (2015) *Evaluation of vehicle-based crash severity metrics*, Traffic Injury Prevention 16(S2), S132-S139
- [101] Digges K., Eigen A. (2006) *Classification of rollovers according to crash severity*, Annual Proceedings Association for the Advancement of Automotive Medicine 50, 141-153
- [102] Pintar F.A., Yoganandan N., Maiman D.J., Injury mechanisms and severity in narrow offset frontal impacts, 52<sup>nd</sup> AAAM Annual Conference Annals of Advances in Automotive Medicine, San Diego, 2008.
- [103] EURO NCAP Automated Driving Highway Assist Systems Test & Assessment Protocol, Version 1.0, 2020.
- [104] Gail J., Bartels O., Requirements for automatically commanded steering functions (ACSF), Haus der Technik 2. Expertendialog: Methodenentwicklung für Aktive Sicherheit und Automatisiertes Fahren, Essen, 2016.
- [105] Informal document ACSF-04-07 – Minimum risk manoeuvres (MRM), Geneve: UNECE, 2015.
- [106] Informal document ACSF-03-15 – Industry proposal about minimal risk manoeuvre, Geneve: UNECE, 2015.
- [107] Grover, C. Defining Safe Automated Driving – Insurer Requirements for Highway Automation, Thatcham: Thatcham Research, 2019.
- [108] ISO 3888-1:2018 – Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double lane-change

- [109] ISO 3888-2:2011 – Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2: Obstacle avoidance
- [110] Gordić M., Stamenković D., Popović V., Muždeka S., Mićović A. (2017) *Electric vehicle conversion: Optimisation of parameters in the design process*, Technical Gazette 24(4), 1213-1219
- [111] Wan T.R., Chen H., Earnshaw R.A., A motion constrained dynamic path planning algorithm for multi-agent simulations. WSCG'2005 Conference, Plzen, 2005.
- [112] Süli E., Mayers D.F., An Introduction to Numerical Analysis, Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [113] Elbanhawi M., Simić M., Jazar R.N. (2015) *Continuous path smoothing for car-like robots using B-spline curves*, Journal of Intelligent & Robotic Systems 80, 23-56
- [114] Maekawa T., Noda T., Tamura S., Ozaki T., Machida K.-I. (2010) *Curvature continuous path generation for autonomous vehicle using B-spline curves*, Computer-Aided Design 42(4), 350-359
- [115] Choi J.-W., Curry R., Elkaim G.H. (2010) *Continuous curvature path generation based on Bezier curves for autonomous vehicles*, IAENG International Journal of Applied Mathematics 40(2), 91-101
- [116] Kawabata K., Ma L., Xue J., Zhu C., Zheng N. (2015) *A path generation for automated vehicle based on Bezier curve and via-points*, Robotics and Autonomous Systems 74(A), 243-252
- [117] Miller I., Lupashin S., Zych N., Moran P., Schimpf B., Nathan A., Garcia E., *Cornell University's 2005 DARPA Grand Challenge Entry*, The 2005 DARPA Grand Challenge – The Great Robot Race (Buehler M., Iagnemma K., Singh S., eds), Heidelberg: Springer, 2007, 363-405
- [118] Hazewinkel, M. (ed), Encyclopaedia of Mathematics: Supplement 1, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [119] Aiya S. (2021), Bezier Curve Plotter, MATLAB Central File Exchange, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30759-bezier-curve-plotter>, приступано 4.9.2021.
- [120] Goodman A.W., Modern Calculus with Analytic Geometry, Volume I, New York: MacMillan, 1967.
- [121] Sledge Jr. N.H., Marshek K.M. (1997) *Comparison of ideal vehicle lane-change trajectories*, SAE Transactions 106(6), 2004-2027
- [122] Guo L., Ge P.-S., Yue M., Zhao Y.-B. (2014) *Lane changing trajectory planning and tracking controller design for intelligent vehicle running on curved road*, Mathematical Problems in Engineering, Article ID 478573
- [123] Sledge Jr. N.H., Marshek K.M., Development and validation of an optimized emergency lane-change trajectory, International Congress and Exposition, Detroit, 1998.
- [124] Müller G., Bräsemann C., Joao N., Sodoudi S., Müller S., Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen, Berlin: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., 2017.
- [125] Grip H.F., Imsland L., Johansen T.A., Kalkkuhl J.C., Suissa, A. (2009) *Vehicle sideslip estimation*, IEEE Control Systems Magazine 29(5), 36-52

- [126] Reif K. (ed), *Automotive Mechatronics, Automotive Networking, Driving Stability, Systems, Electronics*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [127] Corrsys-Datron profile (брошура)
- [128] Воротовић Г., *Методологија оптимизације управљивости и стабилности возила*, докторска дисертација, Универзитет у Београду, Машински факултет, 2011.
- [129] Vorotović G., Rakićević B., Mitić S., Stamenković D. (2013) *Determination of cornering stiffness through integration of a mathematical model and real vehicle exploitation parameters*, FME Transactions 41(1), 66-71
- [130] Bechtoff J. et al. (2016) *Cornering stiffness and sideslip angle estimation for integrated vehicle dynamics control*, IFAC-PapersOnLine 49(11), 297-304
- [131] You S.-H., Hahn J.O., Lee H. (2009) *New adaptive approaches to real-time estimation of vehicle sideslip angle*, Control Engineering Practice 17(12), 1367-1379
- [132] Selmanaj D., Corno M., Panzani G., Savaresi S.M. (2017) *Vehicle sideslip estimation: A kinematic based approach*, Control Engineering Practice 67, 1-12
- [133] Grip F.H., Imsland L., Johansen T.A., Fossen T.I., Kalkkuhl J.C., Suissa A. (2008), *Nonlinear vehicle side-slip estimation with friction adaptation*, Automatica 44(3), 611-622
- [134] Strano S., Terzo M. (2018) *Constrained nonlinear filter for vehicle sideslip angle estimation with no a priori knowledge of tyre characteristics*, Control Engineering Practice 71, 10-17
- [135] Kim D., Min K., Kim H., Huh K. (2020) *Vehicle sideslip angle estimation using deep ensemble-based adaptive Kalman filter*, Mechanical Systems and Signal Processing 144, 106862
- [136] Melzi S., Sabbioni E. (2011) *On the vehicle sideslip angle estimation through neural networks: Numerical and experimental results*, Mechanical Systems and Signal Processing 25(6), 2005-2019
- [137] Kiencke U., *Realtime estimation of adhesion characteristic between tyres and road*, IFAC 12<sup>th</sup> Triennial World Congress, Sydney, 1993.
- [138] Kiencke U., Nielsen L., *Automotive Control Systems: For Engine, Driveline, and Vehicle*, Berlin: Springer, 2005.
- [139] Pacejka H.B., *Tire and Vehicle Dynamics (2ed)*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.
- [140] Doumiati M., Victorino A.C., Charara A., Lechner D. (2011) *Onboard real-time estimation of vehicle lateral tire-road forces and sideslip angle*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 16(4), 601-614
- [141] Dugoff J., Fanches P., Segel L. (1970) *An analysis of tire properties and their influence on vehicle dynamic performance*, SAE Transactions 79(2), 1219-1243
- [142] de Wit C.C., Olsson H., Åström K.J., Lischinsky, P. (1995) *A new model for control of systems with friction*, IEEE Transactions on Automatic Control 40(3), 419-425
- [143] Јанковић Д., Тодоровић Ј., Ивановић Г., Ракићевић Б., *Теорија кретања моторних возила*, Београд: Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд, 2001.

- [144] Gao Y., Gray A., Tseng H.E., Borrelli F. (2014) *A tube-based robust nonlinear predictive control approach to semiautonomous ground vehicles*, Vehicle System Dynamics 52(6), 802-823
- [145] Jang B.-C., Choi G. (2007) *Co-simulation and simulation integration for a full vehicle dynamic system*, Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems 13(3), 237-250
- [146] Khadr A., Houidi A., Romdhane L., *Development of co-simulation environment with ADAMS/Simulink to study maneuvers of a scooter*, Design and Modeling of Mechanical Systems – Lecture Notes in Mechanical Engineering (Haddar M., Romdhane L., Louati J., Ben Amara A., eds) Heidelberg: Springer Berlin, 2013, 37-44
- [147] Kuwata Y., Teo J., Fiore G., Karaman S., Frazzoli E., How J.P. (2009) *Real-time motion planning with applications to autonomous urban driving*, IEEE Transactions on Control Systems Technology 17(5), 1105-1118
- [148] Ferguson D., Howard T., Likhachev M. (2008) *Motion planning in urban environments, Parts I & II*, Journal of Field Robotics 25(11-12), 939-960
- [149] Raza H., Ioannou P., *Vehicle following control design for automated highway systems*, Development and Experimental Evaluation of Autonomous Vehicles for Roadway/Vehicle Cooperative Driving (Ioannou P., ed), Berkeley: Institute of Transportation Studies, 1998.
- [150] Raza H., Xu Z., Ioannou P., *Experimental evaluation of cooperative driving system*, Development and Experimental Evaluation of Autonomous Vehicles for Roadway/Vehicle Cooperative Driving (Ioannou P., ed), Berkeley: Institute of Transportation Studies, 1998.
- [151] Jalali K., Lambert S., McPhee J., (2012) *Development of a path-following and a speed control driver model for an electric vehicle*, SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems 5(1), 100-113
- [152] Åström K.J., Control System Design - Lecture notes for ME 155A, Santa Barbara: University of California, 2002.
- [153] Ozguner U. et al., The OSU Demo '97 vehicle, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Boston, 1997.
- [154] Thrun S. et al. (2006) *Stanley: The robot that won the DARPA grand challenge: research articles*, Journal of Field Robotics 23(9), 661-692
- [155] Mashadi B., Mahmoudi-Kaleybar M., Ahmadizadeh P., Oveisi A. (2014) *A path-following driver/vehicle model with optimized lateral dynamic controller*, Latin American Journal of Solids and Structures 11(4), 613-630
- [156] Zhao P., Chen J., Song Y., Tao X., Xu T., Mei T. (2012) *Design of a control system for an autonomous vehicle based on adaptive-PID*, International Journal of Advanced Robotic Systems 9(2), 44:2012
- [157] Marino R., Scalzi S., Netto M. (2011) *Nested PID steering control for lane keeping in autonomous vehicles*, Control Engineering Practice 19(12), 1459-1467
- [158] Zainal Z., Rahiman W., Baharom M.N.R. (2017) *Yaw rate and sideslip control using PID controller for double lane changing*, Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering 9(3-7), 99-103



- [159] Falcone P., Tseng H.E., Borrelli F., Asgari J., Hrovat D. (2008) *MPC-based yaw and lateral stabilisation via active front steering and braking*, Vehicle System Dynamics 46(S1), 611-628
- [160] Falcone P., Borrelli F., Asgari J., Tseng H.E., Hrovat D. (2007) *Predictive active steering control for autonomous vehicle systems*, IEEE Transactions on Control Systems Technology 15(3), 566-580
- [161] MacAdam C.C., Johnson G.E. (1996) *Application of elementary neural networks and preview sensors for representing driver steering control behaviour*, Vehicle System Dynamics 25(1), 3-30
- [162] Tang J., Liu F., Zhang W., Ke R., Zou Y. (2018) *Lane-changes prediction based on adaptive fuzzy neural network*, Expert Systems with Applications 91, 452-463
- [163] Mouri H., Furusho H., Automatic path tracking using linear quadratic control theory, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Boston, 1997.
- [164] Martínez-Barberá H., Herrero-Pérez D. (2014) *Multilayer distributed intelligent control of an autonomous car*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies 39, 94-112
- [165] El Hajjaji A., Bentalba S. (2003) *Fuzzy path tracking control for automatic steering of vehicles*, Robotics and Autonomous Systems 43(4), 203-213
- [166] Rupp A., Stolz M., *Survey on control schemes for automated driving on highways*, Automated Driving (Watzenig D., Horn M., eds), Cham: Springer, 2017, 43-70
- [167] Aleksendrić D., Jakovljević Ž., Ćirović V. (2012) *Intelligent control of braking process*, Expert Systems with Applications 39(14), 11758-11765
- [168] Поповић В., Пројектовање и симулација система активног ослањања, магистарски рад, Универзитет у Београду, Машински факултет, 2001.
- [169] O'Dwyer A., Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules (2ed), London: Imperial College Press, 2006.
- [170] Topouris S., Stamenković D., Olphe-Galliard M., Popović V., Tirović M. (2020) *Heat dissipation from stationary passenger car brake discs*, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering 66(1), 15-28
- [171] Blagojević I., Vorotović G., Stamenković D., Petrović N., Rakićević B. (2017) *The effects of gear shift indicator usage on fuel efficiency of a motor vehicle*, Thermal Science 21(1B), 707-713
- [172] Миљковић З., Петровић М., Интелигентни технолошки системи, Београд: Универзитет у Београду, Машински факултет, 2021.
- [173] Митић М., Емпиријско управљање интелигентног мобилног робота базирано на машинском учењу, докторска дисертација, Универзитет у Београду, Машински факултет, 2014.
- [174] Peng T. et al. (2020) *A new safe lane-change trajectory model and collision avoidance control method for automatic driving vehicles*, Expert Systems with Applications 141, 112953

- [175] Sorniotti A., Barber P., De Pinto S., *Path tracking for automated driving: A tutorial on control system formulations and ongoing research*, Automated Driving (Watzenig D., Horn M., eds), Cham: Springer, 2017, 71-140
- [176] Moon C., Choi S.B. (2011) *A driver model for vehicle lateral dynamics*, International Journal of Vehicle Design 56(1-4), 49-80
- [177] Guo K., Guan H. (1993) *Modelling of driver/vehicle directional control system*, Vehicle System Dynamics 22(3-4), 141-184
- [178] Snider J.M., *Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking*, Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2009.
- [179] Markkula G., Benderius O., Wolff K., Wahde, M. (2012) *A review of near-collision driver behavior models*, Human Factors 54(6), 1117-1143
- [180] Guo K., Ding H., Zhang J., Lu J., Wang R. (2004) *Development of a longitudinal and lateral driver model for autonomous vehicle control*, International Journal of Vehicle Design 36(1), 50-65
- [181] MacAdam C. (1981) *Application of an optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 11(6), 393-399
- [182] Sharp R., Casanova D., Symonds P. (2000) *A mathematical model for driver steering control, with design, tuning and performance results*, Vehicle System Dynamics 33(5), 289-326
- [183] Chatzikomis C., Spentzas K. (2009) *A path-following driver model with longitudinal and lateral control of vehicle's motion*, Forschung im Ingenieurwesen 73(4), 257-266
- [184] Isermann R., Schorn M., Stählin U. (2008) *Anticollision system PRORETA with automatic braking and steering*, Vehicle System Dynamics 46(S1), 683-694
- [185] Tan H.-S., Bougler B., Zhang W.B. (2002) *Automatic steering based on roadway markers: From highway driving to precision docking*, Vehicle System Dynamics 37(5), 315-338
- [186] Hatipoglu C, Redmill K., Ozguner U., *Steering and lane change: A working system*, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Boston, 1997.
- [187] Kapania N.R., Gerdes J.C. (2015) *Design of a feedback-feedforward steering controller for accurate path tracking and stability at the limits of handling*, Vehicle System Dynamics (12), 1687-1704
- [188] Ziegler J. et al. (2014) *Making Bertha Drive - An autonomous journey on a historic route*, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine 6(2), 8-20
- [189] Alonso J., Milanés V., Pérez J., Onieva E., González C., de Pedro T. (2011) *Autonomous vehicle control systems for safe crossroads*, Transportation Research Part C 19(6), 1095-1110
- [190] Mu G., Xinyu Z., Deyi L., Tianlei Z., Lifeng A. (2015) *Traffic light detection and recognition for autonomous vehicles*, The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications 22(1), 50-56

- [191] Li B., Shao Z. (2015) *A unified motion planning method for parking an autonomous vehicle in the presence of irregularly placed obstacles*, Knowledge-Based Systems 86, 11-20
- [192] Fagnant D.J., Kockelman K. (2015) *Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations*, Transportation Research Part A 77, 167-181
- [193] Frlić Sekulić N., Blagojević I., Popović V., Stamenković D., Janković S. (2019) *Development of pedestrian alert system for use in electric vehicles*, Technical Gazette 26(6), 1614-1619
- [194] ISO/SAE 21434:2021 – Road vehicles – Cybersecurity engineering
- [195] Informal document GRVA-06-19 – Proposal for amendments to ECE/TRANS/WP.29/GRVA/2020/3, Geneva: UNECE, 2020.
- [196] Clark M.N., Salesky B., Urmson C., Measuring software complexity to target risky modules in autonomous vehicle systems. AUVSI: Unmanned Systems North America Conference, San Diego, 2008.
- [197] Janković S., Kleut D., Blagojević I., Stamenković D., Vorotović G. (2012) *Application of vehicle's CAN based network in transmission service load data acquisition*, Technical Gazette 19(2), 201-210
- [198] ISO 4130:1978 – Road vehicles – Three-dimensional reference system and fiducial marks – Definitions
- [199] ISO 8855:2011 – Road vehicles – Vehicle dynamics and road-holding ability – Vocabulary
- [200] Datar M., Negrut, D. (2007) Technical Report on Virtual Prototyping of Ground Vehicles, 2007.
- [201] Rao S.J., Vehicle Modeling And Adams-Simulink Co-Simulation with Integrated Continuously Controlled Electronic Suspension (CES) and Electronic Stability Control (ESC) Models, MSc thesis, Columbus: The Ohio State University, 2009.
- [202] MSC Software, Getting Started Using Adams/Controls, 2010.
- [203] <https://www.youtube.com/watch?v=2Miky0qNYGE>, Adams MATLAB Cosimulation for Vehicle ABS Systems, приступано 17.2.2020.
- [204] Mechanical Dynamics, Getting Started Using ADAMS/Car, 2002.
- [205] Mechanical Dynamics, Running Analyses in ADAMS/Car, 2000.
- [206] Mechanical Dynamics, ADAMS/Car Training Guide, 2001.
- [207] <https://uk.mathworks.com/help/simulink/ug/speed-up-simulation.html>, MathWorks Help Center – Speed Up Simulation, приступано 5.4.2021.
- [208] <https://uk.mathworks.com/help/simulink/ug/remove-algebraic-loops.html>, MathWorks Help Center – Remove Algebraic Loops, приступано 5.4.2021.

# Биографија аутора

Драган Д. Стаменковић рођен је 23. октобра 1984. године у Загребу. Основну школу „Јован Дучић” у Београду завршио је 1999. године. Средњу техничку школу у оквиру Политехничке академије завршио је 2003. године, стекавши звање техничара за роботiku и флексибилне производне системе. Машински факултет Универзитета у Београду уписао је 2003. године, где је 2009. године дипломирао на одсеку за моторна возила са просечном оценом 9,38, стекавши стручни назив дипломирани инжењер машинства. Године 2010. уписао је докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду, где је положио све испите предвиђене планом и програмом усавршавања са просечном оценом 10. Од 1. јула 2010. године запослен је на Машинском факултету Универзитета у Београду. У периоду од 11. јула 2013. године до 13. јула 2020. године кандидат је био асистент на Катедри за моторна возила на предметима Системи возила, Динамика возила и Перформансе возила на основним академским студијама и Ефективност система, Мехатроника на возилу и Испитивање возила на мастер академским студијама. Кандидат је од 2010. године ангажован на испитивању моторних и прикључних возила према домаћим и међународним прописима у оквиру Лабораторије ЦИАХ, акредитоване лабораторије Машинског факултета Универзитета у Београду. Био је учесник неколико пројеката, од којих се истичу пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије ТР35045 „Научно-технолошка подршка унапређењу безбедности специјалних друмских и шинских возила” (2010-2019.) и „Истраживање утицаја стила вожње на енергетску ефикасност код аутобуса на електрични погон” (2019-2020.). Коаутор је уџбеника за предмет Динамика возила „Вучно-динамички прорачун транспортних возила – Приручник”, који је 2022. године издао Машински факултет Универзитета у Београду. Члан је Националне асоцијације аутономних и електричних возила (НААЕВ). Као аутор и коаутор објавио је 60 научних радова, од којих 7 у часописима са *SCI* листе и 13 у зборницима радова са међународних конференција.

# Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Драган Д. Стаменковић  
Број индекса: Д59/10

## Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

### Модел управљања аутономним моторним возилом

- 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, 5. јула 2022.

---

# Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Драган Д. Стаменковић  
Број индекса: Д59/10  
Студијски програм: Докторске академске студије  
Наслов рада: Модел управљања аутономним моторним возилом  
Ментор: Проф. др Владимир Поповић

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, 5. јула 2022.

---

# Изјава о коришћењу

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

## Модел управљања аутономним моторним возилом

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)

Потпис аутора

У Београду, 5. јула 2022.

---