

Utjecaj parametara vozila na ponašanje vozila u ispitnim procedurama vezanim za stabilnost

Antolković, Vjeran

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:935481>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Vjeran Antolković

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Goran Šagi

Student:

Vjeran Antolković

Zagreb, 2017./2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojem mentoru, doc.dr.sc. Goranu Šagiju, na savjetima i vremenu koje je uvijek bio spreman nesebično odvojiti za pomoć.

Također se zahvaljujem svojim roditeljima, majci Renati i ocu Zdravku, sestri Jeleni te zaručnici Ani-Keli na nesebičnoj financijskoj i moralnoj potpori tijekom studiranja.

Vjeran Antolković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Vjeran Antolković**

Mat. br.: 0035188202

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Utjecaj parametara vozila na ponašanje vozila u ispitnim procedurama
vezanim za stabilnost**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**Influence of vehicle parameters on vehicle behaviour in stability test
procedures**

Opis zadatka:

Računalne simulacije danas su nezaobilazne u procesu razvoja vozila, njegovih podsustava i komponenata. Programski paketi za analizu dinamike vozila omogućuju simuliranje uvjeta stvarne vožnje i analizu ponašanja vozila u virtualnom okruženju te omogućuju mijenjanje parametara u cilju pronalaženja željenih performansi. Cilj ovog rada je razmotriti utjecaj osnovnih parametara vozila, parametara ovjesa te konfiguracije pogonskog i upravljačkog sustava na ponašanje vozila u ispitnim procedurama koje se odnose na analizu stabilnosti.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- Napraviti detaljni pregled standardnih ispitnih procedura koje se odnose na stabilnost vozila.
- Prikazati primjere (iz literature) simulacijskih modela za analizu dinamike u ispitnim procedurama vezanim za stabilnost vozila te navesti podatke o složenosti numeričkih modela, podatke o potrebnim parametrima za zadavanje modela i podatke o mogućnostima tih simulacijskih modela.
- Na osnovu dostupne literature odrediti koji su najznačajniji parametri koji utječu na stabilnost vozila, a čiji će se utjecaj na ponašanje vozila analizirati u simulacijama.
- Napraviti detaljni pregled dinamičkih karakteristika koje služe za ocjenu ponašanja vozila.
- Izraditi odgovarajuće modele vozila i ispitnih procedura u programskom paketu CarSim te simulirati nekoliko ispitnih procedura vezanih za analizu stabilnosti vozila.
- Prikazati rezultate simulacija, provesti detaljnu analizu rezultata i donijeti zaključke o utjecaju najznačajnijih parametara na stabilnost vozila.

Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu diplomskog rada. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. rujna 2017.

Datum predaje rada:

30. studenog 2017.

Predviđeni datum obrane:

6., 7. i 8. prosinca 2017.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Goran Šagi

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

Popis slika.....	VIII
Popis tablica.....	XII
POPIS OZNAKA	1
SAŽETAK.....	2
SUMMARY.....	3
1. Uvod	4
1.1. Poprečna stabilnost	5
1.1.1. Slučaj ravne podloge ($\beta = 0$).....	6
1.2. Stabilnost pri kočenju	7
1.2.1. Kočenje u zavoju	7
1.2.2. Blokiranje kotača prilikom kočenja.....	8
2. Ispitne procedure za određivanje stabilnosti vozila.....	10
2.1. Dvostruka izmjena pravca ISO 3888-2:2011.....	12
2.2. NCAP fishhook („riblja udica“) manevar.....	14
2.3. Kočenje u zavoju ISO 7975:2006 [4.]	16
2.3.1. Ocjenjivanje podataka i rezultati	17
3. Simulacijski modeli za analizu dinamike vozila	19
3.1. Modeli vozila	19
3.1.1. Dinamika sustava više tijela (<i>engl. MultiBody Systems</i>)	20
3.1.2. Metoda konačnih elemenata (<i>engl. Finite-Element-Method FEM</i>).....	21
3.1.3. Kontinuirani sustavi (<i>engl. Continuous Systems COS</i>)	21
3.2. Cjeloviti modeli vozila.....	21
3.3. Modeli vozila i područja primjene.....	22
3.4. Komercijalni sustavi za simulacije vozila.....	24
4. Utjecajni parametri na stabilnost vozila	25
4.1. Parametri geometrije ovjesa.....	25
4.1.1. Ovjes s krutim osovinama	25
4.1.2. Neovisan ovjes.....	26
4.1.3. Usmjerenost kotača.....	26
4.1.4. Bočni nagib kotača	27
4.1.5. Središte i os valjanja	28
4.2. Opružno-prigušne karakteristike vozila.....	29
4.3. Opterećenje vozila i raspodjela mase.....	30
4.3.1. Opterećenje vozila	30

4.3.2.	Položaj težišta	30
4.4.	Konfiguracija pogona.....	30
4.4.1.	Pogon na stražnje kotače	31
4.4.2.	Pogon na prednje kotače.....	31
4.4.3.	Pogon na sve kotače	31
4.5.	Upravljanje sa svim kotačima.....	32
4.5.1.	Skretanje prilikom malih brzina	32
4.5.2.	Skretanje prilikom većih brzina.....	33
4.6.	Kontakt između pneumatika i podloge	34
5.	Dinamika vozila prilikom skretanja	36
5.1.	Skretanje pri malim brzinama.....	36
5.2.	Skretanje pri velikim brzinama.....	37
5.3.	Preupravljivost i podupravljivost	40
6.	simulacijski model za analizu stabilnosti vozila.....	41
6.1.	Programski paket CarSim	41
6.2.	Simulacijski modeli	41
6.3.	Baza podataka	42
6.4.	Definiranje vozila.....	42
6.4.1.	Definiranje ovješene mase.....	43
6.4.2.	Definiranje ovjesa vozila	44
6.4.3.	Definiranje opružno prigušnih karakteristika	44
6.5.	Definiranje ispitne procedure.....	45
7.	Simulacija ispitnih procedura	47
7.1.	Vozilo korišteno u simulacijama.....	47
7.1.1.	Masa i dimenzije vozila	47
7.1.2.	Karakteristike ovjesa	48
7.1.3.	Karakteristike upravljačkog mehanizma	49
7.1.4.	Karakteristike pneumatika.....	50
7.1.5.	Pogonski sustav	51
7.2.	USPOREDBA SIMULIRANE PROCEDURE I TESTA U STVARNIM UVJETIMA	53
7.2.1.	Usporedba vozila iz izvještaja IKA-e s odabranim vozilom u ovom radu.....	53
7.2.2.	Rezultati izvještaja.....	54
7.3.	Parametri mijenjani tijekom simulacija	57
7.3.1.	Pomak težišta u horizontalnom i vertikalnom smjeru	57
7.3.2.	Promjena vrste pogona	58
7.3.3.	Promjena krutosti opruga.....	60
7.3.4.	Širina profila pneumatika	60
7.3.5.	Upravljanje i stražnjim kotačima.....	61
7.3.6.	Teret na krovu.....	62

7.3.7.	Teret u prtljažniku.....	63
7.4.	Način obrade podataka.....	64
7.4.1.	EDR pretvarač	64
7.4.2.	Microsoft Excel i korištenje VBA (<i>Visual Basic for Applications</i>)	65
8.	Analiza rezultata	66
8.1.	Dvostruka izmjena pravca (DLC)	66
8.1.1.	Promjena težišta u horizontalnom smjeru.....	66
8.1.2.	Promjena težišta u vertikalnom smjeru.....	69
8.1.3.	Širina pneumatika	72
8.1.4.	Krutost opruga	75
8.1.5.	Teret na krovu.....	77
8.1.6.	Teret u prtljažniku.....	81
8.1.7.	Upravljanje svim kotačima (4WS)	84
8.1.8.	Vrsta pogona.....	88
8.1.9.	Zaključak, DLC	89
8.2.	Fishhook.....	90
8.2.1.	Promjena težišta u horizontalnom smjeru.....	90
8.2.2.	Pomak težišta u vertikalnom smjeru.....	92
8.2.3.	Širina pneumatika	94
8.2.4.	Krutost opruga	95
8.2.5.	Teret na krovu.....	96
8.2.6.	Teret u prtljažniku.....	98
8.2.7.	Upravljanje svim kotačima (4WS)	100
8.2.8.	Vrsta pogona.....	101
8.2.9.	Zaključak, Fishhook	101
8.3.	Kočenje u zavoju (BiT).....	102
8.3.1.	Promjena težišta u horizontalnom smjeru.....	102
8.3.2.	Promjena težišta u vertikalnom smjeru.....	104
8.3.3.	Širina pneumatika	106
8.3.4.	Krutost opruga	107
8.3.5.	Teret na krovu.....	109
8.3.6.	Teret u prtljažniku.....	110
8.3.7.	Upravljanje svim kotačima	112
8.3.8.	Zaključak, BiT	112
	Budući da kočenje, u ovom razmatranju, najviše ovisi o masi vozila teretu najveće razlike u usporeju javljaju se kod vozila s dodatnim teretom. Također kod vozila sa širim pneumaticima došlo je do prosječno boljeg usporenja što je i očekivano budući da je tada moguće ostvariti veću longitudinalnu silu na pneumatiku.	112
9.	Simulacija vožnje trkaćom stazom s odabranim vozilima	113
10.	Zaključak	116

POPIS SLIKA

Slika 1. Prevrtnanje vozila oko uzdužne osi [1.]	4
Slika 2. Poprečna stabilnost kod bočnog nagiba terena [1.]	5
Slika 3. Opterećenja kod prolaska vozila zavojem s ravnom podlogom [1.]	7
Slika 4. Kočenje u zavoju	8
Slika 5. Blokiranje kotača prednje i stražnje osovine [1]	9
Slika 6. Dimenzije ispitne staze za dvostruku izmjenu pravca.....	13
Slika 7. Vozilo opremljeno sensorima i mjernim instrumentima za ispitnu proceduru dvostruke izmjene pravca.....	13
Slika 8. Simulacija dvostruke izmjene pravca u CarSim programskom paketu.....	14
Slika 9. Uređaj za robotizirano upravljanje upravljačem	15
Slika 10. Izvođenje <i>Fishhook</i> ispitne procedure na vozilu s značajnom opasnošću prema prevrtanju	16
Slika 11. Primjer dijagrama prikaza podataka za ispitnu proceduru kočenja u zavoju [4.]	18
Slika 12. Tipični primjeri elemenata sustava više tijela [4.].....	20
Slika 13. Višedijelni model vozila (MBS) [4.]	22
Slika 14. Ovjes s krutom osovinom [6.]	26
Slika 15. Usmjerenost kotača [6.].....	27
Slika 16. Bočni nagib kotača [6.].....	28
Slika 17. Središte valjanja [6.].....	28
Slika 18. Os valjanja [6.]	29
Slika 19. Vibracijski model vozila [4.].....	30
Slika 20. Usporedba raspodjele sila kod vozila s pogonom na sve kotače i s pogonom na dva kotača [1.].....	32
Slika 21. Kinematika vozila s upravljanjem na sve kotače [7.].....	33
Slika 22. Usporedba kuta zakreta vozila za različite načine skretanja [7.].....	34
Slika 23. Prikaz simulacijskog modela materijala pneumatika [8.].....	35
Slika 24. Dijagram ponašanje materijala pneumatika [8.].....	35
Slika 25. Geometrija vozila prilikom skretanja malom brzinom [7.]	36
Slika 26. Dijagram ovisnosti krutosti skretanja o tlaku u pneumaticima [7.]	38
Slika 27. Model bicikla za pojednostavljenje skretanja vozila pri velikoj brzini [7.]	39
Slika 28. Usporedba kuta bočnog klizanja kod velikih i malih brzina [7.]	39
Slika 29. Prikaz podupravljanja [1.]	40
Slika 30. Prikaz preupravljanja [1.]	40
Slika 31. Način rada programskog paketa CarSim [9.]	42
Slika 32. Prikaz skupa podataka vozila u CarSimu	43
Slika 33. Prikaz prozora za definiranje ovješene masa	43
Slika 34. Prikaza definiranja parametara ovjesa	44

Slika 35. Prikaz prigušne karakteristike amortizera	44
Slika 36. Prikaz definiranja ispitne procedure	45
Slika 37. Definiranje ispitne procedure „Fishhook“	46
Slika 38. Ford C-max i primjer M segmenta vozila iz programskog paketa CarSim.....	47
Slika 39. Osnovne dimenzije vozila u programskom paketu CarSim	48
Slika 40. Karakteristike prednjeg ovjesa vozila	48
Slika 41. Karakteristike stražnjeg ovjesa vozila	49
Slika 42. Karakteristike upravljačkog sustava.....	50
Slika 43. Glavni prozor modela vozila	50
Slika 44. Karakteristike pneumatika.....	51
Slika 45. Glavni prozor modela vozila	51
Slika 46. Karakteristika mjenjača	52
Slika 47. Momentna karakteristika motora.....	52
Slika 48. Brzina promjene kuta zakreta oko vertikalne osi; Crveno - rezultati IKA simulacije, Plavo - rezultati stvarnog ispitivanja	55
Slika 49. Bočno ubrzanje vozila; Crveno - rezultati IKA simulacije, Plavo - rezultati stvarnog ispitivanja.....	55
Slika 50. Kut zakreta upravljača; Crveno - rezultati IKA simulacije, Plavo - rezultati stvarnog ispitivanja.....	56
Slika 51. Kut zakreta vozila oko uzdužne osi; Crveno - rezultati IKA simulacije, Plavo - rezultati stvarnog ispitivanja.....	56
Slika 52. Prikaz prozora u kojem je mijenjan položaj težišta.....	58
Slika 53. Prozor u kojem se odabire pogonski sustav vozila.....	59
Slika 54. Prikaz toka snage za vozilo s pogonom na 4 kotača i s pogonom na prednje kotače ...	59
Slika 55. Prozor biblioteke vozila i mjesto gdje se odabire baza podataka za prednji i stražnji ovjes vozila	60
Slika 56. Iznos bočnih sila na pneumatik ovisno o bočnom kutu klizanja za različito vertikalno opterećenje.....	61
Slika 57. Definiranje upravljačkog sustava na stražnjoj osovini	61
Slika 58. Dijagram ovisnosti multiplikatora kuta zakreta stražnjih kotača u ovisnosti o brzini vozila	62
Slika 59. Postavljanje slučajeva opterećenja na vozilo	62
Slika 60. Definiranje dodatnog opterećenja na krovu	63
Slika 61. Definiranje dodatnog opterećenja u prtljažniku	63
Slika 62. Sučelje EDR pretvarača.....	64
Slika 63. Izgled prozora VBA-a s dijelom koda za automatsku izradu grafova.....	65
Slika 64. Dijagram brzine vožnje, DLC, promjena težišta u horizontalnom smjeru.....	67
Slika 65. Kut zakreta oko uzdužne osi, DLC, Promjena težišta u horizontalnom smjeru.....	67
Slika 66. Kut zakreta oko uzdužne osi, DLC, pomak težišta u vertikalnom smjeru	69
Slika 67. Kut bočnog klizanja vozila, DLC, pomak težišta u vertikalnom smjeru.....	70

Slika 68. Dijagram bočnog ubrzanja vozila, DLC, promjena težišta u vertikalnom smjeru	71
Slika 69. Tendencija porasta kuta zakreta vozila oko uzdužne osi ovisno o vertikalnom pomaku težišta	72
Slika 70. Kut zakreta upravljača, DLC, širina pneumatika	72
Slika 71. Kut zakreta oko uzdužne osi vozila, DLC, širina pneumatika	73
Slika 72. Kut bočnog klizanja vozila, DLC, širina pneumatika	74
Slika 73. Brzina vozila, DLC, širina pneumatika	75
Slika 74. Kut zakreta oko uzdužne osi vozila, DLC, krutost opruga.....	75
Slika 75. Bočno ubrzanje vozila, DLC, krutost opruga.....	76
Slika 76. Relativna udaljenost od zadane putanje, DLC, krutost opruga	76
Slika 77. Bočni kut klizanja vozila, DLC, teret na krovu	77
Slika 78. Relativna udaljenost od zadane putanje, DLC, teret na krovu	78
Slika 79. Kut zakreta oko uzdužne osi vozila, DLC, teret na krovu.....	79
Slika 80. Prikaz animacije vozila s 150 kg tereta na krovu	79
Slika 81. Prikaz animacije vozila s 75 kg tereta na krovu	80
Slika 82. Bočni kut klizanja vozila, DLC, teret u prtljažniku	81
Slika 83. Relativna udaljenost od zadane putanje, DLC, teret u prtljažniku	82
Slika 84. Kut zakreta oko uzdužne osi vozila, DLC, teret u prtljažniku	82
Slika 85. Prikaz animacije vozila s 200 kg tereta u prtljažniku.....	83
Slika 86. Prikaz animacije vozila s 75 kg tereta na krovu	83
Slika 87. Relativno odstupanje od zadane putanje, DLC, 4WS	84
Slika 88. Bočni kut klizanja vozila, DLC, 4WS	85
Slika 89. Kut zakreta upravljača, DLC, 4WS	85
Slika 90. Brzina vozila, DLC, 4WS.....	86
Slika 91. Kut zakreta pojedinog kotača kod vozila s upravljanjem na sve kotače, DLC, 4WS	86
Slika 92. Prikaz animacije vozila s upravljanjem na sve kotače (žuto-4WS, bijelo-standardno vozilo), DLC, 4WS	87
Slika 93. Bočni kut klizanja vozila, DLC, vrsta pogona	88
Slika 94. Kutna brzina zakreta vozila oko vertikalne osi, DLC, vrsta pogona.....	88
Slika 95. Pomak prednjeg lijevog kotača, u odnosu na podlogu, u vertikalnom smjeru, Fishhook, promjena težišta u horizontalnom smjeru.....	90
Slika 96. Vertikalna sila u stražnjem lijevom kotaču, Fishhook, promjena težišta u horizontalnom smjeru	91
Slika 97. Pomak prednjeg lijevog kotača u vertikalnom smjeru, Fishhook, pomak težišta u vertikalnom smjeru	92
Slika 98. Kut zakreta vozila oko uzdužne osi, Fishhook, pomak težišta u vertikalnom smjeru....	93
Slika 99. Prevrtnje vozila, Fishhook, pomak težišta u vertikalnom smjeru.....	94
Slika 100. Pomak prednjeg lijevog kotača u vertikalnom smjeru, Fishhook, širina pneumatika ..	94
Slika 101. Pomak kotača u vertikalnom smjeru, Fishhook, krutost opruga	95
Slika 102. Kut zakreta oko uzdužne osi vozila, Fishhook, krutost opruga.....	95

Slika 103. Pomak prednjeg lijevog kotača u vertikalnom smjeru, Fishhook, teret na krovu	96
Slika 104. Vertikalna sila na prednjem lijevom kotaču, Fishhook, teret na krovu.....	97
Slika 105. Animacija prevrtanja vozila, Fishhook, teret na krovu	98
Slika 106. Pomak prednjeg lijevog kotača, Fishhook, teret u prtljažniku	98
Slika 107. Kut zakreta vozila oko uzdužne osi, Fishhook, teret u prtljažniku	99
Slika 108. Bočno ubrzanje vozila, Fishhook, teret u prtljažniku.....	99
Slika 109. Bočno ubrzanje vozila, Fishhook, 4WS	100
Slika 110. Kut zakreta vozila oko uzdužne osi, Fishhook, vrsta pogona	101
Slika 111. Relativan iznos longitudinalne deceleracije, BiT, promjena težišta u horizontalnom smjeru	102
Slika 112. Bočni pomak vozila od zadane putanje, BiT, promjena težišta u horizontalnom smjeru	103
Slika 113. Relativan iznos longitudinalne deceleracije, BiT, promjena težišta u vertikalnom smjeru	104
Slika 114. Relativan iznos longitudinalne deceleracije (0 i 25 %), BiT, promjena težišta u vertikalnom smjeru	104
Slika 115. Bočni pomak vozila od zadane putanje, BiT, promjena težišta u vertikalnom smjeru	105
Slika 116. kut zakreta vozila oko poprečne osi, BiT, pomak težišta u vertikalnom smjeru.....	105
Slika 117. Longitudinalna brzina vozila, BiT, širina pneumatika	106
Slika 118. Bočni pomak vozila od zadane putanje, BiT, širina pneumatika	107
Slika 119. Kut zakreta vozila oko poprečne osi, BiT, krutost opruga	107
Slika 120. Relativan iznos longitudinalne deceleracije, BiT, krutost opruga.....	108
Slika 121. Relativna iznos longitudinalne deceleracije, BiT, teret na krovu.....	109
Slika 122. Bočni pomak vozila od zadane putanje, BiT, teret na krovu.....	109
Slika 123. Relativan iznos longitudinalne deceleracije, BiT, teret u prtljažniku	110
Slika 124. Relativan iznos kuta zakreta oko poprečne osi vozila, BiT, teret u prtljažniku	111
Slika 125. Kut zakreta oko poprečne osi, BiT, teret u prtljažniku.....	111
Slika 126. Moment na upravljaču, BiT, 4WS.....	112
Slika 127. Grafički prikaz trkaće staze na kojoj su ispitivana vozila	113
Slika 128. Vozila na cilju trkaće staze (crno- pneumatici 255/45 R18, sivo- pogon na sve kotače, plavo- opruge 50 %, ljubičasto- pogon na sve kotače, žuto- standardno vozilo, crveno- stražnji pogon).....	114
Slika 129. Zaostajanje standardnog vozila (žutog) vozilom s poboljšanim parametrima (zeleno)	114
Slika 130. Zaostajanje standardnog vozila za vozilom s poboljšanim parametrima i teretom....	115
Slika 131. Prevrtanje standardnog vozila s teretom na trkačoj stazi	115

POPIS TABLICA

Tablica 1. Popis ispitnih procedura vezanih uz dinamiku vozila [2.].....	10
Tablica 2. Pregled modela vozila [4.].....	23
Tablica 3. Programski paketi za simulaciju dinamike vozila [4.].....	24
Tablica 4. Usporedba vozila BMW 330xi i referentnog vozila promatranog u ovom radu [11.]	54
Tablica 5. DLC Promjena težišta u horizontalnom smjeru, brzina na kraju poligona.....	66
Tablica 6. Iznos kuta zakreta oko uzdužne osi označeno na dijagramu (Slika 65.), DLC, promjena težišta u horizontalnom smjeru.....	68
Tablica 7. Ostali značajni parametri, DLC, promjena težišta u horizontalnom smjeru.....	68
Tablica 8. Maksimalni iznosi kuta zakreta oko uzdužne osi, DLC, promjena težišta u vertikalnom smjeru	69
Tablica 9. Maksimalni iznosi bočnog kuta klizanja, DLC, pomak težišta u vertikalnom smjeru	70
Tablica 10. Maksimalni iznos bočnog ubrzanja vozila, DLC, pomak težišta u vertikalnom smjeru	71
Tablica 11. Maksimalni iznos kuta zakreta upravljača, DLC, širina pneumatika	73
Tablica 12. Maksimalni iznos kuta zakreta oko uzdužne osi vozila, DLC, širina pneumatika	73
Tablica 13. Kut bočnog klizanja vozila u lokalnom ekstremu označeno na dijagramu (Slika 72.), DLC, širina pneumatika.....	74
Tablica 14. Ostali ekstremi izlaznih podataka, DLC, krutost opruga.....	77
Tablica 15. Maksimalni iznos bočnog kuta klizanja, DLC, teret na krovu	78
Tablica 16. Ostali ekstremi izlaznih podataka, DLC, teret na krovu.....	80
Tablica 17. Maksimalni iznos bočnog kuta klizanja, DLC, teret u prtljažniku	81
Tablica 18. Ostali ekstremi izlaznih podataka, DLC, teret u prtljažniku	84
Tablica 19. Ekstremne vrijednosti izlaznih podataka, DLC, vrsta pogona	89
Tablica 20. Ekstremi značajnih veličina, Fishhook, promjena težišta u horizontalnom smjeru ...	91
Tablica 21. Maksimalni iznosi izlaznih podataka, Fishhook, pomak težišta u vertikalnom smjeru	93
Tablica 22. Maksimalne vrijednosti izlaznih parametara, Fishhook, krutost opruga	96
Tablica 23. Maksimalni iznos izlaznih podataka, Fishhook, teret na krovu.....	97
Tablica 24. Vrijeme potrebno vozilu da završi krug staze	114

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F_{N2}	N	Normalna sila na donji kotač
F_b	N	Granična bočna sila
φ_p	-	Faktor poprečne stabilnosti
β	°	Nagib podloge
h_t	m	Visina težišta
b	m	Širina traga kotača
G_V	N	Težina vozila
F_c	N	Centripetalna sila na vozilo
g	m/s ²	Ubrzanje sile teže
μ	-	Faktor trenja kotrljanje
$v_{max,p}$	m/s	Maksimalna brzina vozila kod koje još ne dolazi do prevrtanja vozila
v	m/s	Longitudinalna brzina vozila
r	m	Radijus zavoja vozila
δ_o	°	Kut zakreta vanjskog kotača
δ_i	°	Kut zakreta unutarnjeg kotača
δ	°	Ackermanov kut zakreta
F_y	N	Bočna sila na kotač
F_{yf}	N	Bočna sila prednje osovine
F_{yr}	N	Bočna sila stražnje osovine
M	kg	Masa vozila
R	m	Radijus okretanja

SAŽETAK

Stabilnost vozila jedna je od najvažnijih aspekata dinamike vozila te se zbog toga vrlo detaljno analizira prilikom razmatranja i testiranja vozila, a istraživanja vezana za ovo područje su u literaturi detaljno obrađena. Ispitne procedure vezane za stabilnost vozila i analiza utjecaja različitih parametara na stabilnost vozila tema su i ovog rada.

U prvom dijelu diplomskog rada navedene su standardne ispitne procedure koje se koriste za analizu stabilnost vozila, a detaljnije su obrazložene ispitne procedure koje će se koristiti u simulacijama provedenim u sklopu zadatka. Također promatrani su i parametri vozila značajni za ponašanje vozila te su prema literaturi odabrani oni koji imaju najznačajniji utjecaj na stabilnost vozila, a čiji se utjecaj može analizirati upotrebom programskog paketa za analizu dinamike CarSim. Na temelju literature i ispitnih procedura definirane su i dinamičke karakteristike koje će se koristiti za analizu ponašanja vozila. Na kraju je provedena analiza rezultata simuliranih ispitnih procedura te su doneseni zaključci o utjecaju pojedinog parametra na ponašanje vozila u pojedinoj proceduri te na stabilnost.

Ključne riječi: Stabilnost, vozilo, ispitne, procedure, parametri, simulacija, CarSim

SUMMARY

Vehicle stability is one of the most important aspects of vehicle dynamics and is therefore thoroughly analysed when considering and testing the vehicle, and studies related to this area are examined in details in the literature. The test procedure related to vehicle stability and the analysis of the influence of various parameters on vehicle stability are topics of this paper.

The first part of this master thesis deals with standard test procedures used for vehicle stability analysis and more detailed explanation of the test procedures to be used in simulations carried out within the task. Also, vehicle parameters are important for vehicle behaviour, and according to selected literature those that have the most significant impact on vehicle stability are going to be analysed using the program for vehicle dynamics CarSim. Based on the literature and test procedures, the dynamic characteristics that will be used for vehicle analysis are also defined. In the end, an analysis of the results of the simulated test procedures was carried out and conclusions were drawn on the influence of certain parameters on vehicle behaviour in certain procedures and on stability.

Keywords: Stability, vehicle, testing, procedure, parameters, simulation, CarSim

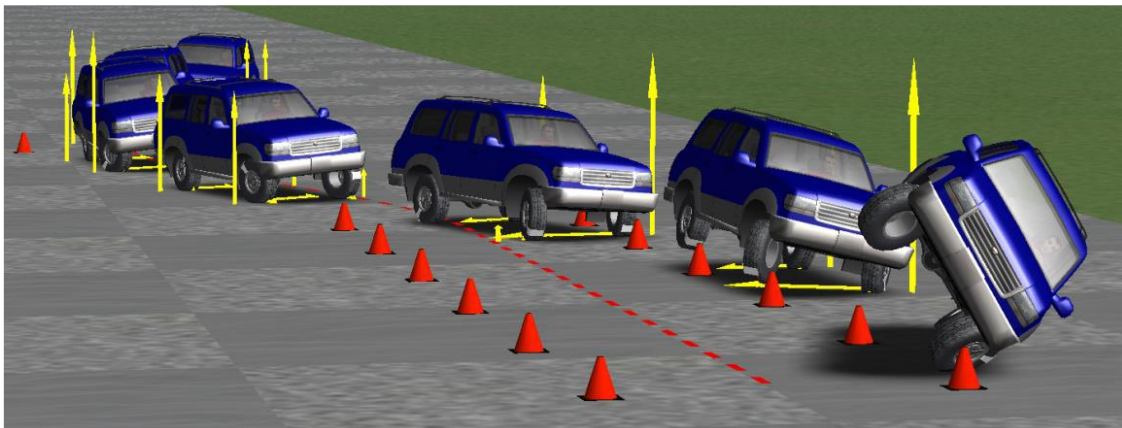
1. UVOD

Za vozilo se može najjednostavnije reći da je stabilno ako slijedi željene, tj. zadane putanje zadane od strane vozača. Točnije rečeno kada vozač upravlja vozilo ono se ne smije udaljiti od željene putanje ili promijeniti zadani položaj bez obzira na poremećaje i druge vanjske utjecaje. O nestabilnom ponašanju vozila govori se tek kada vozilo odstupa od zadane putanje, odnosno sam o vozilo zauzima položaj koji više nije stabilan, tj. u kojem više nije moguće kontrolirati vozilo.

Situacije koje se promatraju vezano uz stabilnost vozila su:

- prevrtanje vozila,
- djelovanje bočnih sila na vozilo, tj. poremećaja (centrifugalna sila, bočni nagib, točni vjetar),
- proklizavanje kotača (pogonskih ili slobodnih),
- blokiranje kotača prilikom kočenja.

Vozilo se može prevrnuti oko uzdužne (Slika 1.) ili oko poprečne osi. Do prevrtanja vozila oko poprečne osi dolazi samo u rijetkim slučajevima kada se savladavaju veliki usponi ili u slučaju vozila s skraćanim međuosovinskim razmakom.



Slika 1. Prevrtanje vozila oko uzdužne osi [1.]

Postoje četiri osnovne vrste stabilnosti:

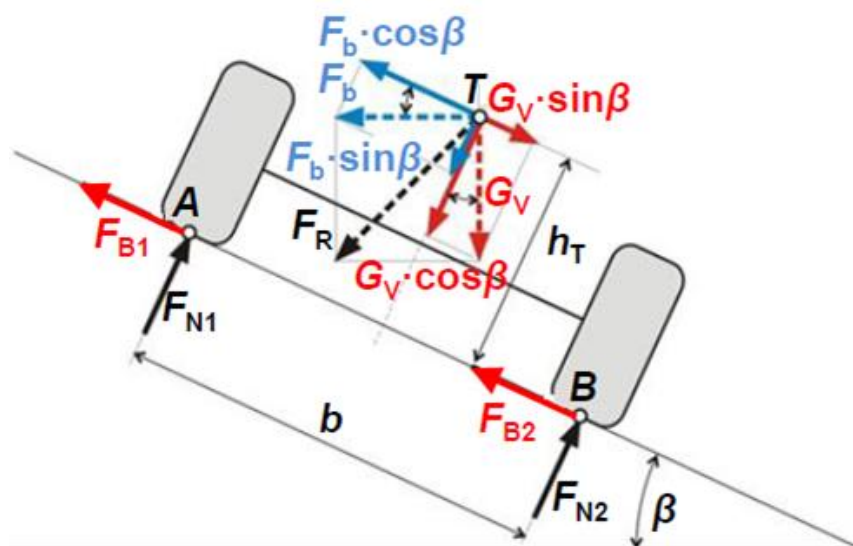
- uzdužna stabilnost,
- poprečna stabilnost,
- bočno klizanje pogonske osovine,
- stabilnost pri kočenju

1.1. Poprečna stabilnost

Poprečna stabilnost predstavlja sklonost vozila da se odupre bočnom prevrtanju. Za razliku od uzdužne stabilnosti vozila gubitak poprečne stabilnosti češće se javlja kod vozila te će biti detaljnije objašnjeno u ovome radu. Mogućnost gubitka poprečne stabilnosti može se dogoditi uslijed:

- bočnog nagiba terena,
- centrifugalne sile,
- sile bočnog vjetra,

Na slijedećoj slici (Slika 2.) može se primijetiti da ukoliko vektor rezultantne sile F_R probada traga kotača neće doći do prevrtanja vozila.



Slika 2. Poprečna stabilnost kod bočnog nagiba terena [1.]

Ako se postavi momentna jednadžba oko točke A dobiva se slijedeće [1.]:

$$F_{N2} = \frac{1}{b} \left(G_V \cdot \cos \beta \cdot \frac{b}{2} + G_V \cdot \sin \beta \cdot h_T - F_b \cdot \cos \beta \cdot h_T + F_b \cdot \sin \beta \cdot \frac{b}{2} \right) \text{ [N]}$$

Iz čega je izraz za graničnu bočnu silu [1.]:

$$F_b \leq \frac{G_V \cdot \left(\cos \beta \cdot \frac{b}{2} + \sin \beta \cdot h_T \right)}{\cos \beta \cdot h_T - \sin \beta \cdot \frac{b}{2}} \text{ [N]}$$

Odnosno [1]:

$$F_b \leq G_V \cdot \frac{\frac{b}{2 \cdot h_T} + \tan \beta}{1 - \frac{b}{2 \cdot h_T} \cdot \tan \beta} \text{ [N]}$$

Isto kao i kod uzdužne stabilnosti uvodi se faktor poprečne stabilnosti [1.]:

$$\varphi_P = \frac{b}{2 \cdot h_T} \text{ [-]}$$

Sada izraz za graničnu bočnu silu glasi:

$$F_b \leq G_V \cdot \frac{\varphi_P + \tan \beta}{1 - \varphi_P \cdot \tan \beta} \text{ [N]}$$

U slučaju prevrtanja oko točke B izraz za graničnu bočnu silu glasi [1.]:

$$F_b \geq G_V \cdot \frac{-\varphi_P + \tan \beta}{1 + \varphi_P \cdot \tan \beta} \text{ [N]}$$

Uvjet da dođe do klizanja prije nego do prevrtanja glasi [1.]:

$$\varphi_P = \frac{b}{2 \cdot h_T} > \mu \text{ [-]}$$

$$b = 2 \cdot h_T \cdot \mu > 1,6 \cdot h_T \text{ [m]}$$

1.1.1. Slučaj ravne podloge ($\beta = 0$)

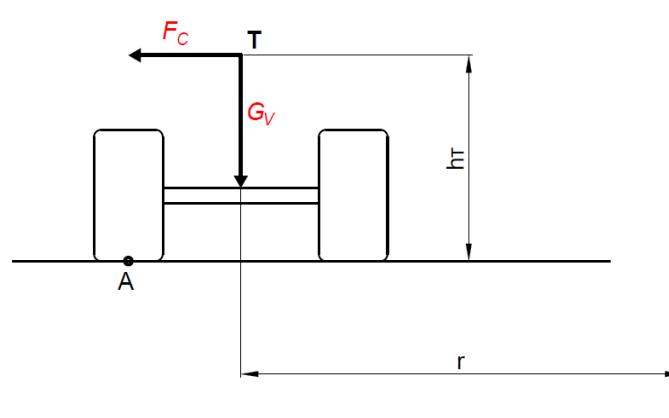
U slučaju prolaska vozila zavojem (Slika 3.) do prevrtanja oko točke A ne dolazi ako [1.]:

$$F_C \leq G_V \cdot \varphi_P \text{ [N]}$$

$$\frac{G_V}{g} \cdot \frac{v^2}{r} \leq G_V \cdot \varphi_P \text{ [N]}$$

Najveća brzina kod koje još ne dolazi do prevrtanja vozila [1]:

$$v_{max,P} \leq \sqrt{r \cdot g \cdot \mu} \left[\frac{m}{s} \right]$$



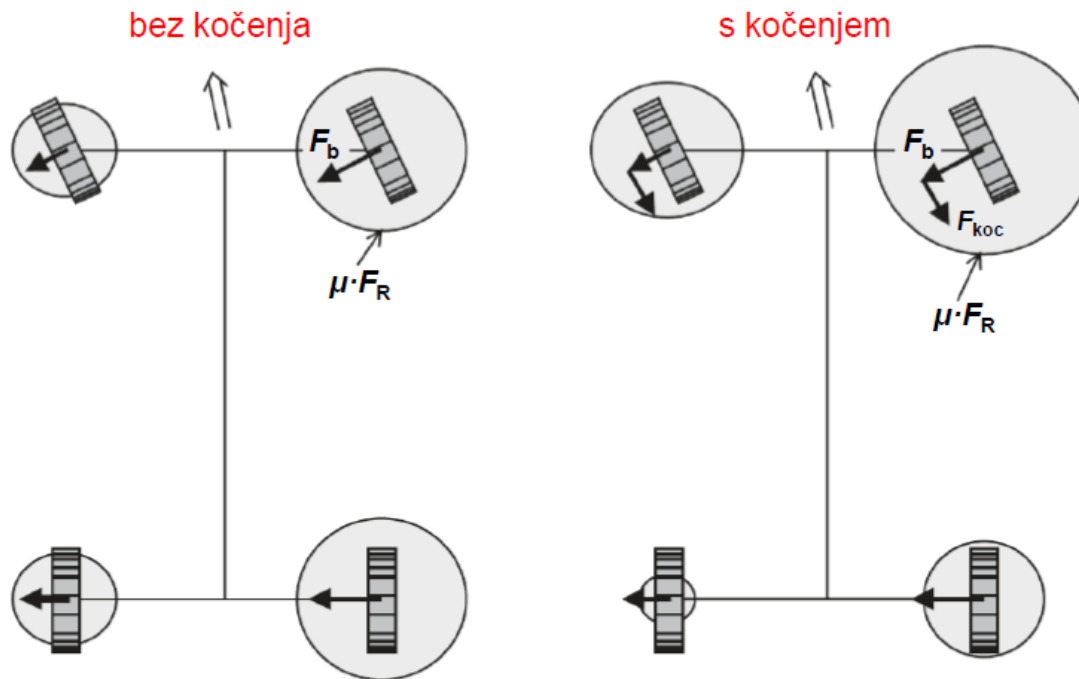
Slika 3. Opterećenja kod prolaska vozila zavojem s ravnom podlogom [1.]

1.2. Stabilnost pri kočenju

Prilikom kočenja postoje tri specifična slučaja gubitka stabilnosti i to su kočenje u zavoju, kočenje na podlozi s različitim faktorima trenja prijanjanja te blokiranja kotača prilikom kočenja.

1.2.1. Kočenje u zavoju

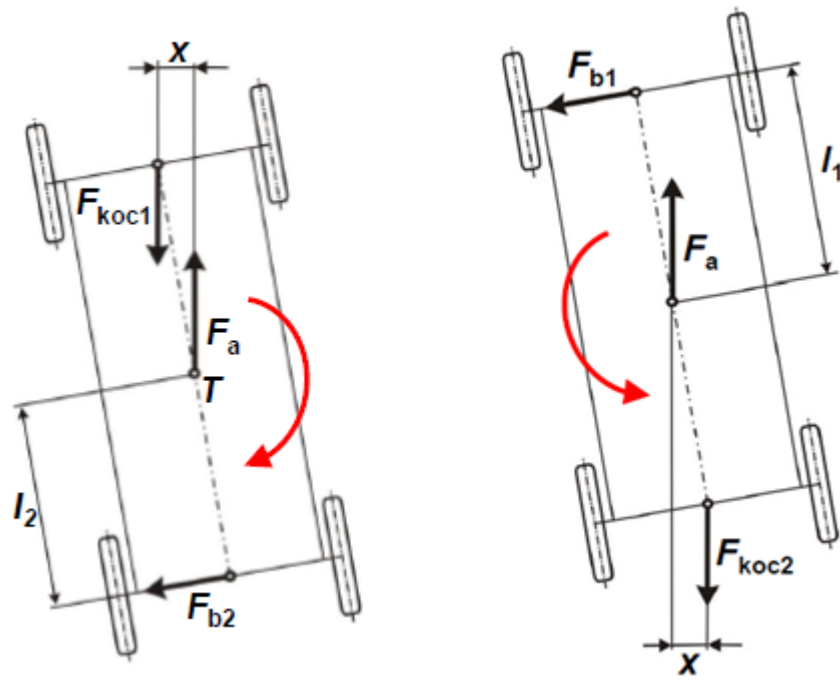
Prilikom kočenja u zavoju postoji problem što se uz bočnu silu, odnosno silu vođenja javlja još i sila kočenja što predstavlja potrebu za većim krugom (elipsom) trenja. Ukoliko zbroj sila, bočne i sile kočenja, postane veći od moguće sile u krugu trenja dolazi do proklizavanja i gubitka stabilnosti (Slika 4.).



Slika 4. Kočenje u zavoju

1.2.2. Blokiranje kotača prilikom kočenja

U slučaju blokiranja prednjih kotača vozilo je i dalje stabilno jer sila bočnog vođenja koja se javlja na stražnjoj osovini vraća vozilo u ravnotežu (Slika 5.). Kod blokiranja stražnjih kotača vozilo dolazi u nestabilno stanje jer dolazi do promjene putanje zbog sile bočnog vođenja na prednjoj osovini koja izaziva dodatno zanošenje vozila. U slučaju blokade sva četiri kotača daljnje gibanje vozila je vrlo neizvjesno odnosno vozilo se nastavlja gibati u neodređenom smjeru.



Slika 5. Blokiranje kotača prednje i stražnje osovine [1]

2. ISPITNE PROCEDURE ZA ODREĐIVANJE STABILNOSTI VOZILA

Ispitne procedure koriste se kako bi se odredilo ponašanje vozila, njegove karakteristike te kako pojedini parametar utječe na stabilnost vozila. Ostvaruje se ponašanje krajnjeg vozila onako kako je predviđeno upravo simulacijama ispitnih procedura u virtualnim okruženjima s virtualnim modelima vozila kao i u stvarnim fizičkim uvjetima sa realnim vozilima. U pravilu se u svim procedurama zahtjeva da ne dođe do prevrtanja vozila ili da se vozilo ne odstupa previše od zadane putanje više od dopuštenog. U tablici (Tablica 1.) nalazi se popis ispitnih procedura vezanih uz dinamiku vozila uz njihov kratki opis.

Tablica 1. Popis ispitnih procedura vezanih uz dinamiku vozila [2.]

Naziv procedure	Norma / Pravilnik	Kratki opis procedure
Ponašanje pri ustaljenoj vožnji – Metode ispitivanja otvorenom petljom (<i>engl. Steady state cornering</i>)	ISO 4138:2012	Procedura određuje podupravljanje/preupravljanje, kut zakreta oko uzdužne osi pri ustaljenoj vožnji te prilikom zakreta upravljača kako funkcija bočnog ubrzanja i kut bočnog klizanja kao funkcija bočnog ubrzanja.
Sinusna pobuda na upravljaču sa zastojem (<i>engl. Sine with dwell</i>)	FMVSS126 S7.9	Koristi se za ispitivanje pojavljivanja preupravljanja i odziva kod preupravljanja. Obavezan je za vozila s ESP/ESC-om.
<i>Fishhook procedure</i> „riblja udica“	NHTSA	Manevar je osmišljen za kvantifikaciju svojstava vozila prilikom izazivanja prevrtanja.
Sinusna pobuda na upravljaču s povećanjem amplitude (<i>engl. Sine steer increased amplitude</i>)	/	Temeljena na proceduri sinusne pobude na upravljaču samo što je amplituda druge polovine ciklusa veća 1,3 puta.
Dvostruka izmjena pravca (<i>engl. Double lane change</i>)	ISO 3888-1:2004	Za određivanje ponašanja vozila i sposobnosti vozila za držanje

Naziv procedure	Norma / Pravilnik	Kratki opis procedure
		željenog pravca kretanja kod dvostruke izmjene pravca.
Izbjegavanje prepreke (<i>engl. Obstacle avoidance</i>)	ISO 3888-2:2011	Definiranje ponašanja vozila kod nagle promjene smjera odnosno izbjegavanja prepreke.
Koračna (<i>step</i>) pobuda na upravljaču (<i>engl. Step input</i>)	ISO 7401:2011	Određivanje bočnog ubrzanja u ovisnosti o kutu zakreta upravljača i brzine zakreta oko vertikalne osi u ovisnosti o kutu zakreta upravljača za slučaj koračne pobude pri ustaljenoj vožnji.
Pulsna pobuda na upravljaču (<i>eng. Pulse input</i>)	ISO 7401:2011	Određivanje bočnog ubrzanja u ovisnosti o kutu zakreta upravljača i brzine zakreta oko vertikalne osi u ovisnosti o kutu zakreta upravljača za slučaj impulsne pobude pri ustaljenoj vožnji.
Slučajna pobuda na upravljaču (<i>eng. Random input</i>)	ISO 7401:2011	Određivanje bočnog ubrzanja u ovisnosti o kutu zakreta upravljača i brzine zakreta oko vertikalne osi u ovisnosti o kutu zakreta upravljača za slučaj slučajne pobude pri ustaljenoj vožnji.
Put zaustavljanja prilikom kočenja kod pravocrtne vožnje s ABS-om	ISO 21994:2007	Kočenje s 100 km/h do 0 km/h za određivanje zaustavnog puta vozila, ali i stabilnost vozila prilikom kočenja.
Kočenje kod pravocrtne vožnje prema naprijed, s različitim koeficijentima trenja	ISO 14512:1999	Određivanje odstupanja vozila od smjera prilikom kočenja na podlozi s različitim koeficijentima trenja.
Kočenje u zavoju	ISO 7975:2006	Rezultati vezani uz poprečnu stabilnost, odstupanja od zadanog

Naziv procedure	Norma / Pravilnik	Kratki opis procedure
		smjera vožnje i promjene u bočnom ubrzanju
Reakcija vozila u zavoju pri naglom otpuštanju pedale snage	ISO 9816:2006	Prikupljanje podataka o ponašanju vozila prilikom otpuštanja pedale snage prilikom prolaska zavojem.
Ubrzavanje od 0 km/h do najveće brzine	/	Definiranje ponašanja pogonskog sustava i sustava za prijenos snage, karakteristikama mjenjača, vrijeme od 0 – 100 km/h, vrijeme potrebno za prelazak 402 m te marginu ubrzanja.

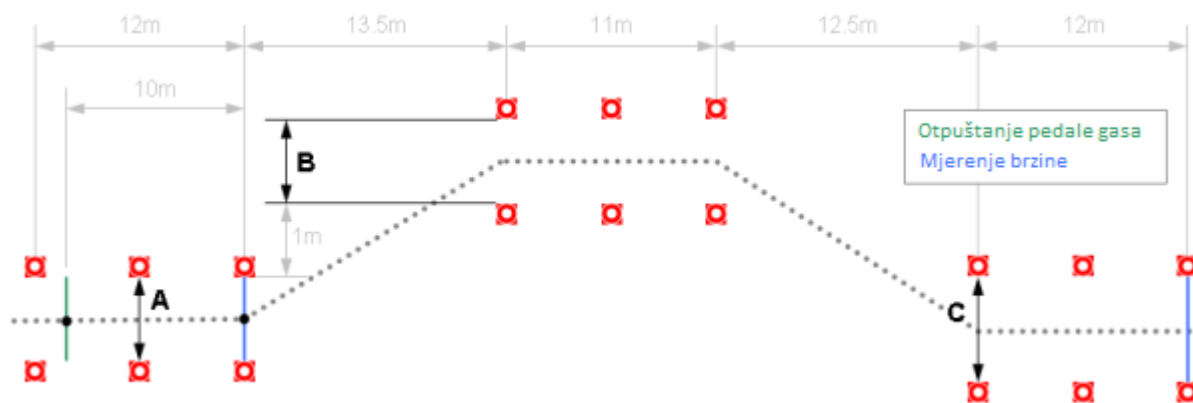
Ispitne procedure kojima se primarno promatra stabilnost vozila i koje će se detaljnije obraditi i koristiti u ovome radu su:

- Dvostruka izmjena pravca (*engl. Double Lane Change*) ISO 3888-2,
- NCAP (*National Highway Traffic Safety Administration*) *Fishhook* („riblja udica”) manevar,
- Kočenje u zavoju ISO 7975:2006.

2.1. Dvostruka izmjena pravca ISO 3888-2:2011

Ova ispitna procedura definirana je normom ISO 3888-2:2011 čiji je puni naziv *Ispitna staza za manevar nagle promjene prometnog traka – 2. dio: Izbjegavanje prepreke*. U normi su definirane dimenzije ispitnog poligona (Slika 6.), kao i određene karakteristike vozila. Za karakteristike same staze i uvjete ispitivanja norma se poziva na normu ISO 15037-1:2006 u kojoj su definirani vremenski uvjeti, karakteristike same podloge, karakteristike pneumatika s kojima se izvodi ispitna procedura te ostali uvjeti.

Normom ISO 3888-2 definiran je položaj čunjeva te širina staze koja ovisi o dimenzijama samog vozila. Svaki segment staze (*A, B, C*) je određene širine koja je, prema normi, funkcija širine samog vozila.



Slika 6. Dimenzije ispitne staze za dvostruku izmjenu pravca

Sama ispitna procedura izvodi se na način da vozilo određenom brzinom koja nije manja od 50 km/h ulazi između prvog seta čunjeva te vozač izvodi zadani manevar pokušavajući zadržati vozilo unutar čunjeva. Nije dopušteno pritiskanje pedale kočnice kao ni gasa do završetka procedure. Zahtjev je da se za upravljačem, prilikom izvođenja ove ispitne procedure, nalazi iskusan vozač.

Vozilo je uspješno izvršilo ispitnu proceduru ako vozilom nije dotaknut ni jedan od čunjeva, ukoliko nije došlo do prevrtanja vozila. Najčešće se ova ispitna procedura izvodi na način da se prvo uđe vozilom brzinom od 50 km/h, koliko je minimalno potrebno za pravilno izvođenje procedure, a zatim se radi više ponovnih prolaza te se svaki puta povećava brzina vozila te se to ponavlja do pojave gubitka stabilnosti, odnosno dokle god vozilo ne dodirne jedan od čunjeva. Bilježi se zadnja brzina pri kojoj vozilo još nije izgubilo stabilnost.



Slika 7. Vozilo opremljeno sensorima i mjernim instrumentima za ispitnu proceduru dvostruke izmjene pravca



Slika 8. Simulacija dvostruke izmjene pravca u CarSim programskom paketu

Karakteristike ponašanja vozila koje se mjere ovom ispitnom procedurom i koje su propisane normom su sljedeće:

- brzina vozila,
- bočno ubrzanje,
- kut zakreta upravljača,
- bočna brzina,
- uzdužno ubrzanje,
- brzina kuta zakreta oko vertikalne osi (*engl. Yaw rate*),
- kut zakreta oko uzdužne osi (*engl. Roll*),
- moment na upravljaču.

2.2. NCAP fishhook („riblja udica“) manevar

Ova ispitna procedura propisana je od strane Ministarstva za transport Sjedinjenih Američkih Država (*engl. U.S. Department of Transportation*), točnije uprave za sigurnost prometa (*engl. Nacional Highway Traffic Safety Administration*) [10.]. Zadaća ove procedure je ocijeniti sklonost vozila prema prevrtanju. Ispitna procedura sastoji se od prvog manevra u kojem se određuju karakteristike vozila i drugog manevra u kojem se ocjenjuje otpor prevrtanju.

U ovom pravilniku u prvom dijelu propisani su uvjeti vozila koji moraju biti zadovoljeni prilikom izvođenja procedure. Tako su tu propisana opterećenje vozila, pneumatici, prikupljanje podataka, instrumenti za mjerenje te nazivi dinamičkih veličina vozila.

Važno je napomenuti da je ovu ispitnu proceduru moguće izvoditi i uz pomoć robotiziranog uređaja za zakretanje upravljača (tako se najčešće i izvodi), u tome slučaju propisane su i karakteristike samog uređaja (Slika 9.).



Slika 9. Uređaj za robotizirano upravljanje upravljačem

Samo izvođenje ispitne procedure sastoji se od dva dijela.

U prvom dijelu se određuju karakteristike vozila, točnije veličine vezane uz bočnu dinamiku vozila, a temeljen je na testu konstantne brzine, promjenjivog upravljanja koji je definiran u SAE J266 [3.]. Izvodi se kako bi se odredio kut zakreta upravljača pri kutnom ubrzanju od 0,3 g pri brzini od 80 km/h (50 mph). Taj kut zakreta upravljača definira konstantu upravljača koja će se koristiti za izvođenje drugog dijela ove ispitne procedure.

Drugi dio procedure je moguće izvesti na dva načina: zakretanje upravljača može izvoditi vozač, ili je moguće koristiti robotizirano upravljanje. Drugo spomenuti način je naveden kao preferirani pa će on biti i detaljnije opisan.

U drugom dijelu ispitne procedure vozilo se kreće zadanom brzinom te se naglo, brzinom od 720 °/s zakreće upravljač, do kuta koji iznosi 5,5 puta kut zakreta definiranog u prvom dijelu ispitne procedure. Ukoliko prilikom ovog manevra dođe do odvajanja bilo koja dva kotača vozila (dolazi do odvajanja dva kotača na istoj strani vozila) od podloge za više od 50 mm ispit se ponavlja sa smanjenom ulaznom brzinom. Ukoliko vozilo ne može zadovoljiti ovaj uvjet pri brzini ne manjoj

od 48 km/h smatra se da vozilo ne prolazi ovu ispitnu proceduru. Također, ukoliko se desi prevrtanje vozila prilikom izvođenja ove procedure, smatra se da vozilo ne prolazi ovu ispitnu proceduru. [10.]



Slika 10. Izvođenje *Fishhook* ispitne procedure na vozilu s značajnom opasnošću prema prevrtanju

2.3. Kočenje u zavoju ISO 7975:2006 [4.]

Svrha ove ispitne procedure je ispitati efekt kočenja na zadržavanje smjera i kretanje vozila. Konkretno se to odnosi na utvrđivanje promjene odziva vozila, kod stacionarnog kretanja vozila kružnom stazom, prilikom kočenja.

Početni uvjeti definirani su konstantnom uzdužnom brzinom vozila te kružnom stazom zadanog polumjera, specificiranog u normi ISO 4138. Kut zakreta upravljača potreban za stacionarno kretanje vozila kružnom stazom potrebno je održavati konstantnim tijekom cijelog ispitivanja. Tijekom ispitivanja ulazni parametri i odzivi vozila se mjere i bilježe te se iz dobivenih podataka izračunavaju karakteristične vrijednosti.

Varijable koje se mjere su sljedeće:

- moment kočenja,
- kut zakreta upravljača,
- bočno ubrzanje,
- uzdužno usporenje,
- uzdužna brzina,
- brzina kuta zakreta oko vertikalne osi,
- kut bočnog klizanja i/ili bočna brzina.

Također se preporuča određivanje sljedećih varijabli:

- tlak u glavnom kočnom cilindru ili tlak kruga koji aktivira kočnicu barem na jednom prednjem kotaču,
- brzinu rotacije kotača

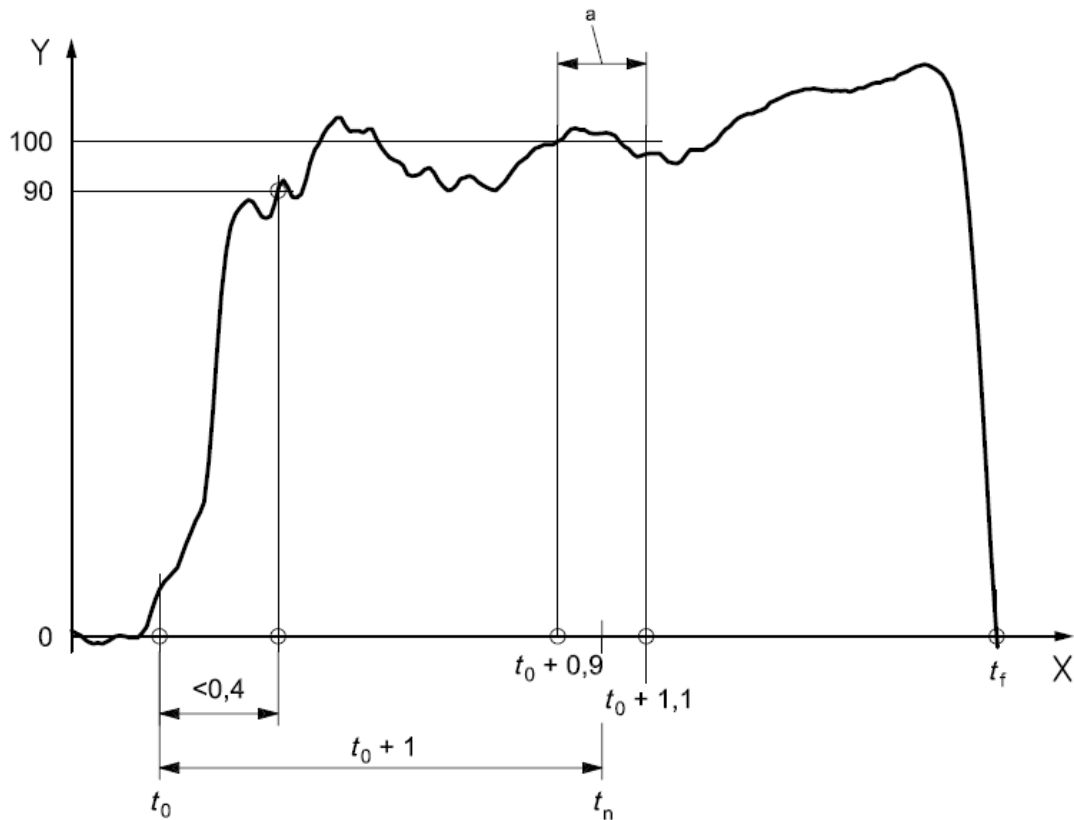
Normom su također propisani: način zagrijavanja kočnica, procedura uglašavanja neravnina kočnih površina ukoliko je riječ o novim kočnicama te inicijalni uvjeti vožnje.

Kada se postignu stacionarni uvjeti vožnje upravljač se fiksira mehaničkim uređajem ili alternativno se čvrsto pridržava u zadanom položaju od strane vozača. Pedala gasa se otpušta, a pedala kočnice se pritišće što brže. Za vozila s ručnim mjenjačem test se provodi u najvećem mogućem stupnju prijenosa za zadane uvjete, a pedala spojke se može pritisnuti istovremeno s pedalom kočnice ili na kraju testa.

Minimalni intenzitet kočenja mora odgovarati srednjoj vrijednosti uzdužne akceleracije od najmanje 2 m/s^2 .

2.3.1. Ocjenjivanje podataka i rezultati

Referentna točka u vremenu je točka t_0 a predstavlja trenutak aktivacije kočnice. Na slici (Slika 11.) Y predstavlja uzdužno usporenje izraženo u postocima, a X vrijeme u sekundama. Vrijeme porasta uzdužnog usporenja predstavlja vrijeme koje je potrebno da vozilo ubrza od točke t_0 do 90 % nazivne vrijednosti uzdužnog ubrzanja i ne smije biti veće od 0,4 sekunde. Uzdužno ubrzanje u točki t_n predstavlja vrijeme od jedne sekunde nakon točke t_0 te su tu postavljena nazivna vrijednost uzdužnog usporenja, ali se ne očitava vrijednost u toj točki nego se za nazivnu vrijednost uzima srednja vrijednost uzdužnog usporenja u vremenu između 0,1 sekunde prije i poslije točke t_n .



Slika 11. Primjer dijagrama prikaza podataka za ispitnu proceduru kočenja u zavoju [4.]

Budući da kočenje u zavoju određuje mali broj kompletnih karakteristika stabilnosti vozila rezultati ovih testova mogu se smatrati značajnima samo za odgovarajuće mali broj ukupne dinamike vozila. Potrebno je značajno više prikupljenih podataka vezanih uz dinamiku vozila iz više testova kako bi se postigao dovoljan broj rezultata za ocjenu stabilnosti. Upravo iz ovih razloga ova ispitna procedura i njezini rezultati ne mogu se koristiti u propisivanju pravilnika i zakona.

3. SIMULACIJSKI MODELI ZA ANALIZU DINAMIKE VOZILA

Cilj simulacije je matematički opisati sva bitna područja i samo vozilo te podsustave vozila koji se mogu primijeniti na konstrukciju, razvoj i ocjenu dinamike vozila. Ovime se omogućuje jednostavno, brzo i efikasno istraživanje ponašanja vozila bez potreba za skupim i zahtjevnim ispitivanjima. Simulacija omogućuje variranje parametara vozila i uvjeta na način koji to često nije moguće na stvarnom ispitivanju. Budući da su rezultati dobiveni računalnim simulacijama samo približni i njihova je preciznost određena točnošću i složenošću modela vozila, potrebno je pažnju posvetiti na modeliranje tih sustava.

Na karakteristike samog vozila utječe više faktora. Karakteristika pneumatika, koji prenose predodređeno gibanje relativno u odnosu na šasiju, ima značajnu ulogu. Izborom korisnih geometrijskih parametara u konstruiranju ovjesa na primjer, stabilnost vozila prilikom savladavanja zavoja ili izmjene pravca je zagantirana. Također ispravno postavljanje jednadžbi je od velike važnosti u cilju smanjenja napora modeliranja i minimizacije potrebnog vremena provođenja simulacije. Svaka simulacija teži što je moguće preciznijem opisu promatranog sustava u cilju utvrđivanja ponašanja stvarnih sustava iz ponašanja modela. [5.]

3.1. Modeli vozila

Da bi modeli vozila mogli što realističnije opisivati dinamičke karakteristike stvarnih vozila moraju zadovoljavati slijedeće kriterije[5.]:

- kompletnu prostornu kinematiku i kinetiku cijelog vozila i, ako je potrebno, njihovih podsustava,
- nelinearna kinematika ovjesa,
- nelinearna i, gdje god je potrebna, dinamička reprezentacija elemenata sile,
- dinamičke sile na pneumaticima.

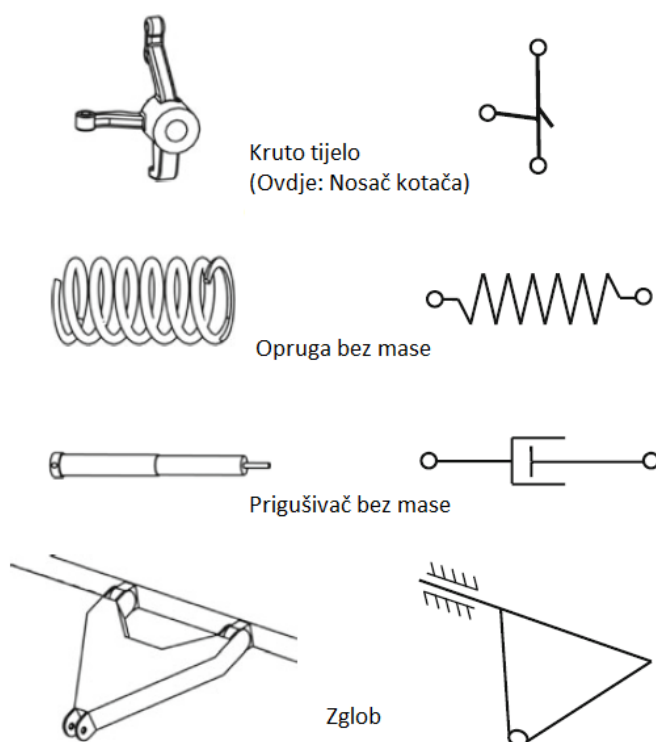
S druge strane modeli moraju biti konstruirani tako da vrijeme izračuna bude razumno, to se posebno odnosi na simulacijske modele koji će biti implementirani u ispitne uređaje na vozilima.

Za simulaciju dinamike vozila moguća je primjena različitih vrsta modela ovisno o željenoj razini pojedinosti i samome zadatku koji se izvodi. Ako se na primjer pretpostavi da je šasija vozila kruta tada taj model ima šest stupnjeva slobode u prostoru, što se može reducirati daljnjim pretpostavkama kao što su modeli vozila s jednim ili dva traga kotača. Čak i za jednostavan model

bočne dinamike vozila potrebna su minimalno dva stupnja slobode za opisivanje bočnog pomaka i kuta zakreta oko vertikalne osi.

3.1.1. Dinamika sustava više tijela (*engl. MultiBody Systems*)

Dinamika sustava više tijela, ili skraćeno MBS, pogodan je za opisivanje mehaničkih sustava koji su većinom čvrsti i međusobno su povezani ležajevima i zglobovima. Ovakvi sustavi se najčešće sastoje od krutih (i/ili fleksibilnih) tijela s masom koja su podvrgnuta djelovanju koncentriranim silama i momentima na diskretnim mjestima. Neki od simbola, koji se često koriste za tipične višedijelne sustave, nalaze se na slici (Slika 12.)



Slika 12. Tipični primjeri elemenata sustava više tijela [4.]

Kruto tijelo sustava više tijela okarakterizirano je masom i momentom inercije. Karakteristične točke krutog tijela su težište te konačan broj spojnih točaka na kojima sile i momenti djeluju na druga tijela spojena odgovarajućim elementima (zglobovima, linearnim ležajevima, sfernim zglobovima, itd.)

3.1.2. Metoda konačnih elemenata (*engl. Finite-Element-Method FEM*)

Ova metoda se primarno koristi za matematičko opisivanje elastičnih i, gdje je to moguće, plastičnih karakteristika mehaničkih sustava u kojima su masa i elastičnost jednoliko raspodijeljene po tijelu. Model se sastoji od velikog broja konačnih elemenata, jednostavne geometrije, čiji su principi deformiranja opisani elementarnim funkcijama. Ova metoda se primarno koristi za istraživanje efekata vanjskih sila na deformaciju i raspodjelu naprezanja po volumenu tijela. Matematička formulacija metode konačnih elemenata dovodi do običnih diferencijalnih jednadžbi s velikim brojem stupnjeva slobode.

3.1.3. Kontinuirani sustavi (*engl. Continuous Systems COS*)

Kontinuirani sustavi se koriste za prikaz elastičnih karakteristika mehaničkih sustava u kojima su masa i elastičnost, ako i plastičnost, kontinuirano distribuirani po volumenu tijela. Matematička formulacija kontinuiranih sustava opisana je pomoću parcijalnih diferencijalnih jednadžbi s beskonačnim brojem stupnjeva slobode. Odgovarajuće područje primjene ovih strukturno različitih kontinuiranih sustava uglavnom ovisi o geometriji i raspodjeli krutosti inicijalnog mehaničkog sustava.

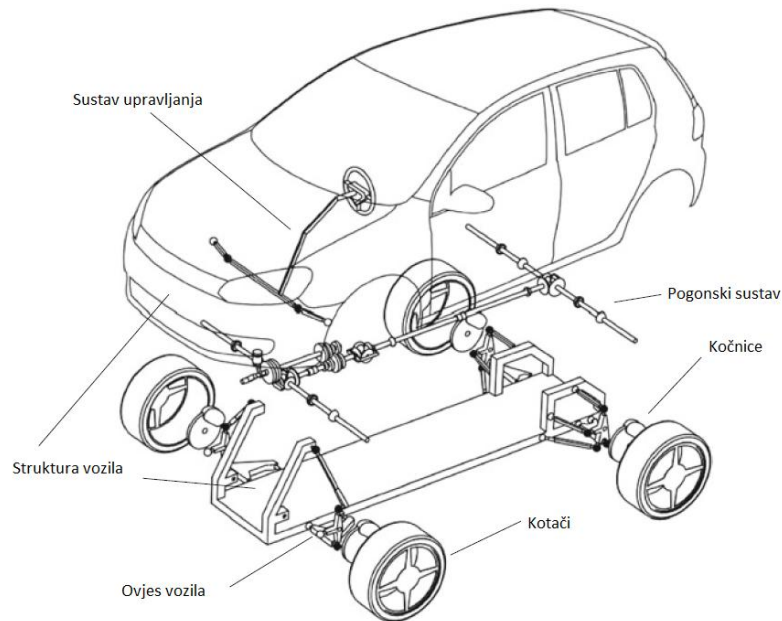
Višedijelni sustavi idealni su za kompleksne modele koji pomažu u opisivanju dinamike vozila. Međutim, također je moguće i kreiranje modela upotrebom metode konačnih elemenata što ima prednosti kada je potrebno odrediti deformacije i raspodjelu naprezanja uz kinematiku vozila.

3.2. Cjeloviti modeli vozila

Cjeloviti model vozila se sastoji od podsistema šasije, pogonskog sustava, ovjesa, kotača, kočnica i upravljanja. Ulazi ovoga modela su položaj pedale kočnice, položaj pedale snage, kut zakreta upravljača i stupanj prijenosa. Utjecaj okoliša na vozilo opisan je preko predodređenih uvjeta okoliša kao što su bočni vjetar i suprotan vjetar, koeficijent trenja između podloge i pneumatika, nagib kolnika i neravnine.

Primjer kompleksnog model vozila koji je bio modeliran kao višedijelni sustav može se vidjeti na slici (Slika 13.). Nije uvijek potrebno modelirati cijelo vozilo, moguće je podijeliti model vozila u podsustave koje je moguće promatrati zasebno, a ukoliko je potrebno, povezati ih kasnije u cjeloviti model. Na slici (Slika 13.) može se vidjeti model vozila podijeljen na tipične podsustave:

- struktura vozila,
- pogonski sustav,
- ovjes vozila,
- kotači,
- kočnice,
- sustav upravljanja.


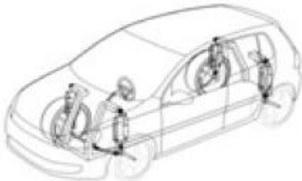
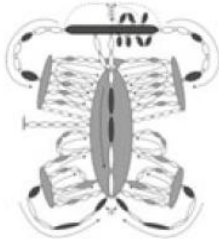



Slika 13. Višedijelni model vozila (MBS) [4.]

3.3. Modeli vozila i područja primjene

Ovisno o potrebama primjene različiti modeli vozila se mogu koristiti. Osnovni modeli navedeni su u tablici (Tablica 2.)

Tablica 2. Pregled modela vozila [4.]

	Model vozila s jednim tragom korača		Model vozila s dva traga kotača		Dinamika sustava više tijela (MBS)		
	Linearni	Nelinearni	Bez kinematike	S kinematikom	Reducirana	Kompleksna	Kombinirano s metodom konačnih elemenata
							
Tip kretanja	Ravninska translacija, kut zakreta oko vertikalne osi						
	Dinamika kuta zakreta oko svih osi						
	Gibanje komponenata						
	Posebne primjene, mehanika sudara itd.						
Stupnjevi slobode	2	3 - 7	14 - 25		20 - ...		20 - ...
Frekvencija spektra	0 - 2 Hz		0 - 5 Hz		0 - 30 Hz		0 - 200 Hz

3.4. Komercijalni sustavi za simulacije vozila

Danas je dostupno mnoštvo simulacijskih programa i cijelih simulacijskih okruženja sa setom alata za simulaciju dinamike vozila. U ovome poglavlju navedeno je nekoliko programa za simulaciju dinamike vozila. (Tablica 3.)

Tablica 3. Programski paketi za simulaciju dinamike vozila [4.]

Programski paket	Proizvođač	Tip
CarMaker	IPG	MBS, real time, HiL
CarSim	Mechanical solutions	MBS, real time
veDyna	TESIS Dynaware	MBS, real time
Proracingsim	ProRacing Sim	Motor simulation
AVL Advisor	AVL	MBS, real time, pogonski sustav
AVL Cruise	AVL	MBS, real time, pogonski sustav
ASM	dSPACE	HiL, embedded
VDMS	Milliken research	MBS
Madymo	TASS	MBS, MKE

4. UTJECAJNI PARAMETRI NA STABILNOST VOZILA

Kako bi se odredilo ponašanje vozila u ispitnim procedurama vezanim za stabilnost vozila potrebno je odrediti parametre vozila koji utječu na njegovu stabilnost. Utjecajni parametri mogu se podijeliti na:

- parametre geometrije ovjesa,
- opružno prigušna karakteristika,
- konfiguracija pogona,
- opterećenje vozila i raspodjela mase,
- kontakt pneumatika i podloge te druge parametre.

4.1. Parametri geometrije ovjesa

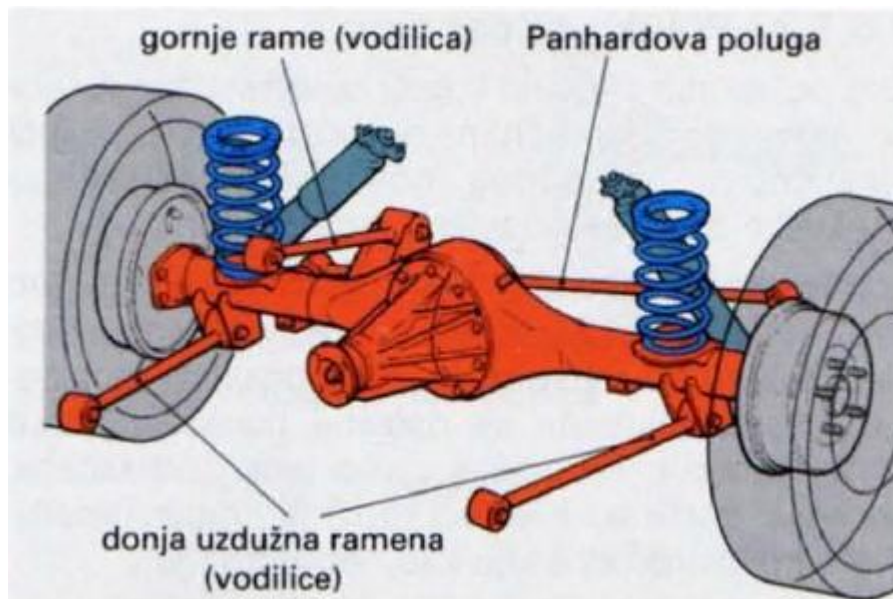
Ovjes vozila objedinjuje čitav niz elemenata čija je glavna zadaća osiguranje konstantnog kontakta između pneumatika i podloge. Osim toga zadaća ovjesa je smanjiti udare koji se prenose s pneumatika na ostatak vozila, opirati se ljuljanu šasije, održavanje kotača u pravilnom položaju prilikom skretanja. Određivanje parametara ovjesa jedan je od najzahtjevnijih u konstruiranju vozila, a razlog tome je sama složenost sustava te količina parametara. Osim toga sami utjecaji tih parametara na dinamiku vozila su isprepleteni, a često i kontradiktorni.

Ovjes se općenito dijeli na dvije grupe:

- ovjes s krutim osovinama,
- neovisan ovjes.

4.1.1. Ovjes s krutim osovinama

Kod ovjesa s krutim osovinama kotači su montirani na svaki kraj krute osovine tako da se svaki pomak jednog kotača prenosi na suprotni kotač (Slika 14.). Ova vrsta ovjesa često se koristila straga na starijim vozilima i većini kamiona, kako i s prednje strane brojnih vozila s pogonom na sva četiri kotača. Prednost ove vrste ovjesa je u tome što zakretanje vozila oko uzdužne osi ne utječe na bočni nagib kotača čime je smanjen bočni nagib kotača prilikom savladavanja zavoja.



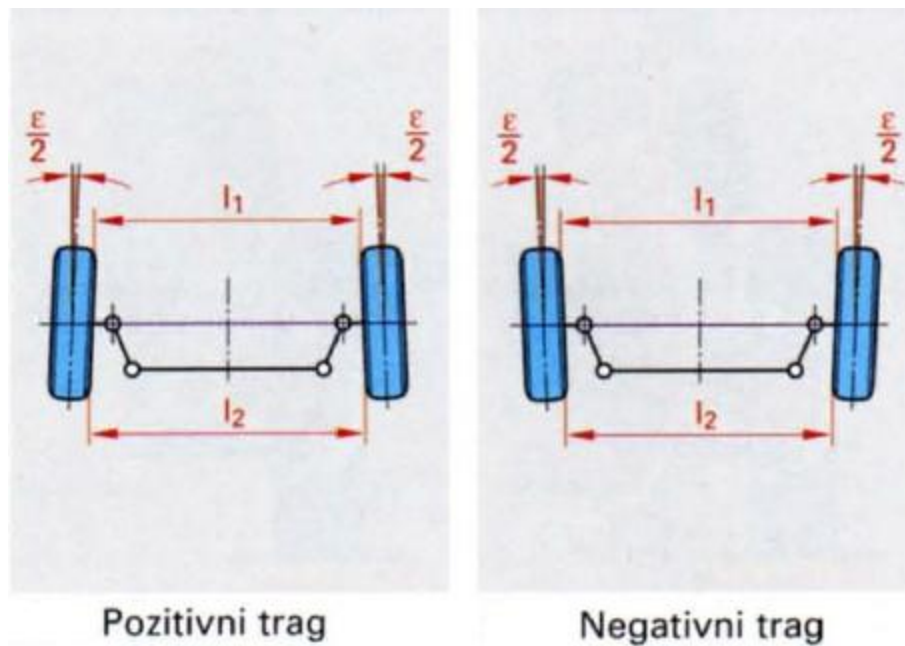
Slika 14. Ovjes s krutom osovinom [6.]

4.1.2. Neovisan ovjes

Neovisan ovjes (pojedinačni ovjes kotača) znatno su smanjene neovještene mase. Pomaci jednog kotača ne utječu na progibanje drugog. Gotovo sva putnička vozila danas koriste neovisan ovjes zbog toga što osigurava više prostora za motor te zbog boljeg otpora njihanju i krivudanju upravljača. [6.]

4.1.3. Usmjerenost kotača

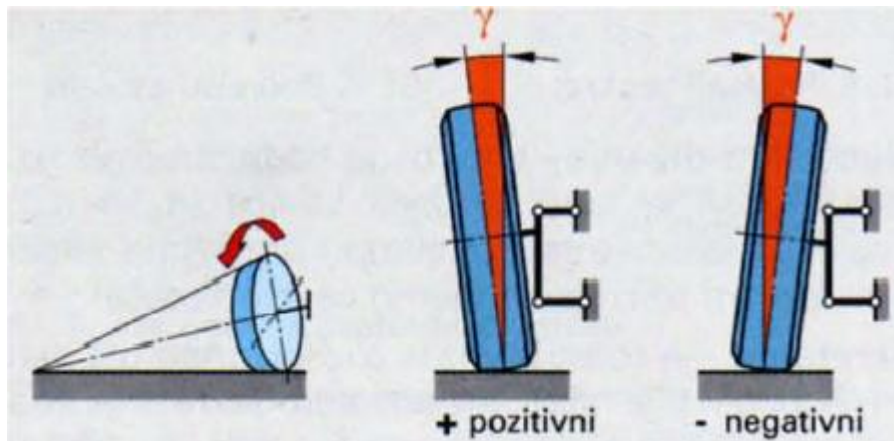
Usmjerenost kotača ili trag kotača (*engl. Toe*) predstavlja kut između uzdužne osi ravnine simetrije kotača i uzdužne ravnine vozila gledano iz horizontalne ravnine vozila. Također može biti i definirana kao razlika između stražnjeg i prednjeg razmaka kotača, mjenog u visini središta u neutralnom položaju upravljačkih kotača. Razlikuje se pozitivan, negativan i neutralan trag kotača. Pozitivan trag kotača ili konvergentnost usmjerenosti kotača doprinosi većoj stabilnosti vozila u zavoju povećanjem kuta bočnog klizanja, čime je moguće prenijeti veće bočne sile na pneumatike. Tipične vrijednosti usmjerenosti kotača iznose od $-30'$ do $+30'$ za prednju osovinu te između $\pm 20'$ za stražnju osovinu prema [6.]



Slika 15. Usmjerenost kotača [6.]

4.1.4. Bočni nagib kotača

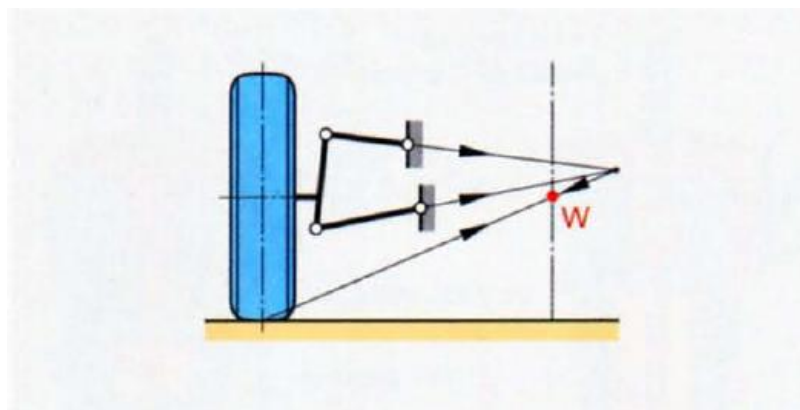
Bočni nagib kotača (*engl. Camber*) je definiran kao kut između ravnine simetrije kotača i vertikalne uzdužne ravnine, gledano u YZ-ravnini vozila (Slika 16.). Kut nagiba kotača daje se u stupnjevima i minutama. Pozitivan nagib kotača je onaj kod kojeg je kotač s gornje strane nagnut prema van. Najveći broj motornih vozila ima na upravljanim prednjim kotačima, u neutralnom položaju pozitivan nagib od $+0^{\circ} 20'$ do $1^{\circ} 30'$. Pozitivan nagib uzrok je učinku kotrljanja stošca pa zbog toga vozilo ima manji polumjer okretanja. Što je veći pozitivan nagib to su manje bočne sile vođenja u zavoju, te se smanjuje moment otpora zakretanja kotača, čime se olakšava okretanje upravljača. S druge strane negativni nagib kotača, kotač je s gornje strane nagnut prema unutra, omogućuje vozilu da bolje preuzima bočnu silu, odnosno poboljšava bočno vođenje u zavoju, ali to uzrokuje brže trošenje pneumatika na unutarnjoj strani gazećeg sloja [6.]



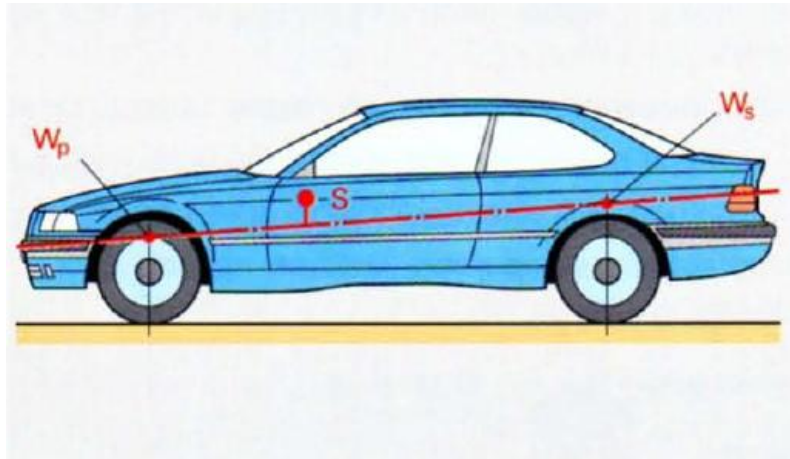
Slika 16. Bočni nagib kotača [6.]

4.1.5. Središte i os valjanja

Središte valjanja (točka W , Slika 17.) je točka presjecišta spojnice trenutnog pola ovjesa i središta kontaktne površine kotača s uzdužnom vertikalnom ravninom simetrije vozila. Os valjanja je pravac koji prolazi kroz središta valjanja prednje W_p i stražnje osovine W_s vozila (Slika 18.). Kako je središte valjanja prednje osovine obično niže od stražnje, to os njihanja ima pad prema naprijed. Preporuka je težište vozila postaviti što bliže osi njihanja jer se time vozilo manje nagnje u zavojima te je samim time poboljšana stabilnost vozila.



Slika 17. Središte valjanja [6.]



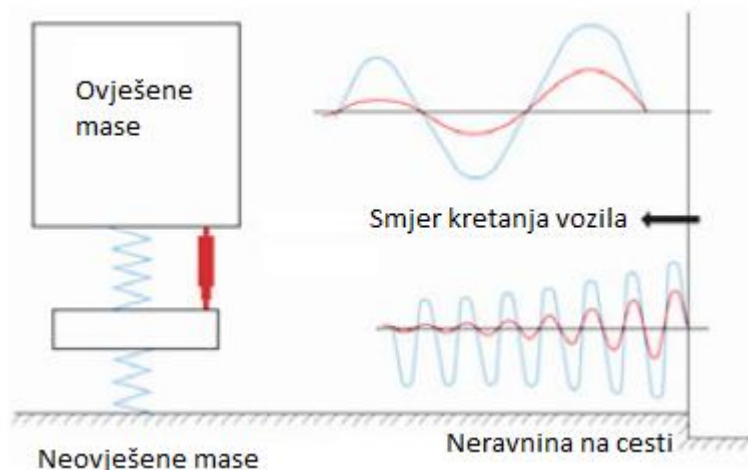
Slika 18. Os valjanja [6.]

4.2. Opružno-prigušne karakteristike vozila

Osnovna zadaća opružno prigušnog sustava na vozilu je osigurati neprestani kontakt pneumatika sa podlogom i osiguravanje udobne vožnje. Zadaća opruga je ublažavanje udaraca koji se prenose s kotača na nadgradnju. Energija udaraca pretvara se u energiju njihanja i toplinu. Opruge se u sustavu ovjesa ugrađuju između vodilica i karoserije. Stlačeni zrak u pneumaticima također spada u sustav opruga i djeluje povoljno na stabilnost vozila. Krutost opruge proporcionalna je pomaku opruge samo do određene deformacije.

Zadatak amortizera je prigušivanje vibracija opruga, odnosno ne dopustiti kotačima odvajanje od podloge. Ugradnjom amortizera smanjuju se amplitude i oscilacije se brže prigušuju, ali se frekvencija oscilacija ne mijenja. U amortizerima se energija oscilacija pretvara u toplinsku energiju. Koeficijent viskoznog prigušnog elementa određuje se iz uvjeta očuvanja energije (izgubljena energija u jednom periodu vibracija mora biti jednaka izgubljenoj energiji sustava) uz pretpostavku da amortizer nema niti masu niti elastičnost, a prigušna sila je proporcionalna relativnoj brzini između klipa i cilindra prigušivača. [6.]

Opružno prigušni sustav sprječava da ovješene mase dođu u kontakt s ne ovješanim masama. Opruge međutim imaju tendenciju relaksacije time oslobađajući pohranjenu energiju u njima. Kako bi se brzo smanjile i eliminirale oscilacije između osovina i šasije, vozilo je opremljeno prigušnicima vibracija odnosno amortizerima. Ovješene i ne ovješene mase vibriraju različitim frekvencijama. Na slici (Slika 19.) može se vidjeti kako se vibracije uzrokovane neravninom na cesti (plavo: neprigušene vibracije) smanjuju amortizerima (crveno: prigušene vibracije) [6.]



Slika 19. Vibracijski model vozila [4.]

4.3. Opterećenje vozila i raspodjela mase

Opterećenje vozila predstavlja masa vozila zajedno sa masom tereta (vozač, ispitna oprema i sl.). Raspodjela mase predstavlja uzdužni, vertikalni i poprečni položaj težišta vozila te odnos ovještene i neovještene mase.

4.3.1. Opterećenje vozila

Prilikom vožnje masa vozila se ne mijenja drastično (potrošnja goriva), ali se dodatnim teretom može povećati opterećenje vozila. Dodatni teret poput vozača, putnika, prtljage i sl. može, teoretski, povećati faktor trenja između pneumatika i podloge na vanjskim kotačima u zavoju te će oni moći primiti veću bočnu silu. No veća masa uzrokuje također veću centrifugalnu silu u zavoju te posljedično veću bočnu silu potrebnu za prenijeti s pneumatika na podlogu.

4.3.2. Položaj težišta

U osnovi je pretpostavljeno da se poprečna koordinata težišta vozila nalazi u ravnini simetrije koja se prostire duž vozila, te je samim time zanemaren njezin utjecaj na ponašanje vozila, ukoliko nije drugačije definirano. Uzdužna i vertikalna koordinata težišta vozila ovise o razmještanju mase samog vozila. Ukoliko se težište pomiče prema prednjoj osovini vozilo postaje podupravljivo, a pomak prema stražnjoj osovini uzrokuje preupravljivost. Povećanjem visine vertikalne koordinate težišta vozilo postaje sklono prevrtanju, a njezinim smanjivanjem doprinosi smanjenoj težnji vozila podupravljivosti. [4.]

4.4. Konfiguracija pogona

Smještaj motora, pogonskog sustava i vrsta pogona utječe na ostvarivanje performansi vozila, te posljedično na položaj težišta. Postoje tri osnovne vrste pogona u ovisnosti o tome kako se snaga raspodjeljuje do kotača, pa se tako kod cestovnih vozila razlikuje:

- pogon na stražnje kotače (*engl. Rear wheel drive*),
- pogon na prednje kotače (*engl. Front wheel drive*),
- pogon na sve kotače (*engl. All wheel drive*)

4.4.1. Pogon na stražnje kotače

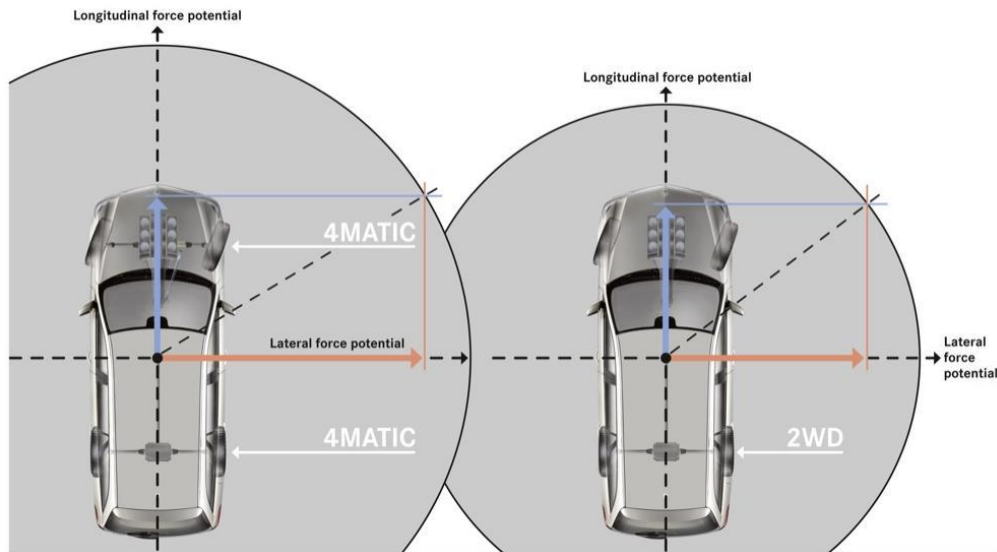
Vozilo s motorom smještenim naprijed i pogonom na stražnje kotače ima ravnomjernu raspodjelu težine na prednju i stražnju osovinu te se u zavojima ponaša neutralno. Kod vozila koja uz pogon na stražnje kotače imaju i motor otraga javlja se osjetljivost na bočne udare vjetra i sklonost zanošenju vozila. Središnje smješten motor predstavlja najpovoljniju raspodjelu mase, zbog težišta se vozilo ponaša neutralno te se zbog toga ova konfiguracija koristi kod sportskih i trkaćih vozila.

4.4.2. Pogon na prednje kotače

Motor u prednjem dijelu vozila može biti smješten ispred, na prednjoj osovini i iza nje, a motor, spojka, mjenjač i diferencijal čine jedan blok. Prednosti ove konfiguracije su značajne: manja masa vozila, kraći put prijenosa snage na kotače (manji gubici), vozilo je stabilno jer pogonske sile „vuku“ a ne „guraju“ vozilo. S druge strane nedostaci su: nepovoljna raspodjela težine (veće opterećenje prednje osovine, sklonost podupravljalivosti, veće trošenje pneumatika prednje osovine.

4.4.3. Pogon na sve kotače

Kod ove konfiguracije razlikuju se trajni pogon i povremeni pogon na sve kotače. Kod trajnog pogona obje osovine stalno pogone vozilo, a središnji diferencijal izjednačava razliku brzine vrtnje prednje i stražnje osovine, sprječavajući neželjena naprezanja i trošenje dijelova mjenjača i pogonskog sustava. U slučaju povremenog pogona na sve kotače iz razvodnog mjenjačkog prijenosnika ide po jedno kardansko vratilo na stražnji i prednji diferencijal. Prednost ovakve vrste pogona je u tome što vozilo može preuzeti veću bočnu silu jer se manji dio snage (kruga trenja) troši na vuču vozila te time vozilo ima veću bočnu stabilnost (Slika 20.). Glavni nedostatak ove konfiguracije je značajno veća masa u odnosu na prethodna dva sustava zbog potrebe za ugradnjom dodatnih elemenata.



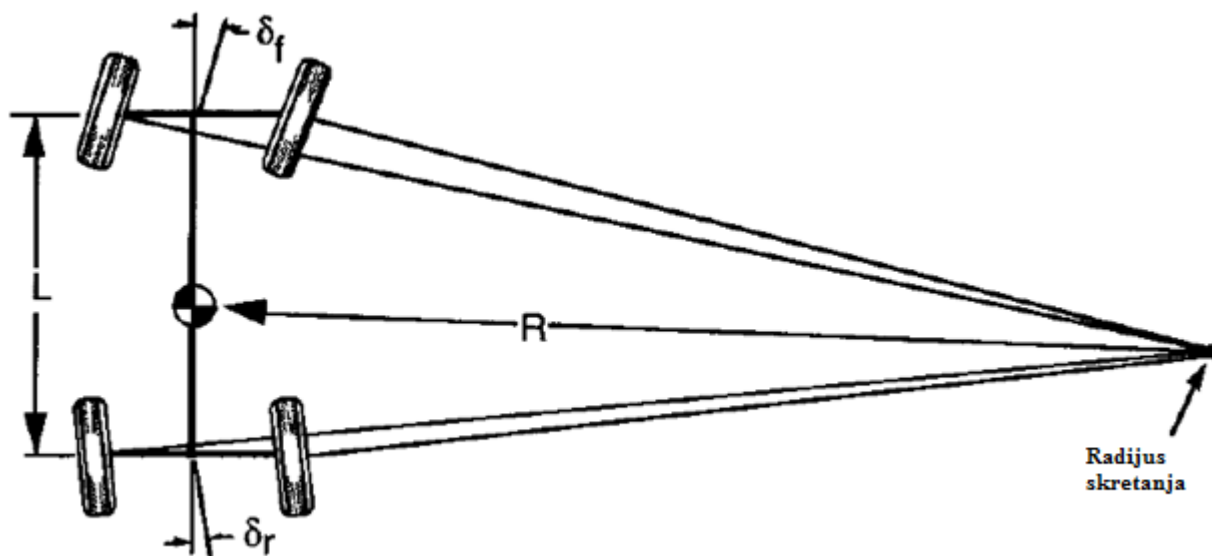
Slika 20. Usporedba raspodjele sila kod vozila s pogonom na sve kotače i s pogonom na dva kotača [1.]

4.5. Upravljanje sa svim kotačima

Performanse vozila tijekom skretanja mogu se poboljšati aktivnim upravljanjem kotača stražnje osovine vozila. Također upravljanje sa svim kotačima poboljšava sposobnost manevriranja pri manjim brzinama.

4.5.1. Skretanje prilikom malih brzina

Prilikom manjih brzina, najčešće do 50 km/h, stražnji kotači vozila zakreću se na suprotnu stranu od prednjih. Zakretanje stražnjih kotača postiže se najčešće mehaničkim, hidrauličkim ili električnim pogonom. Stražnji kotači zakreću se samo za dio kuta za koji se zakreću prednji kotači, najčešće je to do 5 stupnjeva. Analiza skretanja vozila s upravljanjem na svim kotačima pojednostavljena je pretpostavkom prosječnog kuta zakreta prednjih i stražnjih kotača (Slika 21.). [7.]



Slika 21. Kinematika vozila s upravljanjem na sve kotače [7.]

Eksplicitni izraz za radijus zakretanja vozila glasi:

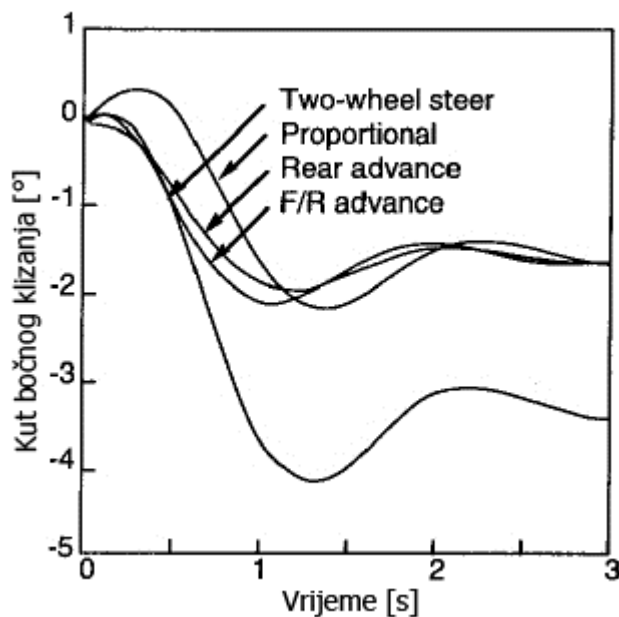
$$R = \frac{L}{\delta_f(1 + \xi)}$$

Pri 50 % stražnjeg zakretaja kotača, točnije stražnji kotači se zakreću za duplo manji kut nego prednji, radijus zakretanja se smanjuje za jednu trećinu, a pri 100 % zakretaja stražnjih kotača (isti kut zakreta prednjih i stražnjih kotača) radijus zakretanja smanjen je na polovicu.

4.5.2. Skretanje prilikom većih brzina

Zakretanje kotača u suprotnu stranu o prednjih bi pri brzinama većim bila neprikladna zbog pomaka stražnje strane vozila na vanjsku stranu zavoja što dovodi do velikog preupravljanja i nestabilnosti vozila. Zbog toga se pri većim brzinama kotači stražnje osovine zakreću u istom smjeru kao i prednji.

Glavna prednost upravljanja sa svim kotačima je bolja kontrola tranzijentnog ponašanja prilikom skretanja. U glavnini sustav upravljanja sa svim kotačima osigurava brži odziv i bolje prigušenje oscilacija zakreta oko vertikalne osi. Također se može značajno smanjiti kut bočnog klizanja vozila primjenom upravljanja sa svim kotačima (Slika 22.). [7.]



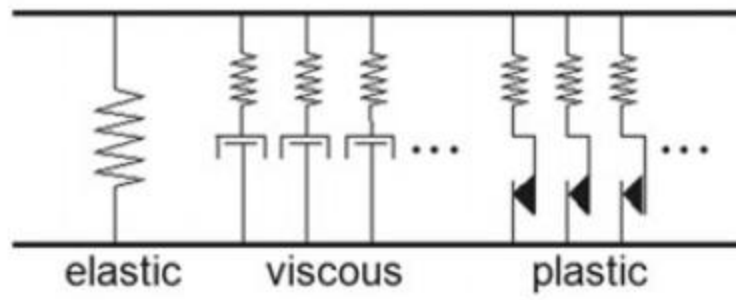
Slika 22. Usporedba kuta zakreta vozila za različite načine skretanja [7.]

4.6. Kontakt između pneumatika i podloge

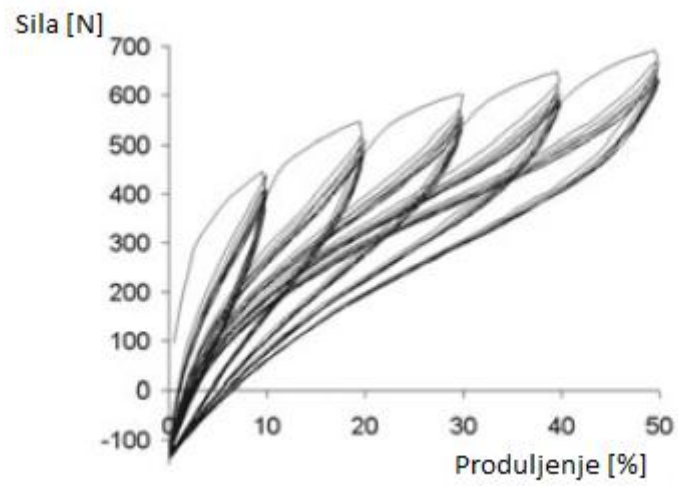
Glavni zahtjevi koji se stavljaju na pneumatike su: prijenos pogonskih, kočnih i bočnih sila vođenja, preuzimanje težine vozila, mali otpor kotrljanja te smanjenje udaraca na ostale dijelove kotača. Sama interakcija između pneumatika i podloge ključna je za ostvarivanje performansi kao i za osiguravanje stabilnosti vozila.

Najvažniji faktor vezan uz kontakt između pneumatika i gume, a o kojem će ovisiti stabilnost vozila je faktor trenja između podloge i pneumatika. Ako se pretpostavi da je faktor trenja na suhoj cesti uglavnom konstantan pneumatik će moći prenijeti veću bočnu silu ako se poveća širina pneumatika, zbog veće površine gaznog sloja, i smanjenjem visine bočne stjenke, jer se time postiže veća bočna krutost.

Materijal iz kojega je izrađen pneumatik viskoelastičnih je svojstava, ovisan o vremenu te izrazito nelinearan. Posljedica toga je da je matematičko opisivanje ponašanja gume vrlo zahtjevno (Slika 23). Na slici (Slika 24.) prikazan je dijagram opterećivanja materijala pneumatika sa 5 ciklusa opterećenja različitih amplituda iz kojeg se može vidjeti elastično ponašanje materijala.



Slika 23. Prikaz simulacijskog modela materijala pneumatika [8.]



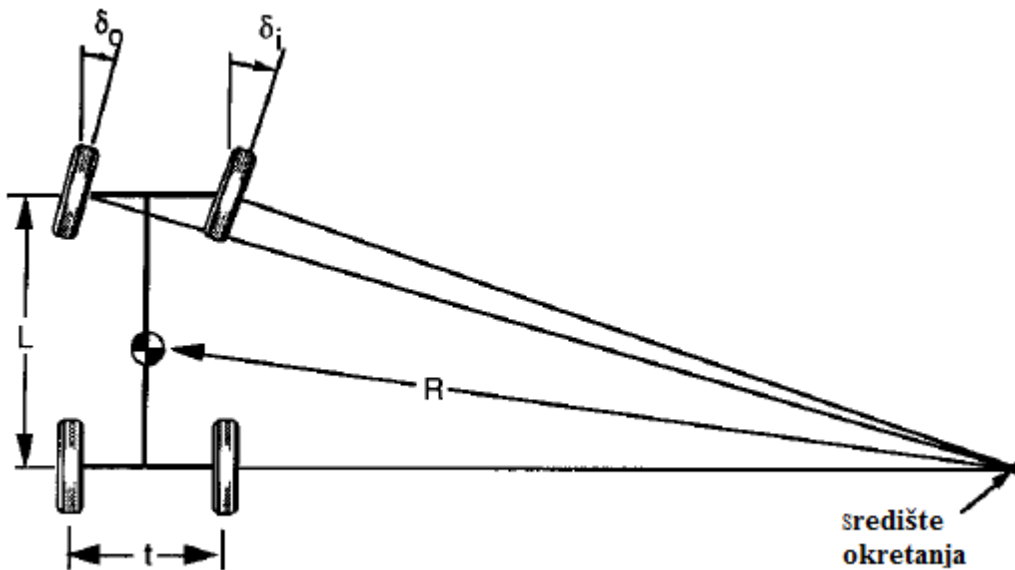
Slika 24. Dijagram ponašanje materijala pneumatika [8.]

5. DINAMIKA VOZILA PRILIKOM SKRETANJA

Budući da ispitivanje stabilnosti vozila podrazumijeva pobudi volanom, donosno zakretanje upravljača, time i skretanje vozila, u ovom poglavlju pojašnjena je dinamika vozila prilikom skretanja. Vozač i vozilo čine sustav s zatvorenom petljom što znači da vozač promatra smjer i položaj vozila te ispravlja njegovo kretanje zakretanjem upravljača. Kako bi se okarakteriziralo ponašanje vozila, koristi se takozvana otvorena petlja, tj. ne rade se korekcije upravljanja na temelju ponašanja vozila nego se ono samo promatra. [7.]

5.1. Skretanje pri malim brzinama

Prvi korak pri razumijevanju dinamike vozila prilikom skretanja je analiza skretanja pri malim brzinama. Prilikom takvih manevara na pneumaticima se ne javljaju bočne sile, nego se kotači kotrljaju bez kuta bočnog klizanja (Slika 25.).



Slika 25. Geometrija vozila prilikom skretanja malom brzinom [7.]

Ukoliko se na stražnjim kotačima ne javlja bočno klizanje središte okretanja nalazi se na pravcu koji prolazi stražnjom osovinom. Također pravci okomiti na svaki od prednjih kotača moraju se sjeći u istoj točki na pravcu koji prolazi stražnjom osovinom. Ako to nije slučaj dolazi do klizanja prednjih kotača. Idealni kutovi zakreta prednjih kotača prikazani su izrazima [7.]:

$$\delta_o \cong \frac{L}{(R + t/2)}$$

$$\delta_i \cong \frac{L}{(R - t/2)}$$

Prosječni kut prednjih kotača, pretpostavljajući male kuteve zakreta, definiran je Ackermanovim kutom:

$$\delta = L/R$$

Ovime je opisana Ackermanova geometrija koja predstavlja točnu geometriju prikazanu na slici (Slika 25.). Greške ili devijacije u kutovima zakreta lijevog i desnog prednjeg kotača imaju značajan utjecaj na trošenje pneumatika, međutim nemaju značajan utjecaj na usmjerenost vozila, ali utječu na moment zakreta upravljača. Kod Ackermanove geometrije moment na upravljaču raste konstantno s zakretom upravljača, dok se u slučaju da su kutovi lijevog i desnog prednjeg kotača jednaki moment na upravljaču može u nekom trenutku nestati, a također i postati negativan što bi značilo da se vozač mora smanjiti kut zakreta upravljača kako bi održao vozilo na željenoj putanji što je nepoželjno. [7.]

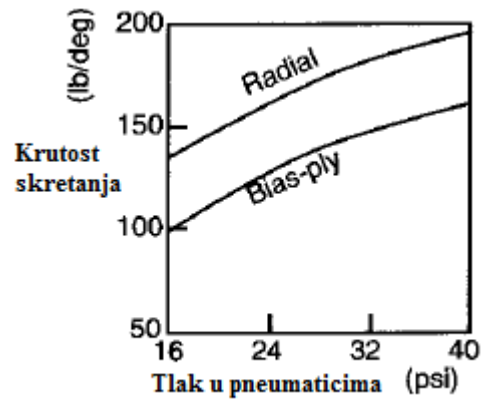
5.2. Skretanje pri velikim brzinama

Pri većim brzinama izrazi spomenuti u prethodnom poglavlju se mijenjaju jer se javlja bočna akceleracija. Kako bi se uravnotežila bočna akceleracija na pneumaticima se javljaju bočne sile, a time i kutovi klizanja pneumatika.

Pri malim kutovima klizanja (ispod 5°) odnos bočne sile i kuta zakreta je linearan [7.]:

$$F_y = C_\alpha \cdot \alpha$$

Gdje α predstavlja kut bočnog klizanja, a C_α konstantu proporcionalnosti odnosno krutost skretanja (*engl. cornering stiffness*). Krutost skretanja ovisi o mnogim varijablama, veličini pneumatika, tipu pneumatika, tlaku u pneumaticima itd. Na slici (Slika 26.) je dijagramski prikazana ovisnost tlaka u pneumaticima na krutost skretanja.



Slika 26. Dijagram ovisnosti krutosti skretanja o tlaku u pneumaticima [7.]

Izrazi kojima se opisuje skretanje pri većim brzinama izvedene su iz Newtonovog drugog zakona i izraza kojima se opisuje geometrija u zavoju, korigirana za kut klizanja. Radi jednostavnije analize koristi se model bicikla (Slika 27.). Pri velikim brzinama radijus okretanja je veći od osovinskog razmaka vozila te se mali kutovi mogu pretpostaviti, a razlika između kuta skretanja s vanjske i unutarnje strane prednjeg kotača je zanemariva te se mogu, radi jednostavnosti, oba prednja kotača mogu prikazati na jednom kotaču s kutom skretanja δ .

Za vozilo koje se kreće brzinom v zbroj svih sila u bočnom smjeru mora biti jednaka umnošku mase i centripetalne akceleracije [7.]:

$$\sum F_y = F_{yf} + F_{yr} = M \frac{v^2}{R}$$

Gdje je:

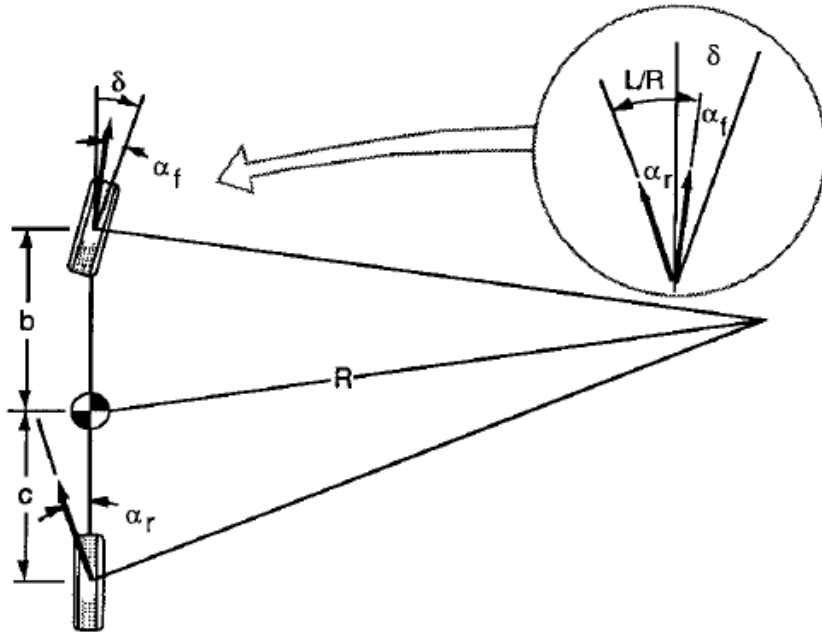
F_{yf} – bočna sila prednje osovine,

F_{yr} – bočna sila stražnje osovine,

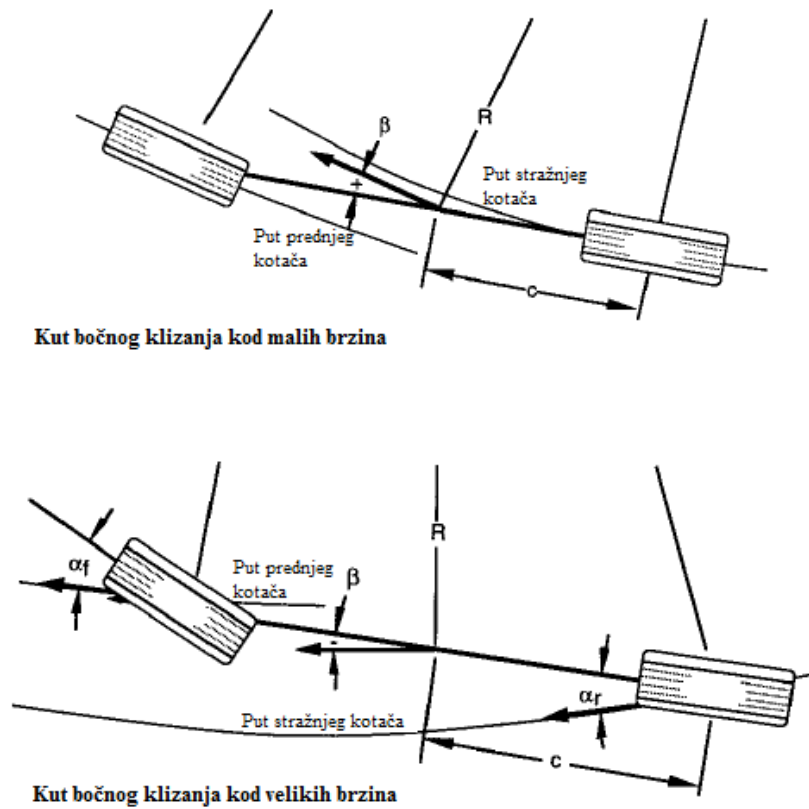
M – masa vozila,

v – longitudinalna brzina vozila,

R – radijus okretanja.



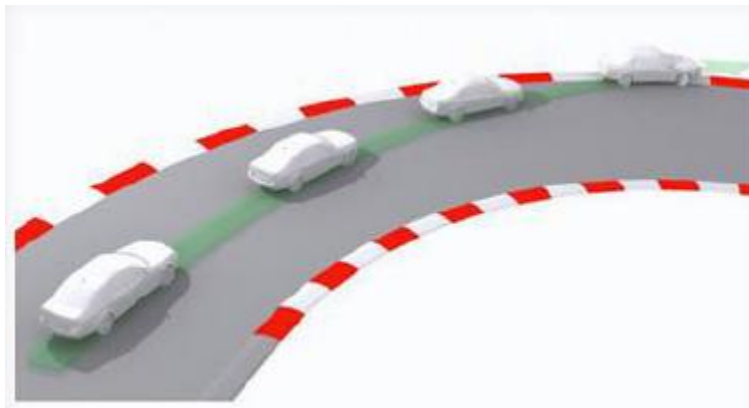
Slika 27. Model bicikla za pojednostavljenje skretanja vozila pri velikoj brzini [7.]



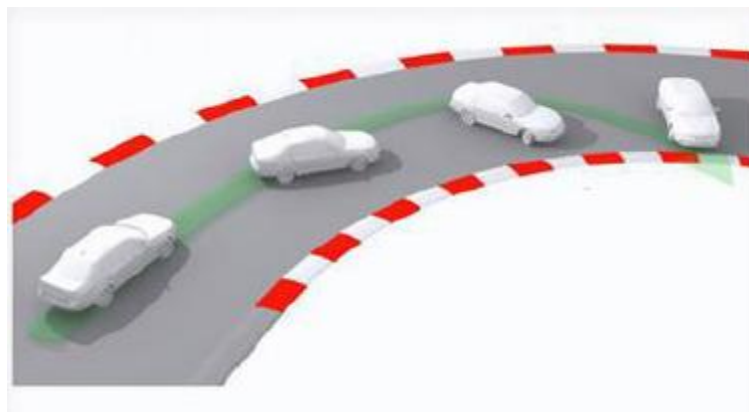
Slika 28. Usporedba kuta bočnog klizanja kod velikih i malih brzina [7.]

5.3. Preupravljivost i podupravljivost

Preupravljivost (Slika 29.) i podupravljivost (Slika 30.) su stanja u kojima se vozilo može nalaziti prilikom savladavanja zavoja. Podupravljivost se javlja kada je kut bočnog klizanja prednjih kotača veći od kuta klizanja stražnjih kotača, dok preupravljivost nastaje kod obrnute situacije odnosno kada je kut klizanja stražnjih kotača veći od kuta klizanja prednjih kotača. Kod pojave podupravljivosti vozilo ima tendenciju kretanja zavojem većeg radijusa dok kod preupravljivosti ima tendenciju kretanja manjim zavojem manjeg radijusa. Podupravljivost se smatra stabilnim stanjem jer je za ispravljanje vozila na zadanu putanju potrebno povećati kut zakreta upravljača dok se preupravljivo stanje smatra nestabilnim.



Slika 29. Prikaz podupravljanja [1.]



Slika 30. Prikaz preupravljanja [1.]

6. SIMULACIJSKI MODEL ZA ANALIZU STABILNOSTI VOZILA

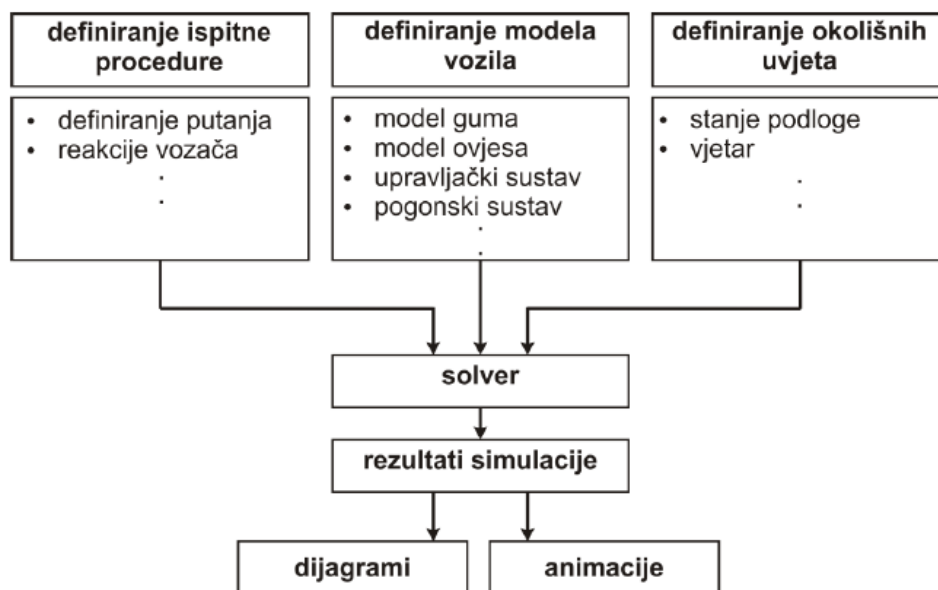
6.1. Programski paket CarSim

Programski paket CarSim jedan je od vodećih simulacijskih alata za analizu dinamike vozila. Omogućuje predviđanje i razumijevanje ponašanja vozila i identifikaciju ključnih parametara vozila, a koristi ga više od 30 proizvođača vozila, 100 dobavljača i preko 200 fakulteta i istraživačkih ustanova.

6.2. Simulacijski modeli

Za opisivanje dinamike vozila CarSim koristi VehicleSim simulacijski softver koji koristi dinamiku sustava više tijela (MBS). Modeli vozila u Car Simu sadrže više od 55 stupnjeva slobode gibanja, te mogućnost definiranja više od 300 ulaznih i analizu preko 700 izlaznih parametara vozila. Moguće je zadavanje osnovnih parametara vozila, ovjesa, karakteristika opruga i amortizera, upravljačkog i kočnog sustava, izbor različitih modela pneumatika te pogonskog sustava i drugih. Karakteristike vozila moguće je opisivati konstantnim vrijednostima, linearnim promjenama, nelinearno preko tablica s podacima te algebarskim jednadžbama.

Osim podataka o svim sustavima vozila zadaju se i podaci vezani uz reakcije vozača, podlogu i uvjete okoline. U samoj bazi podataka CarSima postoji veliki broj gotovih ispitnih procedura sa već zadanim parametrima, a također postoji i mogućnost izrade novih. Postoji mogućnost modeliranja poligona i određivanje svih potrebnih parametara kao što su: 3D geometrija, prepreke, hrapavost, različite vrste podloge, koeficijent trenja itd.



Slika 31. Način rada programskog paketa CarSim [9.]

6.3. Baza podataka

U programskom paketu CarSim radi se sa bazom podataka koja sadrži vozila, sustave na vozilima, komponente, ispitne procedure i poligone. Također je moguće dodatno proširenje baze podataka novim procedurama, poligonima, vozilima i podsustavima.

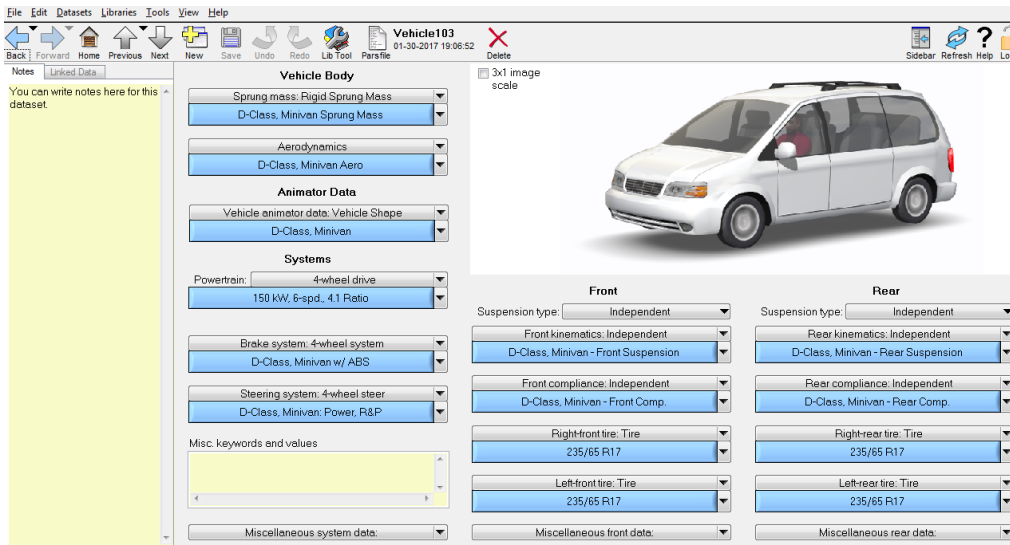
Sama baza dijeli se na tri osnovne kategorije:

- **Skup podataka** (*Engl. Dataset*) osnovna je razina baze podataka vezana uz neku kategoriju u CarSimu. Svaki skup podataka sadrži sve parametre, jednog elementa potrebne za provođenje simulacija.
- **Biblioteka** (*Engl. Library*) je za razinu veća od skupa podataka i objedinjuje više skupova podataka koji se odnose na pojedini element vozila, simulacije ili procedure (npr. knjižnica mjenjača, knjižnica pogonskih sustava, biblioteka motora itd.)
- **Baza podataka** (*Engl. Database*) skup je svih knjižnica (*Librarya*), koji se koriste pri radu u CarSimu. Moguće je imati više baza podataka na jednom računalu kao i kreiranje novih, vlastitih baza podataka.

6.4. Definiranje vozila

Odabirom sklopa vozila u početnom sučelju programa CarSim otvara se osnovni skup podataka vezan uz vozila koji sadrži ostale skupove podataka vezan uz pojedini segment vozila (Slika 32.). Daljnjim odabirom nekog od skupa podataka segmenata vozila moguće je mijenjati parametre

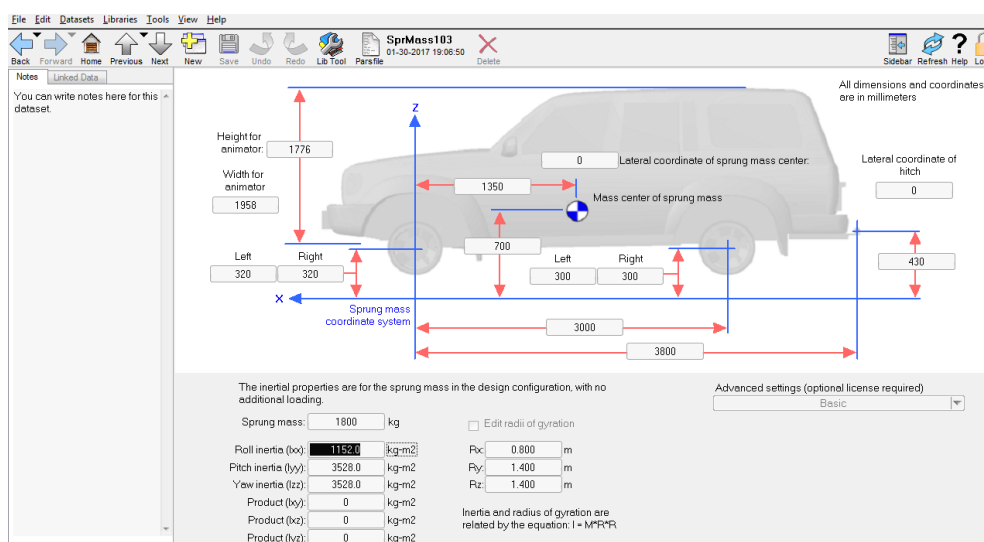
vozila. Tako je u ovom prozoru moguće mijenjati karakteristike ovještene mase vozila, aerodinamiku, pogonski sustav, kočnice, upravljanje, ovjes, pneumatike i što god je dalje potrebno.



Slika 32. Prikaz skupa podataka vozila u CarSimu

6.4.1. Definiranje ovješene mase

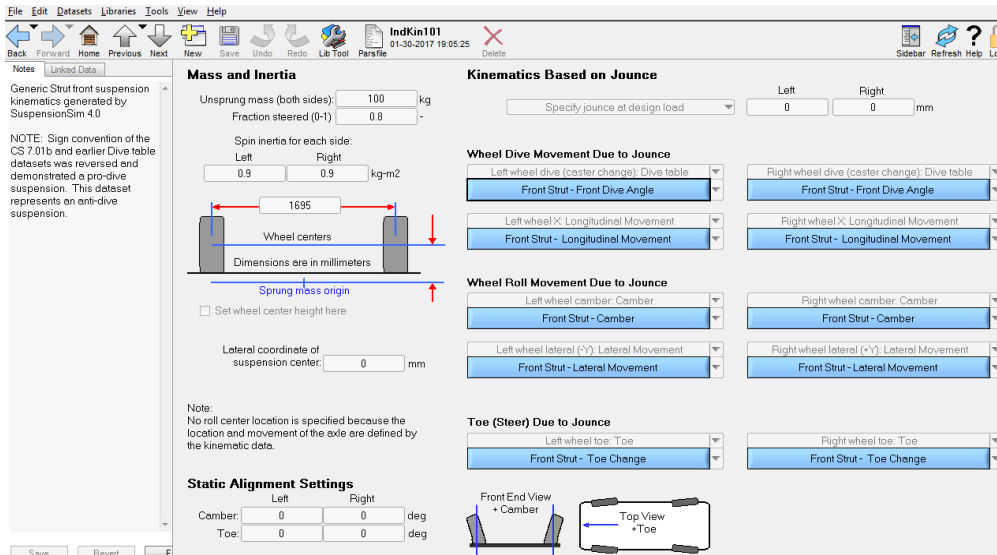
Odabirom skupa podataka vezanog uz ovještenu masu (Slika 33.) otvara se prozor u kojem je moguće definirati iznos ovještene mase, položaj težišta, međuosovinski razmak, momente inercije vozila i slično.



Slika 33. Prikaz prozora za definiranje ovješene mase

6.4.2. Definiranje ovjesa vozila

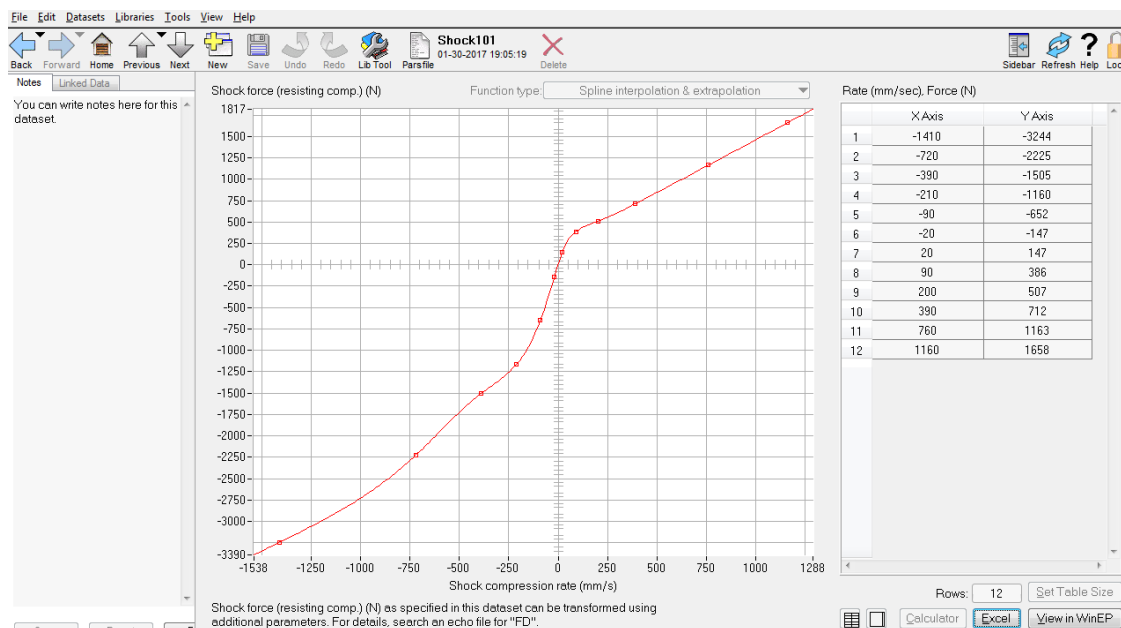
Omogućena je definicija nekoliko vrsta ovjesa: nezavisni ovjes, kruta osovinu te torzijska opruga. Parametri koje je moguće definirati su širina traga kotača, usmjerenost kotača i bočni nagib kotača.



Slika 34. Prikaza definiranja parametara ovjesa

6.4.3. Definiranje opružno prigušnih karakteristika

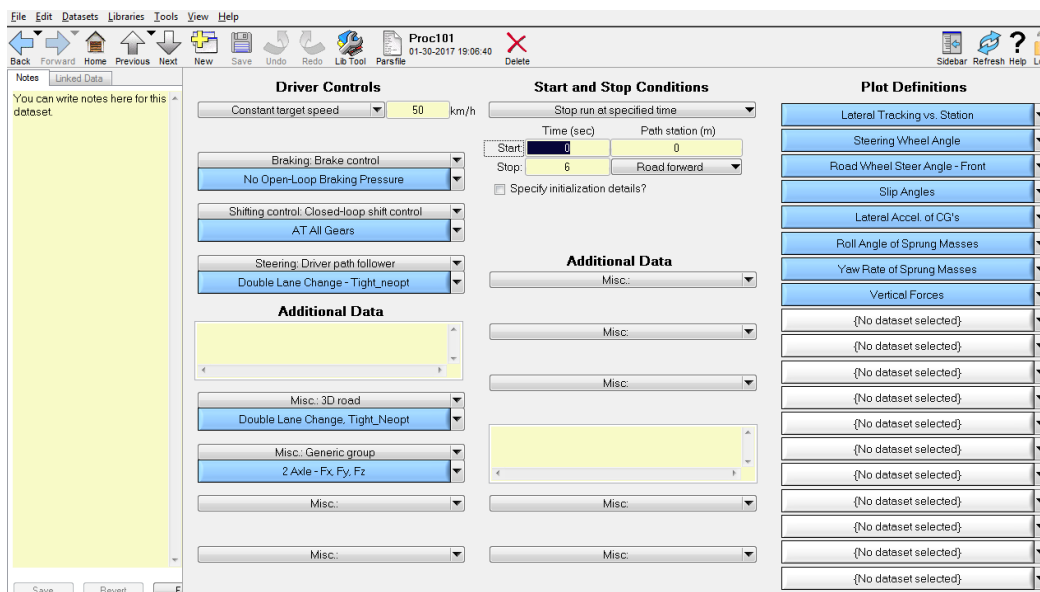
Definiranje opruga najjednostavnije je korištenjem linearne karakteristike, no ukoliko je to potrebno oprugu je moguće definirati na bilo drugi način. Što se tiče prigušne karakteristike amortizera ona je najčešće zadana tablično i prikazana grafom (Slika 35.).



Slika 35. Prikaz prigušne karakteristike amortizera

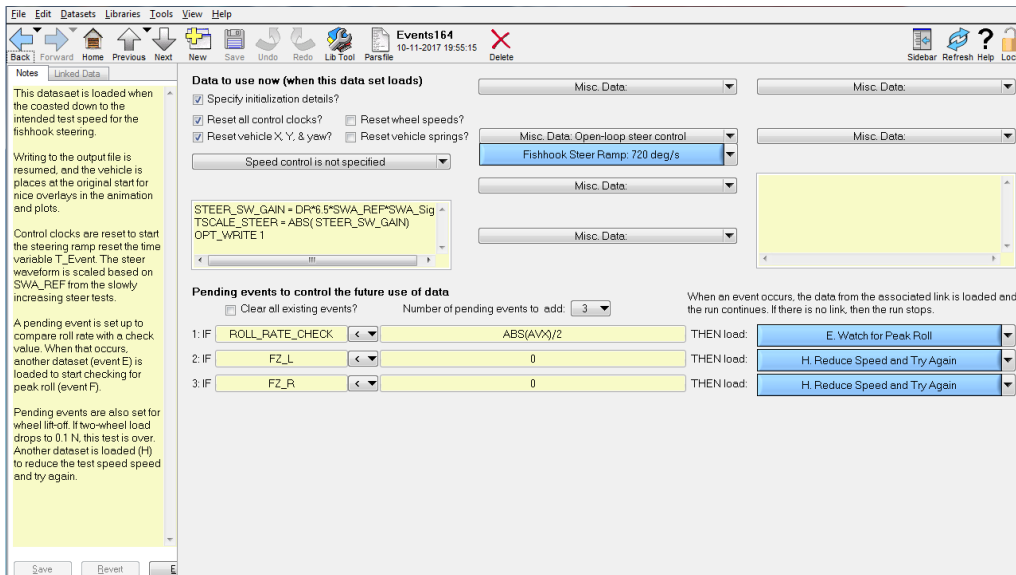
6.5. Definiranje ispitne procedure

Ispitne procedure definiraju se kao slijed događaja (*Engl. Event*) odnosno koraka te se za svaki korak zadaju posebni parametri. Tako se tu definira putanja vozila, profil brzina, ubrzanje i usporenje vozila, stupanj prijenosa, koraci procedure ako postoje, uvjeti koje vozilo mora zadovoljiti prilikom svakog izvođenja procedure, putanja koju vozilo pokušava pratiti, model vozača, svojstva poligona i slično. Također ovdje se zadaje koji će se podaci bilježiti i koristiti kasnije za analizu (Slika 36.).



Slika 36. Prikaz definiranja ispitne procedure

Na slici (Slika 37.) prikazano je definiranje uvjeta i načina izvođenja glavnog dijela ispitne procedure „Fishhook“. Tako je zadan kut zakreta upravljača koji se postiže zadanom brzinom a koji je ovisan o kutu zakreta upravljača dobiven u prijašnjem dijelu ispitne procedure odnosno prethodno događaju (*engl. Eventu*). Također je i zadano koje parametre program promatra i kako dalje teče simulacija na osnovi rezultata.



Slika 37. Definiranje ispitne procedure „Fishhook“

7. SIMULACIJA ISPITNIH PROCEDURA

U programskom paketu CarSim simulirane su tri već spomenute ispitne procedure (u poglavlju 2.) vezane za stabilnost vozila, odabrane po kriteriju značaja za stabilnost vozila.

7.1. Vozilo korišteno u simulacijama

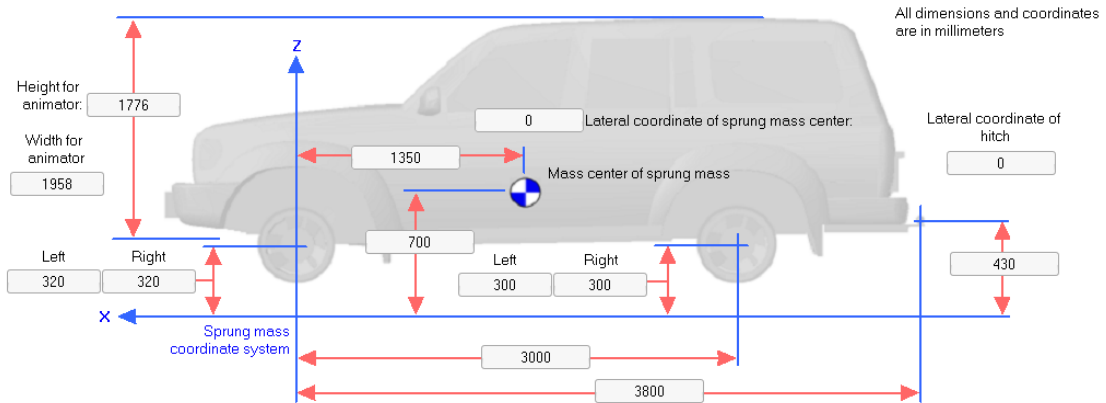
Odabrano vozilo korišteno u simulacijama je osobno cestovno vozilo kategorije M1 te monovolumenske karoserijske izvedbe, tj. prema kategorizaciji Europske komisije [12.] vozilo spada u M segment, višenamjensko vozilo (*engl. MPV- Multi purpose vehicles*). (Slika 38.)



Slika 38. Ford C-max i primjer M segmenta vozila iz programskog paketa CarSim

7.1.1. Masa i dimenzije vozila

Masa neovješene masa vozila iznosi 1800 kg, nosivost vozila je 450 kg, dinamički moment inercije oko uzdužne osi iznosi 1152 kgm^2 , oko poprečne osi 3528 kgm^2 te oko vertikalne kgm^2 (karakteristike vozila preuzete su direktno iz programskog paketa *CarSim*). Osnovne dimenzije vozila potrebne za simulaciju, te položaj težišta prikazani su na slici (Slika 39).



Slika 39. Osnovne dimenzije vozila u programskom paketu CarSim

7.1.2. Karakteristike ovjesa

Karakteristike prednjeg ovjesa prikazane su na slici (Slika 40.), a karakteristike stražnjeg ovjesa (Slika 41.). Vidljivo je sa slike kako je moguće mijenjati neovješenu masu, krutost opruga, karakteristike amortizera, bočni nagib kotača, usmjerenost kotača te sve ostale bitne karakteristike ovjesa vozila.

Mass and Inertia

Unsprung mass (both sides): 100 kg
 Fraction steered (0-1): 0.8

Spin inertia for each side:
 Left: 0.9 kg-m²
 Right: 0.9 kg-m²

Wheel centers: 1695 mm
 Dimensions are in millimeters

Sprung mass origin

Set wheel center height here

Lateral coordinate of suspension center: 0 mm

Note: No roll center location is specified because the location and movement of the axle are defined by the kinematic data.

Static Alignment Settings

	Left	Right	
Camber:	0	0	deg
Toe:	0	0	deg

Kinematics Based on Jounce

Specify jounce at design load

	Left	Right	
	0	0	mm

Wheel Dive Movement Due to Jounce

Left wheel dive (caster change): Dive table	Right wheel dive (caster change): Dive table
Front Strut - Front Dive Angle	Front Strut - Front Dive Angle
Left wheel X: Longitudinal Movement	Right wheel X: Longitudinal Movement
Front Strut - Longitudinal Movement	Front Strut - Longitudinal Movement

Wheel Roll Movement Due to Jounce

Left wheel camber: Camber	Right wheel camber: Camber
Front Strut - Camber	Front Strut - Camber
Left wheel lateral (+Y): Lateral Movement	Right wheel lateral (+Y): Lateral Movement
Front Strut - Lateral Movement	Front Strut - Lateral Movement

Toe (Steer) Due to Jounce

Left wheel toe: Toe	Right wheel toe: Toe
Front Strut - Toe Change	Front Strut - Toe Change

Ssprings

Internal springs only

Left Spring Alone: 31 N/mm

Right Spring Alone: 31 N/mm

Upper spring seat height adjustment: 0 mm

Shock Absorbers (Dampers)

Left shock absorber: Shock absorber: Small SUV Damping

Right shock absorber: Shock absorber: Small SUV Damping

Jounce / Rebound Stops

Left jounce / rebound stops: +80 mm / -60 mm

Right jounce / rebound stops: +80 mm / -60 mm

Mechanical ratios: component compression / suspension jounce

	Left	Right
Springs:	0.959	0.959
Dampers:	0.965	0.965
Jounce stops:	0.965	0.965
Rebound stops:	0.965	0.965

Auxiliary Roll Moment

Roll moment: Aux: Roll Moment: Linear 384 N-m/deg

Auxiliary roll damping: 0 N-m sec/deg

Compliance Coefficients

	Left	Right	
Toe vs Fx:	0.43e-6	0.43e-6	deg/N
Steer vs Fy:	-0.27e-6	-0.27e-6	deg/N
Steer vs Mz:	0.38e-4	0.38e-4	deg/(N-m)
Camber vs Fx:	0	0	deg/N
Inclination vs Fy:	0	0	deg/N
Inclination vs Mz:	0	0	deg/(N-m)

Longitudinal displacement vs Fx: 5.0e-5 mm/N

Lateral displacement vs Fy: 4.1e-5 mm/N

Front End View + Camber

Top View + Toe

When measuring suspension compliance effects, measurements should be made with identical Fx inputs on the left and right wheels (parallel). Measurements are typically made with Fy and Mz on the two sides opposed.

For the right-side wheel, toe = steer and camber = inclination. For the left side, toe = -steer and camber = -inclination.

Slika 40. Karakteristike prednjeg ovjesa vozila

Mass and Inertia

Unsprung mass (both sides): 100 kg
 Fraction steered (0-1): 0.1

Spin inertia for each side:
 Left: 0.9 kg-m² Right: 0.9 kg-m²

Wheel centers: 1775 mm
 Dimensions are in millimeters

Spring mass origin
 Set wheel center height here

Lateral coordinate of suspension center: 0 mm

Note:
 No roll center location is specified because the location and movement of the axle are defined by the kinematic data.

Static Alignment Settings

	Left	Right	deg
Camber:	0	0	
Toe:	0	0	

Kinematics Based on Jounce

Specify jounce at design load: Left: 0 Right: 0 mm

Wheel Dive Movement Due to Jounce

Left wheel dive (caster change): Dive table
 Rear 5-Link - No Dive

Right wheel dive (caster change): Dive table
 Rear 5-Link - No Dive

Left wheel X Longitudinal Movement
 Rear 5-Link - Longitudinal Movement

Right wheel X Longitudinal Movement
 Rear 5-Link - Longitudinal Movement

Wheel Roll Movement Due to Jounce

Left wheel camber: Camber
 Rear 5-Link - Camber Change

Right wheel camber: Camber
 Rear 5-Link - Camber Change

Left wheel lateral (±Y) Lateral Movement
 Rear 5-Link - Lateral Movement

Right wheel lateral (±Y) Lateral Movement
 Rear 5-Link - Lateral Movement

Toe (Steer) Due to Jounce

Left wheel toe: Toe
 Rear 5-Link - Toe Change

Right wheel toe: Toe
 Rear 5-Link - Toe Change

Front End View +Camber
 Top View +Toe

Ssprings

Internal springs only

Left Spring Alone: 50 N/mm
 Right Spring Alone: 50 N/mm

Upper spring seat height adjustment: Left: 0 Right: 0 mm

Shock Absorbers (Dampers)

Left shock absorber: Shock absorber
 Small SUV Damping

Right shock absorber: Shock absorber
 Small SUV Damping

Jounce / Rebound Stops

Left jounce / rebound stops: +70 mm / -50 mm
 Right jounce / rebound stops: +70 mm / -50 mm

Mechanical ratios: component compression / suspension jounce

	Left	Right
Springs	0.797	0.797
Dampers	0.797	0.797
Jounce stops	0.797	0.797
Rebound stops	0.797	0.797

Auxiliary Roll Moment

Roll moment: Aux. Roll Moment
 Linear 344 N-m/deg

Auxiliary roll damping: 0 N-m sec/deg

Compliance Coefficients

	Left	Right	deg/N
Toe vs Fx:	0	0	
Steer vs Fy:	-0.10e-6	-0.10e-6	
Steer vs Mz:	0.190e-4	0.190e-4	
Camber vs Fx:	0	0	
Inclination vs Fy:	2.9e-5	2.9e-5	
Inclination vs Mz:	0	0	

Longitudinal displacement
 vs Fx: 7e-5 7e-5 mm/N

Lateral displacement
 vs Fy: 3.8e-5 3.8e-5 mm/N

Front End View +Camber
 Top View +Toe

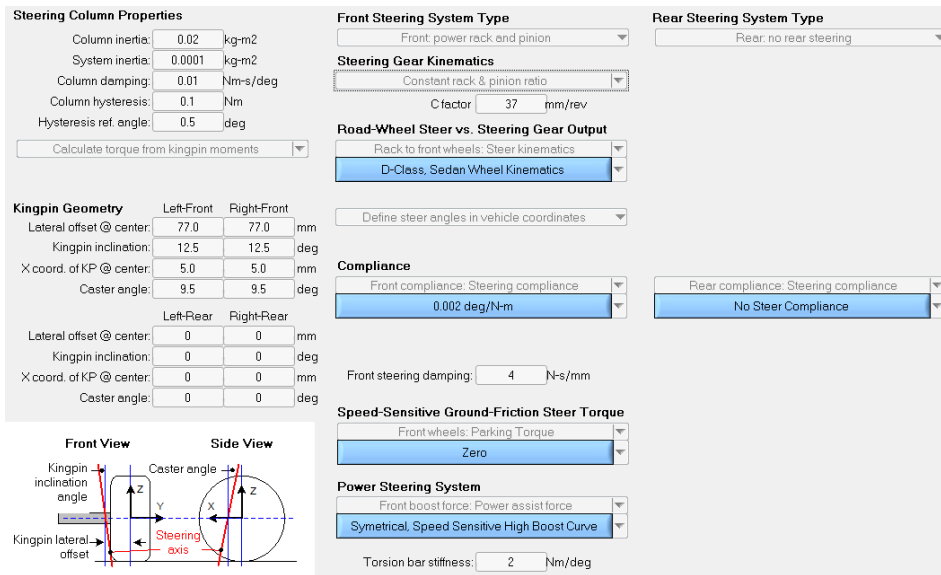
When measuring suspension compliance effects, measurements should be made with identical Fx inputs on the left and right wheels (parallel). Measurements are typically made with Fy and Mz on the two sides opposed.

For the right-side wheel, toe = steer and camber = inclination. For the left side, toe = -steer and camber = -inclination.

Slika 41. Karakteristike stražnjeg ovjesa vozila

7.1.3. Karakteristike upravljačkog mehanizma

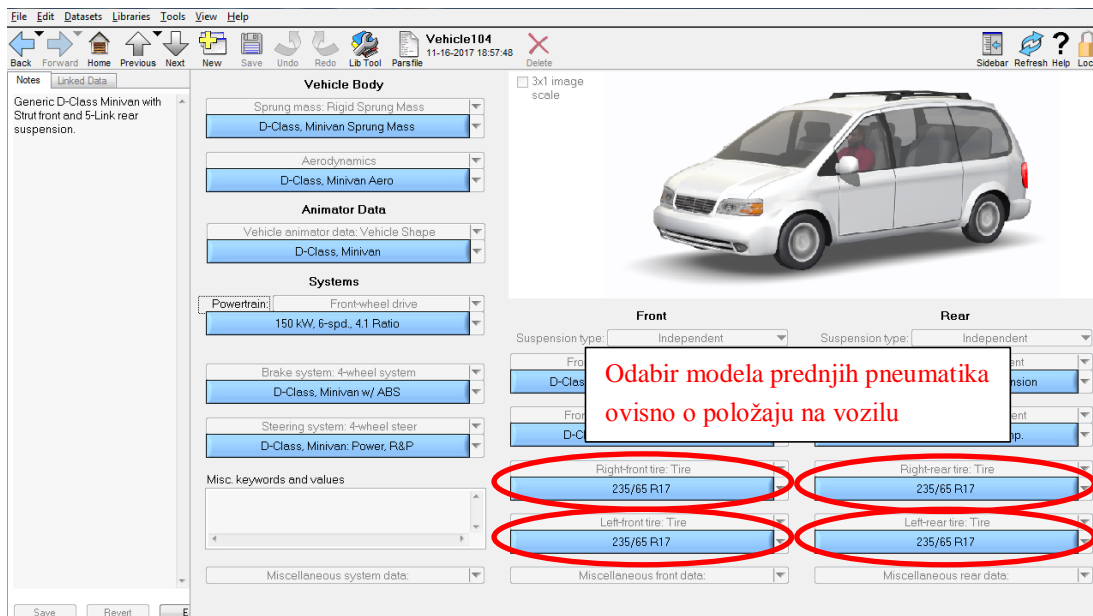
Karakteristike upravljačkog sustava prikazane su na slici (Slika 42.). U ovom prozoru moguće je podešavanje karakteristika upravljačkog stupa te geometriju spoja upravljača sa ovjesom.



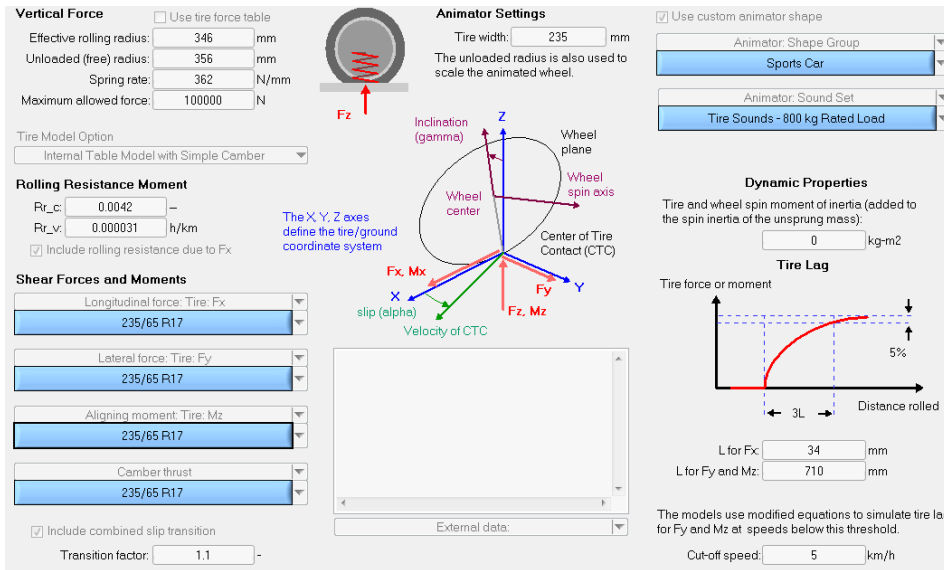
Slika 42. Karakteristike upravljačkog sustava

7.1.4. Karakteristike pneumatika

Karakteristike pneumatika nalaze se na slici (Slika 44). Ovdje je moguće korigirati podatke vezane uz dimenzije pneumatika, otpor kotrljanja, dinamički radijus kotača i radijus neopterećenog kotača kao i dinamičke karakteristike pneumatika.



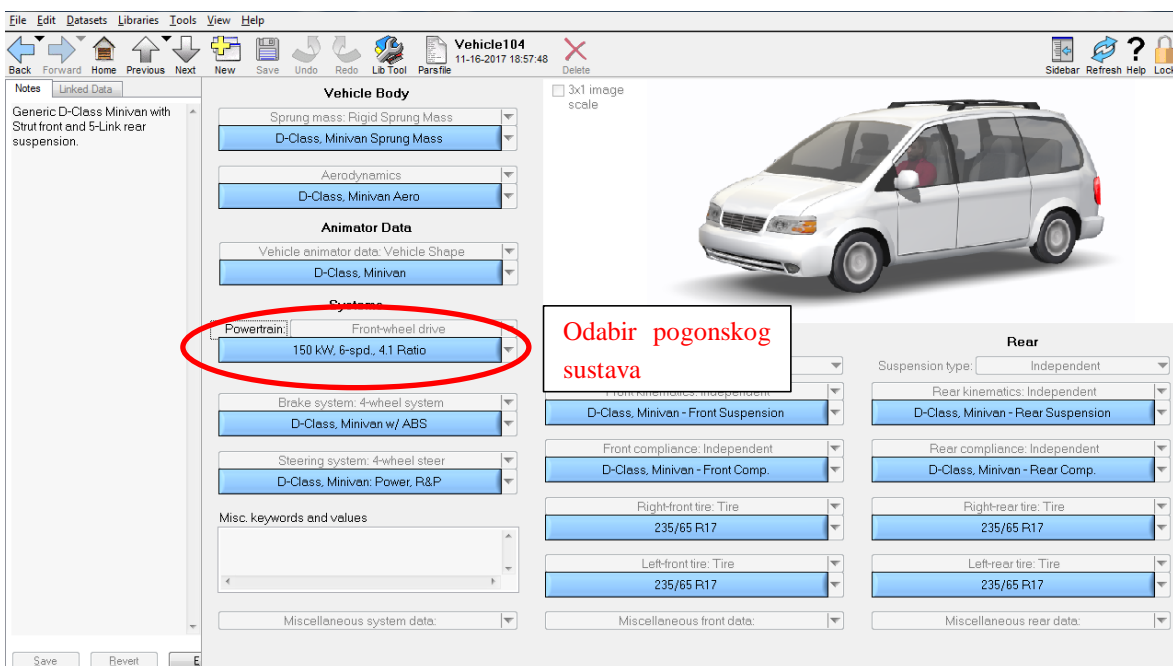
Slika 43. Glavni prozor modela vozila



Slika 44. Karakteristike pneumatika

7.1.5. Pogonski sustav

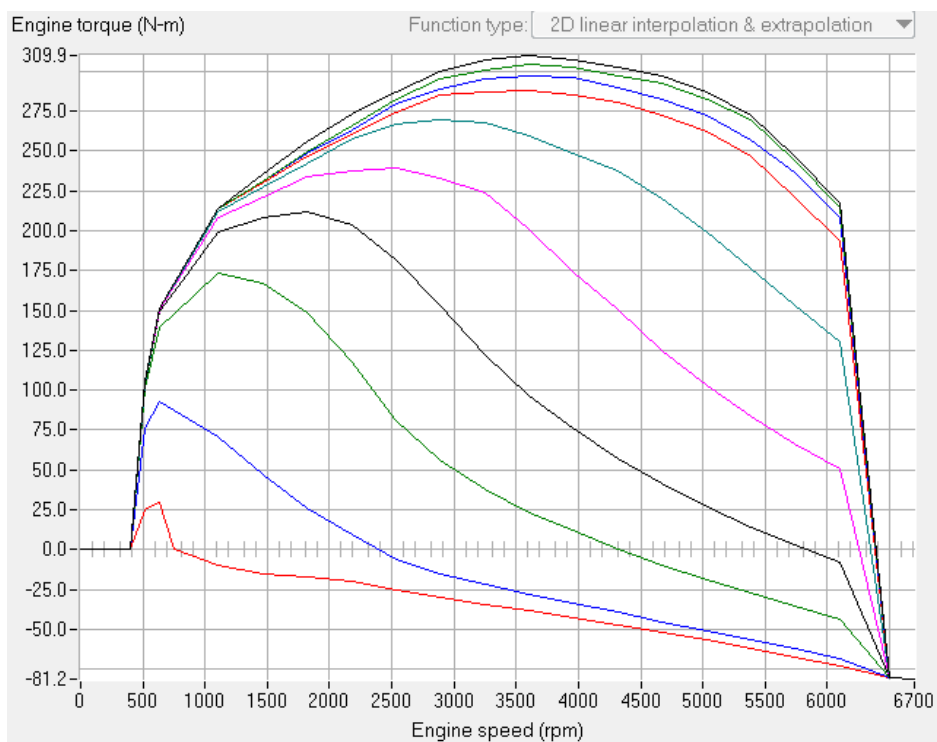
Pogonski sustav sastoji se od motora maksimalne snage 150 kW, 6 stupanjskog mjenjača te diferencijala čiji prijenosni omjer iznosi 4,1. Karakteristika mjenjača nalazi se u tablici na slici (Slika 46.), a momentna karakteristika motora na dijagramu (Slika 47.)



Slika 45. Glavni prozor modela vozila

6 Forward gears		Efficiencies	
	Gear Ratio	Inertia	
			Driving Coasting
R:	-3.168	0.034	0.9 0.9
N:		0.034	
1:	3.538	0.037	0.92 0.92
2:	2.06	0.034	0.92 0.92
3:	1.404	0.042	0.95 0.95
4:	1.00	0.04	0.95 0.95
5:	0.713	0.04	0.98 0.98
6:	0.582	0.04	0.99 0.99

Slika 46. Karakteristika mjenjača



Slika 47. Momentna karakteristika motora

7.2. USPOREDBA SIMULIRANE PROCEDURE I TESTA U STVARNIM UVJETIMA

U izvještaju Instituta za automobilsku industriju iz Aachena (*njem. Institut für Kraftfahrwesen Aachen*) broj 8329 ispitna procedura za regulatore dinamike vozila (*engl. A test procedure for vehicle dynamic controllers*) [11.] izmjerene su dinamičke karakteristike dvaju vozila, Mercedes-Benza A klase (A160) i BMW-a 330xi, te su provedena stvarna ispitivanja ispitnim procedurama, među kojima je i Dvostruka izmjena pravca ISO 3888-2:2011 koja je razmatrana u ovome radu. Također je u ovome izvještaju napravljena i simulacija istih procedura te su rezultati uspoređeni s rezultatima dobiveni na stvarnim ispitivanjima.

7.2.1. Usporedba vozila iz izvještaja IKA-e¹ s odabranim vozilom u ovom radu

Budući da vozila razmatrana u izvještaju ne odgovaraju promatranom vozilu kategorijom niti karakteristikama odabrano je vozilo sa sličnijim karakteristikama, točnije BMW 330xi. Usporedba karakteristika BMW-a, Mercedes-Benza i vozila promatranog u ovome radu nalazi se u tablici (Tablica 4.).

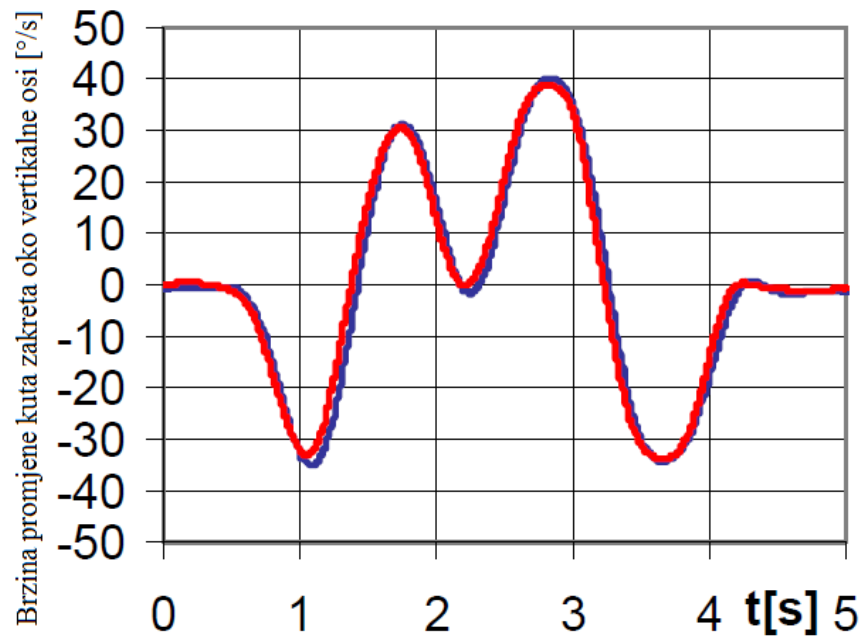
¹ IKA – Institut za automobilsku industriju iz Aachena

Tablica 4. Usporedba vozila BMW 330xi i referentnog vozila promatranog u ovom radu [11.]

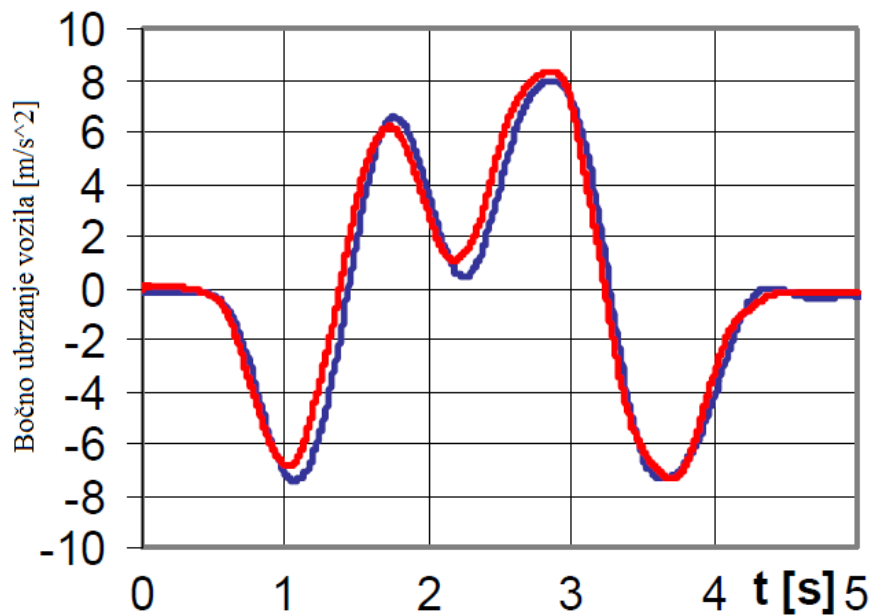
Karakteristika	BMW 330xi	Mercedes-Benz A160	Referentno vozilo simulacije
Međuosovinski razmak	2725 mm	2423 mm	3000 mm
Trag prednjih kotača	1471 mm	1492 mm	1695 mm
Trag stražnjih kotača	1478 mm	1426 mm	1775 mm
Dinamički radijus kotača	300,5 mm	280 mm	346 mm
Masa vozila	1725 kg	1245 kg	1800 kg
Udaljenost prednje osovine od težišta	1365 mm	1100 mm	1350 mm
Udaljenost stražnje osovine od težišta	1360 mm	1323 mm	1650 mm
Visina težišta	493 mm	580 mm	700 mm

7.2.2. Rezultati izvještaja

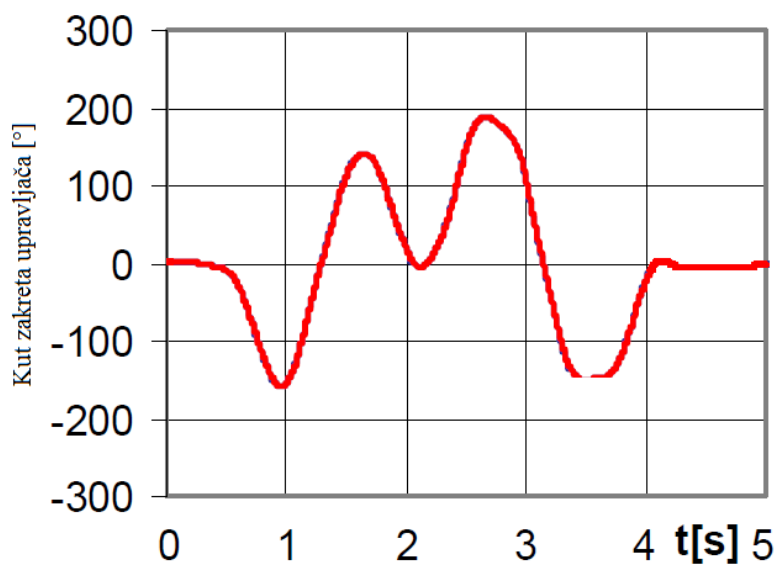
U IKA-inom izvještaju su dijagramski prikazani rezultati dobiveni ispitivanjem vozila zajedno s rezultatima simulacija. Prikazani su kut zakreta upravljača, bočno ubrzanje, brzina kuta zakreta oko vertikalne osi te kut zakreta oko uzdužne osi.



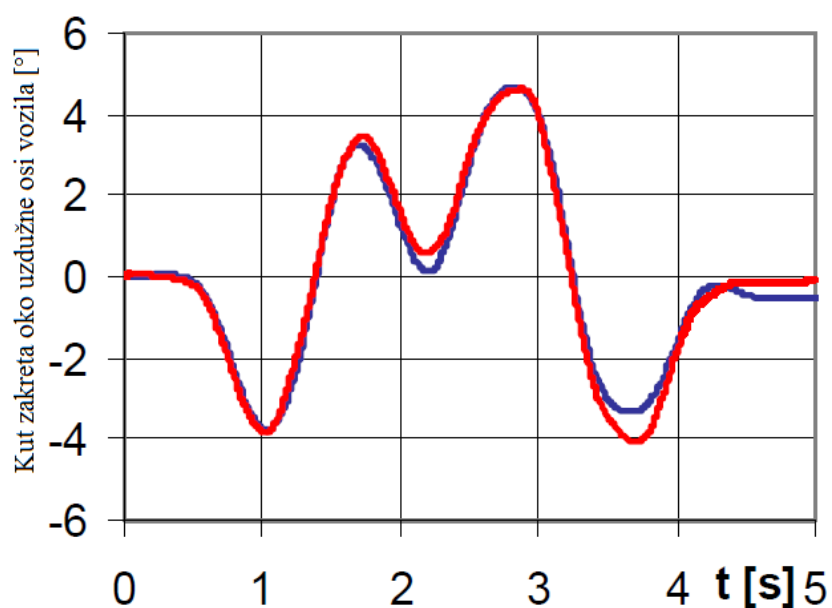
Slika 48. Brzina promjene kuta zakreta oko vertikalne osi; Crveno - rezultati IKA simulacije, Plavo - rezultati stvarnog ispitivanja



Slika 49. Bočno ubrzanje vozila; Crveno - rezultati IKA simulacije, Plavo - rezultati stvarnog ispitivanja



Slika 50. Kut zakreta upravljača; Crveno - rezultati IKA simulacije, Plavo - rezultati stvarnog ispitivanja



Slika 51. Kut zakreta vozila oko uzdužne osi; Crveno - rezultati IKA simulacije, Plavo - rezultati stvarnog ispitivanja

Kako je vidljivo na navedenim dijagramima (Slika 48., Slika 49., Slika 50., Slika 51.) rezultati stvarnih ispitivanja poprilično odgovaraju rezultatima simulacija. Najmanja odstupanja vidljiva su kod brzine promjene kuta zakreta oko vertikalne osi (*engl. Yaw*) te kod kuta zakreta upravljača.

Veća odstupanja vidljiva su kod kuta zakreta vozila oko uzdužne osi (*engl. Roll*) i kod bočnog ubrzanja vozila. Razlog većim razlikama leži u nesavršenosti modela vozila s stvarnim vozilom.

Iako rezultati stvarnog vozila i simuliranog modela ne odgovaraju u potpunosti, vidljivo je iz dijagrama kako se većim dijelom rezultati simulacijskog modela preklapaju s rezultatima stvarnog vozila te da se tek pri vršnim vrijednostima određenih veličina mogu pronaći razlike. Ovime se zaključuje da simulacija može kvalitetno reprezentirati rezultate koje bi ostvarilo slično vozilo.

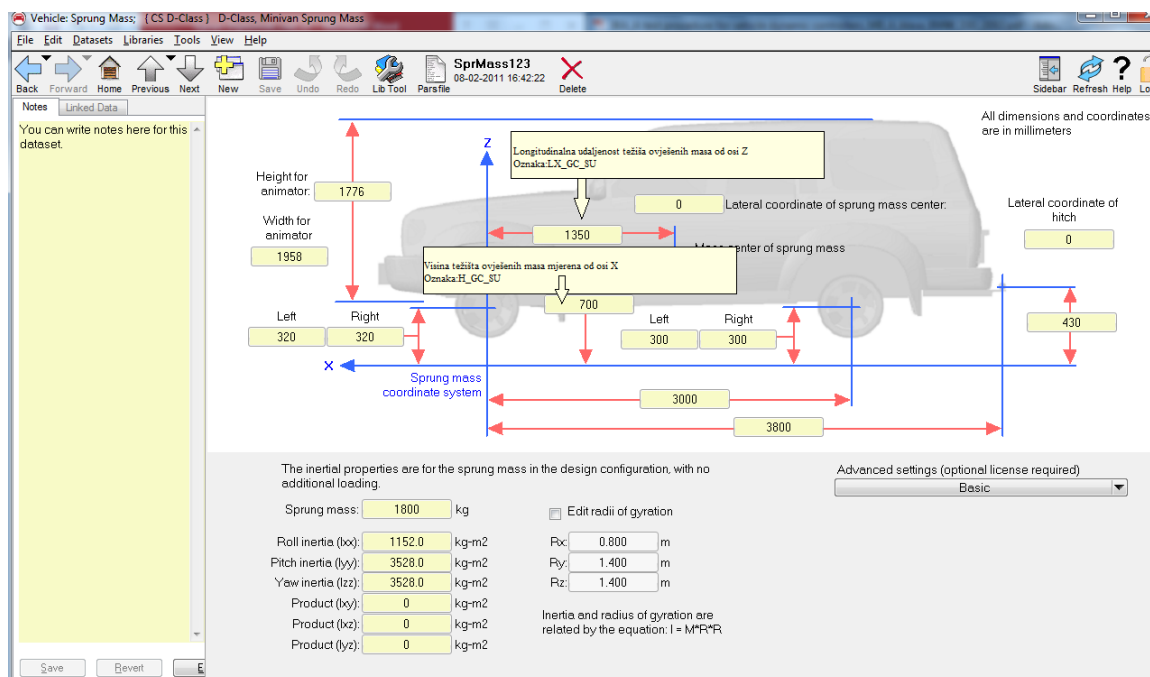
7.3. Parametri mijenjani tijekom simulacija

Parametri koji su mijenjani su sljedeći:

- pomak težišta u horizontalnom smjeru,
- pomak težišta u vertikalnom smjeru,
- promjena vrste pogona (ne kod ispitne procedure kočenje u zavoju),
- krutost opruga,
- širina profila pneumatika,
- upravljanje i stražnjim kotačima,
- teret na krovu,
- teret u prtljažniku.

7.3.1. Pomak težišta u horizontalnom i vertikalnom smjeru

Pomak težišta u vertikalnom i horizontalnom smjeru jednostavno je mijenjan u izborniku namijenjenom za definiranje ovješanih masa. Na slici (Slika 52.) prikazan je prozor u kojem je mijenjan položaj težišta u horizontalnom i vertikalnom smjeru.

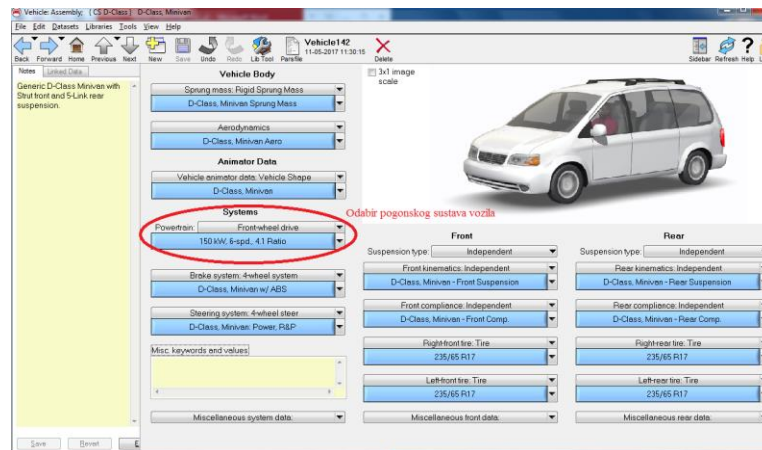


Slika 52. Prikaz prozora u kojem je mijenjan položaj težišta

Položaj težišta mijenjan je za 25 % sa korakom od 5 %, za horizontalni smjer prema stražnjoj strani jer je za očekivati da će se dodavanjem tereta težište pomicati prema stražnjoj strani vozila te povećanjem visine težišta u vertikalnom smjeru jer je veća mogućnost povećanje visine težišta dodavanjem tereta na krov vozila.

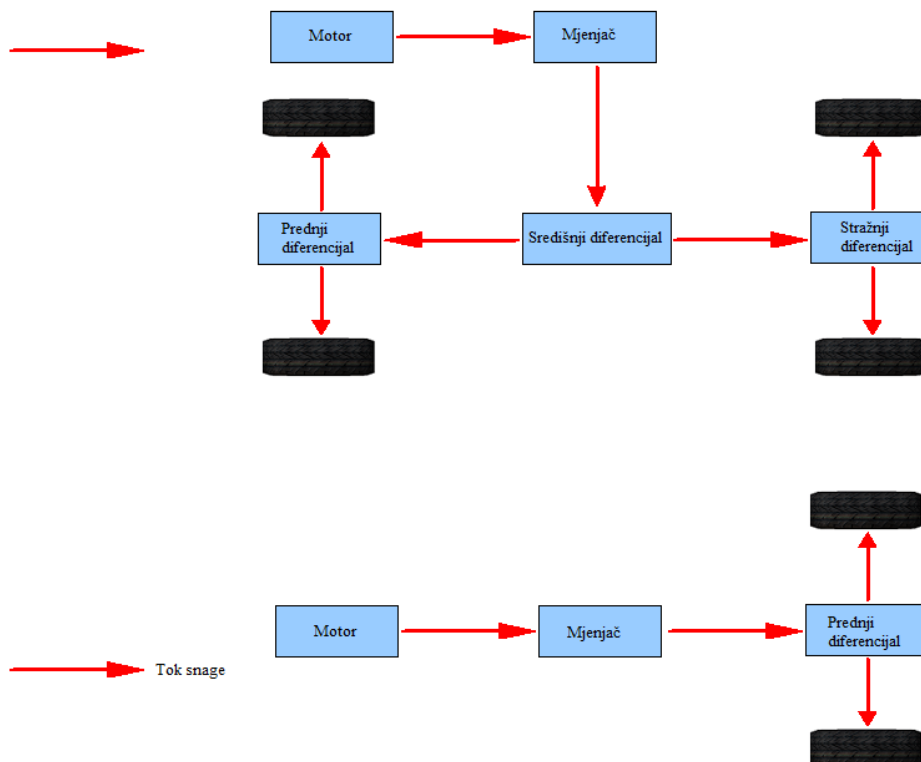
7.3.2. Promjena vrste pogona

U simulaciji mijenjane su tri vrste pogona: pogon na prednje kotače, pogon na stražnje kotače i pogon na sva četiri kotača. U biblioteci vozila odabrana je vrsta pogonskog sustava ovisno o provedenoj simulaciji te je prema tome prilagođen cijeli pogonski sustav (Slika 53.).



Slika 53. Prozor u kojem se odabire pogonski sustav vozila

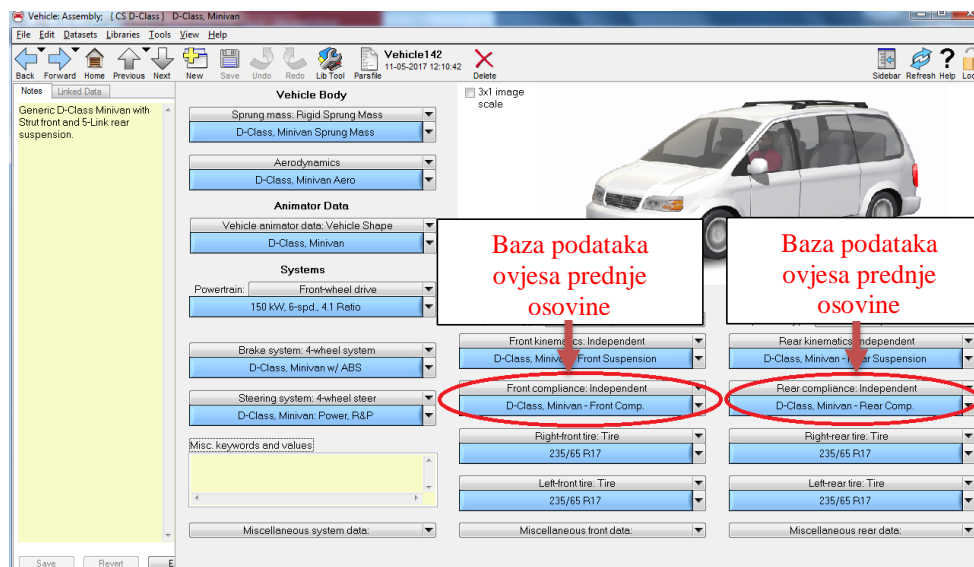
Također izmjenom vrste pogona izmijenjen je i tok snage. (Slika 54.) prikazuje dijagramski tok snage za vozilo s pogonom na prednje kotače i pogonom na sva četiri kotača.



Slika 54. Prikaz toka snage za vozilo s pogonom na 4 kotača i s pogonom na prednje kotače

7.3.3. Promjena krutosti opruga

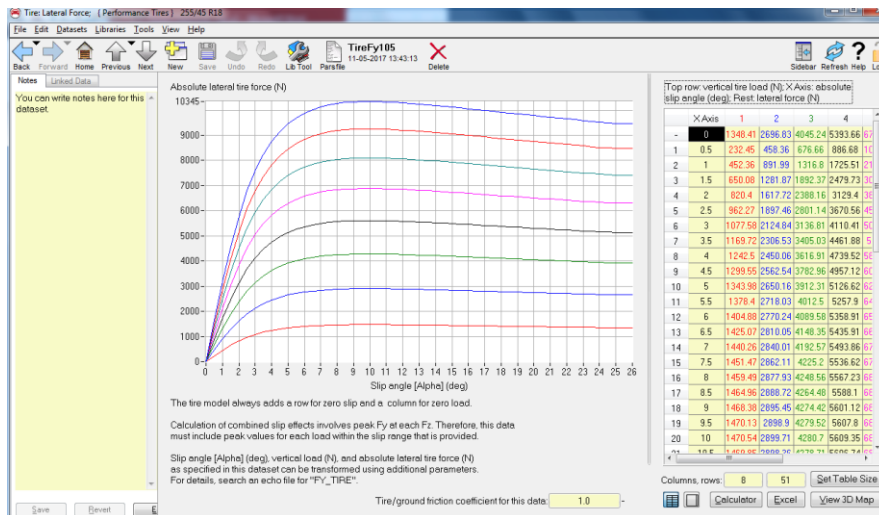
Krutost opruga mijenjana je u bazi podataka vezanoj za prednji i stražnji ovjes vozila. Vrijednost krutosti opruga mijenjana je za $\pm 25\%$ i $\pm 50\%$. Slika (Slika 55.) prikazuje prozor biblioteke o vozilo i mjesto na kojem je moguće doći do baze podataka prednjeg i stražnjeg ovjesa vozila.



Slika 55. Prozor biblioteke vozila i mjesto gdje se odabire baza podataka za prednji i stražnji ovjes vozila

7.3.4. Širina profila pneumatika

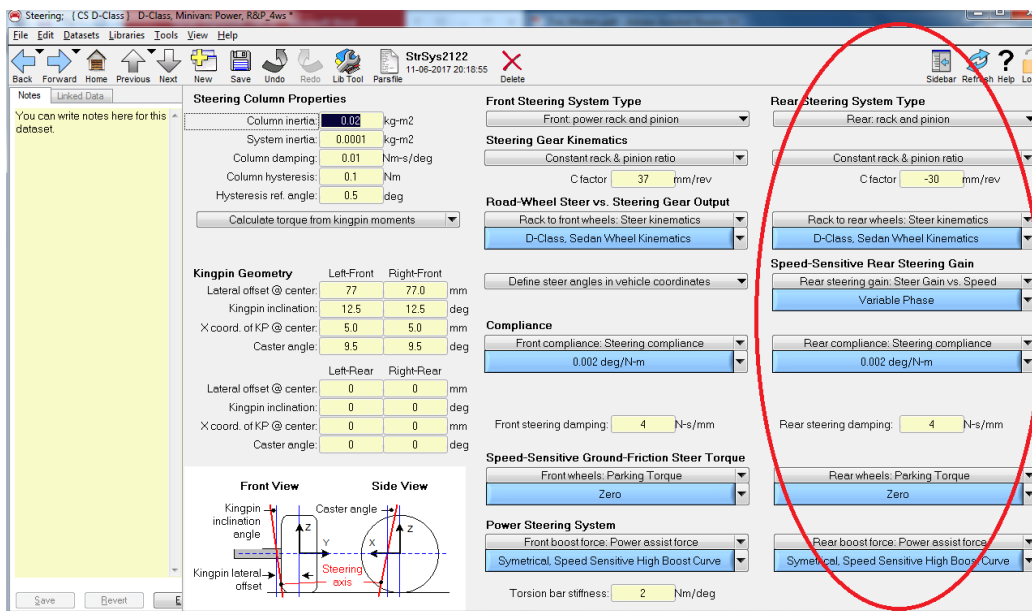
Odabrane su, uz standardne pneumatike (235/65 R17), još tri dodatna profila i to su dimenzija: 175/65 R14, 265/70 R17 i 255/45 R18. Kao i do sada u biblioteci vozila odabran je pneumatik za svaki kotač posebno, s time da je svako od četiri simulirana vozila imalo različit set pneumatika. Model pneumatika je takav da su definirane dinamičke karakteristike pneumatika te, uz ostale podatke, iznosi bočnih i longitudinalnih sila ovisno o bočnom kutu i vertikalnom kutu klizanja ovisno o vertikalnom opterećenju (Slika 56.).



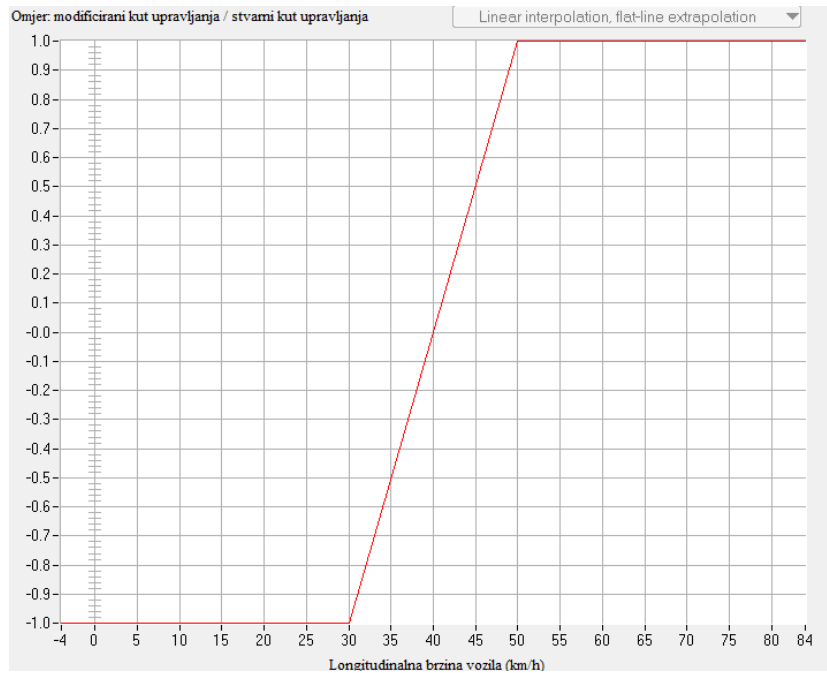
Slika 56. Iznos bočnih sila na pneumatik ovisno o bočnom kutu klizanja za različito vertikalno opterećenje

7.3.5. Upravljanje i stražnjim kotačima

U programskom paketu CarSim omogućeno je, u bazi podataka upravljačkog sustava vozila, kreiranje sustava za upravljanje i na stražnjoj osovini (Slika 57.). Za potrebe simulacije odabrano je upravljanje stražnjim kotačima preko zupčanika i zubne letve. Zakret kotača stražnje osovine ograničen je na maksimalno 5° te je osigurano zakretanje stražnjih kotača u suprotnom smjeru od prednjih pri manjim brzinama (ispod 30 km/h) i u istom smjeru kod većih brzina (50 km/h) (Slika 58.).



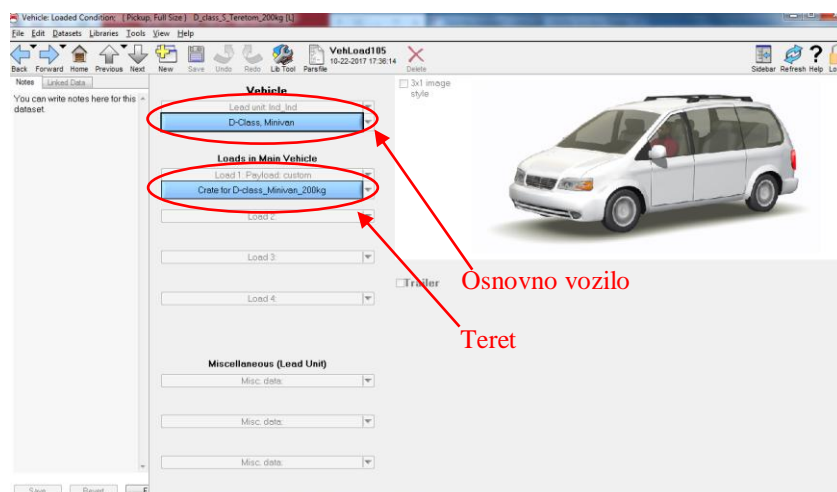
Slika 57. Definiranje upravljačkog sustava na stražnjoj osovini



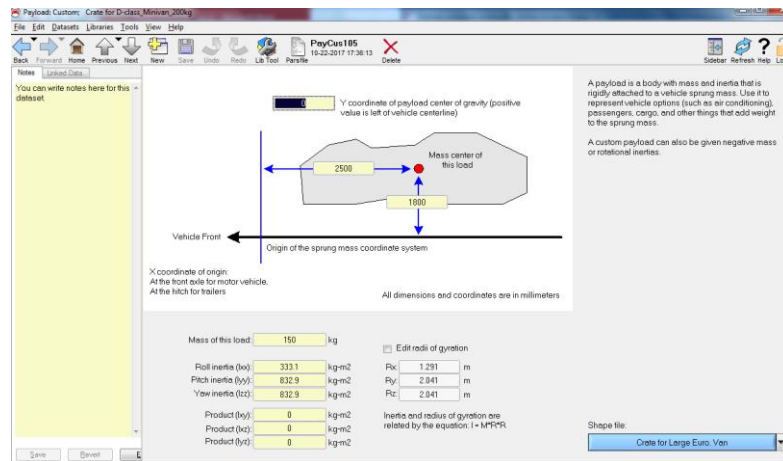
Slika 58. Dijagram ovisnosti multiplikatora kuta zakreta stražnjih kotača u ovisnosti o brzini vozila

7.3.6. Teret na krovu

Moguće je postaviti, u programskom paketu CarSim, slučajeve opterećenih vozila. Ovime je omogućeno postavljanje i više od jednog tereta odjednom na vozilo (Slika 59.). Prednost ovog načina je što nije potrebno ručno računati težište cijelog sustava i korigirati masu i dinamičke momente tromosti. Za teret na krovu odabrane su dvije mase: 75 kg i 150 kg



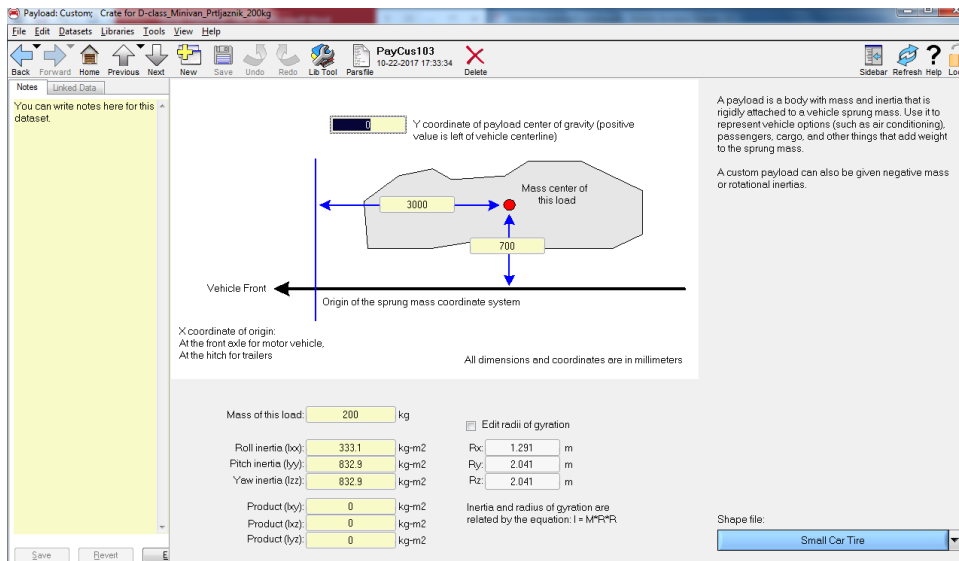
Slika 59. Postavljanje slučajeva opterećenja na vozilo



Slika 60. Definiranje dodatnog opterećenja na krovu

7.3.7. Teret u prtljažniku

Slično kao i u poglavlju 7.3.6. Teret na krovu definiran je teret u prtljažniku samo što su za ovaj slučaj odabrane mase opterećenja od 100 kg i 200 kg. Za položaj dodatnog opterećenja odabrano je središte prtljažnika, točnije 3000 mm od središta prednje osovine ().



Slika 61. Definiranje dodatnog opterećenja u prtljažniku

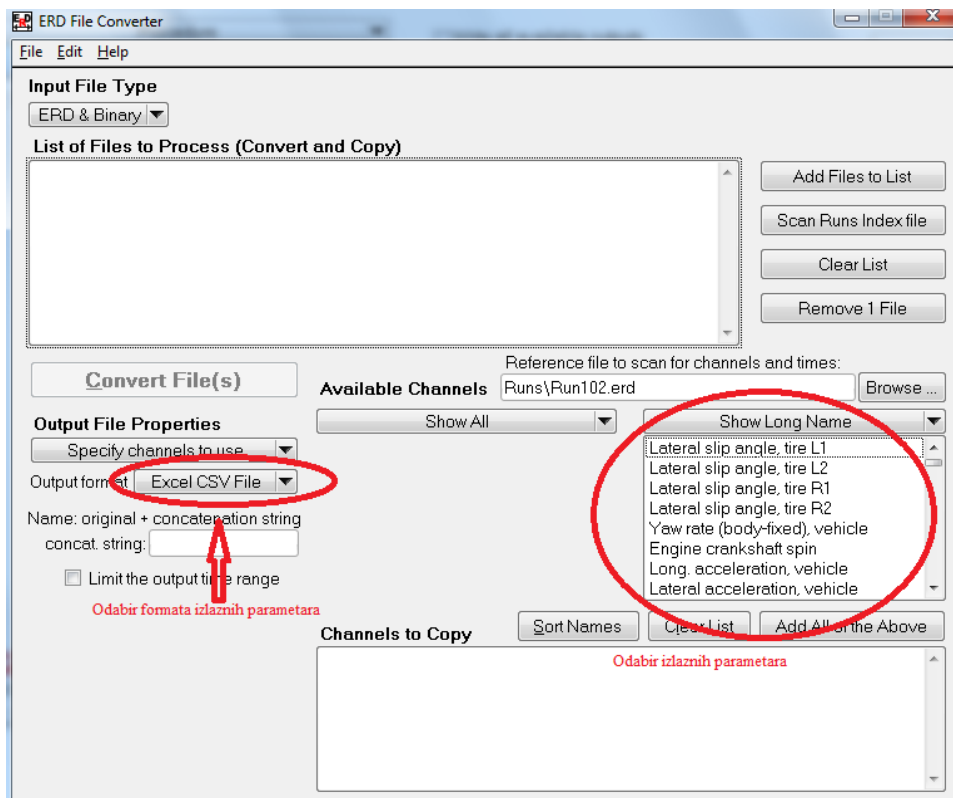
7.4. Način obrade podataka

Kako bi se olakšala obrada i tumačenje podataka dio procesa obrade podatak je automatiziran. Omogućeno je automatsko spremanje podataka nakon provedbe simulacije, automatsko otvaranje svakog seta podataka u Microsoft Excelu te automatska izrada dijagrama za svaki set podataka.

7.4.1. EDR pretvarač

EDR pretvarač (*engl. EDR File Converter*) sastavni je dio programskog paketa CarSim. Služi kao bi se izlazni podaci simulacija, standardno zapisani u binarnom zapisu, mogli konvertirati u format, s kojim je kasnije lakša manipulacija u nekom drugom programskom paketu (Microsoft Excel ili MATLAB). U ovome radu odabran je CSV format za Microsoft Excel (.csv).

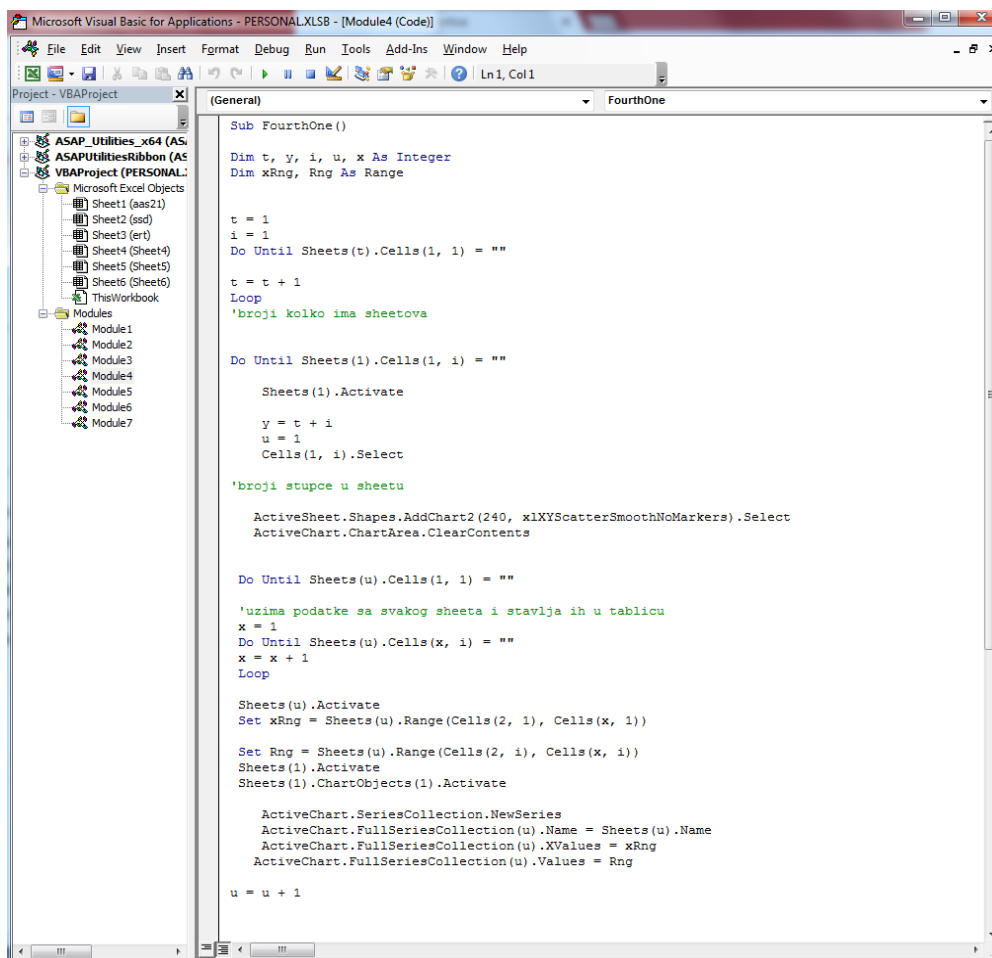
Na slici (Slika 62.) prikazano je sučelje EDR pretvarača u kojem se odabiru željeni izlaznih parametri (ovdje *Channels*) te željeni format zapisa izlaznih parametara.



Slika 62. Sučelje EDR pretvarača

7.4.2. Microsoft Excel i korištenje VBA (*Visual Basic for Applications*)

Kako je spomenuto u prethodnom zadatku program korišten za detaljnu obradu izlaznih podataka u ovome radi je Microsoft Excel te je korišten Visual Basic for Applications (VBA) kako bi se automatiziralo otvaranje svakog seta podataka posebno, kopiranje podatak istih izlaznih parametara za svaku proceduru te na kraju izrada grafa za svaku proceduru i svaki od ulaznih parametara. Na slici (Slika 63.) prikazano je prozor programa Visual Basic for Applications s dijelom koda za automatsku izradu grafova.



Slika 63. Izgled prozora VBA-a s dijelom koda za automatsku izradu grafova

8. ANALIZA REZULTATA

Svaka od 3 ispitne procedure simulirana je sukladno normama te su promatrani svi parametri propisani tim normama. No zbog velikog opsega rezultata i broja provedenih simulacija detaljno će biti prikazani samo rezultati na kojima su vidljive značajne razlike.

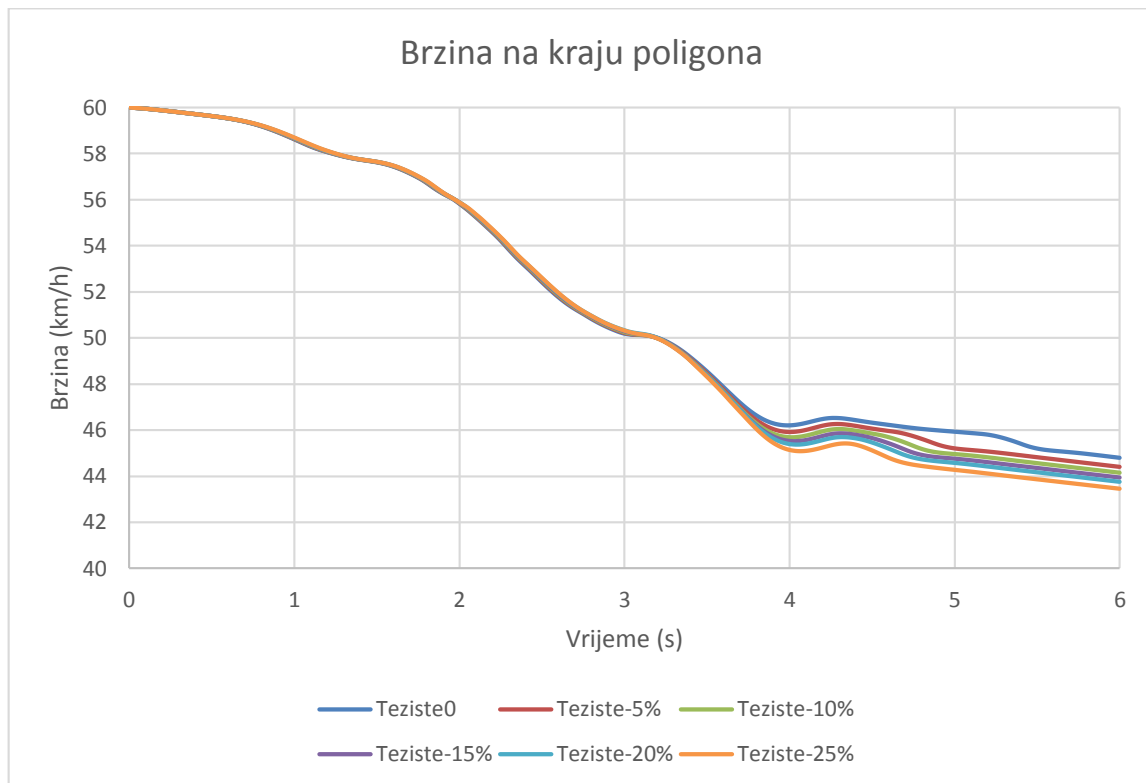
8.1. Dvostruka izmjena pravca (DLC)

Budući da se pri brzini od 50 km/h u nekim slučajevima ne vide značajne razlike, analiza rezultata bit će provedena za podatke dobivene za simulaciju prolaska vozila stazom pri početnoj brzini od 60 km/h.

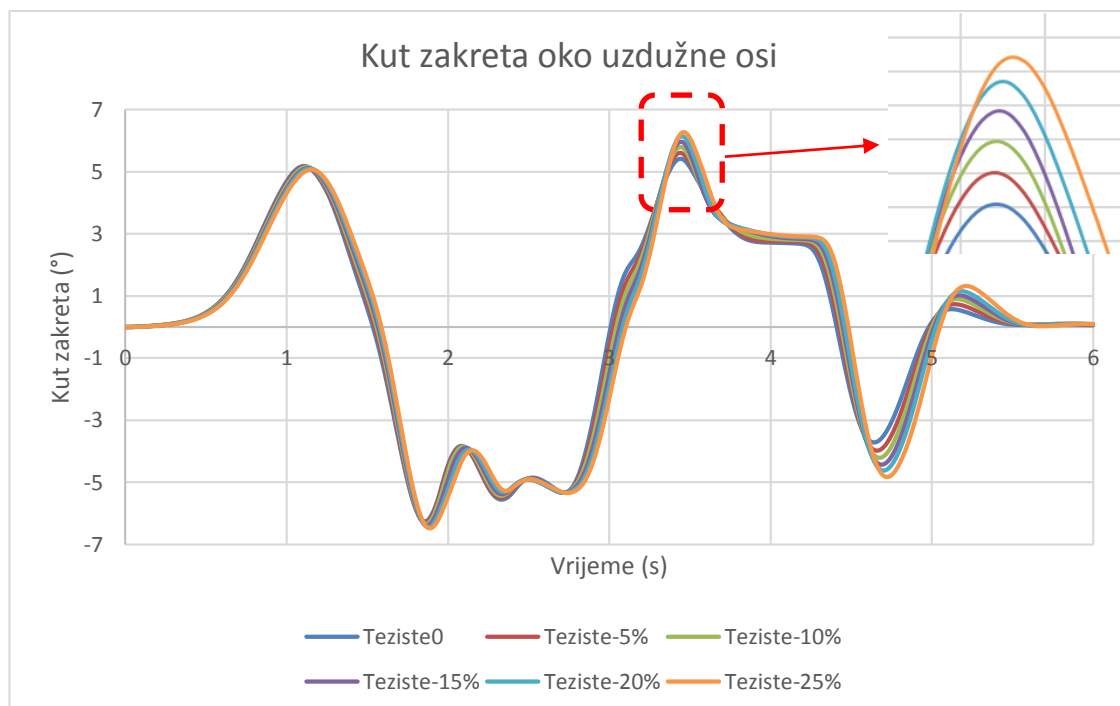
8.1.1. Promjena težišta u horizontalnom smjeru

Tablica 5. DLC Promjena težišta u horizontalnom smjeru, brzina na kraju poligona

Vozilo	Brzina na kraju poligona [km/h]
Standardno vozilo	44,80
Težište -5 %	44,40
Težište -10 %	44,16
Težište -15 %	43,95
Težište -20 %	43,77
Težište -25 %	43,46



Slika 64. Dijagram brzine vožnje, DLC, promjena težišta u horizontalnom smjeru



Slika 65. Kut zakreta oko uzdužne osi, DLC, Promjena težišta u horizontalnom smjeru

Tablica 6. Iznos kuta zakreta oko uzdužne osi označeno na dijagramu (Slika 65.), DLC, promjena težišta u horizontalnom smjeru

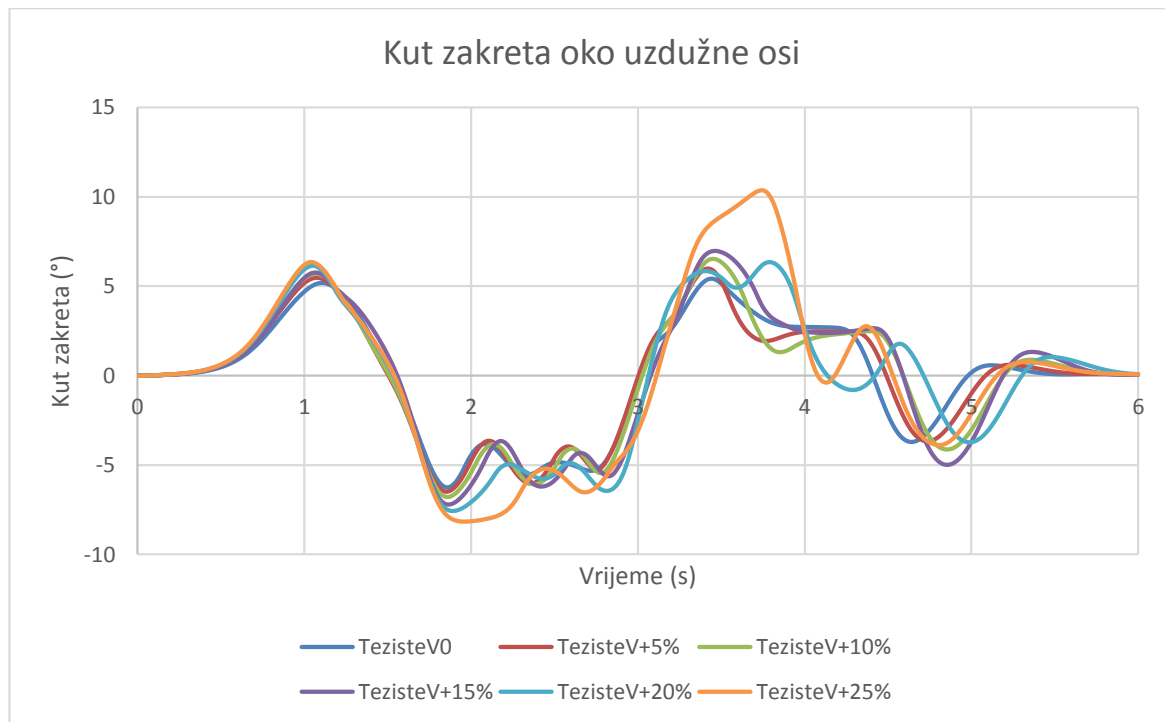
Parametar	Iznos kuta zakreta oko uzdužne osi [°], označeno na dijagramu
Standardno vozilo	5,41
Težište -5 %	5,59
Težište -10 %	5,78
Težište -15 %	5,97
Težište -20 %	6,14
Težište -25 %	6,26

Na prikazanim tablicama (Tablica 5., Tablica 6.) i dijagramima (Slika 64., Slika 65.) vidljivo je kako udaljavanjem težišta prema stražnjoj strani vozila pada brzina vozila na kraju poligona te raste kut zakreta oko uzdužne osi. Ovime se zaključuje da pomak težišta prema stražnjoj strani uzrokuje smanjenje stabilnosti vozila, što odgovara literaturi [8.]. Također i ostali parametri pokazuju smanjenje stabilnosti pomicanjem težišta prema stražnjoj strani vozila, samo u manjoj mjeri. Zbog toga neće biti detaljno prikazani ovdje.

Tablica 7. Ostali značajni parametri, DLC, promjena težišta u horizontalnom smjeru

Parametar	Bočno ubrzanje [g]	Kut bočnog klizanja [°]
Standardno vozilo	0,87	13
Težište -5 %	0,88	13,5
Težište -10 %	0,89	13,7
Težište -15 %	0,9	13,9
Težište -20 %	0,92	14
Težište -25 %	0,94	14,5

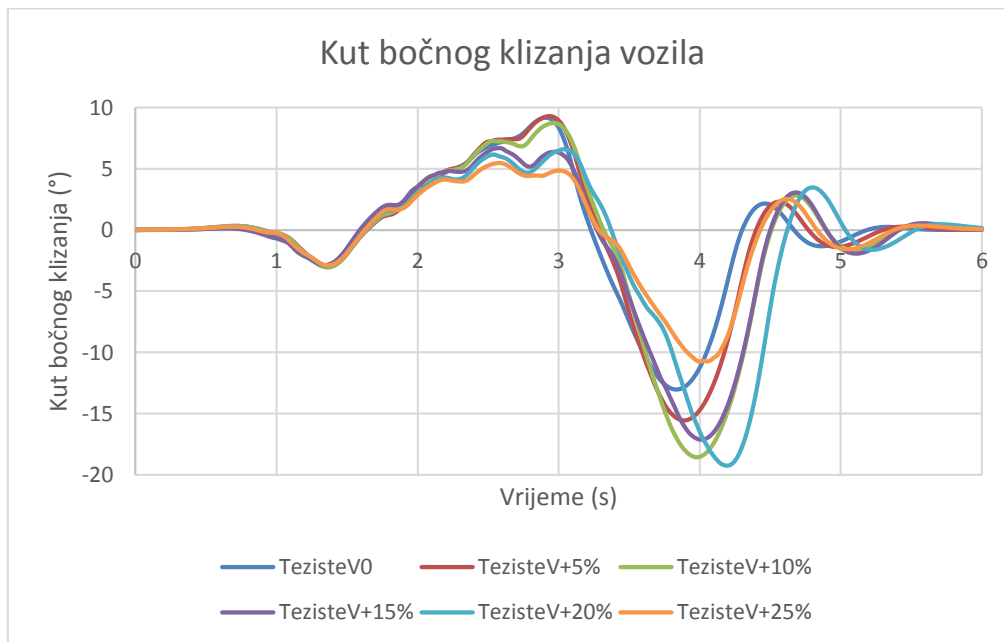
8.1.2. Promjena težišta u vertikalnom smjeru



Slika 66. Kut zakreta oko uzdužne osi, DLC, pomak težišta u vertikalnom smjeru

Tablica 8. Maksimalni iznosi kuta zakreta oko uzdužne osi, DLC, promjena težišta u vertikalnom smjeru

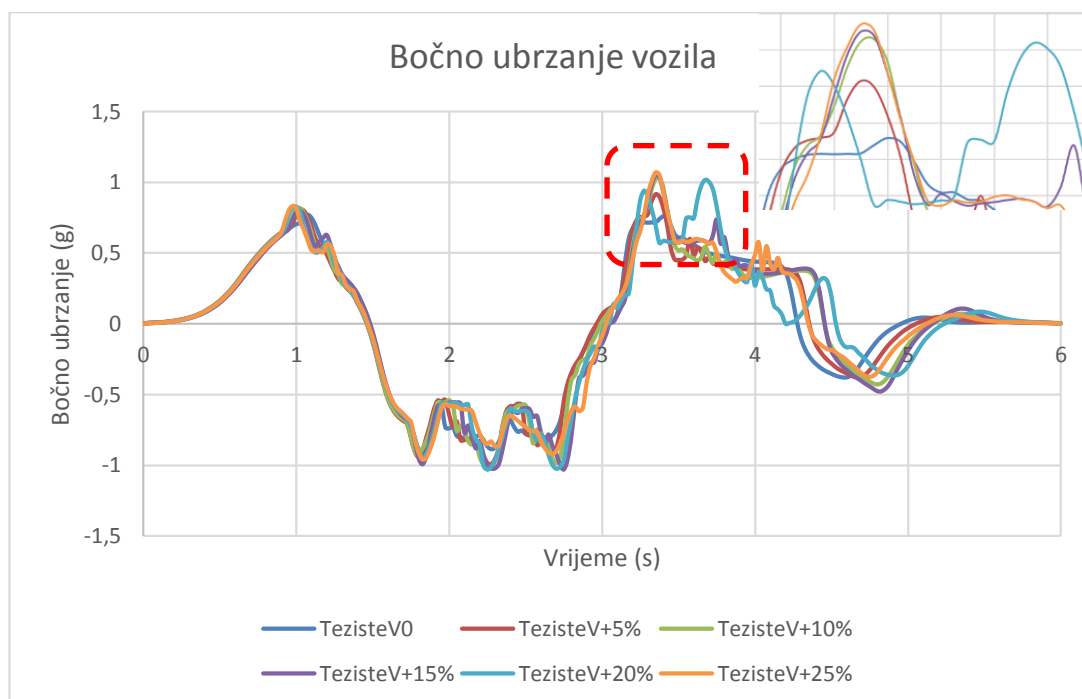
Parametar	Maksimalni iznos kuta zakreta oko uzdužne osi [°] (Apsolutni iznos)
Standardno vozilo	6,22
Težište +5 %	6,48
Težište +10 %	7,78
Težište +15 %	7,2
Težište +20 %	7,56
Težište +25 %	10,35



Slika 67. Kut bočnog klizanja vozila, DLC, pomak težišta u vertikalnom smjeru

Tablica 9. Maksimalni iznosi bočnog kuta klizanja, DLC, pomak težišta u vertikalnom smjeru

Parametar	Maksimalni iznos bočnog kuta klizanja [°] (Apsolutni iznos)
Standardno vozilo	13
Težište +5 %	15,56
Težište +10 %	18,56
Težište +15 %	17,11
Težište +20 %	19,25
Težište +25 %	10,73



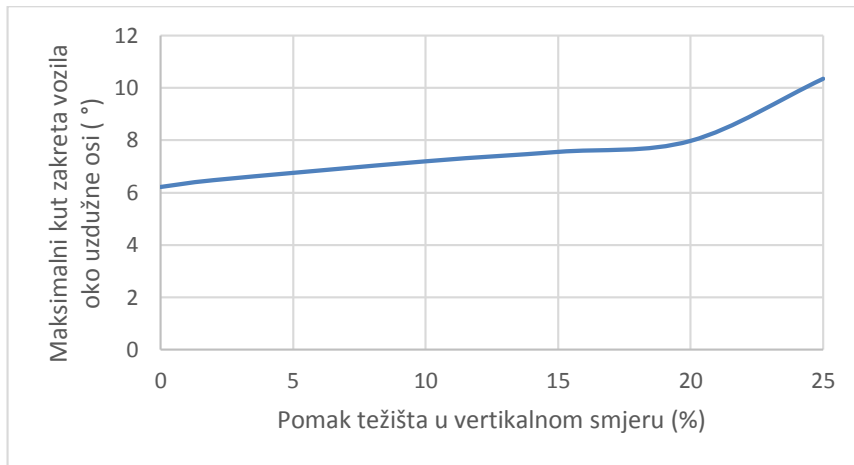
Slika 68. Dijagram bočnog ubrzanja vozila, DLC, promjena težišta u vertikalnom smjeru

Tablica 10. Maksimalni iznos bočnog ubrzanja vozila, DLC, pomak težišta u vertikalnom smjeru

Parametar	Maksimalni iznos bočnog ubrzanja vozila [g]
Standardno vozilo	0,87
Težište +5 %	0,94
Težište +10 %	1,02
Težište +15 %	1,04
Težište +20 %	1,02
Težište +25 %	1,07

Prikaz bočnog kuta klizanja (Slika 67.) ne prikazuje najbolje slučaj pomaka težišta u vertikalnom smjeru. Naime pogledom na dijagram moglo bi se zaključiti da vozilo s povećanom visinom težišta od 25 % ima bolje karakteristike od ostalih vozila budući da ima najmanji vršni iznos bočnog kuta klizanja (Tablica 9.). No to je slučaj zbog toga što tako značajnim povećanjem visine težišta dolazi do relativno velikog odizanja prednjeg i stražnjeg lijevog kotača od podloge čime je smanjena mogućnost upravljanja vozila, a samim time manji je i bočni kut klizanja. To je moguće vidjeti na

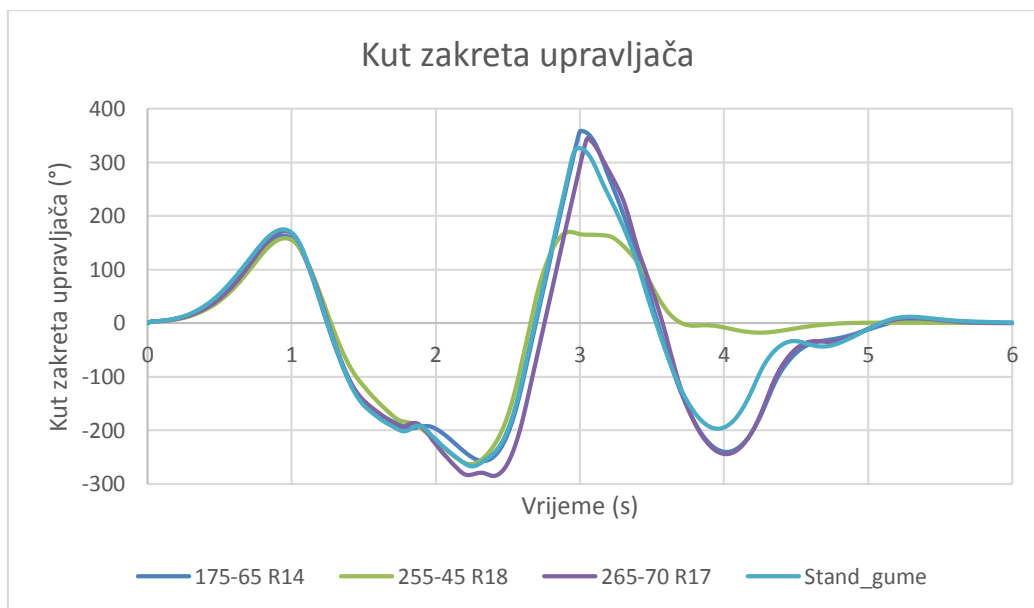
dijagramu kuta zakreta oko uzdužne osi (Slika 66.) na kojem je vidljivo kako vozilo s povećanjem visine težišta od 25 % ima značajno veći kut zakreta.



Slika 69. Tendencija porasta kuta zakreta vozila oko uzdužne osi ovisno o vertikalnom pomaku težišta

Na dijagramu tendencije porasta kuta zakreta vozila oko uzdužne osi ovisno o vertikalnom pomaku težišta (Slika 69.) vidljivo je kako porast kuta zakreta raste linearno s povećanjem visine težišta do 20 %, nakon toga počinje strmije rasti. Razlog tome je što opruge dolaze do granice mogućnosti sabijanja te daljnja opružna karakteristika ovjesa vozila nije linearna. Iz tog razloga može se zaključiti da povećanjem visine težišta iznad 20 % drastično narušava stabilnost vozila.

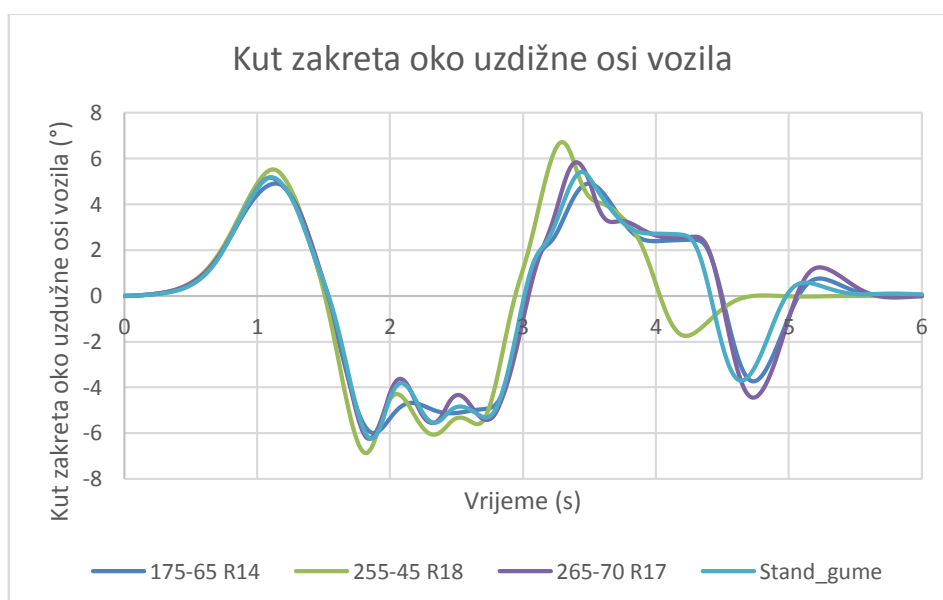
8.1.3. Širina pneumatika



Slika 70. Kut zakreta upravljača, DLC, širina pneumatika

Tablica 11. Maksimalni iznos kuta zakreta upravljača, DLC, širina pneumatika

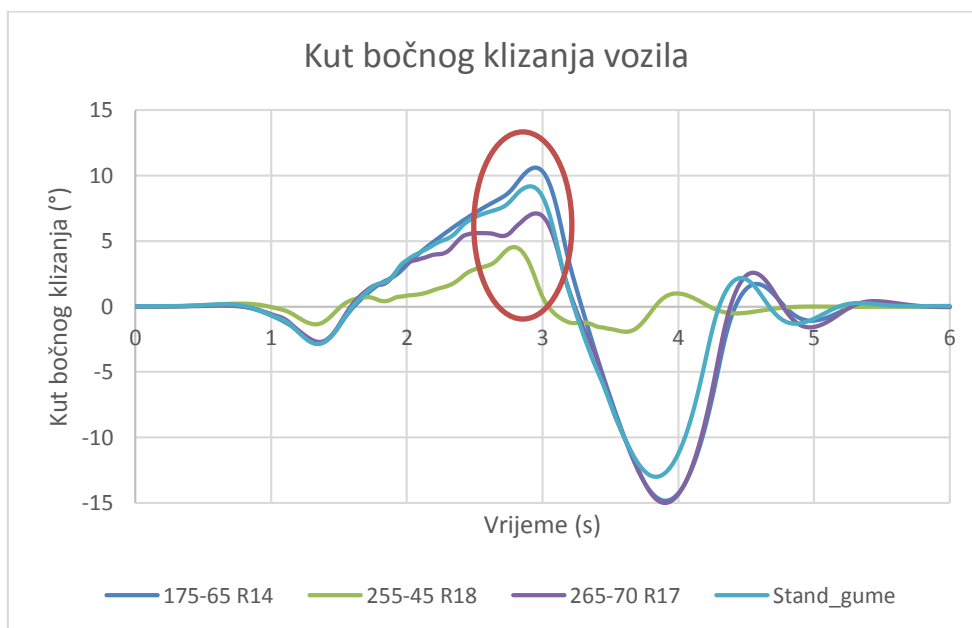
Parametar	Maksimalni iznos kuta zakreta upravljača [°]
175/65 R14	357
225/45 R18	340
235/65 R17 (s)	326
265/70 R17	169



Slika 71. Kut zakreta oko uzdužne osi vozila, DLC, širina pneumatika

Tablica 12. Maksimalni iznos kuta zakreta oko uzdužne osi vozila, DLC, širina pneumatika

Parametar	Maksimalni iznos kuta zakreta oko uzdužne osi [°]
175/65 R14	4,9
225/45 R18	6,71
235/65 R17 (s)	6,22
265/70 R17	5,77

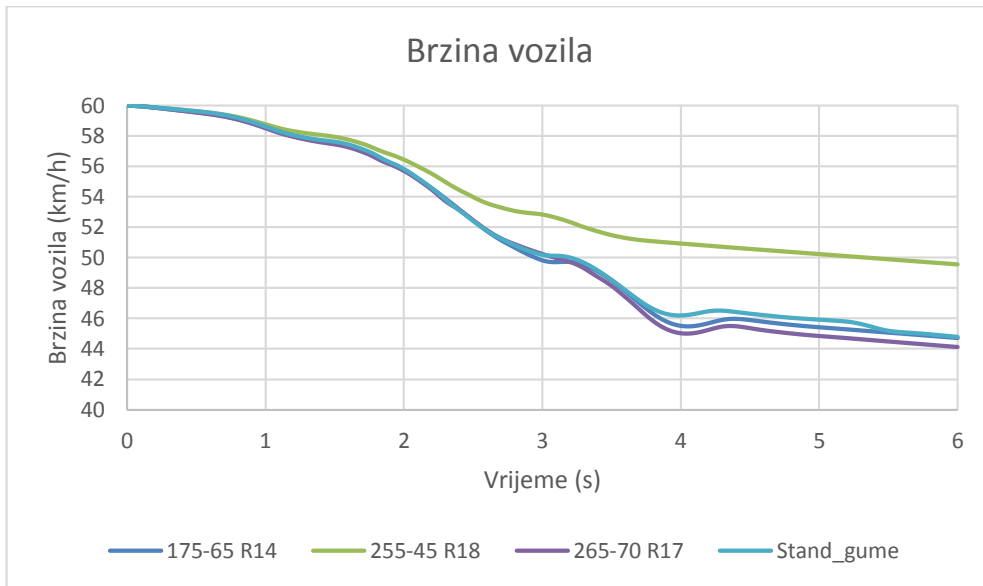


Slika 72. Kut bočnog klizanja vozila, DLC, širina pneumatika

Tablica 13. Kut bočnog klizanja vozila u lokalnom ekstremu označeno na dijagramu (Slika 72.), DLC, širina pneumatika

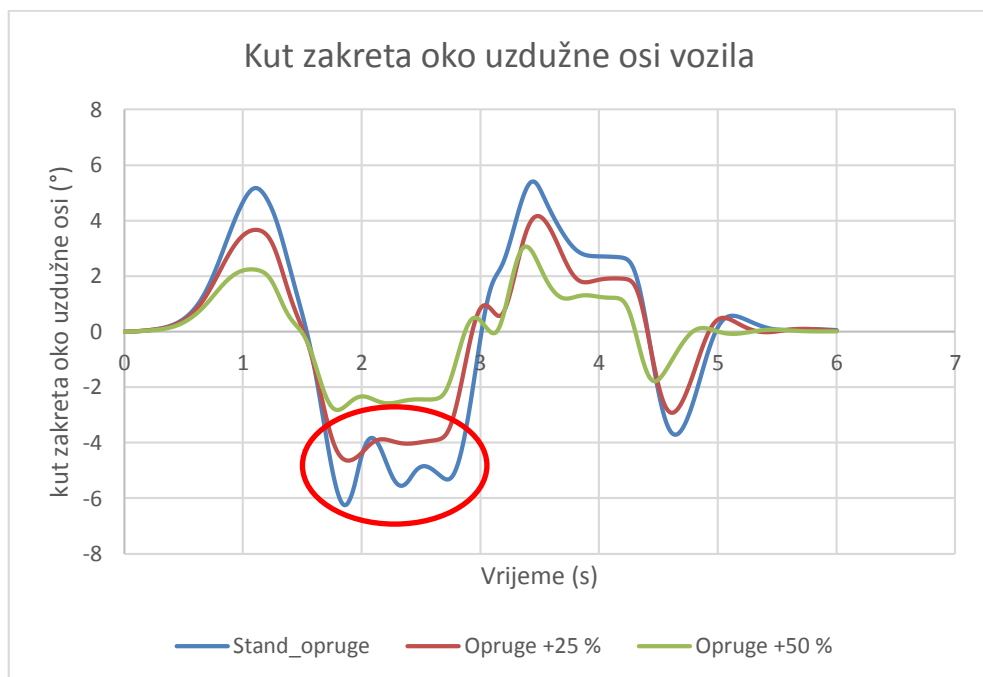
Parametar	Bočni kut klizanja vozila, lokalni ekstrem označen na dijagramu [°]
175/65 R14	10,53
225/45 R18	4,54
235/65 R17 (s)	9,14
265/70 R17	7,08

U ovom poglavlju vidljivo je kako povećanje širine profila pneumatika povećava stabilnost vozila, što se slaže sa literaturom je ti pneumatici mogu prenijeti veću bočnu silu. Također ovdje promatrani niskoprofilni pneumatik (225/45 R18), koji zbog svojeg niskog profila ima relativno visoku krutost skretanja (*engl. cornering stiffness*), može podnijeti puno veća bočna opterećenja. Na slici (Slika 73.) prikazan je dijagram brzine za svaki od profila pneumatika na kojem je jasno vidljivo kako vozilo s niskoprofilnim pneumatikom ima značajno veću krajnju brzinu od ostalih vozila. Ovime se može zaključiti kako niskoprofilni pneumatici pružaju puno bolju stabilnost vozilu, ali vožnju čine neudobnom.

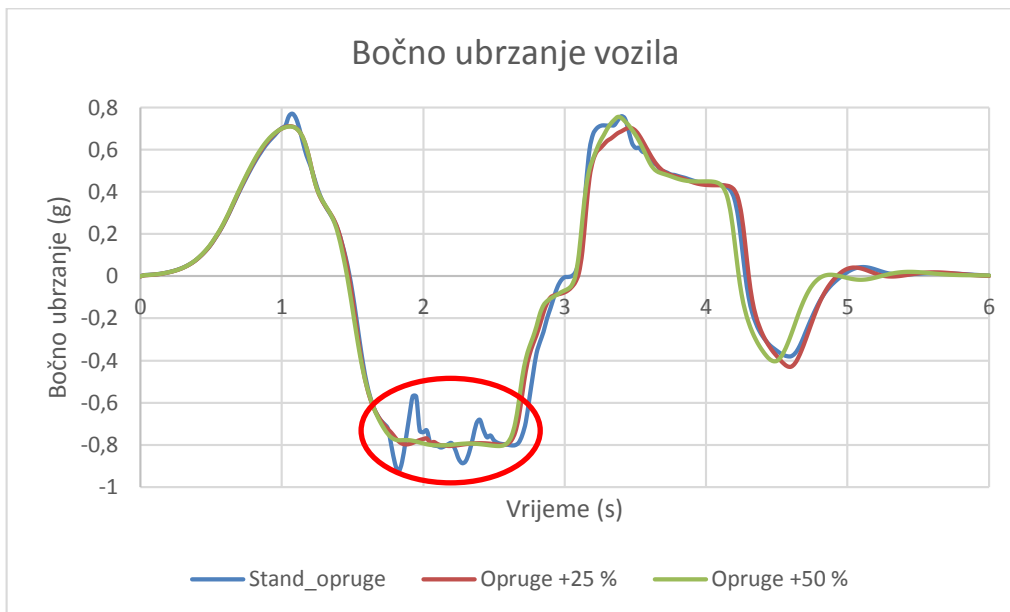


Slika 73. Brzina vozila, DLC, širina pneumatika

8.1.4. Krutost opruga

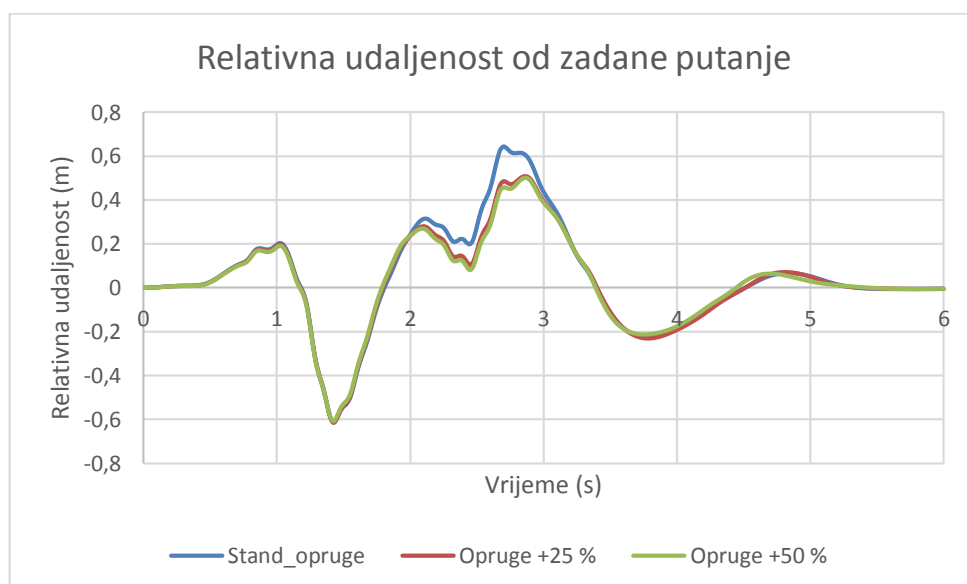


Slika 74. Kut zakreta oko uzdužne osi vozila, DLC, krutost opruga



Slika 75. Bočno ubrzanje vozila, DLC, krutost opruga

Prikazana su dva dijagrama (Slika 74., Slika 75.) na kojima su vidljive oscilacije kuta zakreta oko uzdužne osi vozila te bočnog ubrzanja za vozilo s najmanjom krutošću opruga. Ovakve slabo prigušene oscilacije mogu uzrokovati gubitak stabilnosti u slučaju da je potrebno naglo promijeniti smije vozila. Tada mogu, ukoliko se poklope faze oscilacija, vršne vrijednosti kuta zakreta oko uzdužne osi i bočnog ubrzanja narasti. Jasno je vidljivo, iz dijagrama na slici (Slika 76.), kako se s krućim oprugama vozilo lakše zadržava na zadanoj putanji.

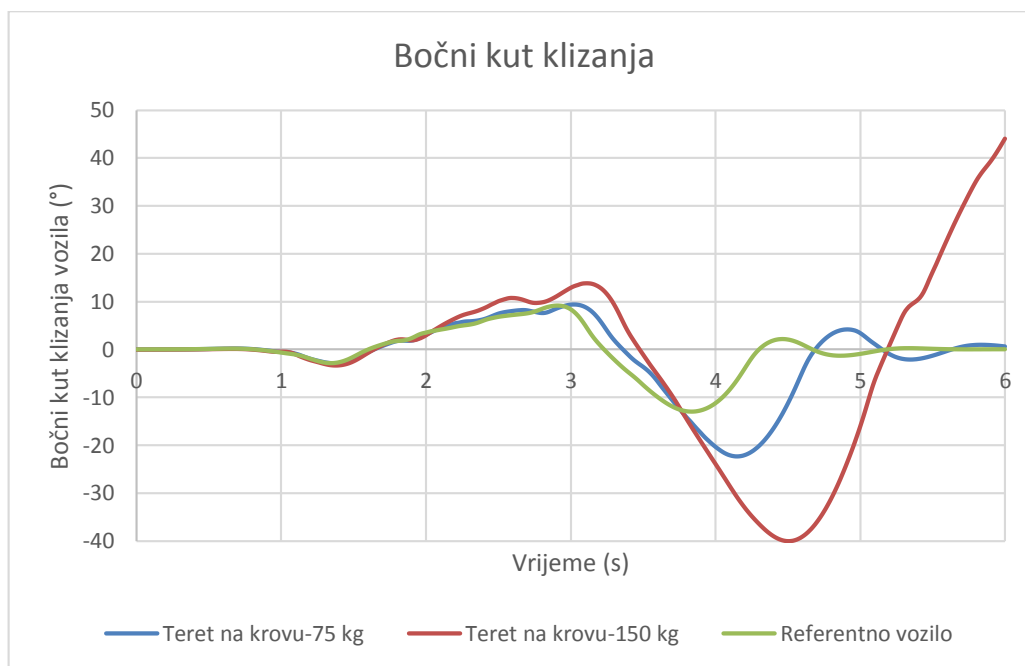


Slika 76. Relativna udaljenost od zadane putanje, DLC, krutost opruga

Tablica 14. Ostali ekstremni izlaznih podataka, DLC, krutost opruga

	Standardne opruge	Opruge + 25 %	Opruge +50 %
Maksimalna brzina promjene kuta zakreta oko vertikalne osi [°/s]	60,17	62,96	66,9
Maksimalni bočni kut klizanja [°]	13	11,77	12,57
Maksimalni kut zakreta upravljača [°]	326	317	313
Brzina na kraju poligona [km/h]	44,79	44,97	46,09

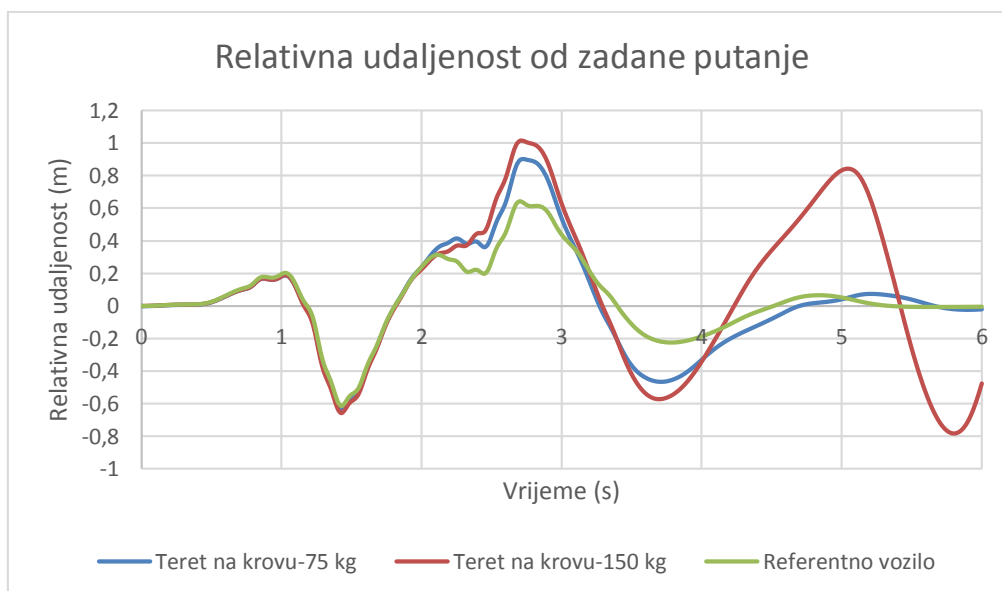
8.1.5. Teret na krovu



Slika 77. Bočni kut klizanja vozila, DLC, teret na krovu

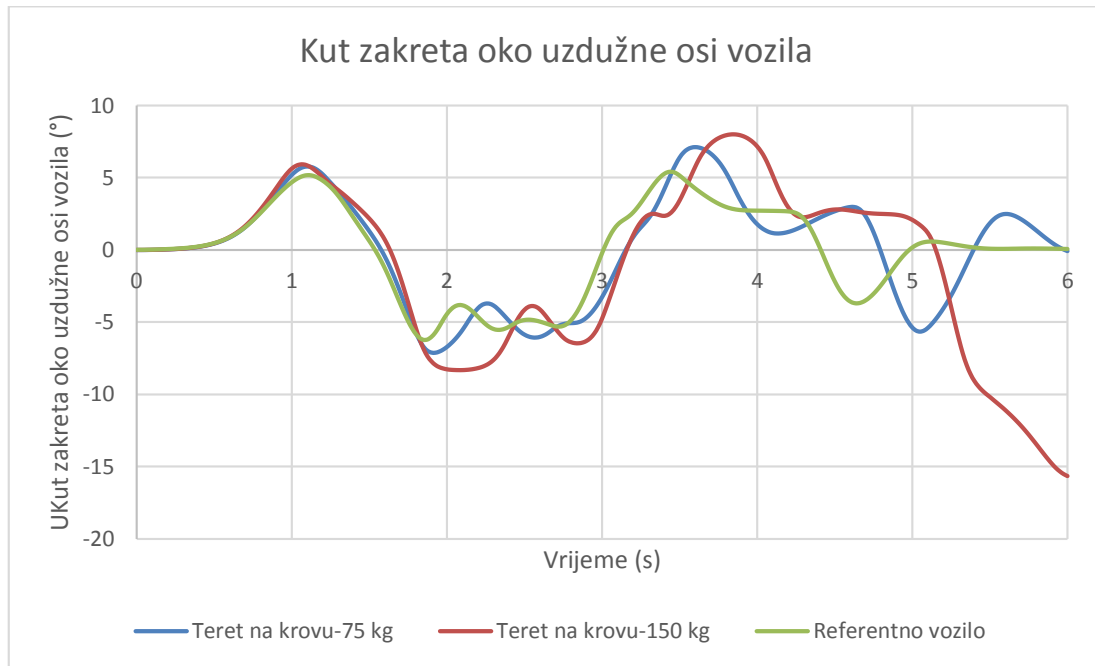
Tablica 15. Maksimalni iznos bočnog kuta klizanja, DLC, teret na krovu

Parametar	Maksimalni iznos bočnog kuta klizanja [°] Apsolutni iznos
Referentno vozilo	13
Teret na krovu-75 kg	22,22
Teret na krovu-150 kg	44,11

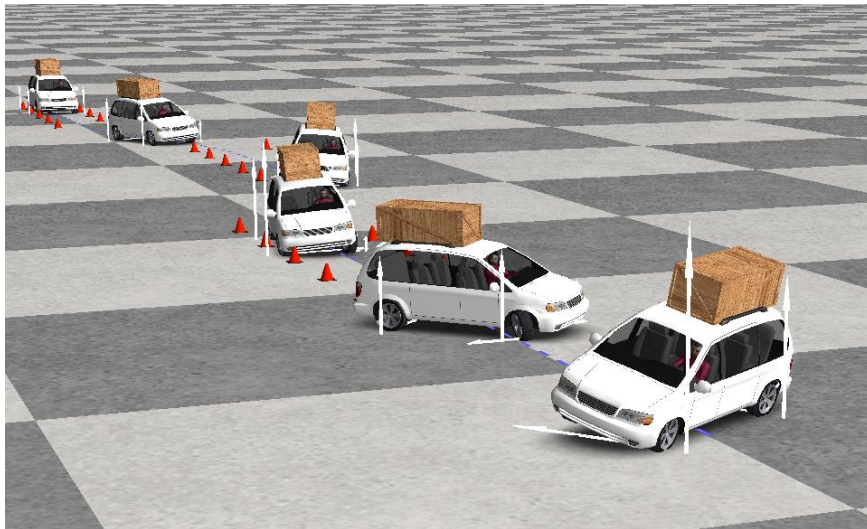


Slika 78. Relativna udaljenost od zadane putanje, DLC, teret na krovu

Na prethodnim dijagramima (Slika 77., Slika 78.) vidljivo je kako na kraju poligona naglo rastu vrijednosti za vozilo s 150 kg tereta na krovu. Razlog tome je što to vozilo na kraju poligona dolazi u fazu prevrtanja, točnije potpuno gubi stabilnost. To se najbolje može vidjeti na dijagramu kuta zakreta oko uzdužne osi vozila (Slika 79.) gdje je jasno vidljiv rast kuta zakreta poslije 5 sekundi od početka procedure.



Slika 79. Kut zakreta oko uzdužne osi vozila, DLC, teret na krovu



Slika 80. Prikaz animacije vozila s 150 kg tereta na krovu

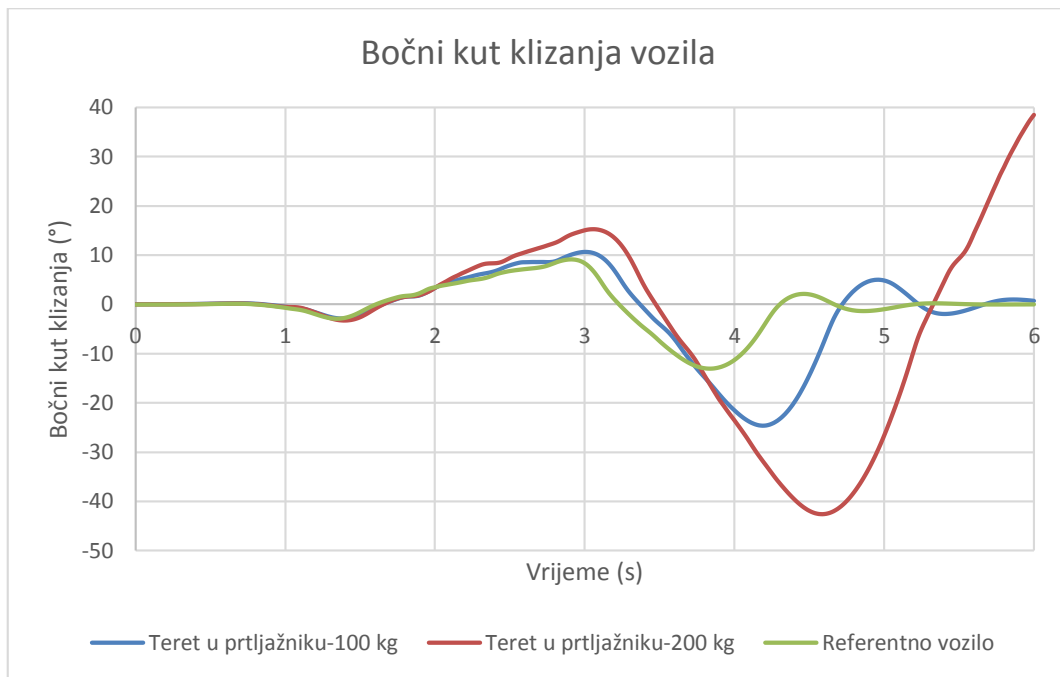


Slika 81. Prikaz animacije vozila s 75 kg tereta na krovu

Tablica 16. Ostali ekstremni izlaznih podataka, DLC, teret na krovu

	Referentno vozilo	Teret na krovu 75 kg	Teret na krovu 150 kg
Maksimalna brzina promjene kuta zakreta oko vertikalne osi [$^{\circ}/s$]	60,17	66,36	114,73
Maksimalno bočno ubrzanje [g]	0,87	1,00	1,27
Maksimalni kut zakreta upravljača [$^{\circ}$]	326	452	680
Brzina na kraju poligona [km/h]	44,79	40,14	15,44
Maksimalni moment na upravljaču [Nm]	38,71	38,10	50,40

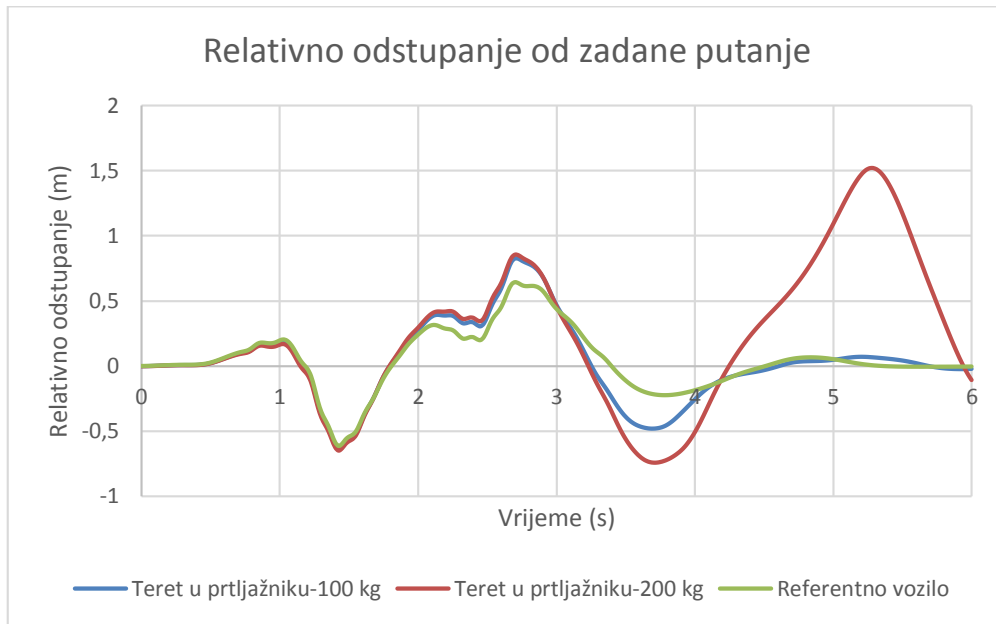
8.1.6. Teret u prtljažniku



Slika 82. Bočni kut klizanja vozila, DLC, teret u prtljažniku

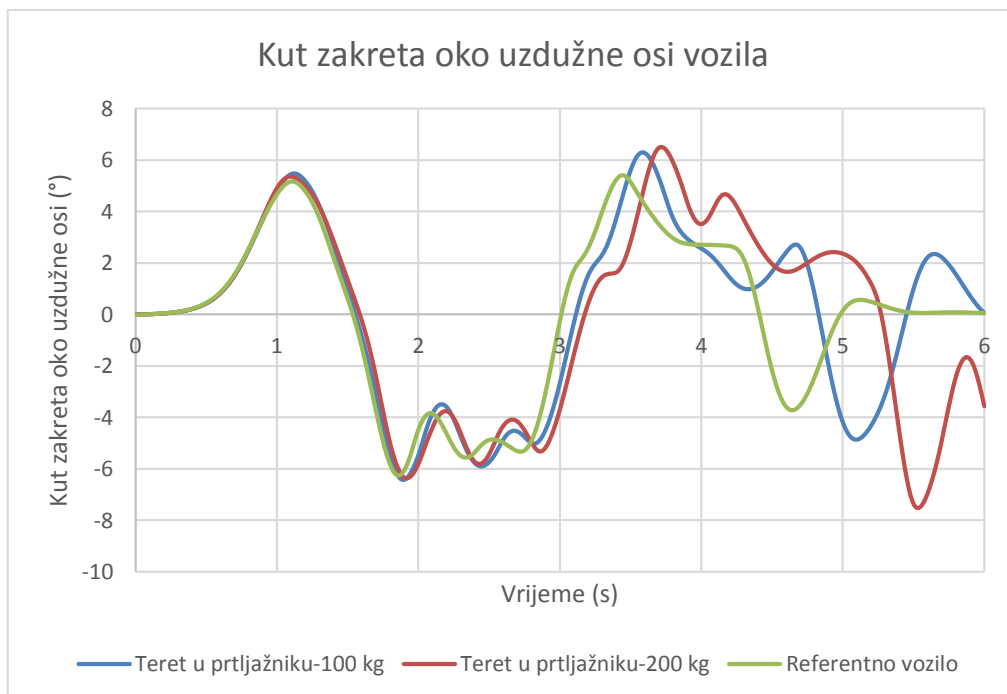
Tablica 17. Maksimalni iznos bočnog kuta klizanja, DLC, teret u prtljažniku

Parametar	Maksimalni iznos bočnog kuta klizanja [°] Apsolutni iznos
Referentno vozilo	13
Teret u prtljažniku-100 kg	24,63
Teret u prtljažniku-200 kg	38,51

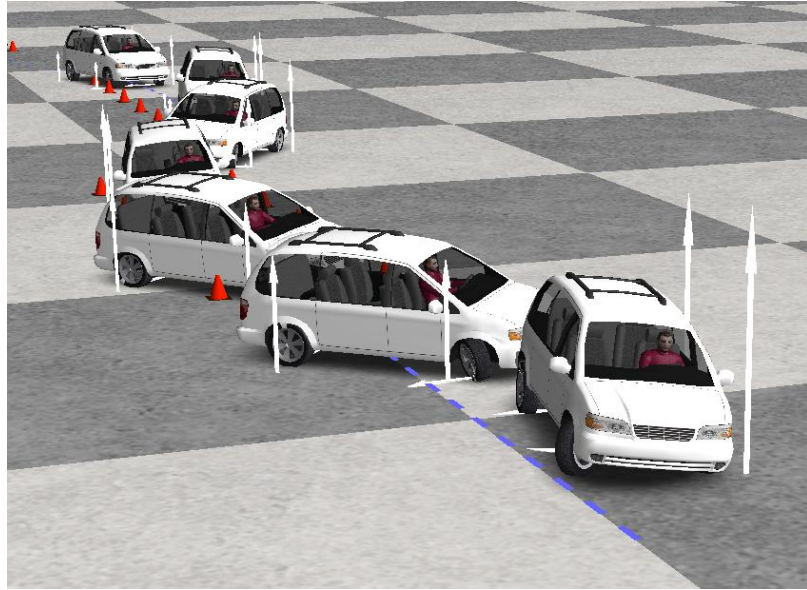


Slika 83. Relativna udaljenost od zadane putanje, DLC, teret u prtljažniku

Na prethodnim dijagramima (Slika 82., Slika 83.) vidljivo je kako pri kraju poligona naglo rastu vrijednosti za vozilo s 200 kg tereta na krovu slično kao kod tereta na krovu 8.1.5. No u ovome slučaju razlog nije prevrtanje vozila, to je izbjegnuto zbog relativno niskog težišta, ali vozilo počinje poskakivati i gubi se konstantan kontakt kotača s podlogom što otežava upravljanje vozilom. To se najbolje može vidjeti na dijagramu kuta zakreta oko uzdužne osi vozila (Slika 84.).



Slika 84. Kut zakreta oko uzdužne osi vozila, DLC, teret u prtljažniku



Slika 85. Prikaz animacije vozila s 200 kg tereta u prtljažniku

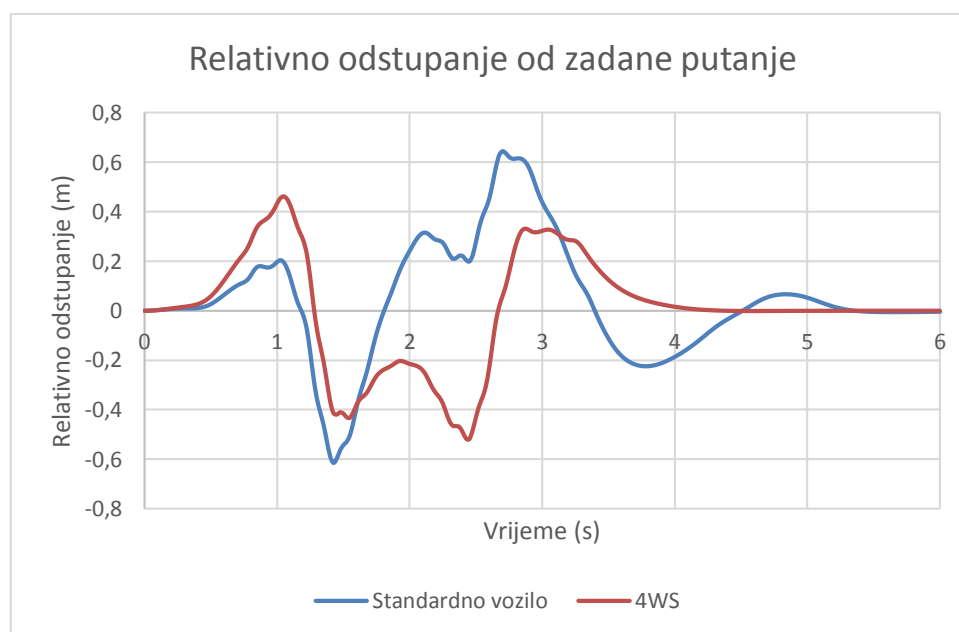


Slika 86. Prikaz animacije vozila s 75 kg tereta na krovu

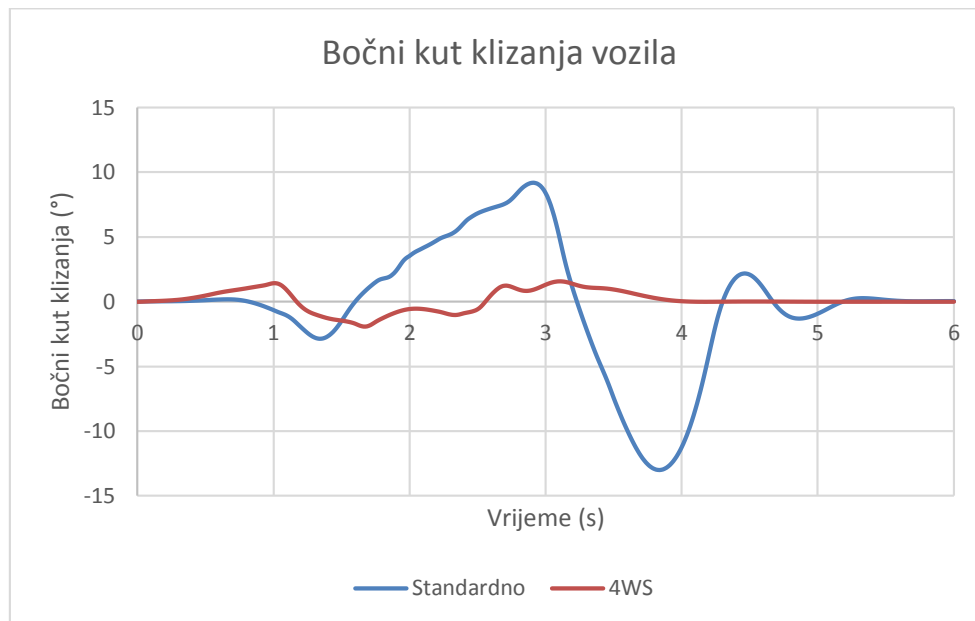
Tablica 18. Ostali ekstremni izlaznih podataka, DLC, teret u prtljažniku

	Referentno vozilo	Teret u prtljažniku 100 kg	Teret u prtljažniku 200 kg
Maksimalna brzina promjene kuta zakreta oko vertikalne osi [$^{\circ}/s$]	60,17	68,26	111,50
Maksimalno bočno ubrzanje [g]	0,87	0,97	1,09
Maksimalni kut zakreta upravljača [$^{\circ}$]	326	486	680
Brzina na kraju poligona [km/h]	44,79	39,43	14,76
Maksimalni moment na upravljaču [Nm]	38,71	37,91	41,82

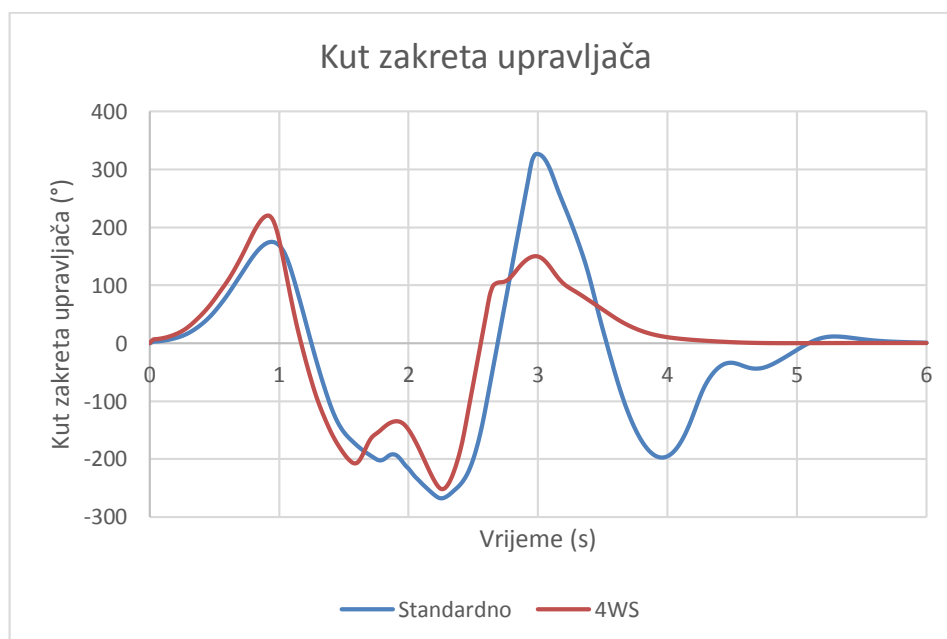
8.1.7. Upravljanje svim kotačima (4WS)



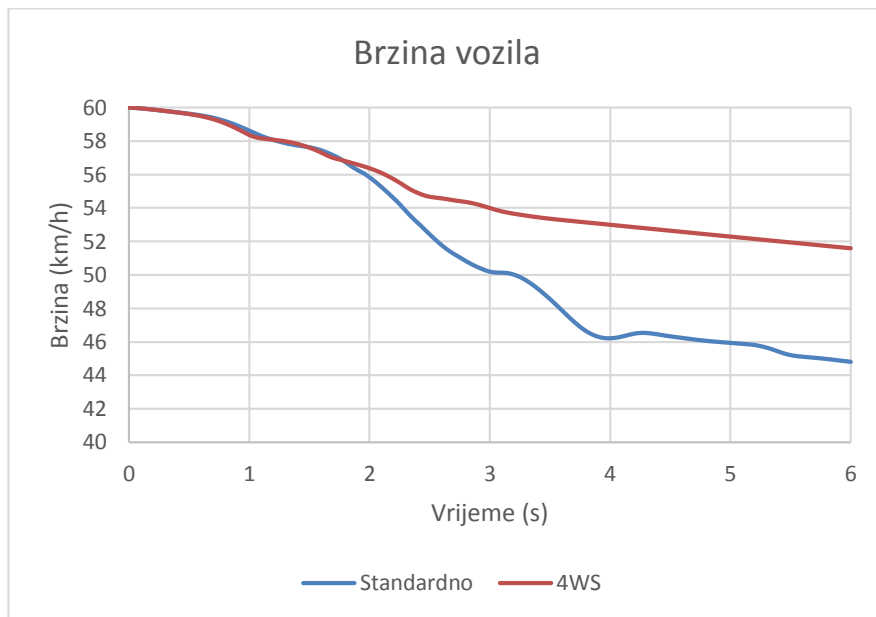
Slika 87. Relativno odstupanje od zadane putanje, DLC, 4WS



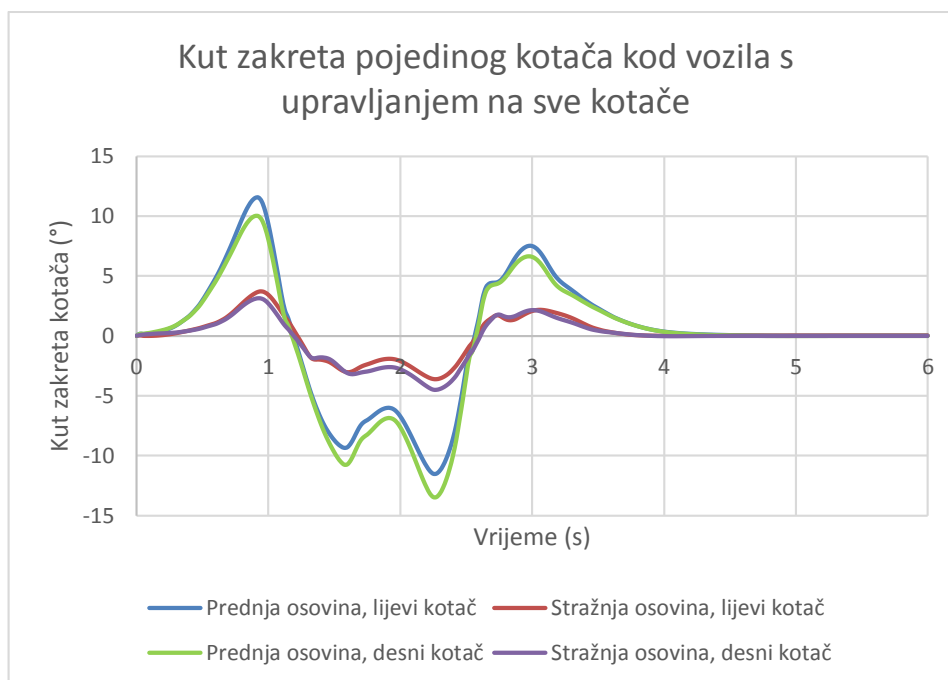
Slika 88. Bočni kut klizanja vozila, DLC, 4WS



Slika 89. Kut zakreta upravljača, DLC, 4WS



Slika 90. Brzina vozila, DLC, 4WS



Slika 91. Kut zakreta pojedinog kotača kod vozila s upravljanjem na sve kotače, DLC, 4WS

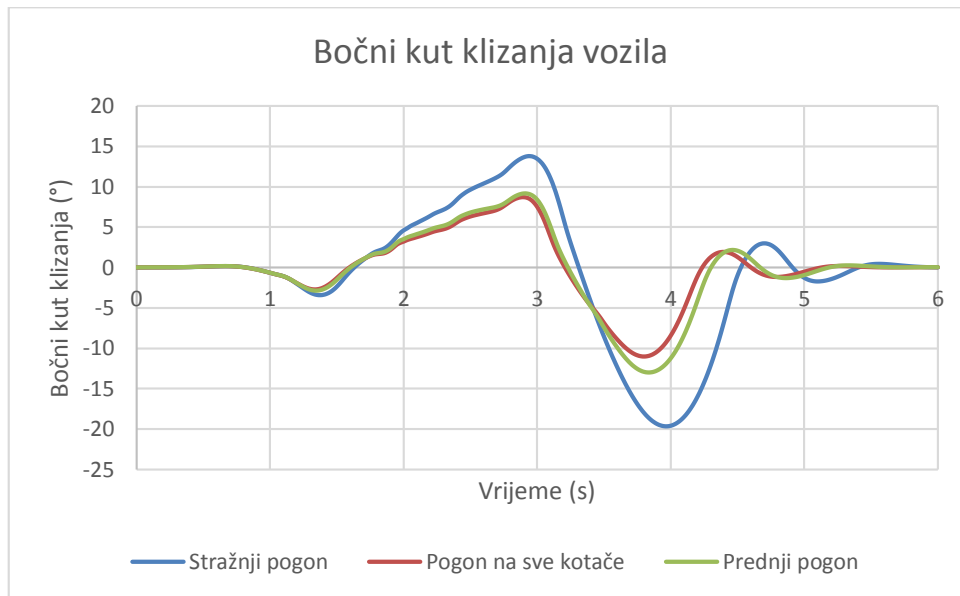
Na prethodnim dijagramima (Slika 87., Slika 88., Slika 89., Slika 90.) može se vidjeti kako vozilo s upravljanjem na sve kotače ima ukupno značajno manje relativno odstupanje od zadane putanje, konstanto manji bočni kut klizanja vozila (na mjestima i do 10 puta manji), kut zakreta upravljača je u većem dijelu manji te je brzina vozila na kraju ispitnog poligona za vozilo s upravljanjem na

sve kotače za 7 km/h veća od standardnog vozila. Primijećeno je kako su ove vrijednosti veće za vozilo s upravljanjem na sve kotače pri početku procedure, odnosno kod prvog skretanja, dok se prilikom vraćanja vozila početnu traku smanjuju u odnosu na standardno vozilo. Razlog tome je brža prilagodba vozila s upravljanjem na sve kotače na promjenu smjera. Ovime je utvrđeno kako vozilo s upravljanjem na svim kotačima pri istoj brzini lakše savladava poligon, odnosno ima veću stabilnost. Na dijagramu (Slika 91.) može se vidjeti da je kut zakreta stražnjih kotača u istom smjeru kao i prednjih budući da je riječ o brzinama većim od 40 km/h. Na slici (Slika 92.) prikazana je animacija simulacije na kojoj je jasno vidljivo kako standardno vozilo ima izraženije zanošenje stražnjeg kraja vozila u odnosu na vozilo s upravljanjem na sve kotače.

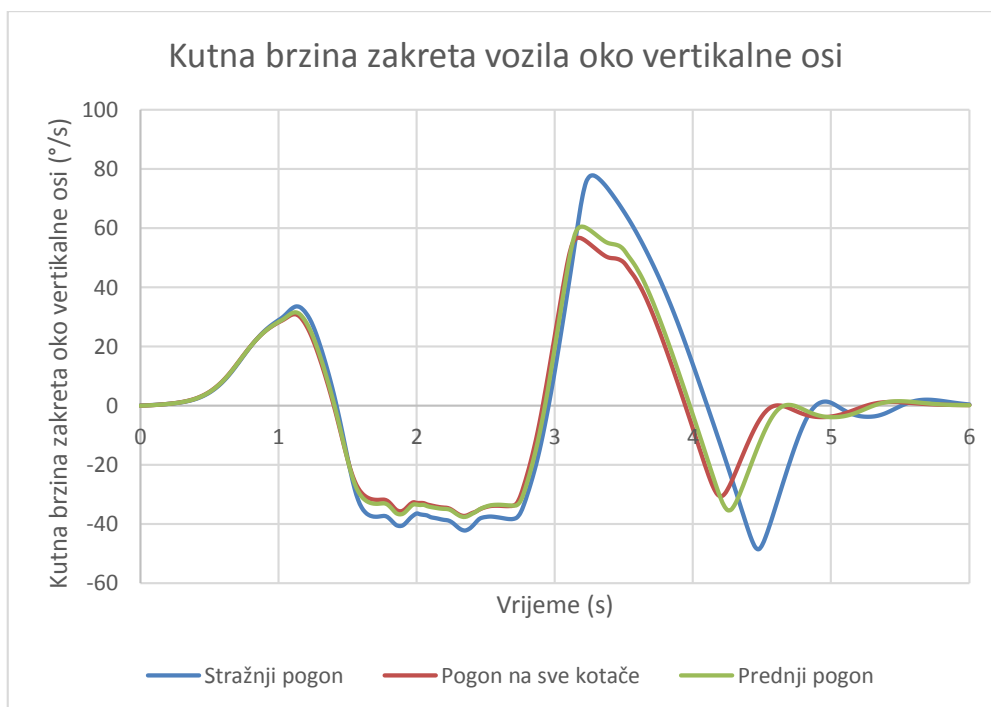


Slika 92. Prikaz animacije vozila s upravljanjem na sve kotače (žuto-4WS, bijelo-standardno vozilo), DLC, 4WS

8.1.8. Vrsta pogona



Slika 93. Bočni kut klizanja vozila, DLC, vrsta pogona



Slika 94. Kutna brzina zakreta vozila oko vertikalne osi, DLC, vrsta pogona

Tablica 19. Ekstremne vrijednosti izlaznih podataka, DLC, vrsta pogona

	Prednji pogon	Pogon na sve kotače	Stražnji pogon
Maksimalni bočni kut klizanja [°]	13	11,34	19,65
Maksimalna kutna brzina zakreta oko vertikalne osi [°/s]	60,17	54,55	77,38
Maksimalno bočno ubrzanje [g]	0,87	0,91	0,95
Maksimalni kut zakreta upravljača [°]	326	291	441
Brzina na kraju poligona [km/h]	44,79	46,12	41,17
Maksimalni moment na upravljaču [Nm]	38,71	36,56	40,49

Sve do trenutka vraćanja vozila u početnu traku nema prevelikih razlika kod vozila vezano uz vrstu pogona. Razlog tome je što se nakon početnog ubrzavanja na zadanu brzinu pušta pedala gasa. Međutim tok snage se ne odvaja nego su kotači konstantno pogonski vezani sa motorom. Upravo to je razlog povećanog kuta bočnog klizanja (Slika 93.) te povećane brzine promjene kuta zakreta oko vertikalne osi vozila (Slika 94.) za vozilo sa stražnjim pogonom koje je sklonije preupravljanju.

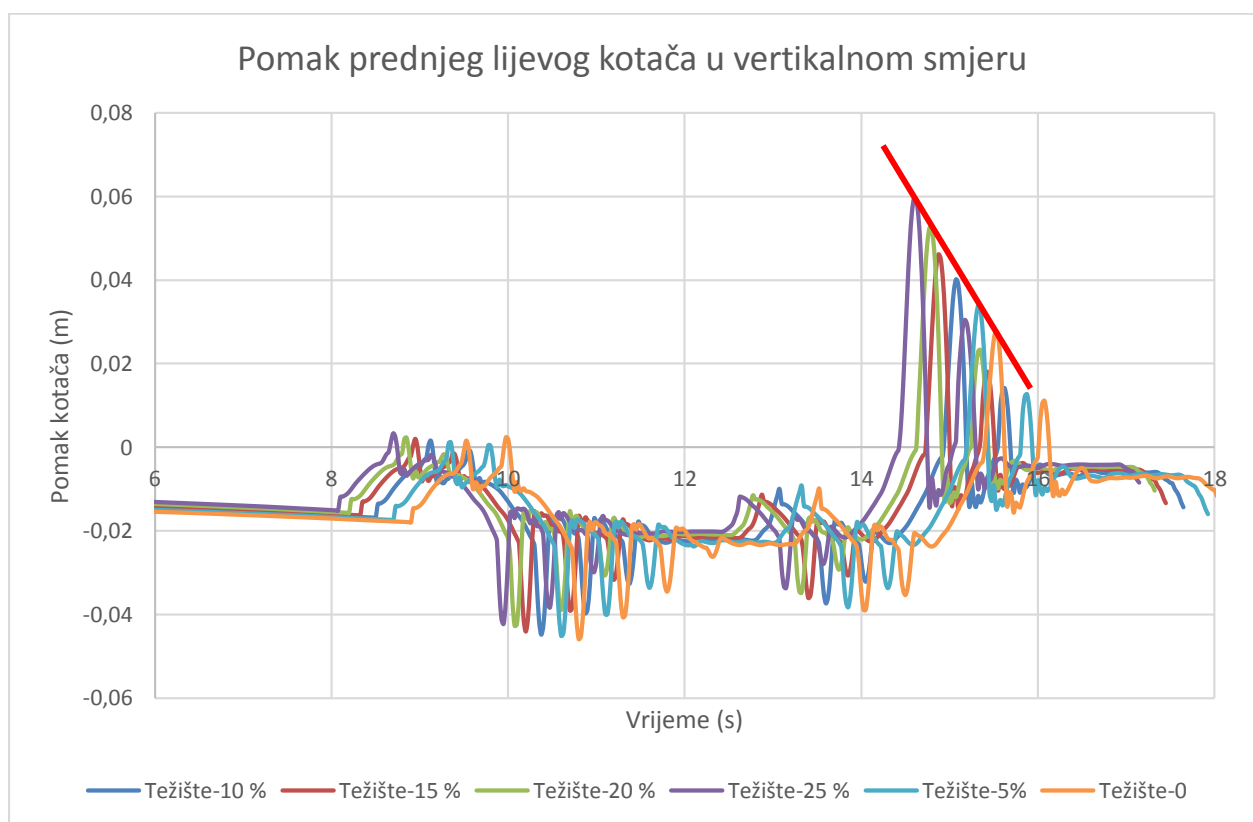
8.1.9. Zaključak, DLC

Simulacijom vozila u ovoj proceduri zaključeno je da povećanje težišta vozila te dodavanje dodatnog tereta smanjuje mogućnost vozila za sigurnom promjenom smjera, a kombinacija povećanja visine težišta s dodavanjem dodatnog tereta dovodi do još veće nestabilnosti. Veća širina pneumatika, pogotovo u kombinaciji s niskim profilom pneumatika, upravljanje svim kotačima i kruće opruge povećavaju stabilnost vozila, ali i upravljivost.

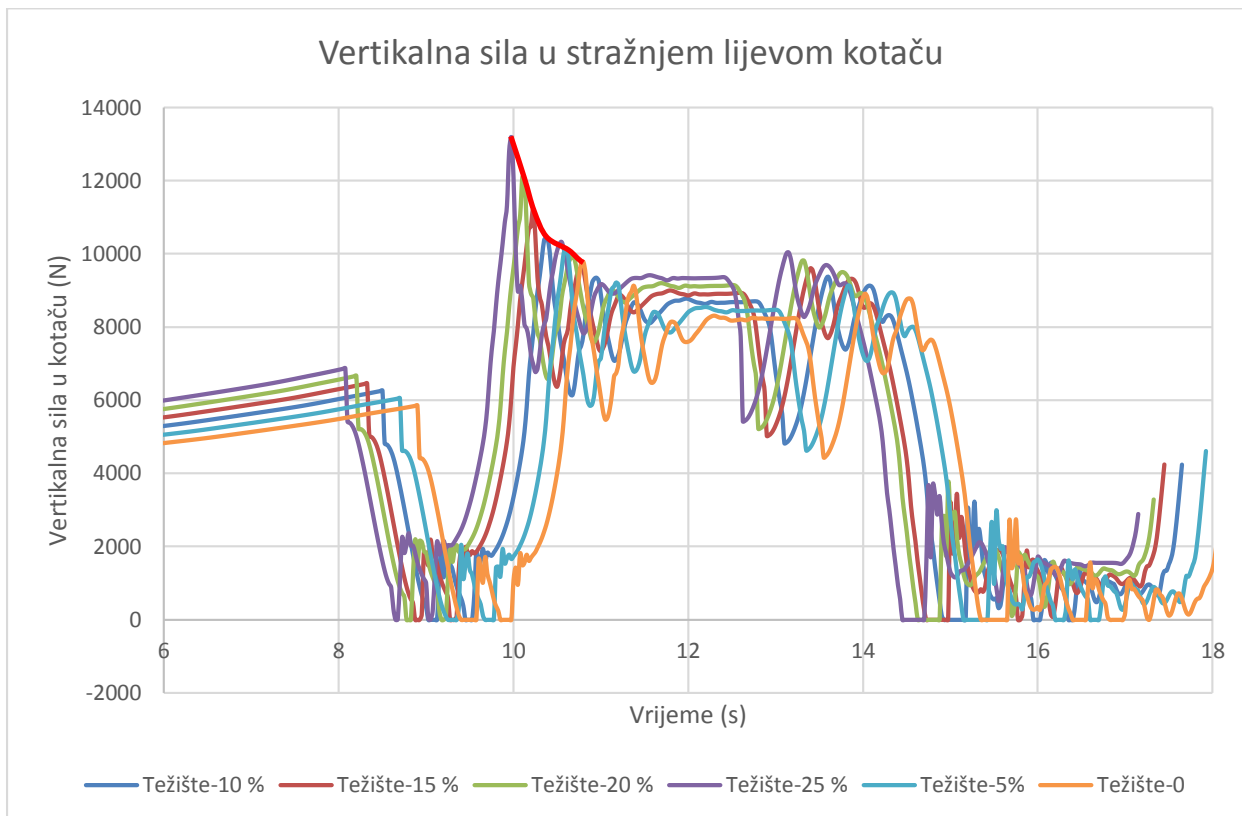
8.2. Fishhook

Kako bi se dobio bolji pregled korisnih informacija, u dijagramima nije prikazan prvi dio procedure koji se odnosi na određivanje kuta zakreta pri bočnom ubrzanju od $0,3 g$. On je ne bitan za provedbu analize, a budući da on traje između 6 do 8 sekundi, neće biti prikazan na dijagramima.

8.2.1. Promjena težišta u horizontalnom smjeru



Slika 95. Pomak prednjeg lijevog kotača, u odnosu na podlogu, u vertikalnom smjeru, Fishhook, promjena težišta u horizontalnom smjeru



Slika 96. Vertikalna sila u stražnjem lijevom kotaču, Fishhook, promjena težišta u horizontalnom smjeru

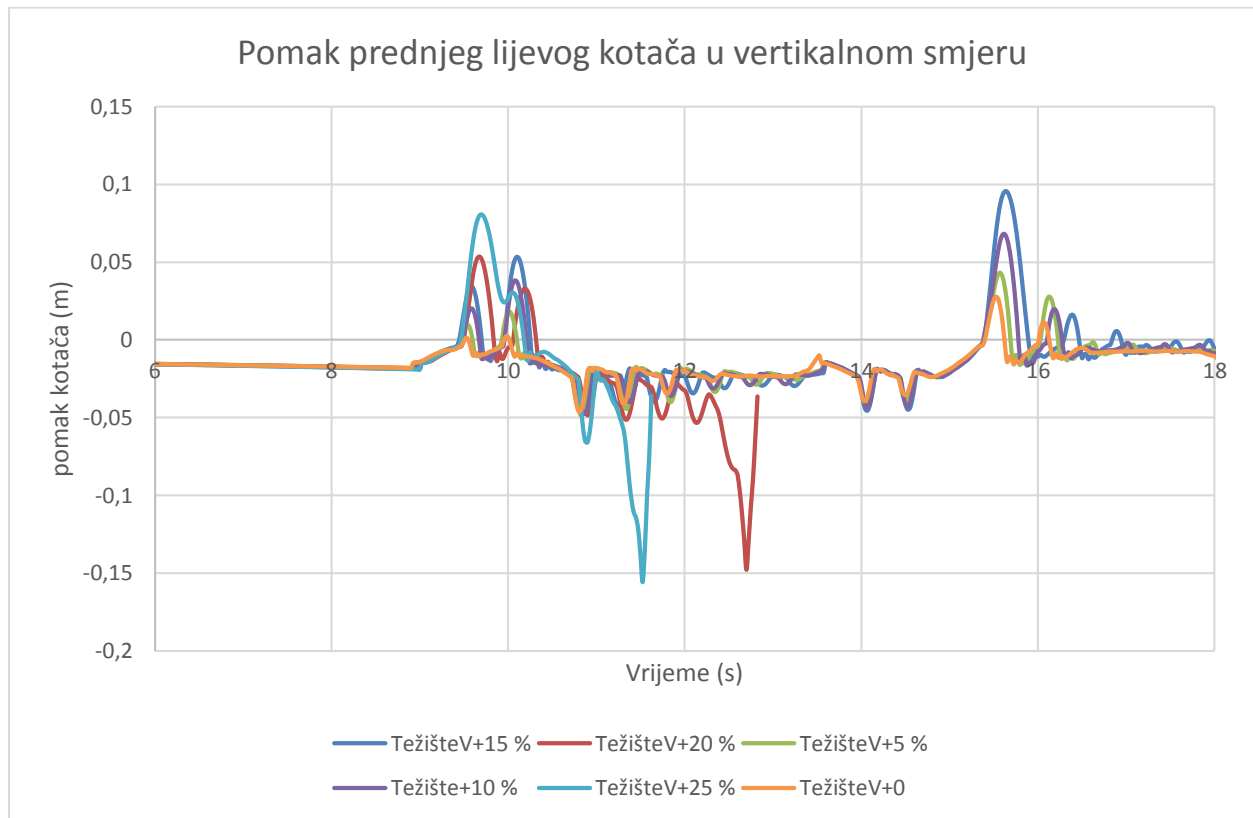
Tablica 20. Ekstremi značajnih veličina, Fishhook, promjena težišta u horizontalnom smjeru

Maksimalni iznos izlaznih podataka	Težište-0	Težište-5 %	Težište-10 %	Težište-15 %	Težište-20 %	Težište-25 %
Odizaj prednjeg lijevog kotača [mm]	26	32	40	47	52	59
Brzina promjene kuta zakreta oko uzdužne osi vozila [°/s]	29,32	29,77	31,39	32,68	33,47	34,90
Bočno ubrzanje [g]	1,019	1,020	1,037	1,043	1,063	1,102
Kut zakreta upravljača [°]	394	382	373	367	361	355

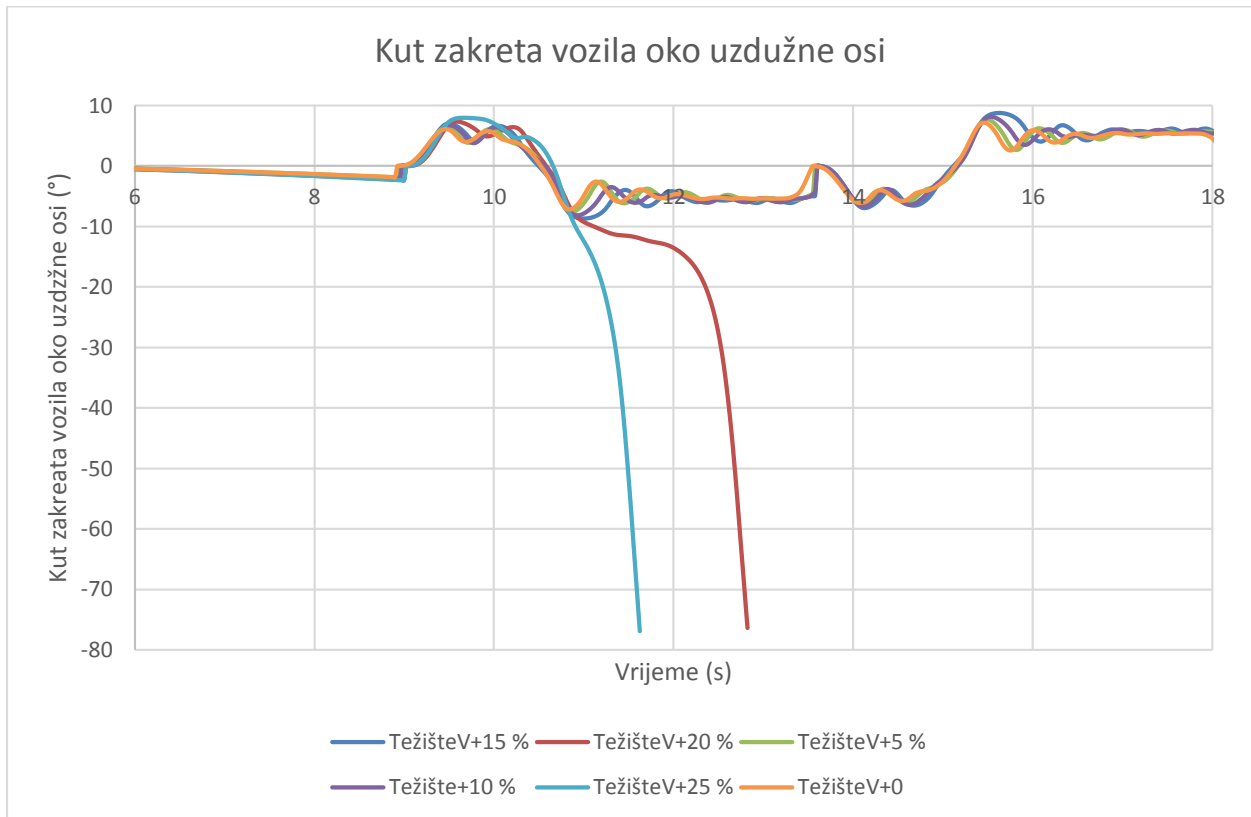
Budući da se ovom metodom ispitivanja provjerava sklonost vozila prevrtanju, promatraju se veličine vezane za prevrtanje vozila (vertikalne sile i vertikalni pomak kotača te kut zakreta oko uzdužne osi vozila i brzina promjene kuta zakreta oko uzdužne osi vozila). Na dijagramu (Slika 95.) vidljiv je razmjerni porast vertikalnog pomaka prednjeg kotača povećanjem odmaka težišta prema stražnjoj strani vozila što je sukladno očekivanjima i literaturi [8.]. Porast maksimalne sile u stražnjem kotaču značajniji je nego što je to slučaj kod pomaka prednjeg kotača (omjer vertikalne

sile na kotaču standardnog vozila i vozila s pomakom težišta od 25 % iznosi 2,25 dok omjer pomaka kotača istih vozila iznosi 1,3).

8.2.2. Pomak težišta u vertikalnom smjeru



Slika 97. Pomak prednjeg lijevog kotača u vertikalnom smjeru, Fishhook, pomak težišta u vertikalnom smjeru

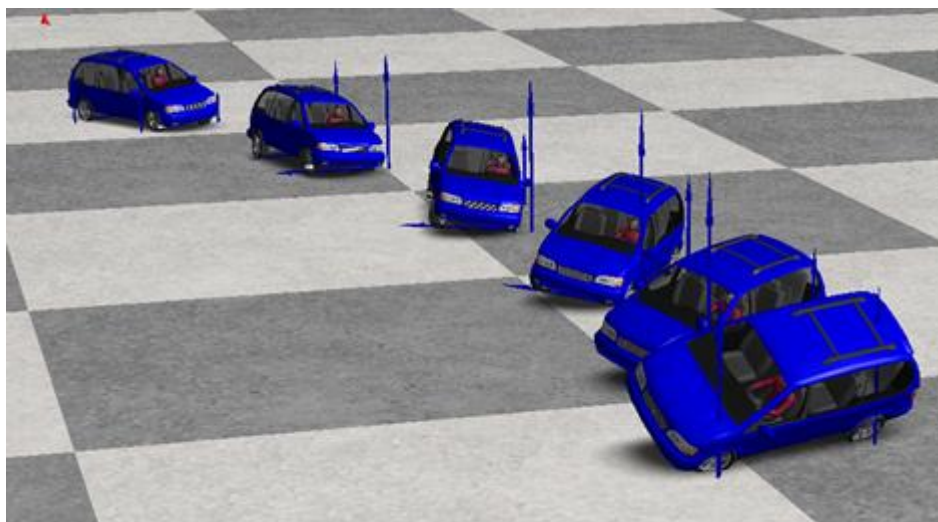


Slika 98. Kut zakreata vozila oko uzdužne osi, Fishhook, pomak težišta u vertikalnom smjeru

Tablica 21. Maksimalni iznosi izlaznih podataka, Fishhook, pomak težišta u vertikalnom smjeru

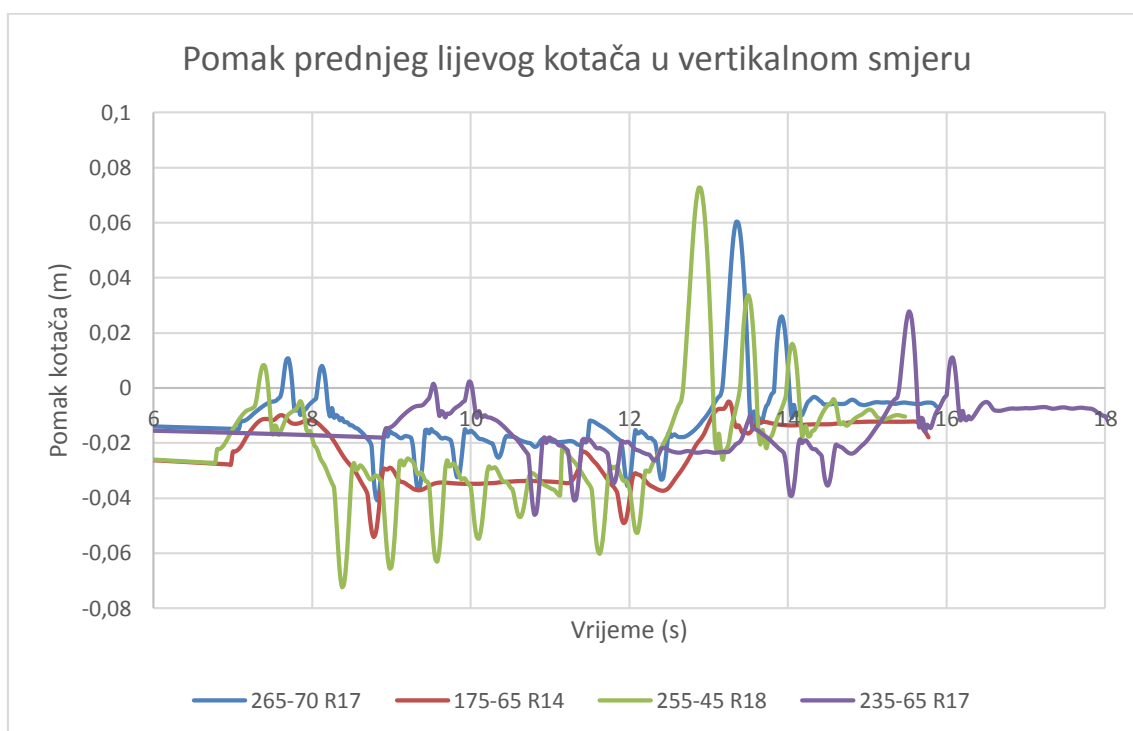
Maksimalni iznos izlaznih podataka	Težište-0	Težište+5 %	Težište+10 %	Težište+15 %	Težište+20 %	Težište+25 %
Odizaj prednjeg lijevog kotača [mm]	26	47	65	93	147	155
Brzina promjene kuta zakreata oko uzdužne osi vozila [°/s]	29,32	31,62	33,05	34,47	188	207
Bočno ubrzanje [g]	1,019	1,032	1,091	1,113	1,143	1,406
Kut zakreata upravljača [°]	394	396	401	403	402	402

Kako je vidljivo na prethodnim dijagramima (Slika 97., Slika 98.) vidljivo je da kod vozila s pomakom težišta od 20 % i 25 % dolazi do prevrtanja vozila (Slika 99.). Ovime se potvrđuju rezultati iz poglavlja 8.1.2. u kojemu je pokazano kako vertikalni pomak težišta, za isti relativni iznos pomaka, izaziva veći gubitak stabilnosti.



Slika 99. Prevrtnanje vozila, Fishhook, pomak težišta u vertikalnom smjeru

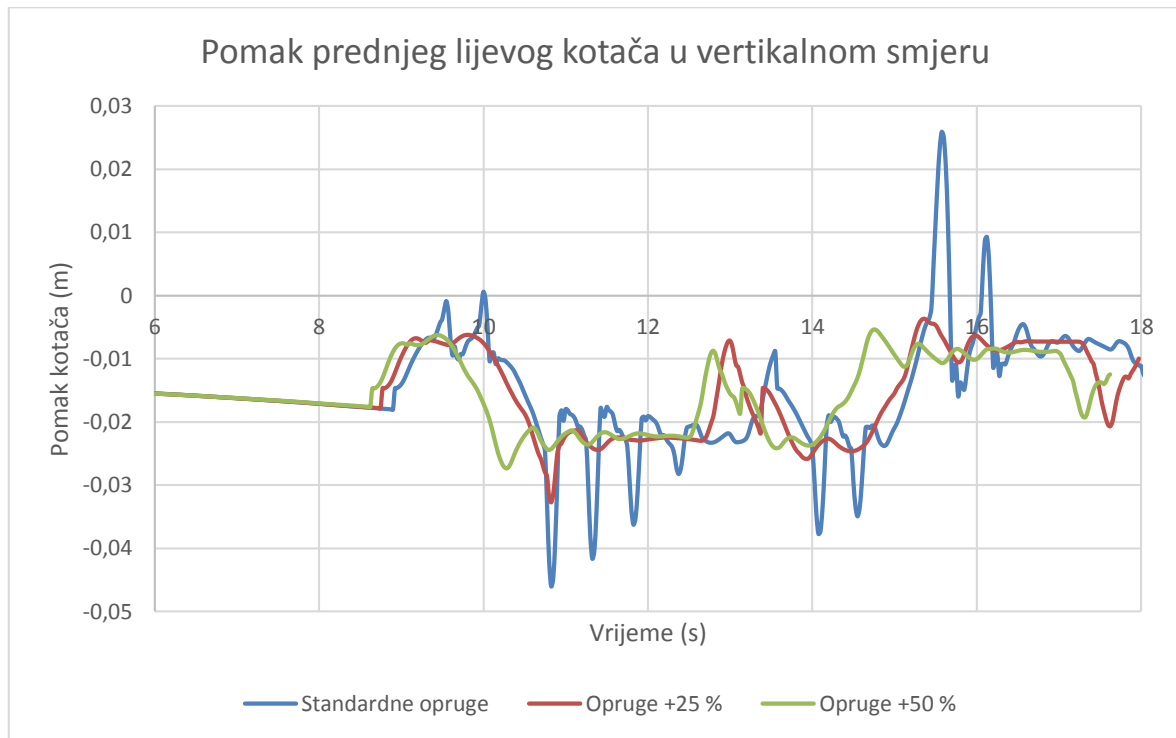
8.2.3. Širina pneumatika



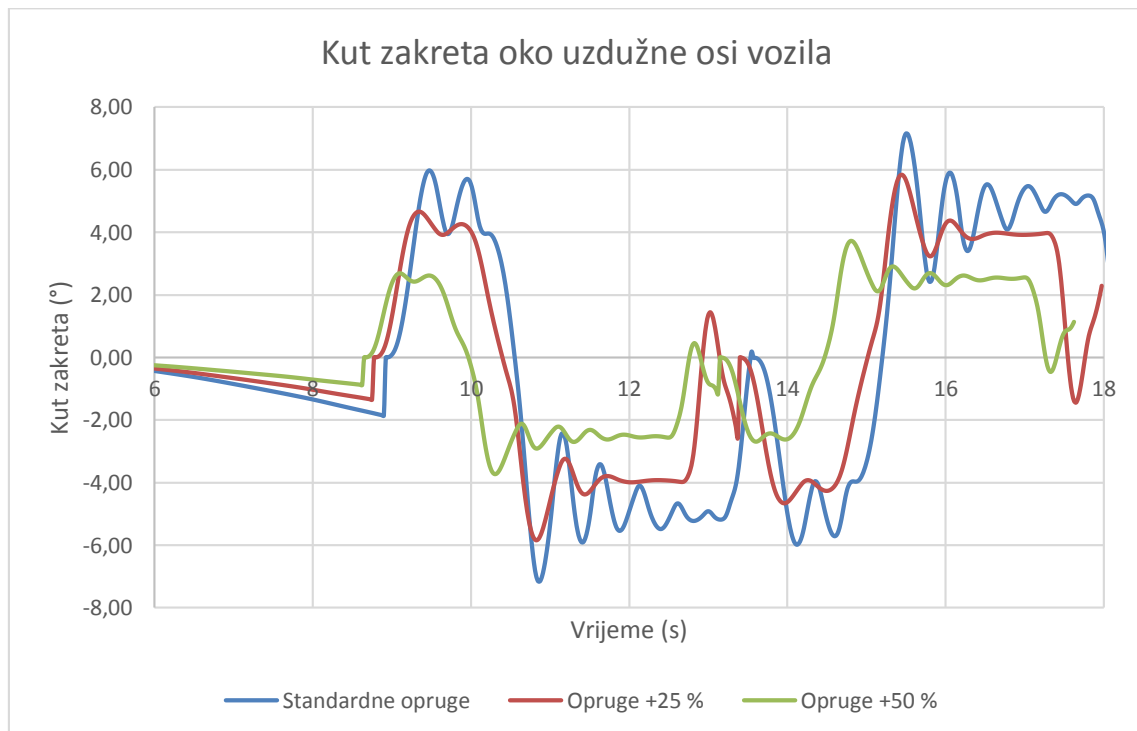
Slika 100. Pomak prednjeg lijevog kotača u vertikalnom smjeru, Fishhook, širina pneumatika

Budući da se ovom metodom ne ispituje udaljšavanje vozila od željene putanje već sklonost vozila prevrtanju pneumatici s većom mogućnošću prigušenja oscilacija. Također velika širina pneumatika, pri bočnom klizanju, izaziva velike bočne deformacije pneumatika koji mogu izazvati dodatne oscilacije što je vidljivo na dijagramu (Slika 100.).

8.2.4. Krutost opruga



Slika 101. Pomak kotača u vertikalnom smjeru, Fishhook, krutost opruga



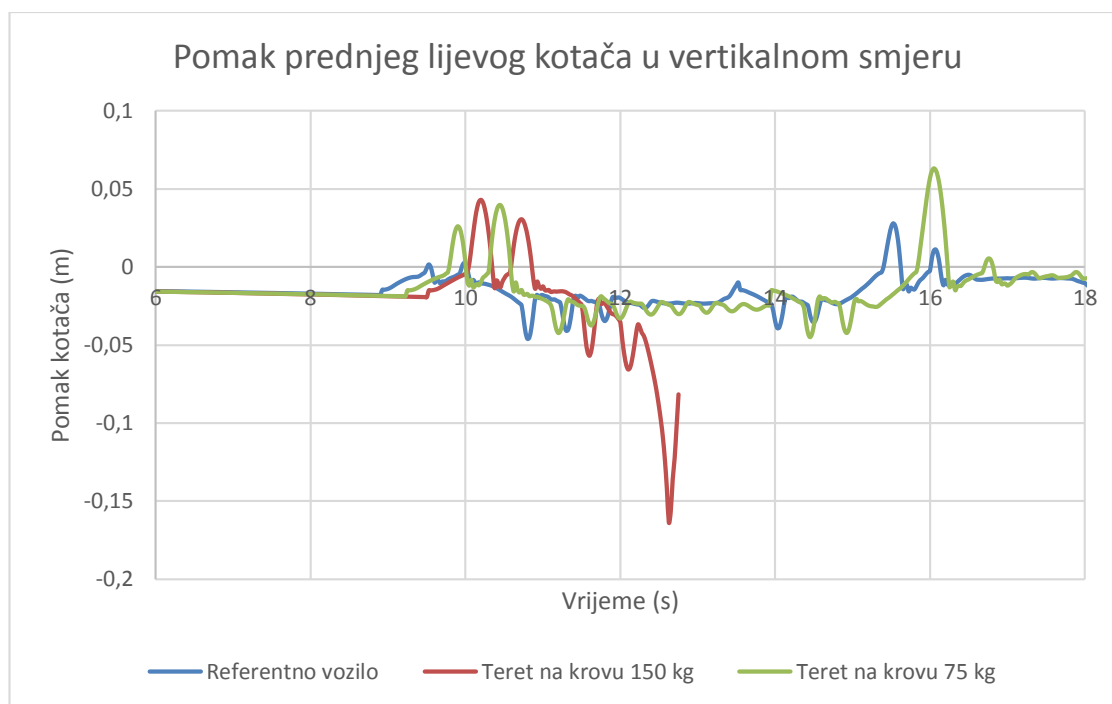
Slika 102. Kut zakreta oko uzdužne osi vozila, Fishhook, krutost opruga

Tablica 22. Maksimalne vrijednosti izlaznih parametara, Fishhook, krutost opruga

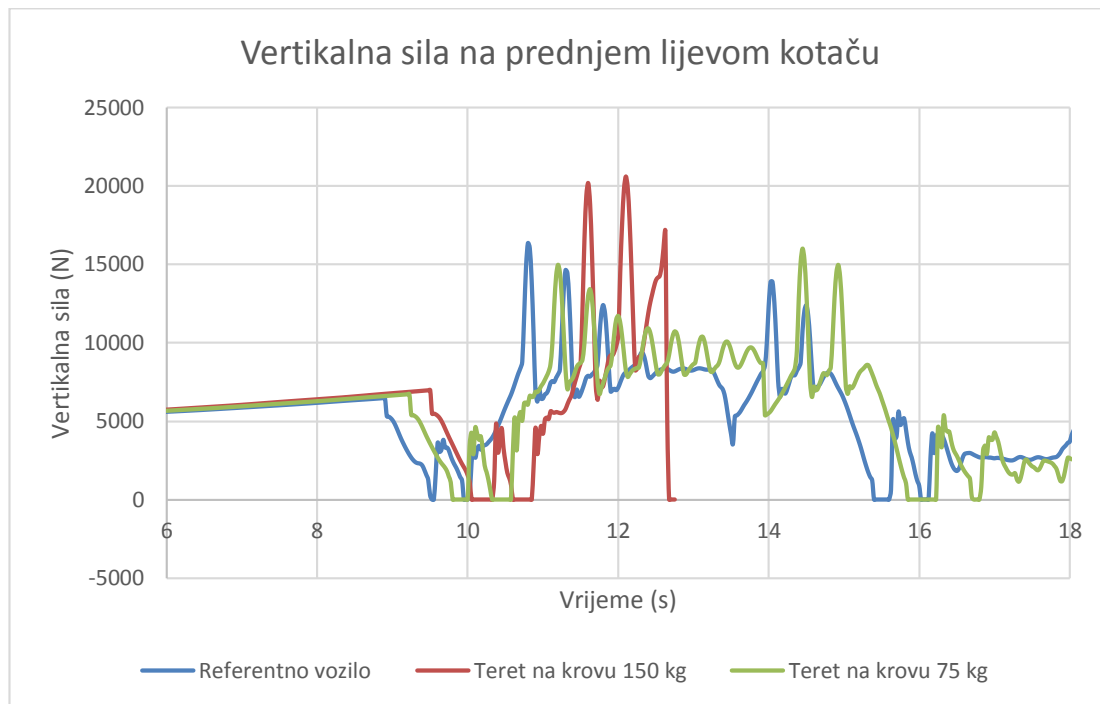
Maksimalni iznos izlaznih podataka	Stand. Opruge	Opruge + 25 %	Opruge + 50 %
Odizaj prednjeg lijevog kotača [mm]	26	-2	-5
Brzina promjene kuta zakreta oko uzdužne osi vozila [°/s]	29,32	24,81	17,07
Bočno ubrzanje [g]	1,019	0,89	0,87
Kut zakreta upravljača [°]	394	402	450

Na dijagramima (Slika 101., Slika 102.) vidljivo je da i malim povećanjem krutosti vozila dolazi do značajnog povećanja stabilnosti vozila, točnije raste otpornost vozila na prevrtanje. Uz to smanjene su i oscilacije gotovo svih izlaznih parametara čime se osigurava stabilnost pri naglim pokretima upravljača.

8.2.5. Teret na krovu



Slika 103. Pomak prednjeg lijevog kotača u vertikalnom smjeru, Fishhook, teret na krovu



Slika 104. Vertikalna sila na prednjem lijevom kotaču, Fishhook, teret na krovu

Tablica 23. Maksimalni iznos izlaznih podataka, Fishhook, teret na krovu

Maksimalni iznos izlaznih podataka	Ref. vozilo	Tnk ² 75 kg	Tnk ¹ 150 kg
Odizaj prednjeg lijevog kotača [mm]	26	62	-160!!!
Brzina promjene kuta zakreta oko uzdužne osi vozila [°/s]	29,32	38,62	174!!!
Bočno ubrzanje [g]	1,019	1,089	1,26
Kut zakreta upravljača [°]	394	404	423

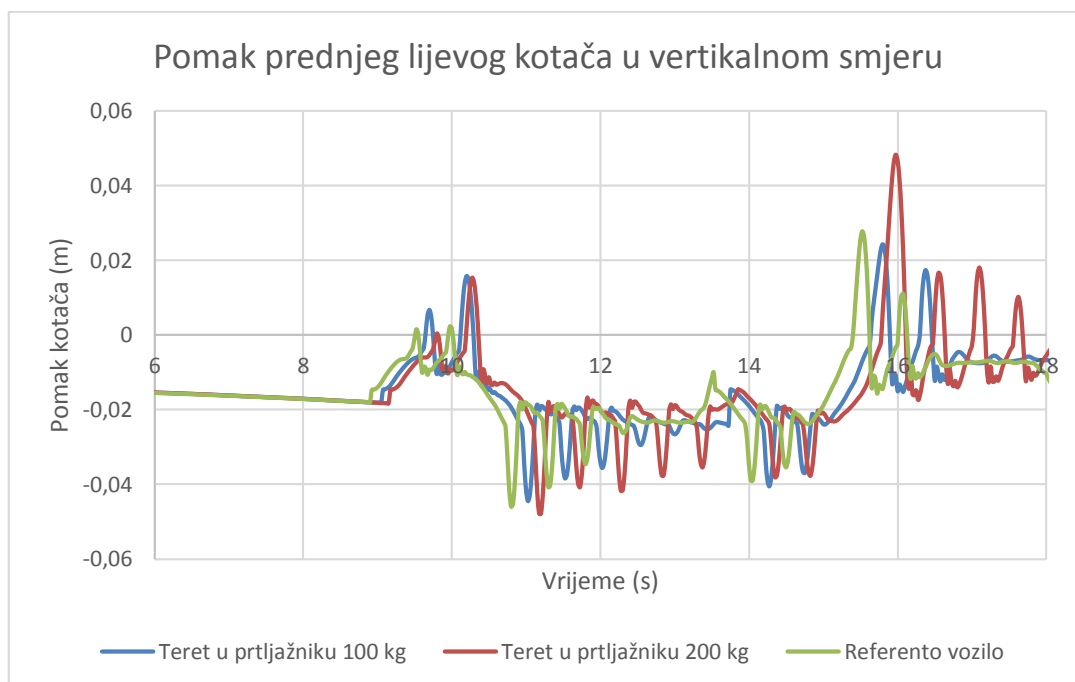
Iz dijagrama (Slika 103., Slika 104.) i tablice (Tablica 22.) može se zaključiti kako kod vozila s teretom od 150 kg na krovu dolazi do prevrtanja (Slika 105.). Zanimljivo je kako teret od 75 kg na krovu ne izaziva veliku opasnost o prevrtanja u usporedbi s referentnim vozilom, ali 150 kg daleko prekoračuje dozvoljene vrijednosti za ovo vozilo. Iz ovoga je moguće zaključiti da i malo povećanje tereta iznad dozvoljenih vrijednosti sigurno izaziva prevrtanje u ovoj ispitnoj proceduri.

² Teret na krovu

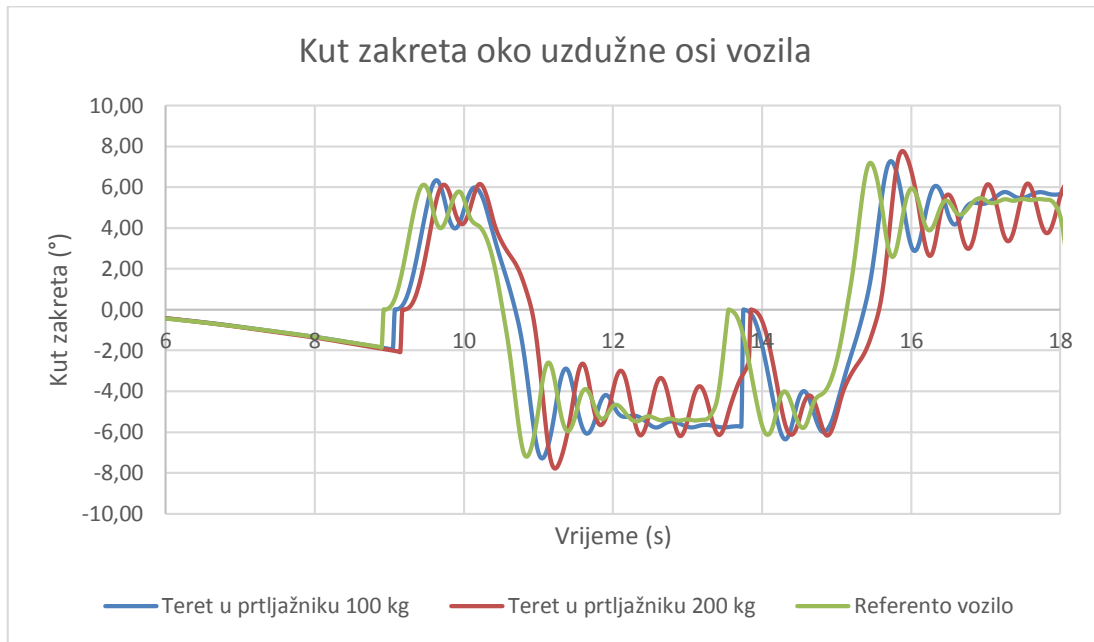


Slika 105. Animacija prevrtanja vozila, Fishhook, teret na krovu

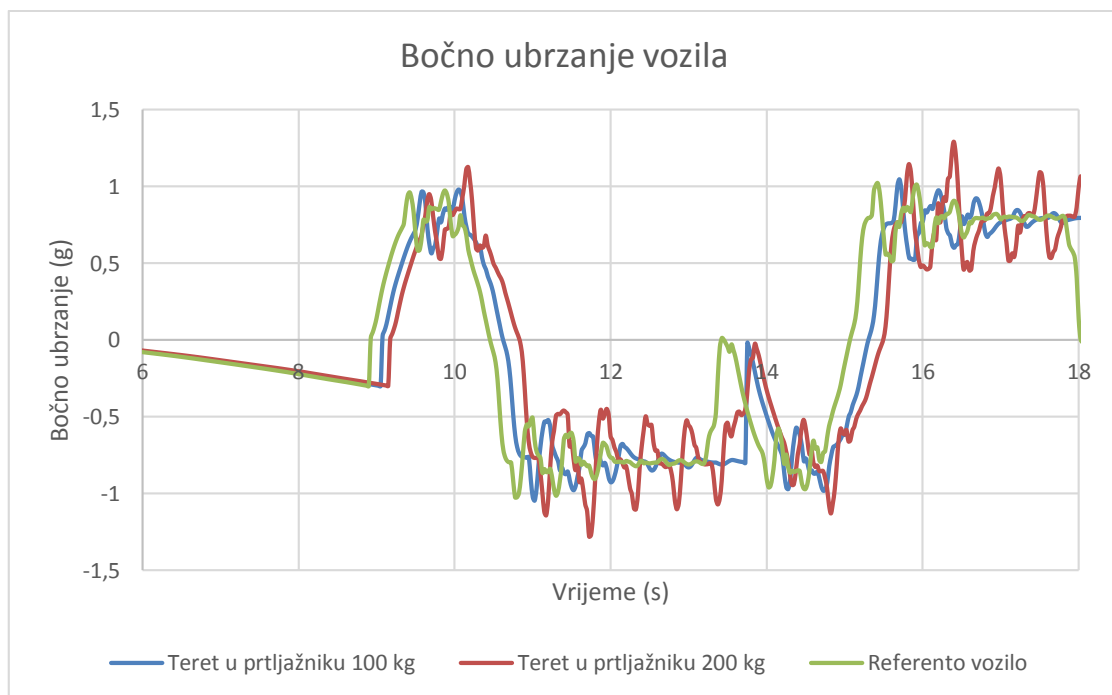
8.2.6. Teret u prtljažniku



Slika 106. Pomak prednjeg lijevog kotača, Fishhook, teret u prtljažniku



Slika 107. Kut zakreta vozila oko uzdužne osi, Fishhook, teret u prtljažniku



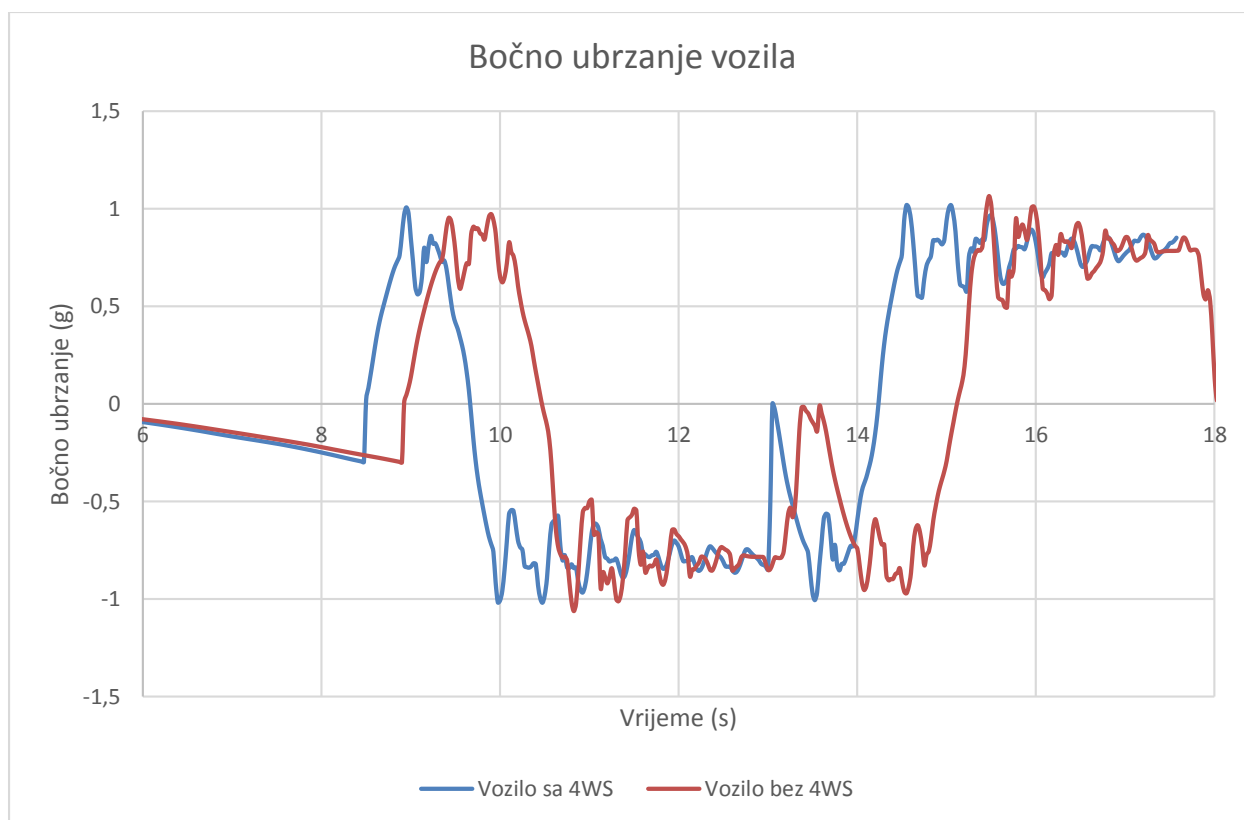
Slika 108. Bočno ubrzanje vozila, Fishhook, teret u prtljažniku

Rezultate ove simulacije korisnije je prikazati dijagramski (Slika 106., Slika 107., Slika 108.) jer se jasnije vide oscilacije vozila s većim teretom koje su slabo prigušene. Riječ je o oscilacijama bočnog ubrzanja, kuta zakreta oko uzdužne osi, pomaka kotača u vertikalnom smjeru, vertikalnih sila i brzini promjene kuta zakreta oko uzdužne osi vozila. Ove oscilacije su očekivane zbog povećane mase vozila i pomaka težišta prema stražnjoj strani i predstavljaju poteškoće kod naglih

pokreta upravljača i održavanja vozila na zadanoj putanji, no ne predstavljaju direktnu opasnost prevrtanju vozila.

8.2.7. Upravljanje svim kotačima (4WS)

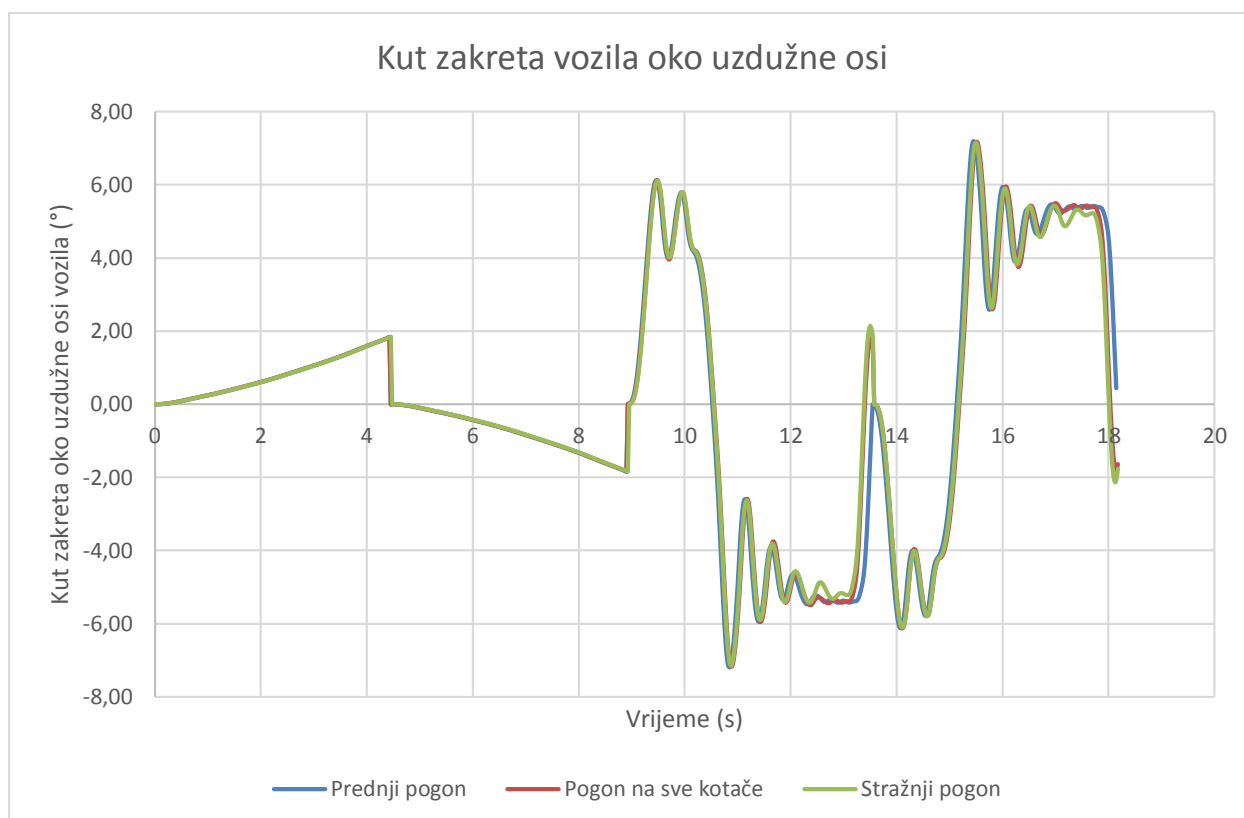
Upravljanje svim kotačima nema značajnog utjecaja u ovoj ispitnoj proceduru zbog toga što ni jedna od karakteristika dinamike vozila nije promijenjena. Jedina razlika u rezultatima od standardnog vozila je u tome što zbog dodatnog zakreta stražnjih kotača ranije dolazi do kuta zakreta upravljača pri kojima je ostvareno bočno ubrzanje od 0,3 g pa samim tim svi rezultati za vozilo s upravljanjem svih kotača vremenski ranije dobiva rezultate (Slika 109.). Budući da je riječ o velikoj brzini prilikom izvođenja procedure (70 km/h) kut zakreta stražnjih kotača je u istu stranu kao i kod prednjih kotača.



Slika 109. Bočno ubrzanje vozila, Fishhook, 4WS

8.2.8. Vrsta pogona

Vrsta pogona i cijeli pogonski sustav nema značajan utjecaj na rezultate ove ispitne procedure (ako se zanemari utjecaj promjene mase i težišta kod različitih pogona). Na dijagramu (Slika 110.) vidljivo je da su vrijednosti kuta zakreta, inače najbitnijeg izlaznog parametra za ovu proceduru, više od 95 % vremena gotovo identične.



Slika 110. Kut zakreta vozila oko uzdužne osi, Fishhook, vrsta pogona

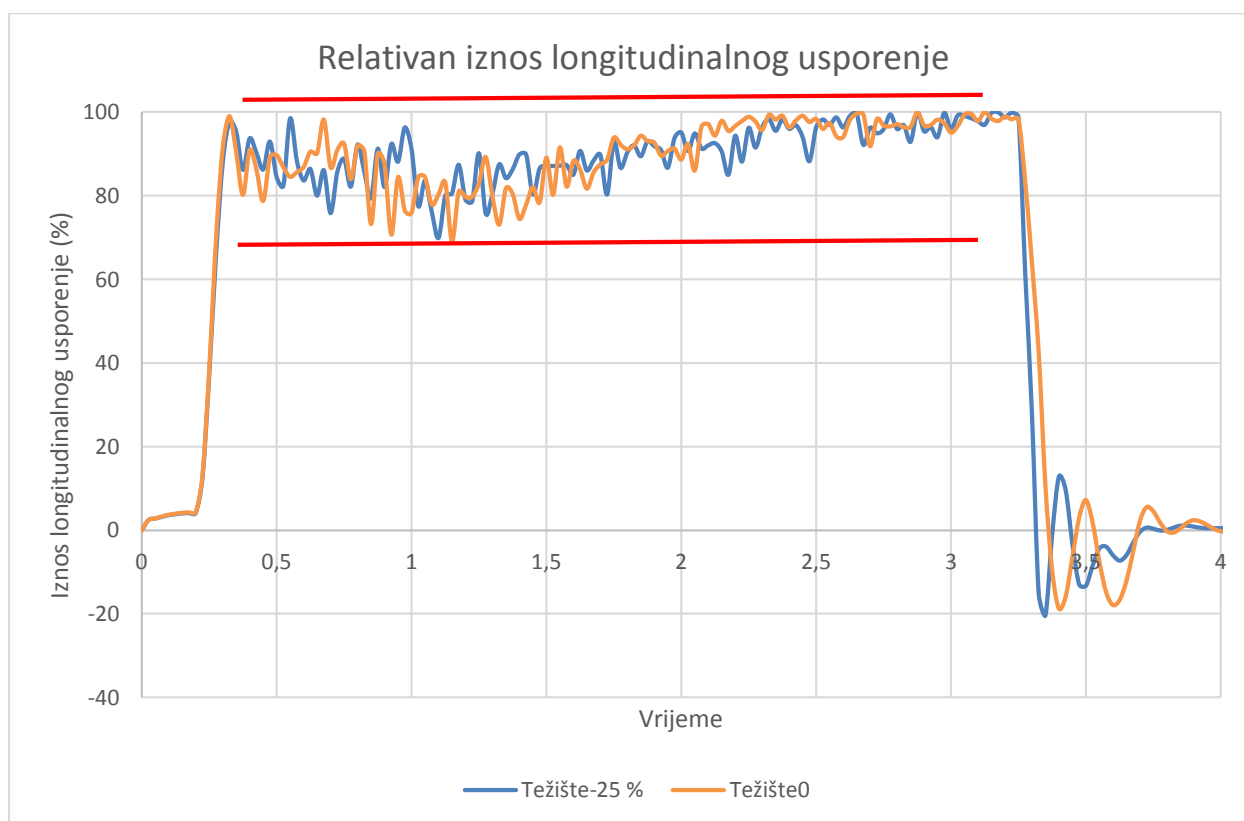
8.2.9. Zaključak, Fishhook

Povećanje težišta vozila iznad određene granice izaziva prevrtanje vozila dok kod pomaka težišta prema stražnjoj strani vozila ne dolazi do opasnosti od prevrtanja vozila. Također dodavanje tereta na krov povećava rizik od prevrtanja vozila dok to nije slučaj kod vozila s teretom u prtljažniku. Povećanje krutosti opruga smanjuje maksimalni iznos kuta zakreta oko uzdužne osi vozila što smanjuje opasnost vozila od prevrtanja. Upravljanje svim kotačima i promjena vrsta pogona nema značajnog utjecaja u ovoj proceduri.

8.3. Kočenje u zavoju (BiT³)

8.3.1. Promjena težišta u horizontalnom smjeru

Promjena težišta u horizontalnom smjeru ne stvara bitne promjene u ovoj ispitnoj proceduri zbog toga što ni na jedan način ne utječe na promjenu dinamičkih karakteristika za slučaj longitudinalnog kočenja. Na dijagramu (Slika 111.) prikazane su vrijednosti relativne longitudinalne deceleracije za dva rubna slučaja (Težište0 i Težište -25 %). Razlog prikazivanja samo ova dva slučaja je taj jer se zbog sličnosti rezultata dobiva dijagram u kojem nije moguće razabrati pojedine slučajeve.



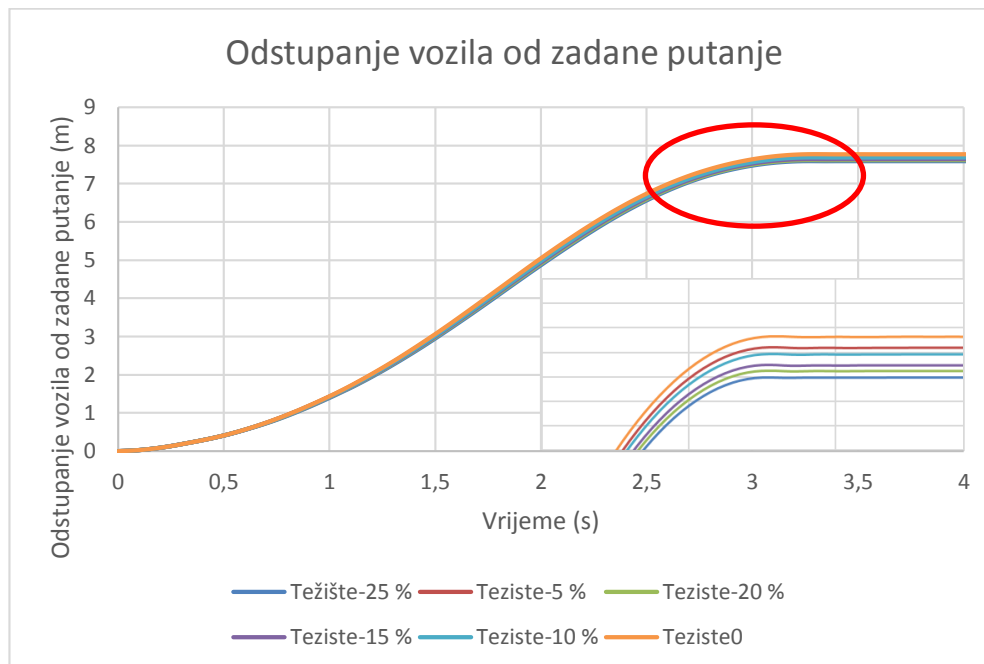
Slika 111. Relativan iznos longitudinalne deceleracije, BiT, promjena težišta u horizontalnom smjeru

Kako je iz dijagrama (Slika 111.) nije moguće jasno vidjeti koje vozilo ima bolje dinamičke karakteristike prilikom kočenja, izračunata je standardna devijacija središnjeg dijela dijagrama longitudinalnog usporenja, označeno na dijagramu. Za vozilo bez pomaka težišta standardna devijacija iznosi 7,60 dok za vozilo s pomakom težišta za 25 % prema stražnjoj strani vozila iznosi

³ BiT – engl. *Breaking in a Turn*

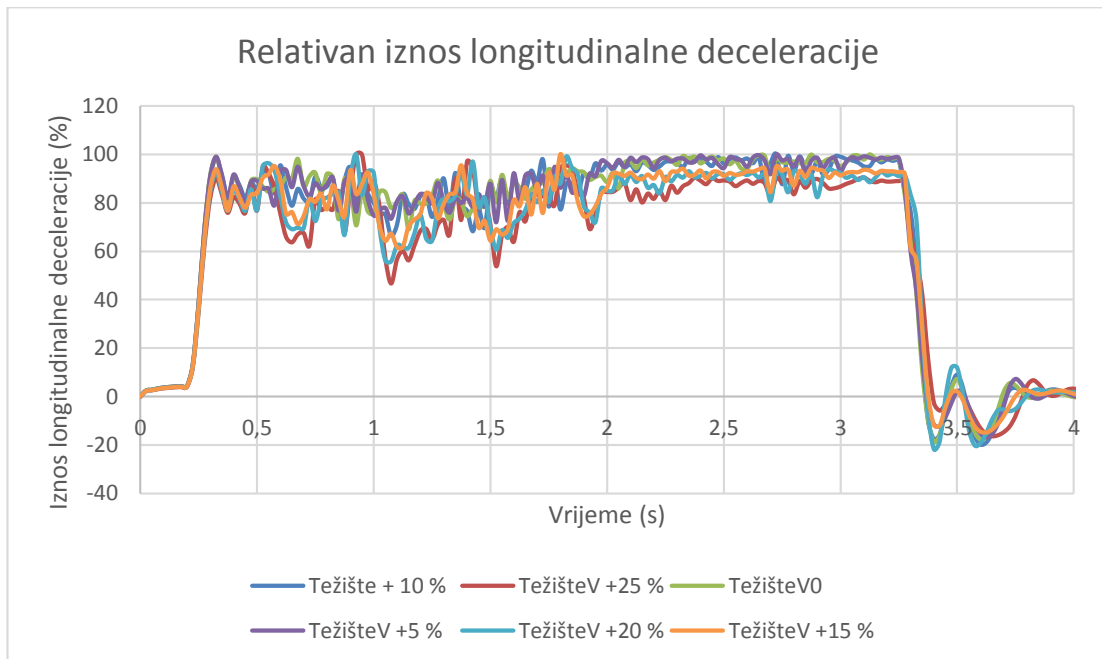
6,07 čime je vidljivo kako vozilo s pomakom težišta prema stražnjoj strani ima manje srednje rasipanje rezultata od srednje vrijednosti (u apsolutnom iznosu) od standardnog vozila.

Na dijagramu (Slika 112.) vidljivo je kako se s povećanjem pomaka težišta prema stražnjoj strani vozila smanjuje odstupanje vozila od zadane putanje.

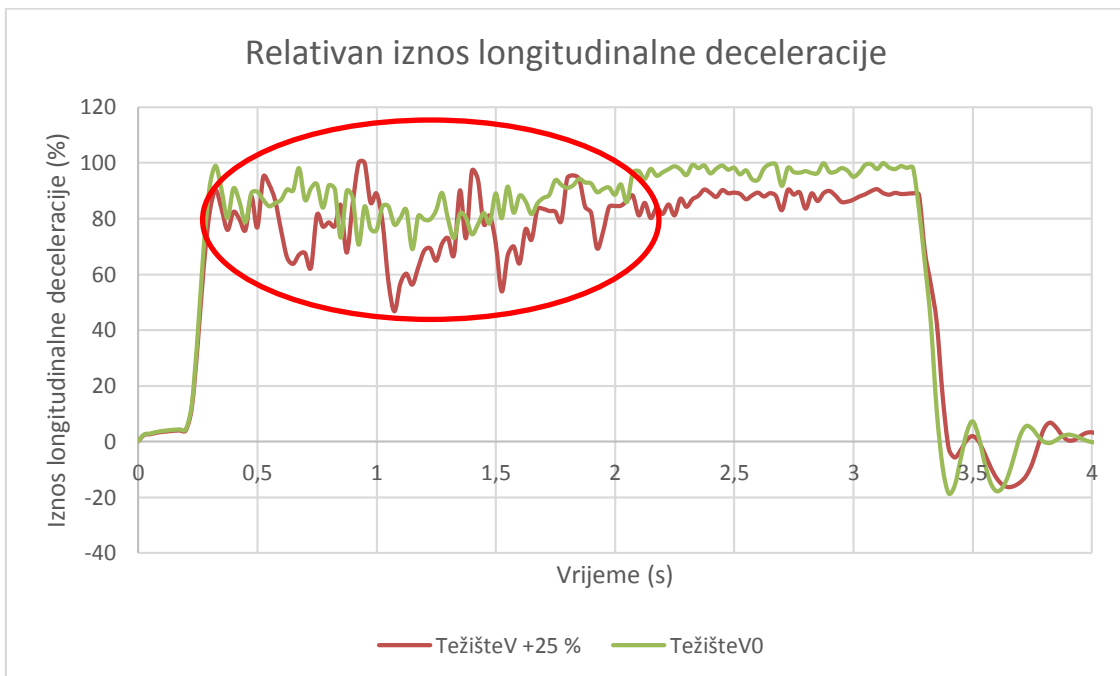


Slika 112. Bočni pomak vozila od zadane putanje, BiT, promjena težišta u horizontalnom smjeru

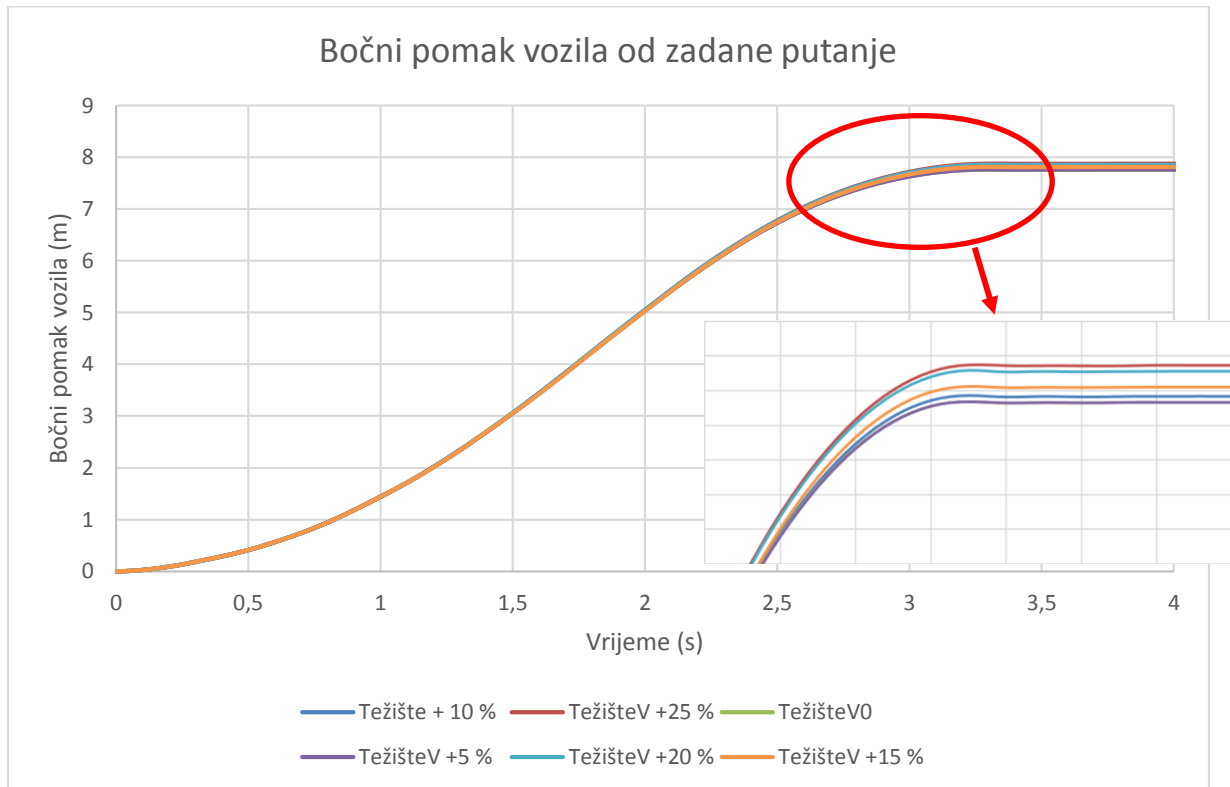
8.3.2. Promjena težišta u vertikalnom smjeru



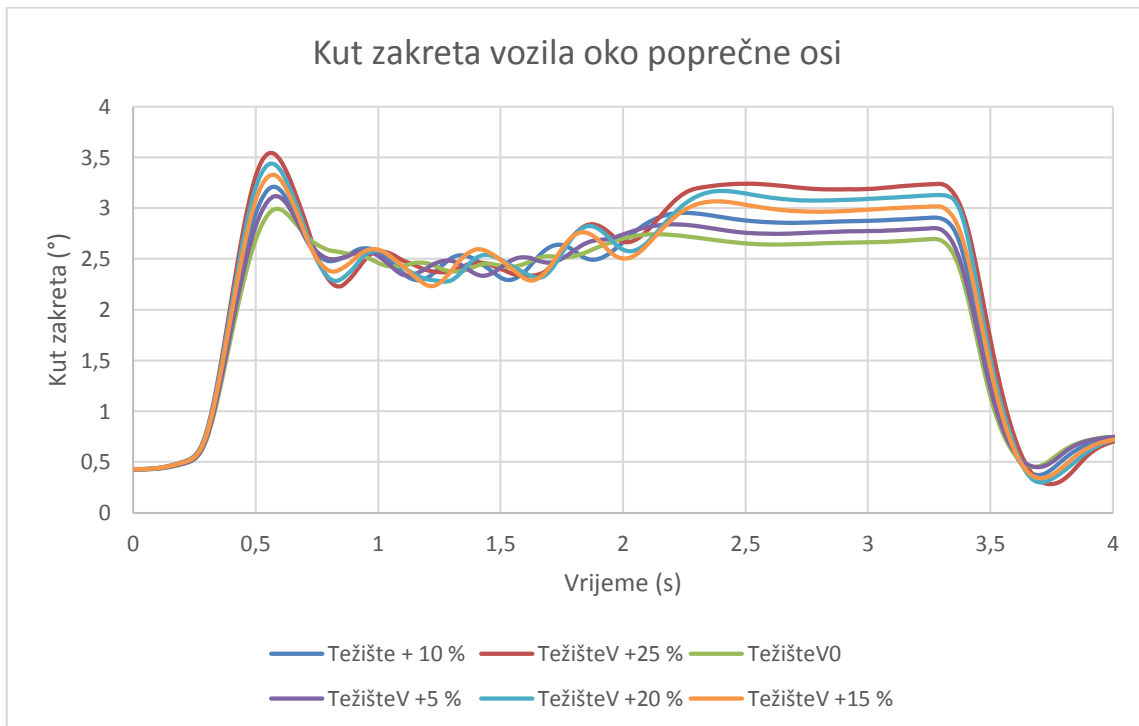
Slika 113. Relativan iznos longitudinalne deceleracije, BiT, promjena težišta u vertikalnom smjeru



Slika 114. Relativan iznos longitudinalne deceleracije (0 i 25 %), BiT, promjena težišta u vertikalnom smjeru



Slika 115. Bočni pomak vozila od zadane putanje, BiT, promjena težišta u vertikalnom smjeru

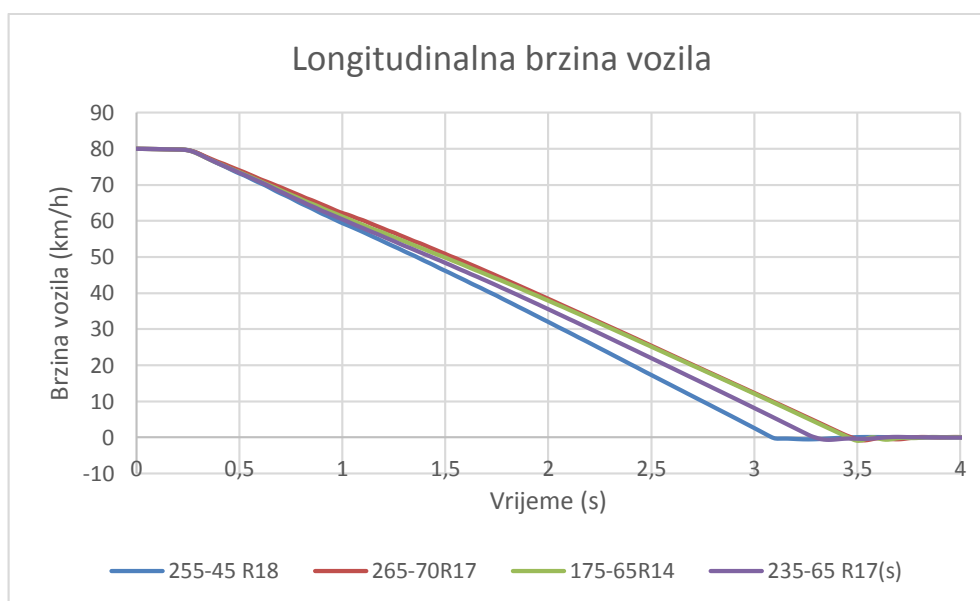


Slika 116. kut zakreta vozila oko poprečne osi, BiT, pomak težišta u vertikalnom smjeru

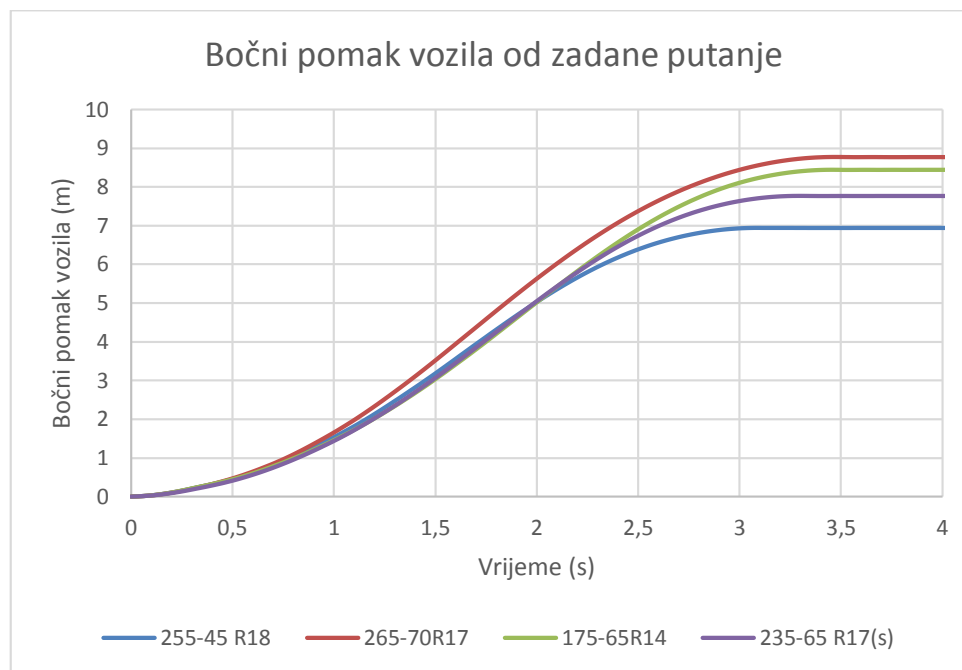
Na dijagramu (Slika 114.) najbolje je moguće vidjeti utjecaj pomicanja težišta u vertikalnom smjeru. Iznos standardne devijacije relativnog usporenja vozila za standardno vozilo iznosi 7,6 dok za vozilo s pomakom težišta u visinu vozila za 25 % iznosi 11,52. Vidljivo je kako je vrijeme kočenja jednako za oba granična slučaja, što je i očekivano zbog toga što nije mijenjan sustav kočenja ni masa vozila, ali vozilo s povećanom visinom težišta ima veće oscilacije u relativnom iznosu longitudinalne deceleracije. Također na dijagramu kuta zakreta oko poprečne osi (Slika 116.) vidljivo je veće poniranje vozila s povećanom visinom težišta te linearan rast maksimalnog iznosa poniranja porastom visine težišta.

8.3.3. Širina pneumatika

Budući da se vrijednosti na dijagramu relativnog usporenja vozila izrazito preklapaju za vozila s različitim širinama pneumatika taj dijagram nije prikazan. Zanimljivije je vidjeti dijagram longitudinalne brzine vozila i bočni pomak vozila od zadane putanje.



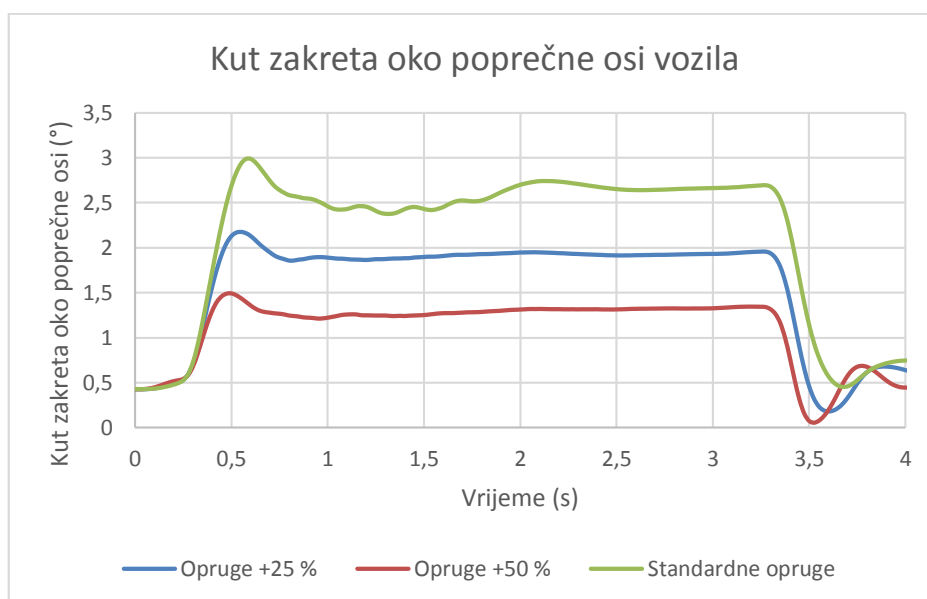
Slika 117. Longitudinalna brzina vozila, BiT, širina pneumatika



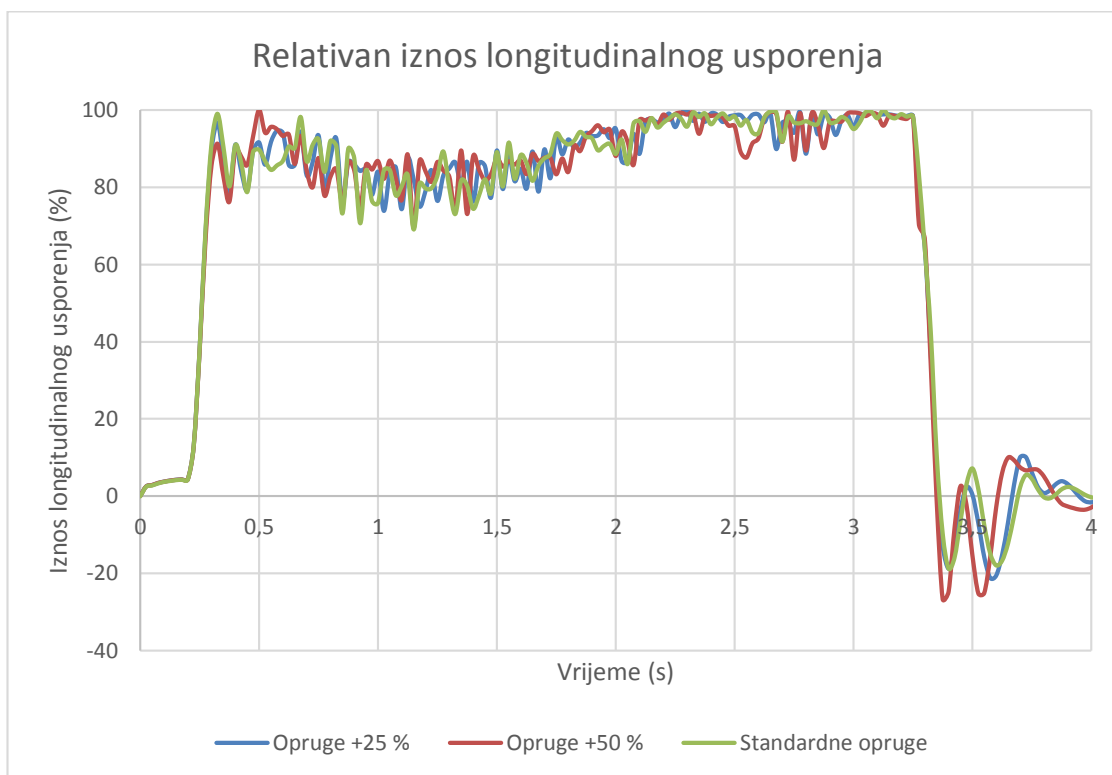
Slika 118. Bočni pomak vozila od zadane putanje, BiT, širina pneumatika

Korištenje pneumatika niskog profila skraćuje zaustavni put (Slika 117.) i bočno gibanje vozila (Slika 118.). Uži profil pneumatika izaziva dulji zaustavni put i veći bočni pomak vozila.

8.3.4. Krutost opruga



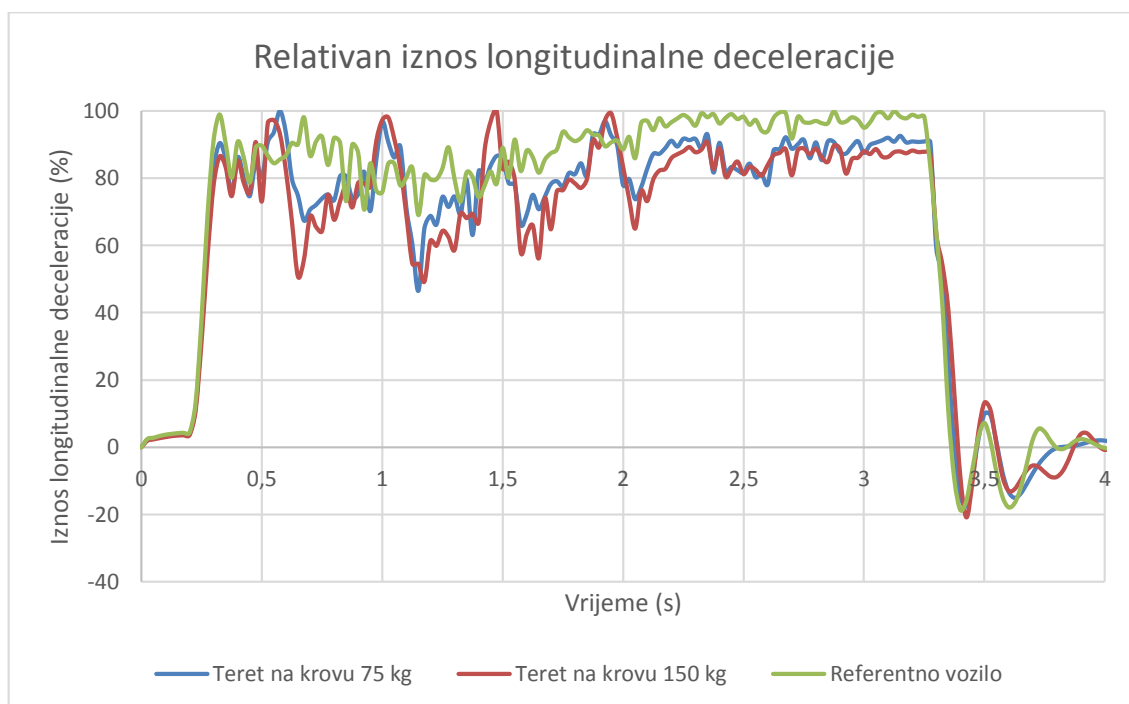
Slika 119. Kut zakreta vozila oko poprečne osi, BiT, krutost opruga



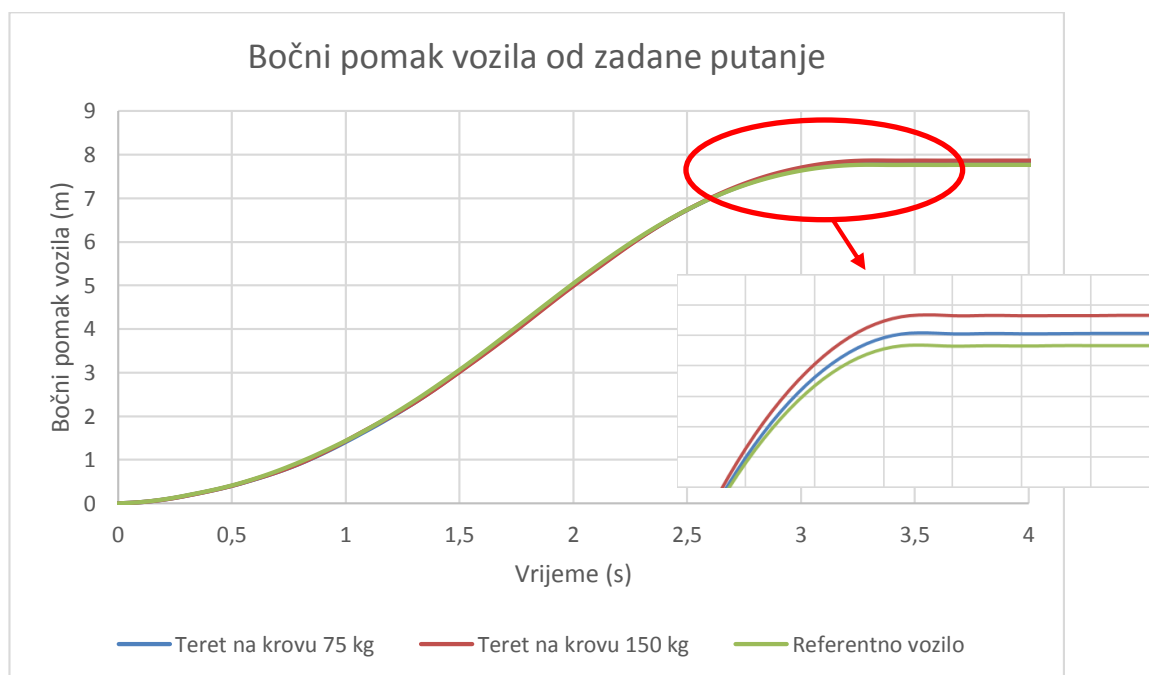
Slika 120. Relativan iznos longitudinalne deceleracije, BiT, krutost opruga

Najbitnija stvar koja se promjenom krutosti opruga željela postići je smanjenje poniranja vozila prilikom kočenja što se može vidjeti da je ostvareno na dijagramu (Slika 119.). Vidljivo je kao se kut zakreta oko poprečne osi gotovo u cijelom vremenskom periodu smanjuje povećanjem krutosti opruga. Na dijagramu (Slika 120.) nije najjasnije dolazi li do poboljšanja pri kočenju kod korištenja krućih opruga no standardna devijacija relativnog iznosa longitudinalnog usporenja vozila s 25 % većom krutošću opruga iznosi 7,11, a sa 50 % većom krutošću opruga 7,01, dok je kod standardnog vozila to 7,60. Ovime je vidljivo kako se povećanjem krutosti opruga smanjuje rasipanje vrijednosti longitudinalnog usporenja od srednje vrijednosti.

8.3.5. Teret na krovu



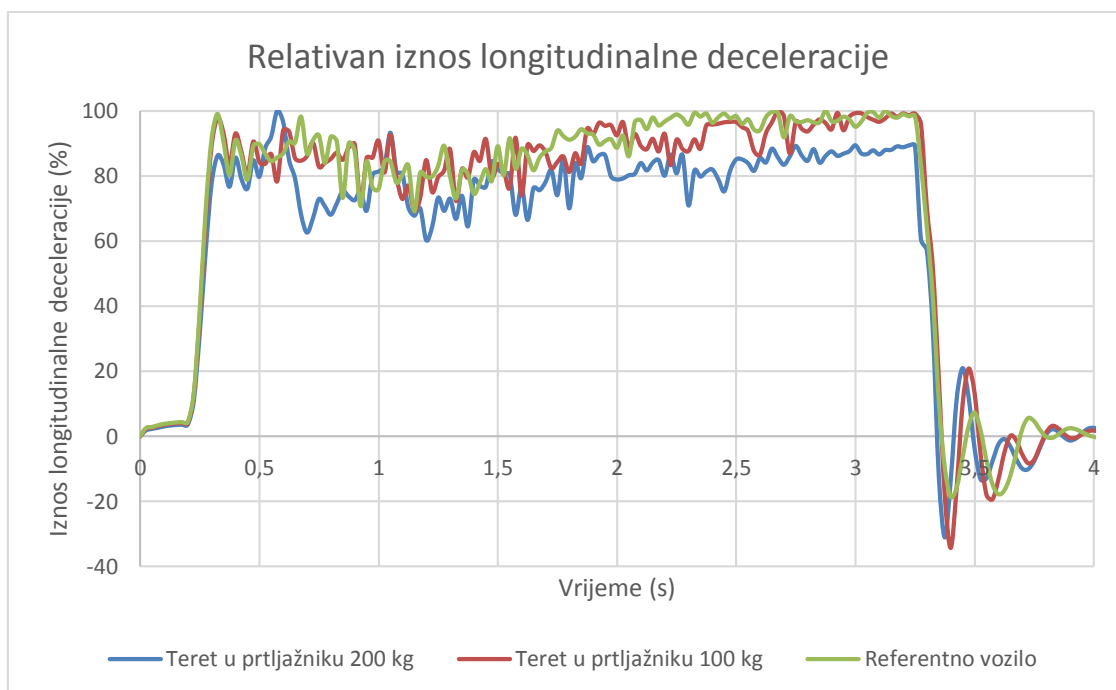
Slika 121. Relativna iznos longitudinalne deceleracije, BiT, teret na krovu



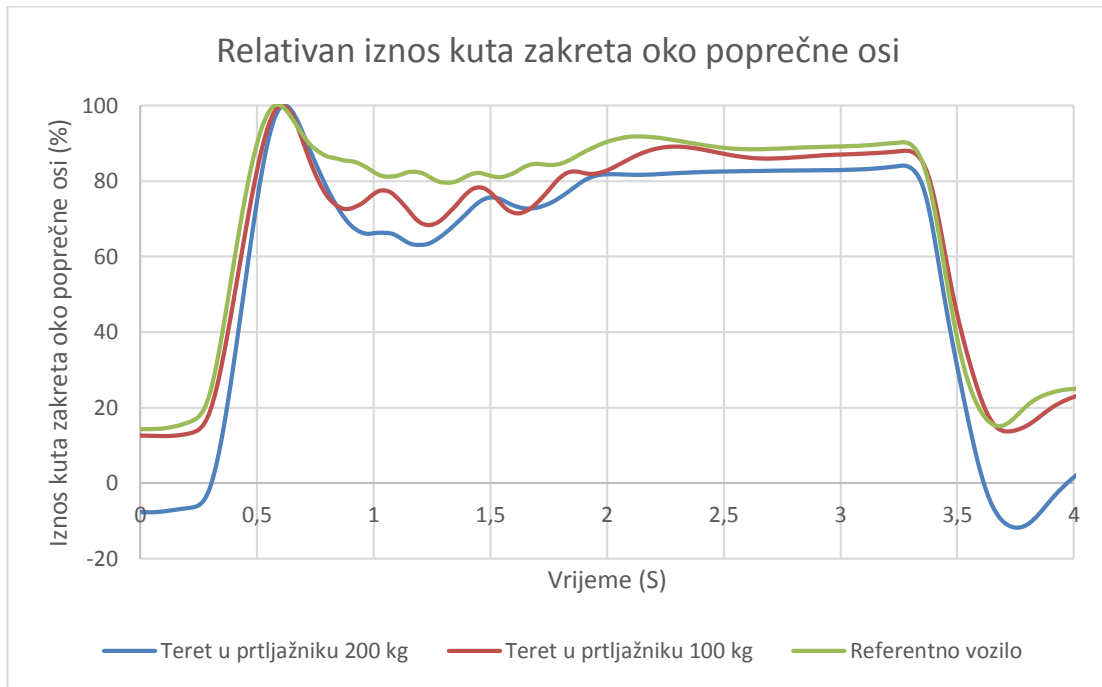
Slika 122. Bočni pomak vozila od zadane putanje, BiT, teret na krovu

Postavljanje tereta na krov povećava ukupnu masu vozila te visinu težišta, tako da se očekuju slični rezultati kao kod povećanja visine težišta. Jedina razlika je povećanje mase tako se može očekivati dulji put kočenja. Na dijagramu (Slika 121.) mogu se vidjeti potvrde prethodnih tvrdnji. Vidljive su povećanje oscilacije longitudinalne deceleracije kod tereta na krovu vozila, pogotovo kod tereta od 150 kg. Također bočni pomak vozila sličan je slučaju kod povećanja visine težišta vozila.

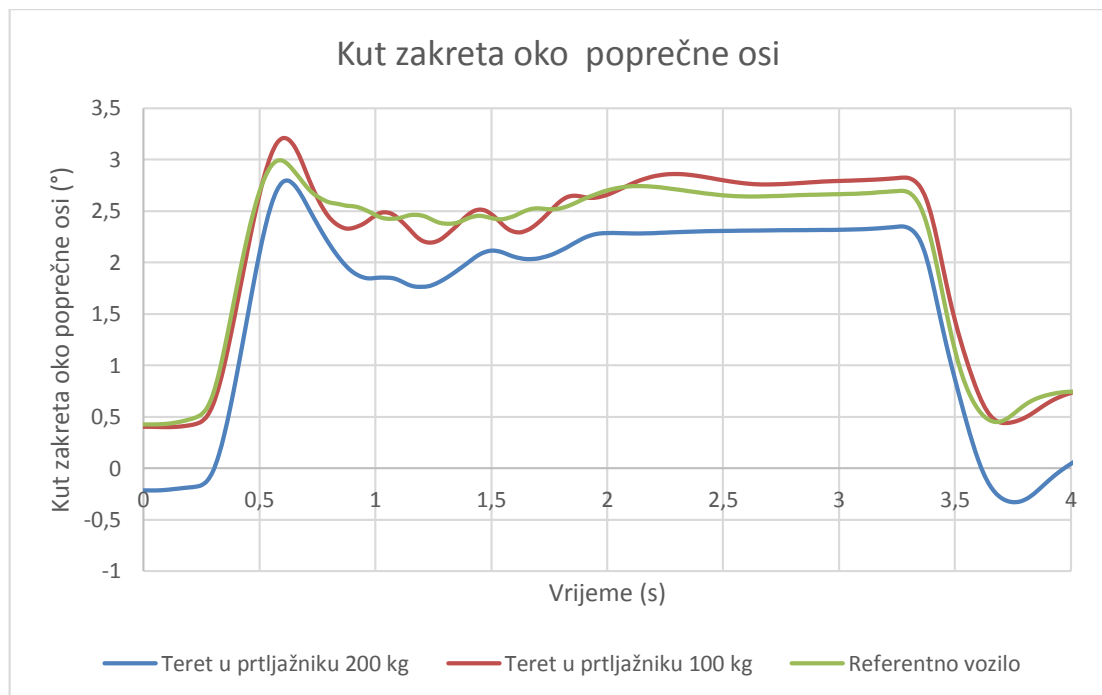
8.3.6. Teret u prtljažniku



Slika 123. Relativan iznos longitudinalne deceleracije, BiT, teret u prtljažniku



Slika 124. Relativan iznos kuta zakreta oko poprečne osi vozila, BiT, teret u prtljažniku



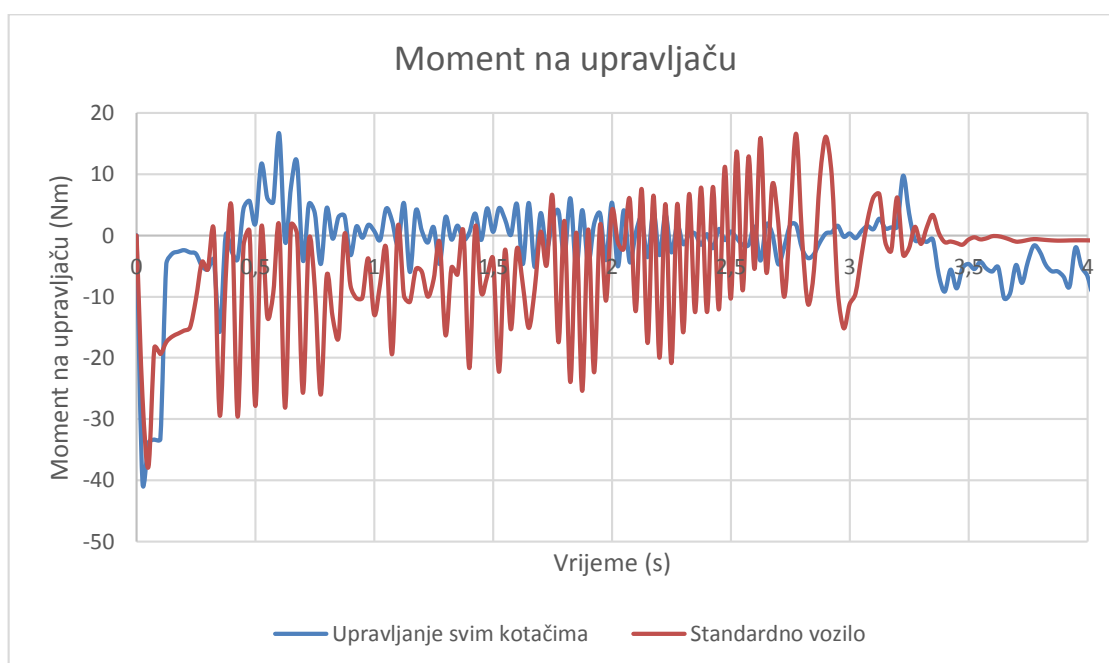
Slika 125. Kut zakreta oko poprečne osi, BiT, teret u prtljažniku

Na dijagramu (Slika 123.) vidljivo je kako povećanjem tereta u prtljažnom prostoru pada cjelokupna deceleracija tijekom gotovo cijelog dijela kočenja, kako je i očekivano. Također kut zakreta oko vertikalne osi u apsolutnom (Slika 125.) i relativnom (Slika 124.) iznosu (u odnosu na maksimalan iznos kuta zakreta oko poprečne osi) je manji kod vozila s većim teretom (pozitivan

kut zakreta predstavlja poniranje vozila). Ovakav odziv je očekivan jer teret na stražnjem kraju vozila podiže prednji dio vozila. Vidljivo je da je i veća razlika u kutu zakreta oko vertikalne osi za između vozila s teretom od 100 i 200 kg nego između vozila s teretom od 100 kg i vozila bez tereta.

8.3.7. Upravljanje svim kotačima

Nisu primijećene nikakve značajne razlike u vozilima s i bez upravljanja na sve kotače što potvrđuje i literatura [7.] jer nisu promijenjene nikakve značajke vezane za sposobnost vozila pri zaustavljanju. Jedina razlika vidljiva je kod momenta na upravljaču gdje su vidljive veći apsolutni iznosi momenata, ali značajno manje oscilacije (Slika 126.).



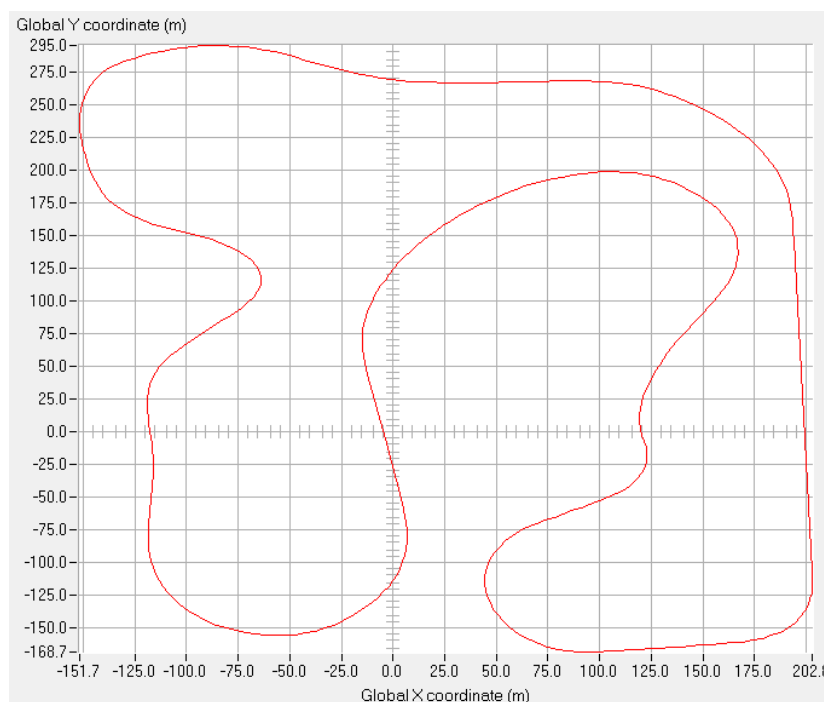
Slika 126. Moment na upravljaču, BiT, 4WS

8.3.8. Zaključak, BiT

Budući da kočenje, u ovom razmatranju, najviše ovisi o masi vozila teretu najveće razlike u usporenu javljaju se kod vozila s dodatnim teretom. Također kod vozila sa širim pneumaticima došlo je do prosječno boljeg usporenja što je i očekivano budući da je tada moguće ostvariti veću longitudinalnu silu na pneumatiku.

9. SIMULACIJA VOŽNJE TRKAĆOM STAZOM S ODABRANIM VOZILIMA

Uspoređivano je ponašanje vozila na trkaćoj stazi (Slika 127.), kako bi se pokazalo kako pojedini ulazni parametar utječe na ponašanje vozila u takvim uvjetima. Model vozača postavljen je tako da vozilo uvijek na rubu elipse trenja, odnosno da se s kotača razvija uvijek najveća moguća rezultantna sila.



Slika 127. Grafički prikaz trkaće staze na kojoj su ispitivana vozila

Na slici (Slika 128.) prikazana su vozila s parametrima kojima su ostvareni najveći doprinosi stabilnosti iz prethodnih procedura. Vremena potrebna svakom vozilu da završi jedan krug nalaze se u tablici (Tablica 24.). Iz tablice, i sa slike, vidljivo je kako pneumatici niskog profila 255/45 R18 i pogon na sve kotače omogućuju vozilu da puno ranije završe zadanu stazu od ostalih vozila, odnosno omogućuju vozilu bolji prijenos momenta na podlogu. Iza njih je vozilo s oprugama povećane krutosti za 50 %, slijedi vozilo s upravljanim svim kotačima iza kojih je standardno vozilo, a iz svih je vozilo sa stražnjim pogonom.

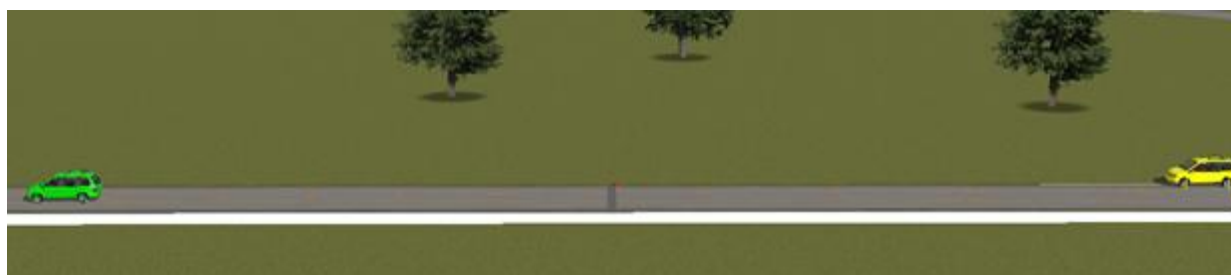


Slika 128. Vozila na cilju trkaće staze (crno- pneumatici 255/45 R18, sivo- pogon na sve kotače, plavo- opruge 50 %, ljubičasto- pogon na sve kotače, žuto- standardno vozilo, crveno- stražnji pogon)

Tablica 24. Vrijeme potrebno vozilu da završi krug staze

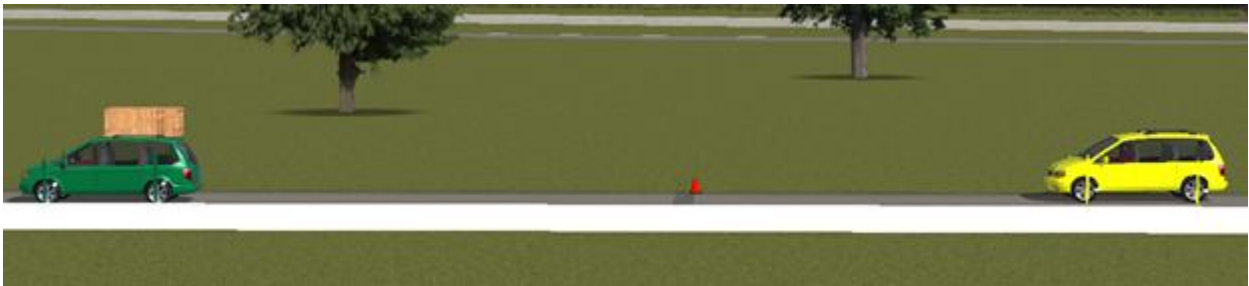
Parametar	Vrijeme potrebno vozilu da završi krug staze [s]
Standardno vozilo	99,54
Pogon na stražnje kotače	99,74
Upravljanje svim kotačima	99,32
Opruge 50 %	98,33
Pogon na sve kotače	97,96
Pneumatici 255/45 R18	97,89

Također napravljen je model vozila u kojem su postavljeni svi parametri koji su osigurali neko poboljšanje na vrijeme potrebno vozilu da završi stazu. Zaostajanje standardnog vozila za vozilom s poboljšanim parametrima prikazano je na slici (Slika 129.). Vrijeme potrebno vozilu s poboljšanim parametrima da završi zadanu stazu iznosi 96,72 sekunde, što je 2,82 sekunde brže od standardnog vozila.

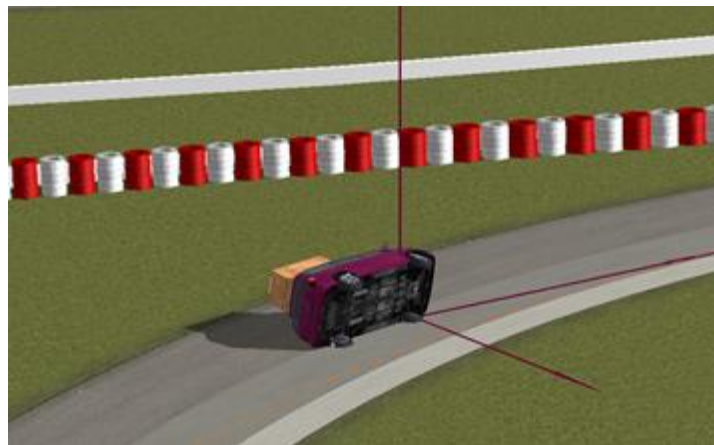


Slika 129. Zaostajanje standardnog vozila (žutog) vozilom s poboljšanim parametrima (zeleno)

Ispitano je također kako se ponaša vozilo s poboljšanim parametrima kojemu je na krov postavljen teret od 150 kg te 200 kg tereta u prtljažnik. Vozila na cilju su prikazana na slici (Slika 130.) na kojoj je vidljivo zaostajanje standardnog vozila za vozilom s poboljšanim parametrima i teretom. Vrijeme potrebno vozilu s teretom i poboljšanim parametrima da završi krug staze iznosi 98,54 sekundi što je 1,82 sekunde sporije od istog tog vozila bez tereta, ali je i dalje brže od standardnog vozila i to za cijelu sekundu. Valja spomenuti da je ispitano i standardno vozilo s istim teretom, ali je, za isti model vozača, došlo do prevrtanja vozila pred kraj staze (Slika 131.).



Slika 130. Zaostajanje standardnog vozila za vozilom s poboljšanim parametrima i teretom



Slika 131. Prevrtanje standardnog vozila s teretom na trkaćoj stazi

10. ZAKLJUČAK

Ponašanje vozila analizirano je kroz tri odabrane ispitne procedure: Izbjegavanje zapreke (Dvostruka izmjena pravca) prema normi ISO 3888-2:2011 kojom se definira ponašanje vozila kod nagle promjene smjera odnosno izbjegavanja zapreke, *Fishhook* procedura (riblja udica) koja se koristi za kvantifikaciju svojstava vozila prilikom izazivanja prevrtanja te procedura kočenja u zavoju prema normi ISO 7975:2006 u kojoj se ispituje poprečna stabilnost vozila, odstupanje od zadanog smjera i promjena bočnog ubrzanja prilikom kočenja vozila u zavoju konstantnog radijusa, napravljen je detaljan pregled utjecajnih parametara.

Za navedene ispitne procedure napravljen je detaljan pregled utjecajnih parametara i dinamičkih karakteristika za ocjenu ponašanja vozila. Simulacijom u programskom paketu za analizu dinamike vozila CarSim, analiziran je utjecaj promjene različitih parametara na stabilnost vozila. U simulacijama su mijenjani položaji težišta u horizontalnom i vertikalnom smjeru, krutost opruga, širina pneumatika, vrsta pogona, broj upravljivih osovina te vozilo s i bez tereta u prtljažniku i na krovu.

Rezultati simulacija potvrdili su tvrdnje iz literature vezane uz promatrane parametre i njihov utjecaj na stabilnost vozila. U poglavlju 8. Analiza rezultata prokomentirani, za svaku ispitnu proceduru zasebno, utjecaji svih parametara zasebno. Potvrđeno je da pomak težišta u vertikalnom smjeru prema pozitivnoj strani (veća visina težišta vozila) imaju utjecaj smanjene mogućnosti vozila na praćenje zadane putanje i povećava sklonost prevrtanju vozila. Također pomak težišta u horizontalnom smjeru prema stražnjoj strani vozila uzrokuje podupravljivost i otežano praćenje zadane putanje, ali sklonost prevrtanju nije značajno porasla. Povećanje krutost opruga u svim slučajevima donijela je poboljšanje stabilnosti vozila, ali kruće opruge smanjuju udobnost vožnje, što nije ispitivano u ovome radu. Simulacija vozila s različitim širinama profila pneumatika također je pokazala kako pneumatici niskog profila i veće širine poboljšavaju stabilnost vozila, ali također uzrokuju smanjenje udobnosti vožnje. Teret na krovu pokazao se opasnijim za gubitak stabilnosti od tereta u prtljažniku, što je bilo i očekivano. Simuliranjem upravljanja svim kotačima potvrđene su njegove prednosti pri praćenju vozila zadane putanje, ali pri otpornosti prevrtanju i prilikom kočenja nije bilo značajnih promjena (ukoliko se zanemari dodatna masa takovog sustava). Također promjenom vrste pogona nije bilo utjecaja pri promjeni vozila na sklonost prema prevrtanju, jedno je potvrđeno otežano praćenje zadane putanje vozila s stražnjim pogonom i poboljšano kod vozila s pogonom na sve kotače u odnosu na vozilo s pogonom na prednje kotače.

Literatura

- [1.] Lulić Z., Ormuž K., Šagi G.; Motorna vozila – predavanja; FSB; 2015./2016.
- [2.] Anders Karlsson; Test Procedures and Evaluation Tools for Passenger Vehicle Dynamics; Master's thesis in Automotive Engineering; Chalmers University of Technology; Göteborg, Sweden 2014
- [3.] SAE J266; *Steady-State Directional Control Test Procedures for Passenger Cars and Light Trucks*; 1996.
- [4.] Norma ISO 7975, Kočenje u zavoju
- [5.] D. Schramm, M. Hiller, R. Bardini; Vehicle Dynamics – Modeling and Simulation; Springer Heidelberg New York Dordrecht London; 2014.
- [6.] Tehnika motornih vozila; travanj 2004.; Zagreb
- [7.] Thomas D. Gillespie; Fundamentals of Vehicle Dynamics; Society of Automotive Engineers, Inc.
- [8.] Heissing, B., Ersoy, M; Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives; 2011.
- [9.] G. Šagi; Računalne simulacije u razvoju motora i vozila; Simulacije dinamike vozila u programskom paketu CarSim; FSB; 2016/2017
- [10.] The Fishhook Maneuver Test Procedure; Laboratory Test Procedure for Dynamic Rollover; U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration; March 2013.
- [11.] A test procedure for vehicle dynamic controllers; ika Report 8329
- [12.] REGULATION (EEC) No 4064/89 MERGER PROCEDURE Article 6(1)(b) NON-OPPOSITION Date: 17/03/1999

PRILOZI

- I. CD-R disc