

Analiza ponašanja električnih bolida Formule Student u programskom paketu Adams car

Vrban, Antonio

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:235:100774>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-18**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Antonio Vrbanić

Zagreb, ožujka 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc.dr.sc. Dario Zlatar, mag.ing.mech.

Student:

Antonio Vrban

Zagreb, ožujka 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Dariu Zlataru na ukazanom povjerenju da ću završiti ovaj zadatak, te na ustupljenoj literaturi i pomoći pri rješavanju usputnih problema.

Zahvaljujem se članovima FSB Racing Team-a na pomoći pri izradi modela, raspravama i literaturi.

Također najviše se zahvaljujem svojoj obitelji i svim prijateljima koji su mi pružili podršku tijekom izrade rada i preddiplomskog studija.

Antonio Vrban



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Antonio Vrban**

JMBAG: **0035218129**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza ponašanja električnih bolida Formule student u programskom paketu Adams Car**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of a Formula Student electric race cars behaviour in software package Adams Car**

Opis zadatka:

FSB Racing Team, prvi hrvatski Formula Student tim koji je prije osamnaest godina osnovan kao projekt udruge Hrvatska studentska asocijacija strojarških fakulteta, svoju punoljetnost je proslavio predstavljanjem električnog bolida koji je ujedno i prvi hrvatski trkači automobil na struju. Paralelno s izradom spomenutog električnog bolida radilo se i na konstrukciji novog električnog bolida. Prilikom razvoja vozila nezaobilazna je primjena računalnih simulacija, a u sklopu ovog rada, cilj je razviti oba električna bolid FSB Racing Team-a, bolida s dva elektromotora vezana na šasiji i bolida s elektromotorima u glavčinama kotača, korištenjem programskog paketa Adams Car.

U okviru završnog rada potrebno je:

- U programskom paketu za analizu dinamike vozila Adams Car-u izraditi modele električnih bolida primjenom dinamike više tijela (engl. Multibody Dynamics).
- Kod modeliranja električnih bolida u programskom paketu Adams Car odrediti materijal komponenti ovjesa temeljem analize dopuštenih naprezanja.
- U programskom paketu Adams Car izraditi virtualne staze, definirati virtualni model vozača te na kraju analizirati ponašanje električnih bolida.
- Prikazati razlike u konstrukciji bolida s elektromotorima vezanim na šasiji u odnosu na bolid s elektromotorima u glavčinama kotača, te kroz vožnju na izrađenim stazama, usporediti rezultate ta dva bolida.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Dario Zlatar

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
SAŽETAK	IV
SUMMARY	V
1. UVOD	1
1.2 O FSB Racing Team-u.....	1
1.2. Ciljevi u razvoju i nova konstrukcijska rješenja.....	3
2. DINAMIKA VOZILA	5
2.1. Kinematičke značajke	5
2.2. Ovjes	8
3. DINAMIKA VIŠE TIJELA.....	12
3.1. Općenito o dinamici više tijela	12
3.2. Programski paket ADAMS	15
4. IZRADA MODELA POMOĆU ADAMS-A	18
4.1. Opis konstrukcije modela vozila	18
4.2. ADAMS Car Template builder.....	19
4.3. ADAMS Car Standard interface	23
4.4. Sklop vozila	25
5. ODREĐIVANJE MATERIJALA OVJESA	26
5.1. Određivanje sila pomoću ADAMS-a.....	26
5.2. Dimenzioniranje komponenata ovjesa pomoću Abaqusa	27
6. USPOREDBA DVA MODELA	30
6.1. Procedura ubrzanja	30
6.2. Procedura kočenja.....	32
6.3. Procedura dvostruke izmjene trake.....	35
6.4. Procedura održavanja konstantne brzine s vertikalnom pobudom	39
6.5. Zaključak nakon usporedbe 2 modela.....	41
7. ZAKLJUČAK	42
LITERATURA.....	43
PRILOZI	Error! Bookmark not defined.

POPIS SLIKA

Slika 1. Strix R	2
Slika 2. Vulpes R i dio FSB Racinga Team-a.....	3
Slika 3. CAD model raspregnutog ovjesa.....	4
Slika 4. Centar valjanja	6
Slika 5. Središta poniranja	6
Slika 6. Osnovni zakreti vozila	7
Slika 7. Vertikalni presjek amortizera sa Vulpes R-a [2]	9
Slika 8. Osnovni parametri kotača [3]	11
Slika 9. Koraci kod modeliranja [5]	13
Slika 10. Welcome dijaloški okvir ADAMS Car-a.....	15
Slika 11. Osnovni model vozila	18
Slika 12. Generički predložak ovjesa	19
Slika 13. Modificirani predložak ovjesa	20
Slika 14. Karakteristične točke	20
Slika 15. Elementi ovjesa.....	21
Slika 16. Grafički prikaz elemenata	21
Slika 17. Veze između elemenata	22
Slika 18. Sile koje djeluju na elemente.....	22
Slika 19. Odabir materijala elemenata.....	23
Slika 20. Simulacija ponašanja prednjeg ovjesa	24
Slika 21. Kompletan sklop vozila	25
Slika 22. Simulaciju ubrzavanja vozila gibanjem na zakrivljenoj putanji.....	27
Slika 23. FEM analiza poprečnih ramena	29
Slika 24. Parametri procedure ubrzanja	30
Slika 25. Graf brzina.....	31
Slika 26. Graf uzdužne akceleracije	31
Slika 27. Parametri procedure kočenja	32
Slika 28. Graf uzdužne deceleracije sa 50 km/h	33
Slika 29. Graf brzine od 50km/h do 0 km/h.....	33
Slika 30. Graf uzdužne deceleracije sa 80 km/h	34
Slika 31. Graf brzine od 80km/h do 0 km/h.....	34
Slika 32. Parametri procedure dvostruke izmjene trake	35
Slika 33. Graf bočne akceleracije.....	36
Slika 34. Graf kuta valjanja vozila	36
Slika 35. Graf brzine zakreta oko vertikalne osi	37
Slika 36. Graf bočne akceleracije.....	37
Slika 37. Graf kuta valjanja vozila	38
Slika 38. Graf brzine zakreta oko vertikalne osi	38
Slika 39. Parametri procedure održavanja brzine s vertikalnom pobudom	39
Slika 40. Graf vertikalne akceleracija vozila	40
Slika 41. Graf vertikalnog pomaka ovješene mase vozila	40
Slika 42. Graf vertikalnog pomaka neovješene mase vozila	41

SAŽETAK

U ovom radu objašnjeni su osnovni parametri ovjesa te kinematičke veličine, također ukratko je objašnjena dinamika više tijela te metoda konačnih elemenata. Opisan je način izrade modela vozila, odnosno opisan je proces preinake generičkog modela u model koji odgovara vozilima koja se natječu na natjecanjima Formule student, u programskom paketu ADAMS Car. Također provedene su ispitne procedure koje uspoređuju dva modela. Razlika između modela je u smještaju pogonskog sustava. Jedan model ima pogonski sustav odnosno elektromotore i reduktore smještene na šasiju, dok su kod drugoga oni smješteni unutar stražnjih kotača. Ispitne procedure definirane su prema zahtjevima FSB Racing Teama kako bi razlike u performansama između dva modela bile što jasnije. Opisan je i proces određivanja materijala ovjesa koji zadovoljava dozvoljena opterećenja koja su dobivena iz simulacija u ADAMS-u. Dobivena opterećenja dalje su korištena u proračunu metode konačnih elemenata u programskom paketu Abaqus.

Ključne riječi:

ADAMS Car, dinamika više tijela, model, ovjes, Abaqus, FSB Racing Team, Formula Student,

SUMMARY

This thesis describes the method of creating a vehicle model, it describes the process of transforming a generic model into a model that corresponds to vehicles competing in Formula Student competitions, in the ADAMS Car software package. Simulations comparing the two models were also conducted. The difference between the models is in the location of the drive system. One model has a drive system, that is electric motors and gearboxes mounted on the chassis, while the other has them located inside the rear wheels. The process of determining the materials that meet the allowable loads obtained from the ADAMS simulations is also described.

The introduction describes the way the Formula Student competition was organized and says something about the FSB Racing Team, its successes and plans for the future. Next, the basic suspension parameters and kinematic features are described. The next chapter lists some basics of multi-body system dynamics and some basics about the ADAMS Car software package. The fourth chapter describes how a model in ADAMS is made. The following section describes how to determine the suspension material using the ADAMS Car and Abaqus software packages. Finally, in the last chapter, two models are compared, and the results are commented.

Key words:

ADAMS Car, multi-body dynamics, model, suspension, Abaqus, FSB Racing Team, Formula Student

1. UVOD

1.2 O FSB Racing Team-u

FSB Racing Team je studentski projekt koji djeluje u sklopu Hrvatske studentske udruge tehničkih fakulteta. Osnovan je 2003. godine na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Zadatak tima je dizajnirati, razviti i proizvesti trkaći automobil nalik onome u Formuli 1 za sudjelovanje na natjecanjima Formule Student. Danas je to jedan od najvećih studentskih projekata u cijeloj Hrvatskoj u kojem sudjeluje preko 100 studenata sa čak 10 različitih fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Formula Student je natjecanje uglavnom studenata tehničkih fakulteta koji izrađuju svoj bolid prema strogim pravilima propisanim u Pravilniku. Prvo natjecanje je održano početkom 1980-ih godina u Americi te se kasnije proširilo na Europu, ali i na ostatak svijeta. Danas se ovo natjecanje održava u preko 20 zemalja. U Europi neka od većih natjecanja se održavaju u Nizozemskoj, Švicarskoj, Engleskoj, Njemačkoj, Austriji i Mađarskoj. Cijelo natjecanje je koncipirano tako da potiče kreativnost i razvijanje sposobnosti studenata da teoriju konstruiranja, kao i marketinške i menadžerske sposobnosti vođenja tima, primjene u praksi. Tim mora voditi brigu o financijama, te pomno planirati sve troškove jer se cijeli projekt financira putem sponzora te donacijama, a osim izrade samog bolida veliki trošak su i odlasci na natjecanja. Natjecanje se sastoji od statičkog i dinamičkog djela. Statički dio obuhvaća prezentaciju vozila, objašnjenje konstrukcijskih rješenja na vozilu i obrazloženje cijene vozila po pojedinim dijelovima i tehnologijama izrade. Gotovi bolidi moraju proći strogi tehnički pregled kako bi se suci uvjerali da su bolidi sigurni te da će dinamički testovi proći u najboljem redu. Tehnički pregled obavljaju stručnjaci koji su i sami bili dio nekog Racing Team-a te se aktivno bave automoto sportom. Dinamička testiranja sastoje se od pet disciplina, a to su: slalom, bočno ubrzanje, ubrzanje, utrka izdržljivosti i potrošnja goriva. Glavna svrha natjecanja je pokazivanje inovativnosti pri izradi i primjena teorijskih znanja stečenih tijekom studija. Prvi bolid, Kuna, proizvedena je 2006. godine a njen najbolji rezultat bio je na natjecanju u Engleskoj gdje je tim osvojio 35. mjesto od 72 tima. Sljedeći bolid bio je Ris. Proizveden je 2007. godine, a najbolji plasman bilo je 48. mjesto od 84 tima na natjecanju u Engleskoj. U jakoj konkurenciji od 103 tima sljedeći bolid, Likos 2012. godine je osvojio 24. mjesto također na natjecanju u Engleskoj što je bio njegov najbolji plasman. U Njemačkoj, 2013. godine, Arctros je imao najbolji plasman a to je bilo 56. mjesto od 75 timova. Nakon brojnih dorada na bolidu nastao je Arctros R koji je ostvario fantastičan rezultat u Engleskoj gdje je osvojio 10. mjesto od 97 timova 2014. godine. Strix je također imao

svoju R verziju. Njegov najbolji rezultat bio je 13. mjesto od 41 tima 2017. godine, dok je njegova doručena verzija 2018. godine osvojila 12. mjesto od 81 tima.



Slika 1. Strix R

Strix R bio je posljednji bolid s motorom s unutrašnjim izgaranjem te je nakon njega proizveden Vulpes koji je pogonjen elektromotorima. Vulpesovi elektromotori proizvode ukupno 80 kW snage što je dovoljno za ubrzanje od 3.4 sekunde do 100 km/h. Osim novosti kod pogona velika novost je i šasija koja je prvi puta izrađena od karbona. Zbog takve šasije Vulpes je čvršći i lakši od svojih prethodnika. Svoj najbolji plasman ostvario je 2019. godine kada je osvojio 19. mjesto od 24 tima. Vulpes R je trenutni bolid te ujedno i najnapredniji do sada. Zbog naprednih tehnologija obrade dijelova ovjesa i odabirom kvalitetnijih materijala poprečnih vodilice, Vulpes R je lakši za 25 kilograma te brži za 0.2 sekunde do 100 km/h. Sa Vulpes R-om ove godine tim je bio na četiri natjecanja. A najbolji rezultat ostvario je na domaćem neslužbenom natjecanju, Alpe Adria osvojivši 7. mjesto od 20 timova.

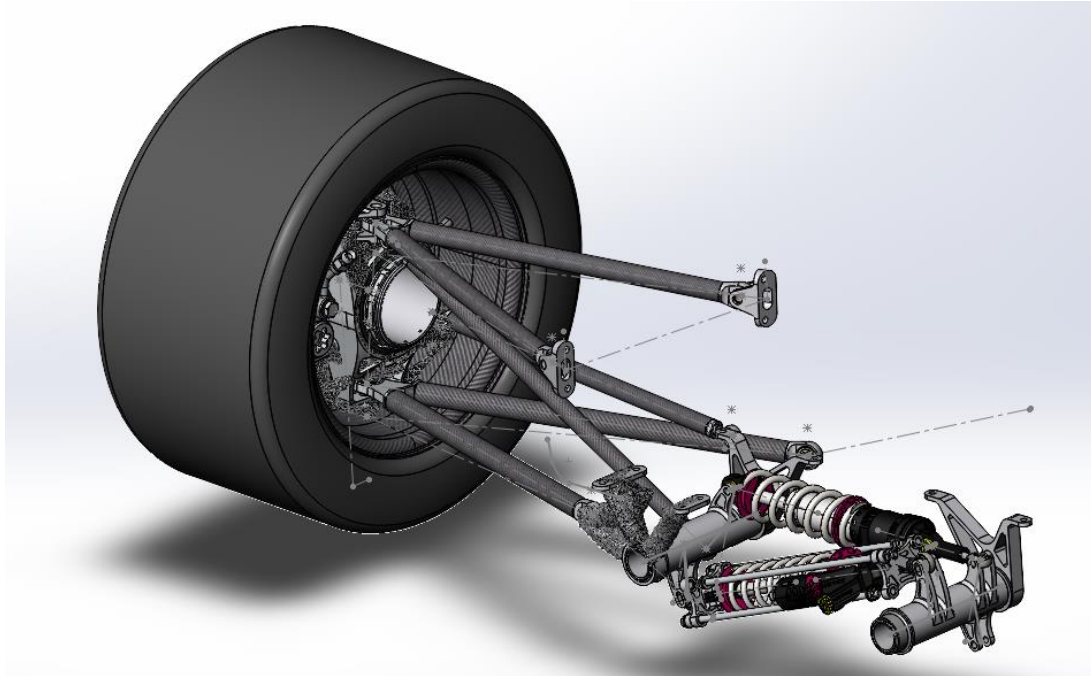


Slika 2. Vulpes R i dio FSB Racinga Team-a

1.2. Ciljevi u razvoju i nova konstrukcijska rješenja

Vulpes je kao prvi električni bolid sa sobom donio cijeli niz novosti. Osim što pogon više nije motor s unutrašnjim izgaranjem nego elektromotor i šasija više nije cijevna nego kompozitna. Brojni senzori se po prvi puta stavljaju na bolid kako bi se usporedile vrijednosti iz simulacija sa stvarnim vrijednostima. Vulpes R ide korak dalje pa mu poprečna vodilice više nisu izrađene od titana nego od kompozita, a nosač glavčine izrađen je SLM tehnologijom. Slijedeći bolid, Taurus, biti će znatno lakši jer tim sada može izraditi lakšu šasiju budući da sada ima više iskustva u izradi, ali i FEM analizi kompozita. Također novost je i to što su elektromotore kompletno izradili studenti sa Fakulteta strojarstva i brodogradnje te će oni prvi puta zajedno sa reduktorom biti smješteni u glavčinama kotača. Motori u glavčinama kotača, dakako, nepovoljno utječu na polarne momente koji su u tom slučaju veći nego da su isti smješteni unutar šasije. Također povećavaju i iznos neovješene mase što nepovoljno utječe na samu upravljivost bolida. Glavna prednost je puno bolje hlađenje samih motora i reduktora, ali i ušteda mase zbog kompaktnog kućišta te nisu potrebne dodatne poluosovine. Osim tih prednosti to je samo jedan korak od formule sa elektromotorom u svakom kotaču čemu teži gotovo svaki Formula student tim. Neke od prednosti pogona na sva četiri kotača su puno bolja stabilnost i upravljivost te implementacija upravljanja momentom (engl. torque vectoring). Razvoj i prijenos znanja je doprinio i osmišljavanju prvog ovjesa koji pruža različite opružno-prigušne karakteristike za valjanje i poniranje bolida. Sve te novosti ne bi bile moguće bez

brojnih simulacija. Neki od programa koji se koriste za određivanje maksimalnih sila u komponentama ovjesa su *AVL VSM*, *ADAMS*, *Lotus*, *Abaqus*.

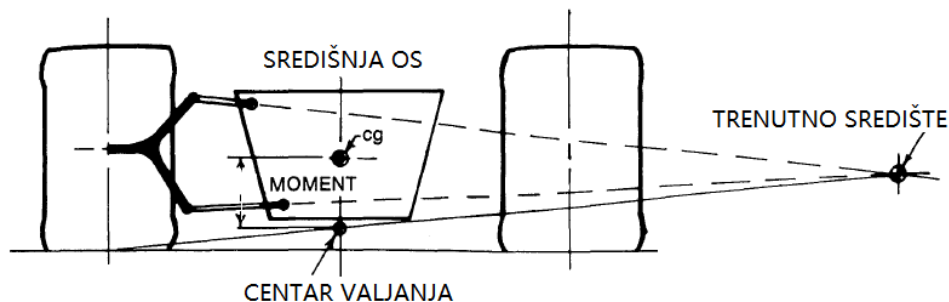


Slika 3. CAD model raspregnutog ovjesa

2. DINAMIKA VOZILA

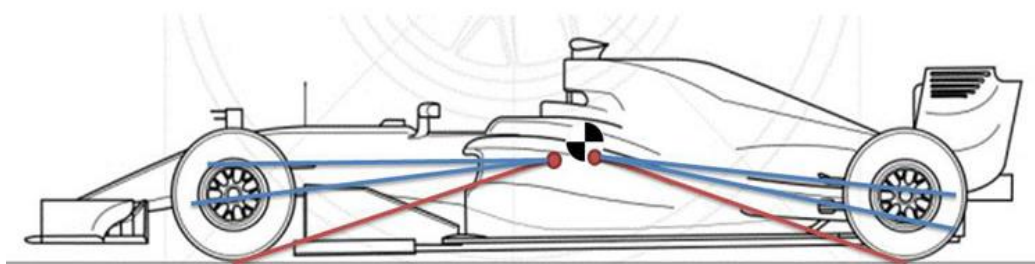
2.1. Kinematičke značajke

Iznimno je važno poznavati osnove dinamike vozila te kinematičke parametre ovjesa, kao i dinamičke pomake i zakrete vozila. Ovješena masa je dio ukupne mase vozila koja je ovješena preko opruga. Sačinjavaju je: šasija, pogonski sustav, mjenjač, diferencijal, sjedalo, te ostale komponente bolida. Kako bi transferi masa bili što manji, a bolid što boljih performansi, ovješena masa mora biti što manja. Poželjno je i da masa bude koncentrirana koliko god je moguće bliže težištu vozila da bi se postigli što manji polarni momenti inercije. Neovješena masa je dio ukupne mase vozila koja nije ovješena na oprugama. Sastoji se od naplatka, gume, glavčine, nosača glavčine, kočnice, ali i približno pedeset posto težine vilica ovjesa, pogonske osovine, te opruga i amortizera, ako su isti montirani van šasije. Neovješena masa treba biti čim manja radi bolje upravljivosti vozila i radi njene lakše kontrole oprugama i amortizerima, kako bi kotači uvijek bili u dodiru s podlogom. Težište bilo kojeg tijela je definirano kao točka u kojoj djeluje rezultanta sila, u njoj je sabrana sva masa tog tijela. Možemo reći da sve sile ubrzanja koje djeluju na tijelo djeluju kroz težište tog tijela. Težište trkaćeg vozila treba biti što niže kako bi valjanja kroz zavoje, te poniranja tijekom ubrzavanja ili kočenja bila čim manja. Valjanje (engl. roll) je zakret vozila oko uzdužne osi vozila. Os valjanja je linija koja spaja centar valjanja prednjeg ovjesa i centar valjanja stražnjeg ovjesa. To je također točka kroz koju će bočne sile koje se prenose s dodirnih točaka gume djelovati na šasiju. Centri valjanja su određeni tako da se krakovi vilica produlje prema središtu bolida sve dok se ne presijeku i formiraju trenutno središte. Tada se povlači ravna crta između trenutnih središta i centra kontakta površine gume. Presjecište ove linije i središnje linija vozila je centar valjanja. Valjanje je neželjena pojava, pronalaskom optimalne krutosti opruga te optimalnom visinom osi valjanja, valjanje se svodi na minimum [1].



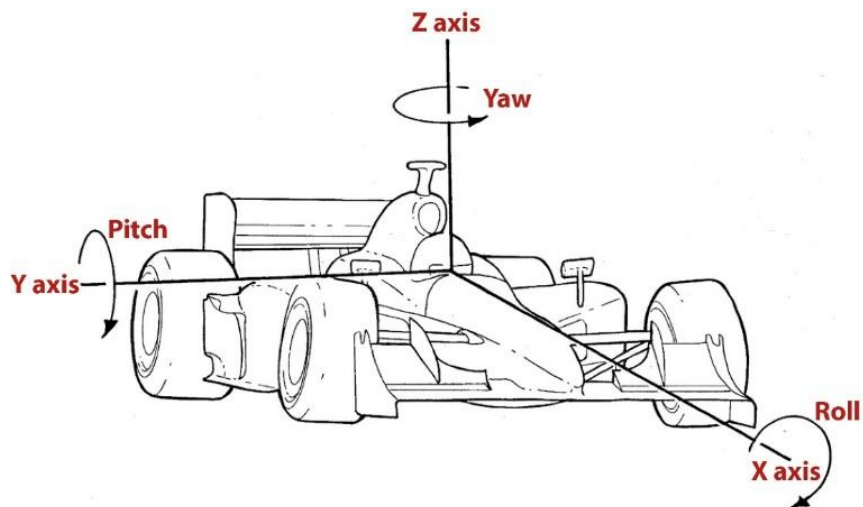
Slika 4. Centar valjanja

Poniranje (engl. pitch) je zakret vozila oko poprečne osi. Poniranje je također nepoželjna pojava koja se eliminira anti značajkama. Anti značajke su oblik geometrije na prednjem i stražnjem ovjesu koji mijenja i kontrolira količinu opterećenja koja će prolaziti kroz vilice ovjesa zbog ubrzanja ili kočenja. Prilikom kočenja, zbog linearnih promjena inercije, automobil će se rotirati prema naprijed oko središta poniranja, spuštajući prednji dio automobila i podižući stražnji kraj. Kod ubrzanja se događa suprotno. Količina opterećenja koja prolazi vilice kontrolira se pomicanjem trenutnog središta rotacije dalje ili bliže osovini za koju određujemo postotak anti značajke. Trenutna središta se pomiču naprijed ili nazad promjenom nagiba vilica. Trenutno središte je sjecište linija koje prolaze kroz obje točke prihvata gornje i donje vilice. Udaljenost te točke od točke dodira gume s podlogom koristi se za izračun anti značajki.



Slika 5. Središta poniranja

Za zakret oko vertikalne osi ostao je engleski termin yaw. Za zakret oko vertikalne osi zaslužni su polarni momenti inercije, već ranije smo spomenuli da je poželjno da oni budu što manji, što se postiže pomicanjem mase čim bliže težištu vozila. Osnovni zakreti vozila prikazani su na slici 6.



Slika 6. Osnovni zakreti vozila

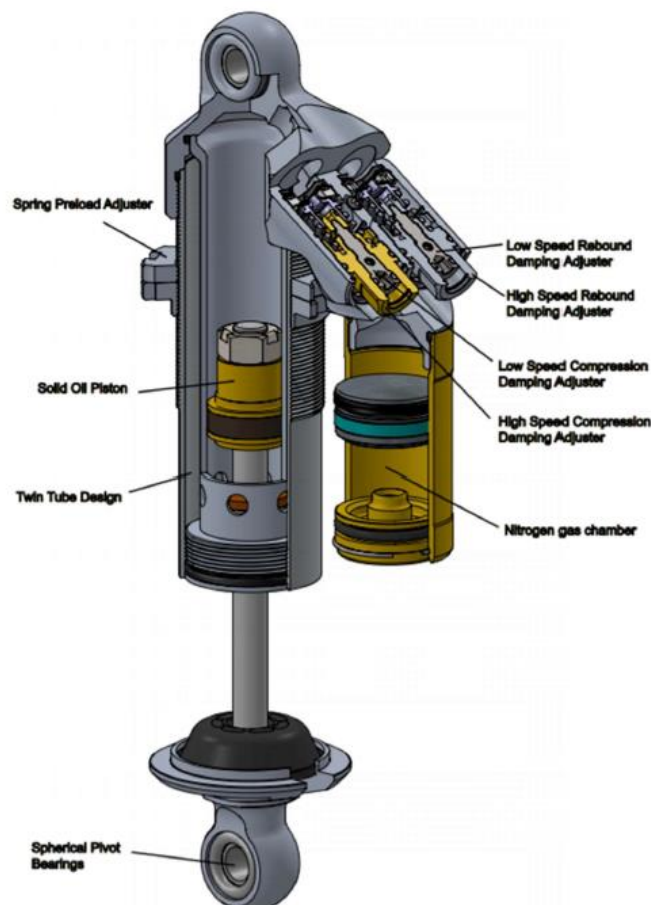
Bitne stavke kod dizajniranja ovjesa su i međuosovinski razmak te trag kotača. Prednosti relativno dugog međuosovinskog razmaka su povećana stabilnost, smanjen uzdužni prijenos opterećenja i smanjeno poniranje, nešto lakša redukcija polarnih momenata inercije i više prostora za smještanje stvari. Prednosti relativno kratkog međuosovinskog razmaka su smanjene ukupna težina i povećana upravljivost. Prednosti širokog traga kotača su smanjene bočnog prijenosa opterećenja i veći prostor za dulja vodilice ovjesa, a glavni nedostatak je povećana frontalna površina. Kod upravljanja vozilom uobičajene su tri geometrije ovjesa; Ackermann, anti-Ackermann i paralelno usmjereni kotači. Za sve tri metode promatrat ćemo slučaj kada je vozilo u zavoju. Kod Ackermanna unutarnji kotač vozila je zakrenut pod većim kutom u odnosu na vanjski. Ovaj princip koristi se uglavnom kod cestovnih vozila zbog toga što je radijus unutarnjeg kotača manji od radijusa vanjskog kotača pa da ne bi došlo do gubitka stabilnosti ili poskakivanja vozila unutarnji kotač nagnut je pod većim kutom. To nije slučaj kod sportskih vozila jer ona prolaze zavojima puno većim brzinama te se stvaraju i puno veće sile na pneumaticima. U zavoju vanjski kotač trpi puno veću silu od unutarnjeg te dolazi do velikog kuta klizanja, zbog toga se teži paralelno usmjerenim kotačima jer će zbog sila u pneumaticima vanjski kotač imati veći kut klizanja pa će biti manje zakrenut od unutarnjeg. Kod vozila koje zavojima prolaze jako velikim brzinama kao što je slučaj u Formuli 1 prisutan je čak i anti-Ackerman geometrija. Kod anti-Ackermanna vanjski kotač je zakrenut pod većim kutom u odnosu na unutarnji zbog prije navedenog problema kuta klizanja koji je kod velikih brzina još izraženiji.

2.2. Ovjes

U formuli student, kao i u formuli 1 koristi se neovisan ovjes sa dvostrukim poprečnim vodilicama iz razloga jer isti pruža najviše mogućnosti podešavanja, te je puno kompaktniji pa ga je lakše smjestiti unutar male šasije bolida. Iako postoje beskrajne moguće kombinacije duljina i nagiba poprečnih vodilica, možemo ih podijeliti na tri osnovna tipa: paralelne vodilice jednakih duljina, paralelne vodilice ali nejednakih duljina, te neparalelne vodilice nejednakih duljina. Paralelne vodilice jednakih duljina tvore paralelogram, zbog toga kod vertikalnog pomaka kotača nema promijene nagiba kotača, a dolazi do značajnog smanjenja traga kotača što nije dobro. Kod valjanja vozila kotači se nagnju jednako kao i šasija zbog čega vanjski kotač ima pozitivan nagib što nije povoljno zbog smanjenog trenja u tom slučaju. Sve nepovoljne posljedice možemo smanjiti produljenjem vodilica, ali ih ne možemo eliminirati u potpunosti. Kod paralelnih vodilica nejednakih duljina gornja vodilica treba biti kraća jer slučaju vertikalnog pomaka kotač poprima negativan nagib što je povoljnije od negativnog. Što je gornja vodilica kraća to će nagib biti izraženiji. Kod valjanja vozila slična situacija je kao i kod paralelnih vodilica jednakih duljina, ali je sada pozitivan nagib vanjskog kotača puno manji, dok je negativan nagib unutarnjeg kotača izraženiji. Budući da je vanjski kotač taj koji je važniji jer je pod većim opterećenjem to je povoljniji slučaj. Kod ovakve geometrije vodilica centar valjanja jako varira kod različitih hodova kotača. Ostavljanjem vodilica paralelno i njihovim kraćenjem nismo riješili sve probleme pa je još ostalo nagnuti gornja vodilica. U tom slučaju, kod valjanja vozila pozitivan nagib vanjskog kotača tada postaje minimalni, a unutarnji se povećava. Na formulama FSB Racing Team-a vodilice nisu paralelne i nisu jednakih duljina.


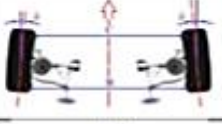




Nadalje, za određivanje krutosti vožnje koristi se četvrtinski model. Taj se model sastoji od ovješene mase, opružnih i prigušnih elemenata, neovješene mase i podloge. Osnovna zadaća opruga u ovjesu vozila je ublažavanje udaraca koji se prenose s kotača na karoseriju. Opruge imaju ulogu spremnika energije. Djelovanjem s ostalim elementima ovjesa osiguravaju neprekinuti kontakt kotača s podlogom. Stvarne opruge su linearne samo do određene deformacije. Nakon toga, bilo zbog materijalne, bilo zbog geometrijske nelinearnosti, karakteristika opruge prestaje biti linearna. Problem kod opruga je taj što mekane opruge osiguravaju bolji kontakt s podlogom ali u tom slučaju valjanje i poniranje vozila je izraženije nego kod krućih opruga. Taj problem se može riješiti raspregnutim ovjesom. Raspregnuti ovjes ima posebne opružno-prigušne karakteristike za poniranje vozila i za valjanje. To omogućuje odabir različitih opruga neovisne jedne o drugima što za posljedicu ima bolje prianjanje vozila

te manje valjanja u zavojima. Također i amortizeri se mogu tada podešavati neovisno jedni o drugima. Amortizeri su prigušni elementi te se ugrađuju između ovješene i neovješene mase vozila, a u kombinaciji sa spiralnim torzijskim oprugama čine vrlo kompaktan sklop. Sila kojom djeluju na vozilo ovisi o brzini kompresije ili ekspanzije. Pri relativnom gibanju klipa i cilindra amortizera fluid prolazi kroz uske provrte pri čemu se konstrukcija amortizera opire protoku fluida, čime uslijed stlačivanja fluida dolazi do prigušivanja gibanja. Pritom je sila prigušenja približno proporcionalna brzini gibanja. Najčešće je prigušenje pri kompresiji manje nego pri ekspanziji, zbog omjera ovješene i neovješene mase. Pri nailasku na neravninu kotačem prvo dolazi do gibanja neovješene mase te istovremene kompresije amortizera. Tek nakon toga dolazi do istovremene ekspanzije amortizera i podizanja ovješene mase u neutralan položaj. Prigušenje je definirano kao omjer prigušne sile i relativne brzine gibanja između klipa i cilindra amortizera.



Slika 7. Vertikalni presjek amortizera sa Vulpes R-a [2]

Anti-roll bar spaja lijevi i desni kotač zajedno preko prihvata povezanih torzijskom šipkom. Povećava krutost ovjesa tijekom valjanja vozila neovisno o krutosti opruge pri vertikalnom hodu kotača. Funkcija anti-roll bara je da prenesu opterećenje na suprotni kotač tijekom vertikalnog hoda jednog kotača i time ih održavaju na sličnim pozicijama s obzirom na šasiju preko torzijske šipke. Kao rezultat, vozilo ima tendenciju boljeg prianjanja na podlogu zbog manjeg valjanja vozila. Nakon prolaska kroz zavoj, opterećenje na torzijsku šipku se smanjuje i kotači se mogu vratiti na svoju prvobitnu visinu. Za natjecateljska vozila, upotrebljava se anti-roll bar kojem se može podešavati krutost ovisno o uvjetima na stazi. Krutost se podešava na način da se smanjuje, odnosno povećava, krak preko kojeg ovjes jednog kotača djeluje na torzijsku šipku. Manji krak, ujedno znači i manji moment uvijanja na šipku pri zadanom opterećenju, pa je ovjes krući. Druga funkcija anti-roll bar-a je mogućnost podešavanja koliko će vozilo podupravljati ili preupravljati. Povećavanjem krutosti anti-roll bara na prednjem kraju povećava se omjer ukupnog prijenosa težine na prednjem kraju vozila i smanjuje se omjer na stražnjem kraju vozila. Što kod vozila izaziva podupravljanje. Povećavanjem omjera ukupne krutosti valjanja na stražnjoj osovini daje suprotan efekt i smanjuje podupravljanje. Nagibi i osnovni parametri kotača objašnjeni su na slici 8.

	Bočni nagib kotača engl. <i>Camber</i> njem. <i>Sturz</i>	Kut između ravnine simetrije kotača i vertikalne uzdužne ravnine, a gledano u YZ-ravnini vozila.
	Usmjerenost kotača engl. <i>Toe angle</i> njem. <i>Spurwinkel</i>	Kut koji tvore uzdužna ravnina simetrije kotača i uzdužna ravnina vozila, a gledano u XY-ravnini vozila.
	Bočni nagib osi zakretanja kotača engl. <i>Kingpin inclination angle</i> njem. <i>Spreizungswinkel</i>	Kut između osi zakretanja kotača i vertikalne uzdužne ravnine, a gledano u YZ-ravnini vozila.
	Poluprijer zakretanja kotača engl. <i>Scrub radius, Kingpin offset</i> njem. <i>Lenkrollradius, Lenkrollhalbmeser</i>	Horizontalna poprečna udaljenost koju tvore kutovi bočnoga nagiba kotača i bočnog nagiba osi zakretanja kotača, a gledano u YZ-ravnini vozila u ravnini kontakta gume i podloge.
	Uzdužni nagib osi zakretanja kotača engl. <i>Caster</i> njem. <i>Nachlaufwinkel</i>	Kut između osi zakretanja kotača i vertikalne poprečne ravnine, a gledano u XZ-ravnini vozila.
	Mehaničko (geometrijsko) predvođenje engl. <i>Caster trail</i> njem. <i>Nachlaufstrecke</i>	Horizontalna uzdužna udaljenost probodišta osi zakretanja kotača i središta kontaktnih površine gume gledano u XZ-ravnini vozila u ravnini kontakta gume i podloge.

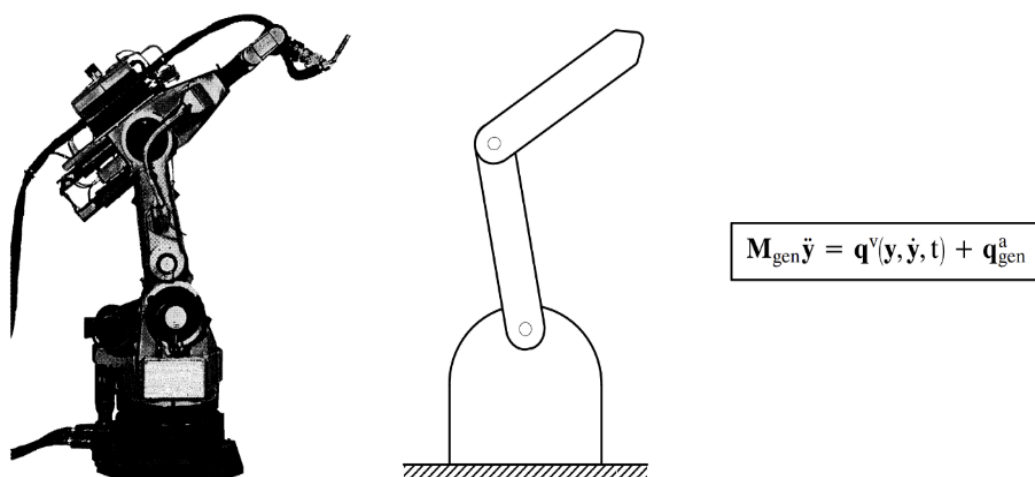
Slika 8. Osnovni parametri kotača [3]

3. DINAMIKA VIŠE TIJELA

3.1. Općenito o dinamici više tijela

Dinamika sustava više tijela (engl. multibody dynamics) bavi se mehaničkim sustavom sastavljenim od međusobno povezanih krutih tijela kojima su dozvoljeni veliki pomaci i velike rotacije. Tijela su međusobno povezana elementima kinematičkih ograničenja i različitim elementima za povezivanje. Stvarna svojstva zadanog problema, kao što su viskoelastičnost i inercija, diskretizirana su tokom procesa oblikovanja mehaničkog modela. Matematičko modeliranje stvorenog mehaničkog modela svodi se na obične diferencijalne jednačbe ili diferencijalno-algebarske jednačbe. Koncept dinamike sustava više tijela danas ima jako široku primjenu u auto industriji, robotici, mehatronici, biomehaničkim sustavima, raznim mehanizmima i slično. Kada se govori o krutim tijelima može se reći da je polje deformacija tog tijela $\varepsilon = 0$, no i dalje mogu postojati koncentrirane elastične komponente, kao što su elastični zglobovi (engl. flexible joints) i elementi sila (engl. force elements) koji služe za povezivanje dvaju idealno krutih elemenata, a predstavljaju lokaliziranu elastičnost [4].

Modeliranje mehaničkih sustava ima dva glavna koraka. Prvi korak je preslikavanje stvarnosti (inženjerskog objekta) u skup pojednostavljenih entiteta kako bi se uspostavio mehanički model. Mehanički model mora uključivati procese koji se razmatraju, mora biti maksimalno jednostavan kako bi se zadovoljila određena točnost i brzina računanja. Sa druge strane, model treba biti i dovoljno složen kako bi rezultati bili relevantni. Mehaničko modeliranje nije jedinstven, već iterativni proces. Potrebno je puno inženjerskog iskustva budući da razlike između stvarnosti i modela ovise o ciljevima analize. U drugom koraku, nakon što je mehanički model izgrađen, potrebno je odrediti matematički model, odnosno moraju se formulirati jednačbe koje opisuju dinamičko ponašanje modela. Matematičko modeliranje također nije jedinstven proces. Ono ovisi o ciljevima analize i računskim procesima, ali i alatima koji su potrebni za rješavanje problema [5].



Slika 9. Koraci kod modeliranja [5]

Mehaničko modeliranje je proces na koji primarno utječe karakter problema i fokus namjeravane analize. Drugo, karakteristike stvarnih objekata su važni, ali samo u okviru zadanog zadatka i namijenjene analize. Stvarni objekt može se modelirati pomoću različitih mehaničkih elemenata. Na primjer, letjelica se može smatrati jedinim krutim tijelom u okviru mehanike leta, ali mora biti modelirana kao sustav više tijela kod analize dinamike slijetanja. Ključni kriterij modeliranja je da mehanički model treba biti sposoban opisati ona mehanička svojstva realnog sustava koja su pod razmatranjem sa željenom točnošću. Mehaničko modeliranje je proces preslikavanja stvarnosti na skup pojednostavljenih elemenata. Utvrđeni skup elemenata (mehanički model) mora biti u stanju opisati mehanička svojstva stvarnog sustava i uzeti u razmatranje dinamičke pojave. S obzirom na ciljeve analize i karakteristike realnog sustava čije će se dinamičko ponašanje istraživati, prvi korak prema uspostavljanju odgovarajućeg mehaničkog modela je odluka hoće li se sustav modelirati kao sustav više tijela ili treba primijeniti principe modeliranja strukturne dinamike. Mnogi inženjerski sustavi sastoje se od velikog broja tijela koji su međusobno povezani elementima sa ograničenjima kao što su spojevi, ležajevi, opruge, amortizeri ili aktuatori. Ovi se sustavi mogu uspješno modelirati kao sustavi više tijela. Može se reći općenito da ako tijela u sustavu prolaze kroz veliko gibanje i male vibracije, vrlo moćan alat u tom slučaju je modeliranje sustava više tijela. Ako se koncept sustava više tijela usvoji za potrebe modeliranja, pravi sustav bit će diskretiziran. Drugi dio mehaničkog modeliranja je idealizirani opis stvarnog opterećenja. Može se uvesti u model kao koncentrirane sile i momenti koji su raspoređeni po liniji, površini ili volumenu. Prikladno

modeliranje opterećenja također ovisi o konkretnom zadatku i utvrđenom modelu. Nakon što je mehanički model uspostavljen, treba formulirati odgovarajući matematički model.

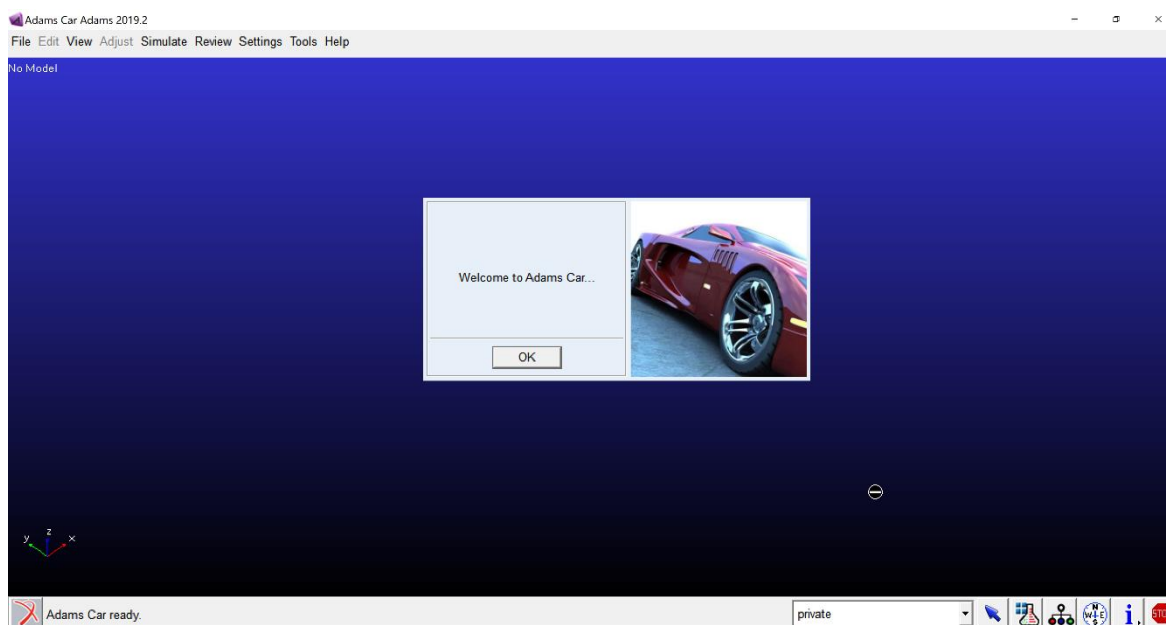
Matematičko modeliranje (engl. mathematical modelling) je proces formuliranja sustava jednadžbi koji opisuje gibanje i druge fizikalne pojave koje se pojavljuju na promatranom mehaničkom modelu. Dobar i učinkovit matematički model mora odražavati vrstu i karakter analize koja se treba izvesti. Na primjer, linearna ili nelinearna analiza. Ali također mora biti pravilno formuliran kako bi odgovarao računskim postupcima i algoritmima koji će biti korišteni za manipulaciju i evaluaciju generirane jednadžbe. U nekim posebnim slučajevima rješenje utvrđenog matematičkog modela može se pronaći analitički. Ako je tako, dobiveno rješenje je 'točno' pod pretpostavkama koje su određene tijekom mehaničkog i matematičkog modeliranja. Ipak, u većini slučajevi moraju se koristiti računalni procesi za pronalaženje numeričkih rješenja. U posljednja tri desetljeća brojne računalne tehnike i algoritmi su uspostavljeni za generiranje jednadžbi za različite klase problema i specifične vrste analiza (sustavi više tijela, sustavi s jednostranim ili promjenjivim ograničenjima itd.). Ovi algoritmi su jezgra različitih programskih paketa koji se danas nude na tržištu. Iako se vrlo često mehanička analiza može izvesti polazeći od različitih matematičkih modela, odgovarajući matematički model može u velikoj mjeri utjecati na sam računski postupak reducirajući vrijeme izračunavanja ili dobivanje točnijih rezultata.

Za neke posebne (često puta samo jednostavne) slučajeve postoji i analitički zapis problema koji može poslužiti za verifikaciju numeričkih procedura. Matematički modeli nastali su iz proučavanja gibanja čestica koje reprezentiraju koncentrirane mase i kruta tijela na čije gibanje su primijenjeni klasični zakoni mehanike (kao što su Newtonovi zakoni gibanja). Ti matematički modeli proširuju se kako bi se opisale i druge fizikalne pojave, kao što je na primjer deformabilnost tijela. Razlikujemo dva matematička modela. Jedan se temelji na metodi konačnih elemenata korištenjem teorije velikih pomaka, a drugi na metodi dinamike sustava više tijela koja uključuje reducirane modele pojedinih deformabilnih članova sustava. Dinamika sustava više tijela izvorno je osmišljena kao alat koji će poslužiti za analiziranje dinamičkih pojava koje se dešavaju unutar konstrukcijskih sustava sačinjenih od više krutih tijela. Kruta tijela se mogu pojednostaviti diskretizacijom materijalnih svojstava (mase) i geometrijskih svojstava (momenta inercije) u jednu točku (koja je obično težište tijela). Ta pretpostavka uvelike pojednostavljuje jednadžbe gibanja. Iz tog razloga ovim pristupom se mogu rješavati problemi dinamike koju uključuju jako velik broj međusobno povezanih tijela. Taj broj

nerijetko iznosi stotine pa čak i tisuće tijela. Položaji točaka geometrije koje će poslužiti za vezu s ostalim tijelima te položaj težišta definirani su pomičnim koordinatnim sustavom u globalnom fiksnom koordinatnom sustavu [4].

3.2. Programski paket ADAMS

ADAMS Car, dio paketa softvera ADAMS, specijalizirano je okruženje za modeliranje vozila. Omogućuje vam stvaranje virtualnih prototipova podsustava vozila i samih vozila te analizu istih bez potrebe za analizom fizičkih prototipova što za posljedicu ima veliku uštedu financijskih sredstava te kraće vrijeme izrade stvarnog vozila. ADAMS – Automated Dynamic Analysis of Mechanical Systems je software za simulaciju dinamike sustava krutih tijela (engl. multibody dynamics). Ovaj se software temelji na programskim jezicima C++ i Fortran, a razvijen od strane Mechanical Dynamics Incorporation – a, kojeg je kasnije kupio MSC Software Corporation. Također, programski paket ADAMS pokazao se kao bitan i koristan software zbog svojih mogućnosti, a najviše zbog razvijanja virtualnih prototipa i mogućnosti preciznih simulacija. Nadalje, ovaj software omogućuje skraćivanje vremena i troškova izrade te planiranja proizvoda.



Slika 10. Welcome dijaloški okvir ADAMS Car-a

Koristeći ADAMS Car, mogu se brzo izraditi sklopovi ovjesa i kompletnih vozila, a zatim i analizirati kako bi razumjeli njihovu izvedbu i ponašanje. Sklopovi u ADAMS Car-u stvaraju se definiranjem podsustava vozila, kao što su prednji i stražnji ovjesi, upravljački sustav, anti-roll barovi i karoserije. Ovi podsustavi temelje se na njihovim odgovarajućim standardnim ADAMS Car predlošcima. Na primjer, ADAMS Car uključuje predloške za ovjes s dvostrukim poprečnim vodilicama, MacPherson ovjes, upravljanje zupčastom letvom, pogonske sustave itd. Također, moguće je izraditi svoje podsustave na prilagođenim predlošcima koji se izrađuju pomoću ADAMS Car Template Builder-a. Kada se analizira sklop, ADAMS Car primjenjuje parametre koji su navedeni u analizi. Na primjer, za analizu ovjesa mogu se odrediti parametri za vertikalno pomicanje kotača kod naleta na prepreku i izmjeriti nagibi kotača, promjena brzine kotača, brzina kotrljanja i ostale veličine. Moguće je provesti simulaciju gdje se definira bočno opterećenje ili zakretni moment samoupravljanja na mjestu dodira pneumatika i podloge i mjeri promjena nagiba ili bočni otklon kotača. Mogu se okretanjem volana od jedne do druge krajnje točke izmjeriti kutovi zakretanja kotača i količina Ackermanna, odnosno razlika između kutova zakretanja lijevog i desnog kotača. Na temelju rezultata analize može se brzo promijeniti geometrija ovjesa ili opruge i ponovno analizirati ovjes kako bi se procijenili učinci promjena. Na primjer, može se brzo promijeniti stražnji ovjes iz standardnog ovjesa u ovjes sa dvostruko poprečnim ramenima kako bi se vidjelo koji daje najbolje karakteristike upravljanja za neko vozilo. Nakon što se završi analiza modela, moguće je podijeliti svoj rad s drugima. Također, moguće je ispisati grafikone karakteristika ovjesa i dinamičkih rezultata. Osim toga, može se pristupiti modelima drugih korisnika bez uništavanja parametara koje su oni postavili.

Modeliranjem vozila u ADAMS-u moguće je s dovoljnom preciznošću odrediti kakve je promjene potrebno izvesti u svrhu poboljšavanja dinamičkih karakteristika vozila. Osim mogućnosti izrade modela vozila u paketu ADAMS Car moguća je izrada staza, modeliranje procedura, standardnih i specifičnih, kao i postavljanje ponašanja vozača. Izrada staza moguća je na nekoliko različitih načina predviđena prema namjeni. Moguća je i izrada staze preko segmenata staze ako se radi o poznatim segmentima neke jednostavnije procedure, dok izrada dugih i složenih staza s nepravilnim oblicima zavoja i uzvišenjima modelira se preko ADAMS Chassis Build-a, tako da se definira središnja linija staze preko poznatih točaka. Staze u ADAMS-u mogu se izraditi i kao procedure gdje sam oblik staze nije bitan već je definiran samo vozač koji vozi određenom putanjom, a staza može biti ravna beskonačna površina, no velika prednost izrada stvarne staze je naknadna optimizacija putanje vožnje koja je još jedna

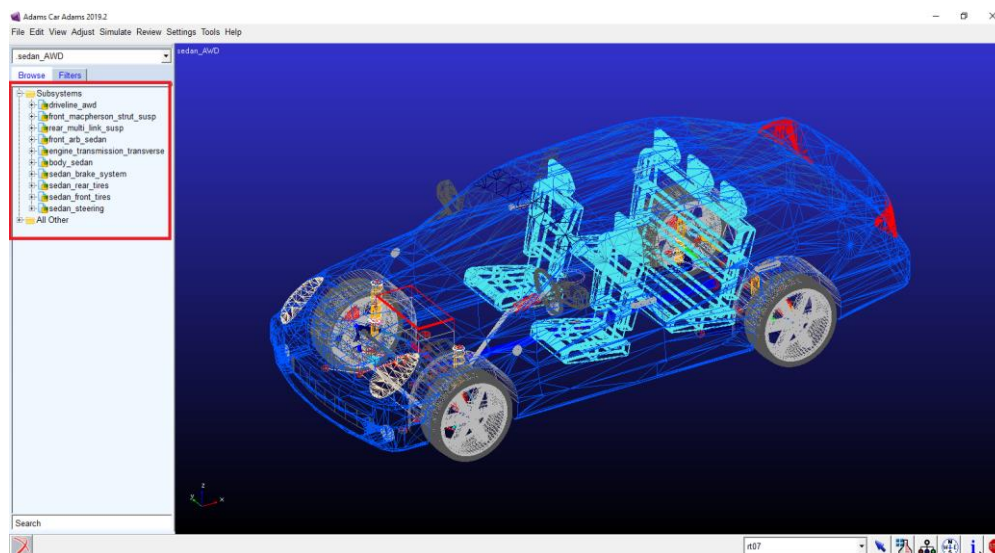
mogućnost programskog paketa ADAMS Car i ADAMS Chassis. Mogućnost izrade stvarnih staza sa natjecanja Formule Student omogućuje određivanje približnih vremena koja vozilo može ostvariti na nekoj stazi. Na taj način tim može procijeniti da li je njihovo vozilo konkurentno.

Pomoću modela dinamike više tijela promatraju se ostvarene performanse te optimiraju podesivi parametri vozila kako bi se one poboljšale. Model vozila definiran je kao mehanizam koji opisuje određena gibanja te omogućuje analizu važnih značajki konstrukcije. Preko numeričkog rješavanja procedura gibanja omogućeno je dimenzioniranje i oblikovanje dijelova. Svi podsustavi vozila, predlošci, staze i upravljačke datoteke opisani su kroz tekstualne datoteke svojstava (engl. property files), a sve one čine bazu podataka (engl. database). Kroz procedure vožnje cilj je procijeniti ponaša li se vozilo u skladu sa vozačevim preferencijama.

4. IZRADA MODELA POMOĆU ADAMS-A

4.1. Opis konstrukcije modela vozila

Sa programskim paketom ADAMS Car dolaze već izrađeni i potpuno definirani modeli vozila. To su modeli koji pokrivaju neke klase vozila kao što su: mali gradski auto, limuzina, terensko vozilo. Svaki model ima mogućnost stražnjeg, prednjeg ili pogona na sve kotače. Na slici 11. prikazan je model limuzine sa pogonom na sve kotače. Lijevo od modela je stablo u kojem su navedeni svi podsustavi vozila.

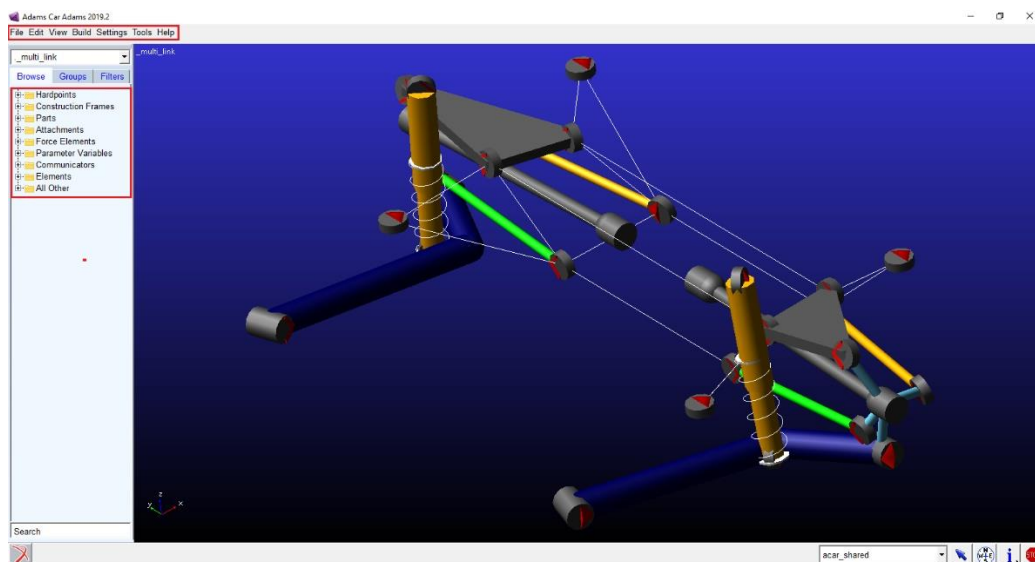


Slika 11. Osnovni model vozila

No budući da za potrebe FSB Racing Team-a ti modeli nisu optimalni jer nemaju ovjes sa dvostruko poprečnim ramenima, te ni jedna geometrija vozila ne odgovara bolidu. Potrebno je izmijeniti generički ovjes, sustav upravljanja te pogonski sustav prema CAD modelu iz Solidworks-a. Da bi model bio funkcionalan potrebno je odrediti kinematičke veze između svih komponenti vozila, masu, momente inercije, snagu i moment pogonskog sustava, pozicije svih prihvatna na šasiji na koja se prihvaćaju ostali elementi podsustava. ADAMS Car podijeljen je u dva sučelja, jedno je standardno a drugo je sučelje za izradu predložaka. Model vozila sastoji se od više podsustava, neke smo već i spomenuli, a svaki podsustav definiran je svojim predloškom. Model vozila će biti kompletan i funkcionalan samo ako su svi podsustavi ispravno definirani. Također svi podsustavi biti će funkcionalni samo ako su njihovi predlošci ispravno definirani.

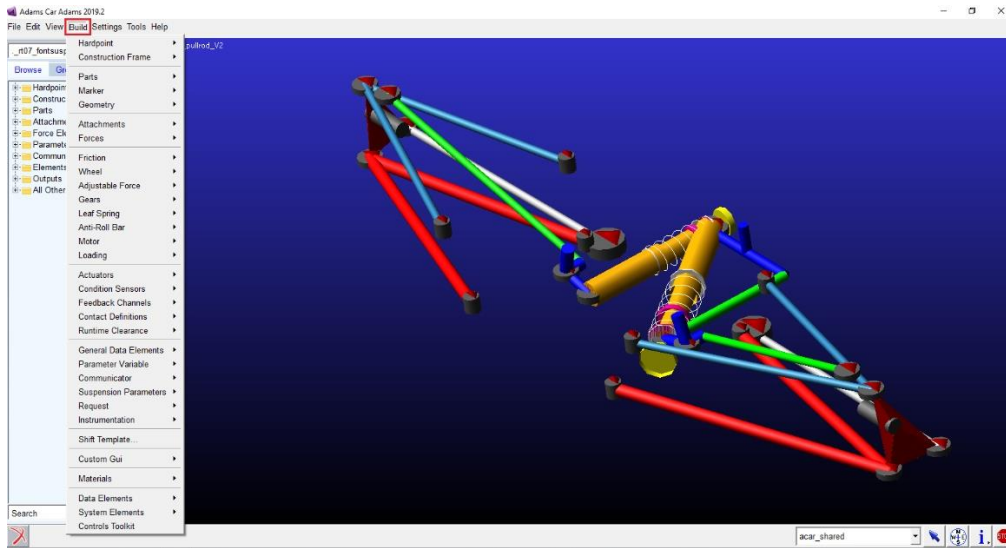
4.2. ADAMS Car Template builder

Predlošci (engl. templates) podsustava se izrađuju u sučelju za izradu predložaka (engl. template builder), gdje se definiraju parametri elemenata koji čine podsustav (engl. subsystem). Neki od parametara su: karakteristične točke (engl. hardpoints), krute (engl. joints) ili elastične (engl. bushings) veze između elemenata, mase i inercije elemenata, vizualni prikaz i sile koje djeluju između elemenata itd. Za modeliranje podsustava neće se izrađivati novi predlošci nego će se iskoristiti generički predlošci koji dolaze s programskim paketom ADAMS car (slika 10.). Razlog je taj što bi dizajniranje novih predložaka oduzelo jako puno vremena. Sa lijeve strane na slici 12. prikazano je stablo podsustava. U stablu se nalaze svi parametri koji definiraju određeni predložak.



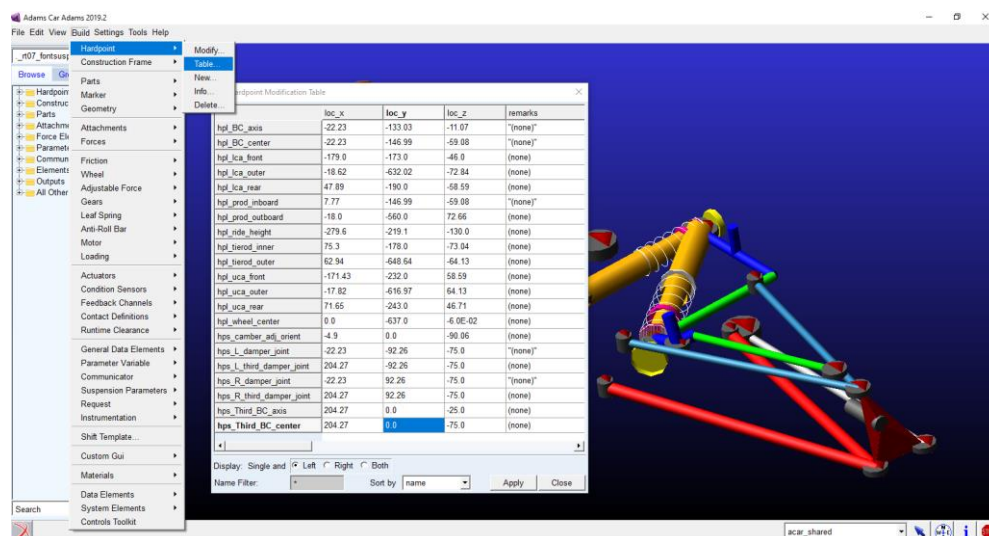
Slika 12. Generički predložak ovjesa

Već postojeći predlošci mogu se modificirati dovoljno dobro da bi odgovarali traženoj geometriji. Predložak modificiranog generičkog ovjesa prikazan je na slici 12 .



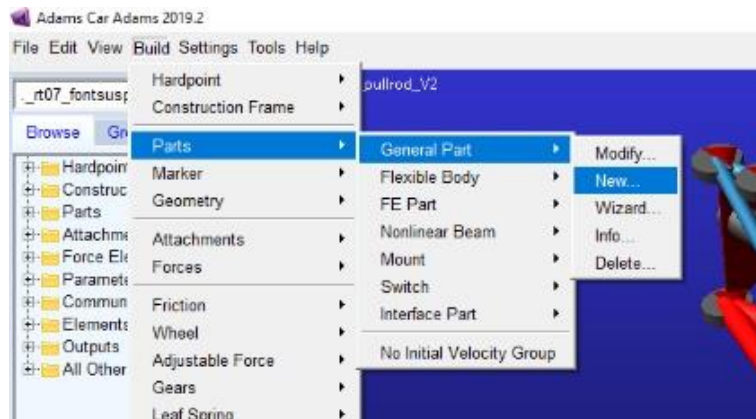
Slika 13. Modificirani predložak ovjesa

Modificiranje generičkog predloška najlakše je započeti definiranjem novih točaka svih elemenata koji se nalaze u predlošku. Nove točke definiraju se u skočnom izborniku izradi (engl. build) (slika 13.).



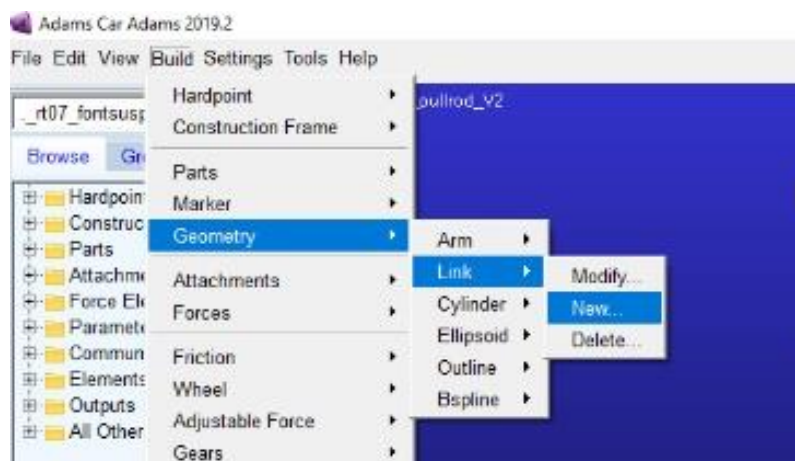
Slika 14. Karakteristične točke

Nakon definiranih karakterističnih točaka definiraju se svojstva elemenata predloška koji nedostaju u generičkom predlošku. Svojstva elemenata dodat ćemo u predložak u kartici opći dijelovi (engl. general parts) (slika 14.).



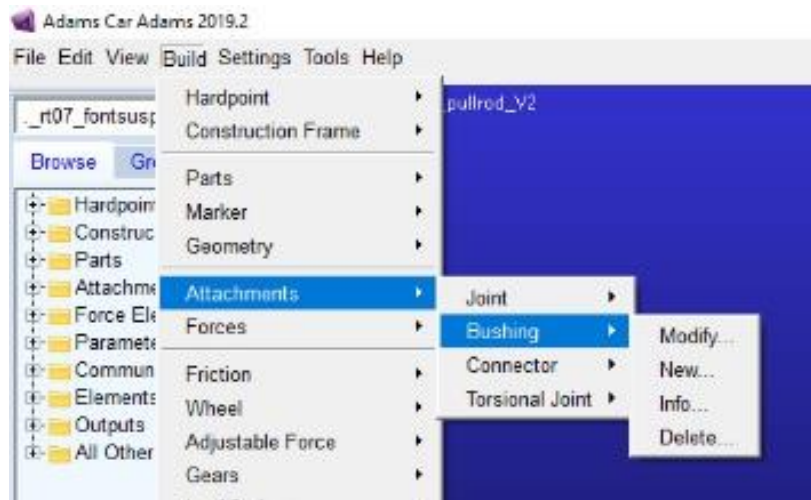
Slika 15. Elementi ovjesa

Da bi element bio i vizualno prikazan moramo posebno izraditi i njegov vizualni prikaz koji se definira se u kartici geometrija (engl. geometry) (slika 15.).



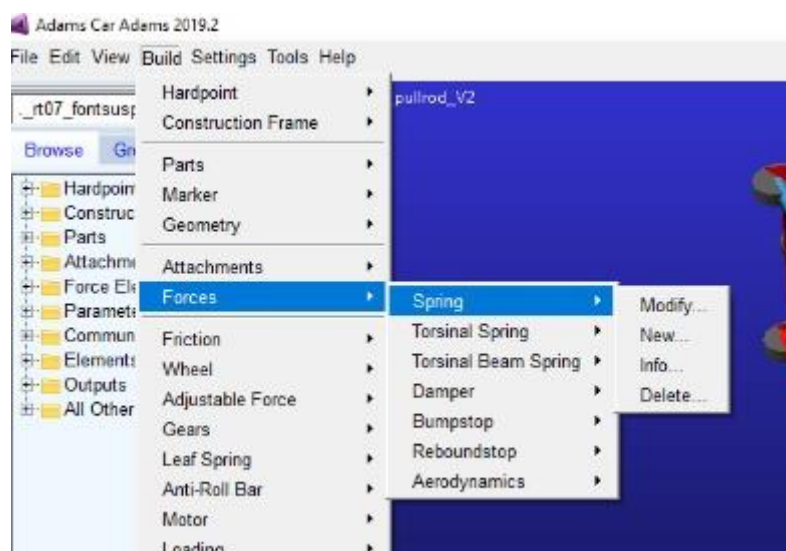
Slika 16. Grafički prikaz elemenata

Nadalje, dijelovi podsustava se međusobno spajaju krutim (engl. joints) ili elastičnim (engl. bushings) vezama. Sferni ležajevi ovjesa (engl. uniball) svojom konstrukcijom omogućuju male pomake elementa u odnosu na druge elemente ili u odnosu na šasiju pri vožnji uz vrlo malene elastične deformacije, ugrađuju se na krajevima poprečnih vodilica i spona. Podsustavi se međusobno povezuju prihvatima (engl. mounts).



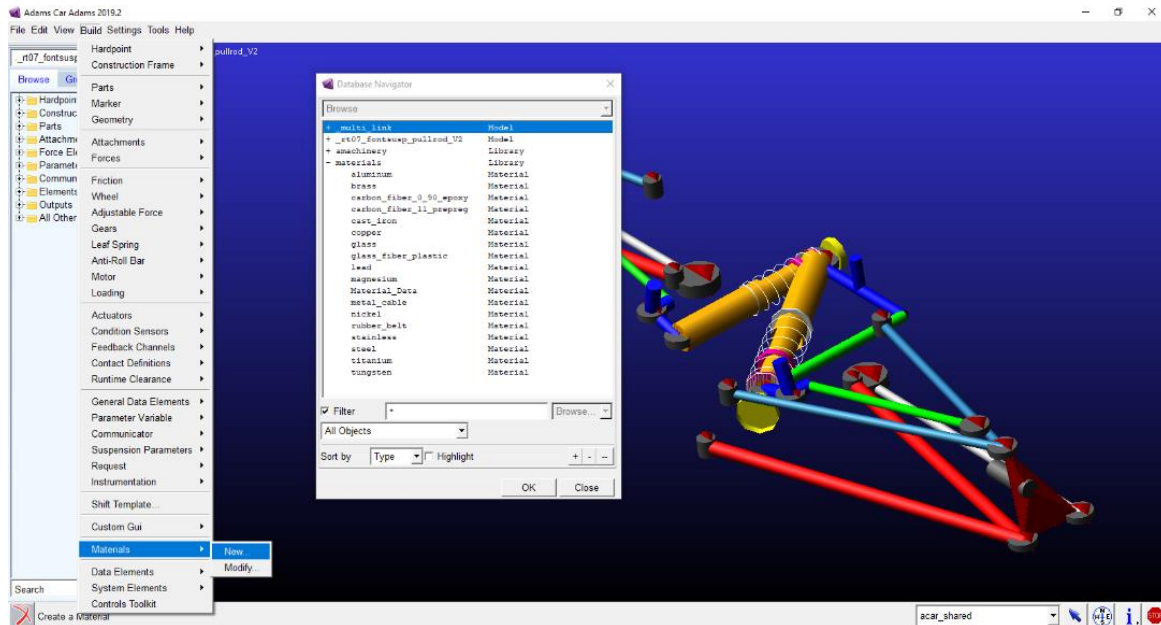
Slika 17. Veze između elemenata

Osim veza između elemenata, važno je odrediti i unutarnje sile koje djeluju između elemenata. Sile u oprugama koje vozilu daju krutost vožnje (te dio krutosti valjanja), torzijska krutost anti-roll bara, prigušna sila amortizera, kočni moment, pogonski moment i ostale sile se modeliraju u kartici sile (engl. forces). Oprugama i amortizerima pridružuje se datoteka svojstva (engl. property file) koja sadrži ovisnost opružne sile o deformaciji opruge, odnosno koja sadrži karakteristiku prigušenja koju daje proizvođač amortizera za odabrane postavke prigušenja. Torzijska krutost anti-roll bara se opisuje aktuatorom koji se ovisno o relativnom kutu zakreta opire tom zakretu, dok je torzijska krutost konstantna vrijednost. Skočni izbornik sile prikazana je na slici 18.



Slika 18. Sile koje djeluju na elemente

U predlošcima je moguće definirati jako puno parametara određenog podsustava kao što su: karakteristike elektromotora, kapacitete baterije, odnos između zupčaste letve i zupčanika, nagibe kotača, prijenosni omjer u reduktoru ili diferencijalu ako model to zahtjeva. Slika 19. prikazuje karticu materijali (engl. materials) u kojoj se određuju materijali elemenata.

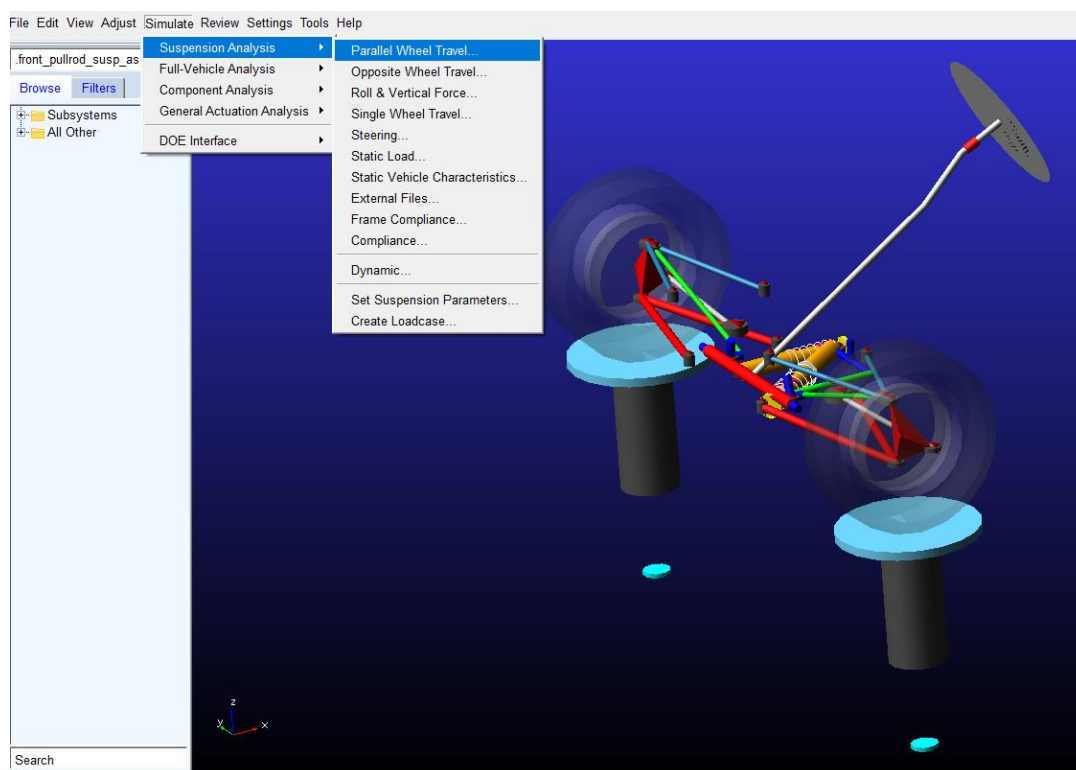


Slika 19. Odabir materijala elemenata

4.3. ADAMS Car Standard interface

Nakon što su svi predlošci definirani, izrađuju se podsustavi na temelju izrađenih predložaka. Unutar podsustava vozila u kartici podesivi parametri (engl. parameter variables) moguće je raditi naknadne promijene (npr. mase i inercije elemenata podsustava, kut bočnog nagiba kotača, usmjerenost kotača, prijenosni omjer reduktora itd.). Ovješena masa vozila se modelira kroz podsustav šasija (engl. chassis), u kojem je određena kao koncentrirana masa u svom težištu. Iznosi masa i inercija su određeni uz pomoć CAD sklopa vozila. Hvatišta sila otpora i uzgona zraka također su definirana u tom podsustavu jer aerodinamičke sile djeluju najvećim dijelom na ovješenu masu. Nadalje, unutar podsustava ovjesa vozila definiraju se težišta poprečnih vodilica i spona u središtu između karakterističnih točaka koje ih definiraju, te je pretpostavljeno da je 50 % njihove mase neovješeno. Njihovi iznosi masa i inercija također su određeni iz CAD modela. Ranije smo spomenuli da su dijelovi modela međusobno povezani

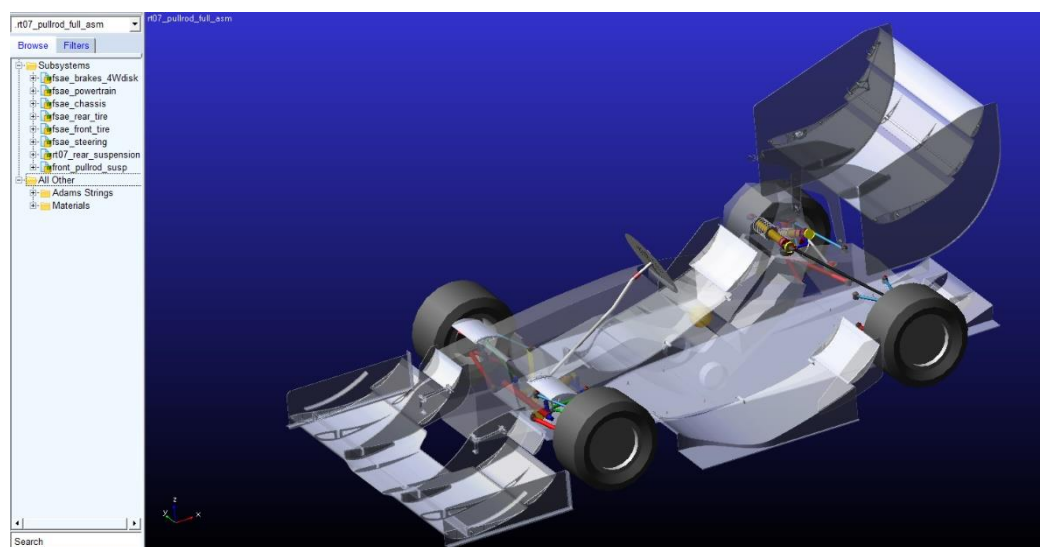
krutim ili elastičnim vezama. Sferni ležajevi se u ovjesu ugrađuju na krajevima poprečnih vodilica i spona, a u modelu su definirani kao elastične veze (engl. bushings) pošto one za razliku od krutih veza (engl. joints) nakon završetka simulacijske procedure vožnje daju mogućnost ispisa sila. Sferni ležaj je kinematička veza koja dopušta zakrete oko sve tri koordinatne osi, a sprečava relativnu translaciju vezanih dijelova u smjeru sve 3 koordinatne osi. Zbog toga su unutar datoteke svojstava definirane jako velike krutosti pomaka, dok su momenti zakreta vrlo malih iznosa. Pneumatici imaju vrlo velik utjecaj na rezultate simulacija procedura vožnje, jednako kao i u stvarnosti na performanse vozila. U svrhu postizanja što točnijih rezultata, pneumatici se podvrgavaju ispitivanjima u kojima se mjere sile priranja koje su postignute za različite postavke kinematičkih značajki, tlakova i vertikalnih opterećenja. U ADAMS Car standardnom sučelju provode se sve simulacije. Moguće je provoditi simulacije za zasebne podsustave ili za cijeli model vozila. Na slici 20. prikazana je procedura paralelnog vertikalnog pomaka kotača koja je samo jedna od brojnih procedura koje se mogu provesti za podsustav ovjesa. Osim već predefiniраниh procedura moguće je i izraditi procedure sa vlastitim parametrima i za podsustave i za kompletan model.



Slika 20. Simulacija ponašanja prednjeg ovjesa

4.4. Sklop vozila

Model formule definiran je provođenjem preinaka na generičkom modelu koji je dostupan u bazi podataka ADAMS Car-a. Model se sastoji od podsustava ovjesa, sklopa kotača, pneumatika, pogonskog sustava, sustava za upravljanje, konture šasije i aeropaketa. Šasija kao i ostali elementi su savršeno kruti u ovoj analizi. Generički model je prenamijenjen u model FSB-RT07 pomicanjem svih točaka prihвата ovjesa na šasiju, točaka u kojima su definirani zglobovi, promjenom krutosti opruga i iznosa prigušenja amortizera, te promjenom iznosa masa, inercijskih vrijednosti za sve elemente. Generički model korišten je zato što je definiranje kompletnog vozila iz nule iznimno dugotrajan i težak posao za koji je potrebno više ljudi kako bi se uspio napraviti. Za svaki element potrebno je definirati njegov položaj, masu, položaj težišta, orijentaciju koordinatnog sustava, momente inercije te matrice transformacije za sve pojedinačne koordinatne sustave elemenata u odnosu na glavni koordinatni sustav vozila. Kako bi sustav funkcionirao, svaki element i svaka zglobna veza moraju biti točno definirani. Uz to, uvijek postoji mogućnost greške uz koju će model moći završiti zadanu simulaciju, ali rezultati simulacija biti će beskorisni. Kako bi proces optimizacije modela ubrzao i osigurala njegova maksimalna točnost, suci na natjecanjima također potiču da se primjenjuju generički modeli i modificiraju željeni parametri. Na slici 21. prikazan je model FSB-RT07. Ovaj model izrađen je u 2 izvedbe. Jedan model ima pogonski sustav odnosno elektromotore i reduktore montirane na šasiju, dok su kod drugoga oni smješteni unutar stražnjih kotača.



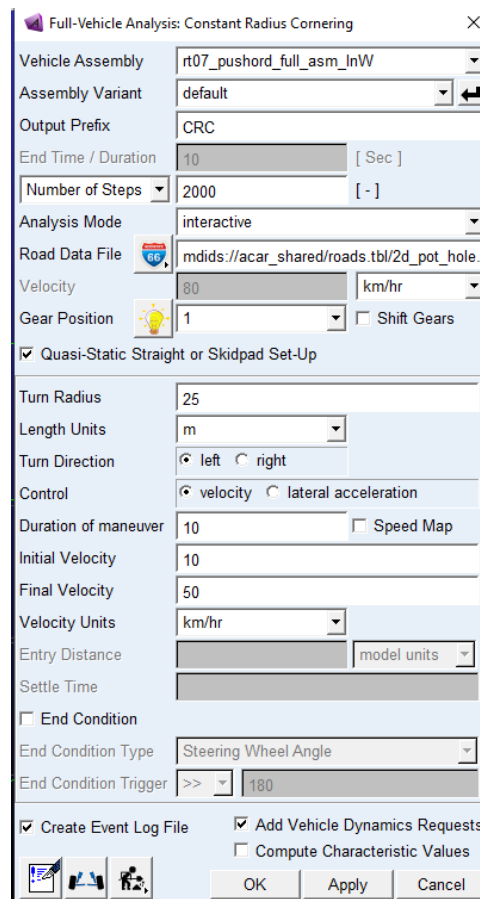
Slika 21. Kompletan sklop vozila

5. ODREĐIVANJE MATERIJALA OVJESA

5.1. Određivanje sila pomoću ADAMS-a

Glavni zahtjevi kod konstrukcije trkaćeg vozila su čim manja masa, čim niži položaj težišta i čim manji momenti inercije. Da bi masa vozila bila čim manja potrebno je provesti topološke optimizacije svakog dijela vozila kako bi se odstranio nepotreban višak mase. Važno je smanjiti masu neovješene mase kako bi se povećala udobnost i sigurnost vožnje, a kod trkaćih i sportskih vozila smanjenje neovješene mase djeluje direktno na poboljšanje stabilnosti vozila. Ranije smo spomenuli da neovješenu masu čine naplatci, gume, glavčine, nosača glavčine, kočnice, ali i približno pedeset posto težine vilica ovjesa, pogonske osovine, te opruga i amortizera. Budući da je prigušno djelovanje pneumatika zanemarivog iznosa. To znači da je jedino moguće prigušiti amplitude vertikalnog gibanja mase kao odziv na pobudu s podloge pomoću prigušnog elementa koji se nalazi u sustavu ovjesa, ali taj element ne djeluje na prigušenje odziva neovješene mase zbog pobude s podloge. Zbog toga je važno smanjiti neovješenu masu kako bi vozilo imalo najbolje moguće performanse. Neovješenu masu smanjiti ćemo pravilnim odabirom materijala ovjesa ali i ranije spomenutim topološkim optimizacijama. Vodilice ovjesa sastoje se od prihvata vodilice izrađene od aluminijske legure Al7075-T6 i šuplje cijevi izrađene od kompozitnog materijala ugljik - epoksidna smola. Ovi materijali su izabrani zbog izuzetno male mase te zbog dobrog podnošenja velikih opterećenja. S obzirom na to da tehnički aluminij ima nizak modul elastičnosti i nisku tvrdoću njegova primjena je ograničena. Kako bi se poboljšala njegova mehanička svojstva, tehnički aluminij se legira. Najvažniji legirani elementi su bakar (Cu), magnezij (Mg), silicij (Si), cink (Zn) i mangan (Mn). Osim legiranih elemenata, u strukturi aluminijskih legura se nalaze i primjese i nečistoće poput željeza (Fe), kroma (Cr) i titana (Ti). Čistoća komercijalnog aluminija je najčešće oko 99%. Ostalih 1% čine maloprije navedene nečistoće. U nastavku teksta biti će objašnjeno na koji način su određena maksimalna dopuštena naprezanja te da li ovi materijali zadovoljavaju zahtjeve koji se stavljaju pred njih. Za određivanje sila koje djeluju na ovjes iz ADAMSA koristiti ćemo simulaciju ubrzavanja vozila gibanjem na zakrivljenoj putanji. Pri takvom gibanju dolazi do povećanja opterećenja na vanjskim kotačima uslijed djelovanja inercijskih sila. To rezultira većim opterećenjem kotača i elemenata ovjesa na vanjskoj strani vozila zakrivljene putanje. Odabrana je ova procedura zato što se na taj način može odrediti kritična brzina kod koje vozilo gubi svoju stabilnost na zadanoj putanji. U trenutku prije nego što vozilo izgubi stabilnost opterećenje elemenata ovjesa je najveće zato što tada na vozilo

djeluje najveća inercijska sila kojoj se na mjestu kontakta podloge i pneumatika suprotstavlja reakcijska sila. Parametri simulacije su prikazani na slici 22. Prikazani parametri definiraju početnu i krajnju brzinu vožnje modela, vrijeme trajanja simulacije i radijus zakrivljenosti putanje po kojoj se vozilo giba u simulaciji. Dobivene sile iz ADAMSA koriste se dalje u proračunu. Proračun je proveden na temelju metode konačnih elemenata.

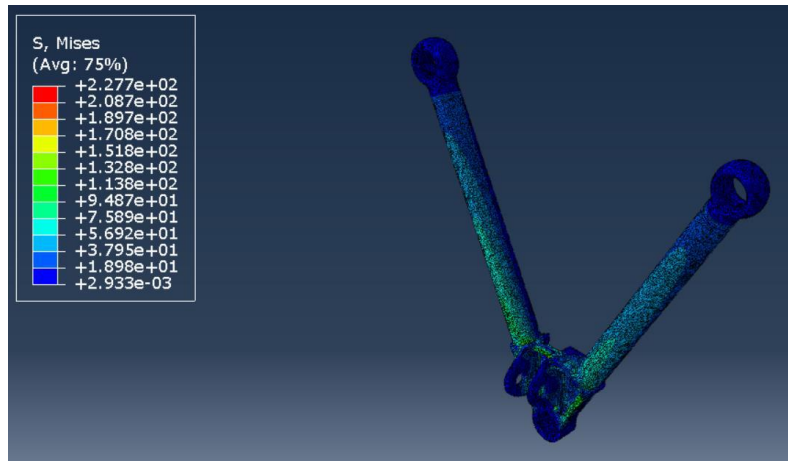


Slika 22. Simulaciju ubrzavanja vozila gibanjem na zakrivljenoj putanji

5.2. Dimenzioniranje komponenata ovjesa pomoću Abaqusa

Metoda konačnih elemenata je metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum s beskonačno stupnjeva slobode gibanja zamjenjuje se s diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Drugim riječima, područje kontinuuma dijeli se na konačan broj elemenata, pa se razmatrani kontinuum prikazuje kao mreža konačnih elemenata. Konačni elementi međusobno

su povezani u točkama na rubovima elementa koje se nazivaju čvorovi. Osim na vrhovima bridova, čvorovi se mogu nalaziti i duž stranica koje definiraju rubove elemenata. Pomoću interpolacijskih funkcija opisuje se stanje u svakom elementu, kao što je npr. polje pomaka, deformacije, naprezanja, temperature te ostalih veličina. Te funkcije moraju zadovoljavati odgovarajuće uvjete da bi se diskretizirani model što više približio ponašanju kontinuiranog sustava. Točnost dobivenog rezultata prvenstveno ovisi o broju korištenih konačnih elemenata. S povećanjem broja konačnih elemenata korištenih prilikom diskretizacije rješenje konvergira prema točnom rezultatu. Definicije jednadžbi važne su za opisivanje stanja u elementu odnosno za varijacijsku formulaciju jer se od njih polazi prilikom izvođenja algebarskih jednadžbi. Nakon izvođenja jednadžbi za konačni element, gdje su nepoznanice neovisne varijable u čvorovima, izvode se globalne jednadžbe za diskretizirani model. Primjenom poznatih teorijskih relacija i pomoću izračunatih čvornih veličina moguće je odrediti sve veličine potrebne za analizu opisanog kontinuiranog sustava. Metodu konačnih elemenata inženjeri su počeli primjenjivati u svakodnevnoj inženjerskoj praksi tek nakon razvoja računala. Današnja računala vrlo lako rješavaju velike sustave jednadžbi koji se primjenjuju kod metode konačnih elemenata. Također, primjena računala omogućuje i veliku uštedu vremena jer se u kratkom vremenu može napraviti veliki broj eksperimenata te se brže dolazi do konstrukcije koja je najoptimalnija. Najvažnije što prosječni inženjer mora znati o konačnim elementima jest da je to skup elemenata povezanih u prostoru određenim brojem točaka, koji mogu opisati razne oblike. U određenim točkama zadani su uvjeti pomaka i sila. Prilikom provođenja simulacija inženjer mora moći prepoznati koji elementi su bitni za provedbu simulacije, a koje je moguće zanemariti (kao npr. rupe, spona, ukrute i sl.). Proračun čvrstoće ovjesa na bolidu FSB-RT07 je proveden u programskom paketu Abaqus. To je programski paket koji služi za definiranje proračunskog modela i provođenje samog proračuna. U njemu je potrebno definirati svojstva materijala, veze između pojedinih elemenata, rubne uvjete, vrstu i gustoću željenih konačnih elemenata te opterećenja [6].

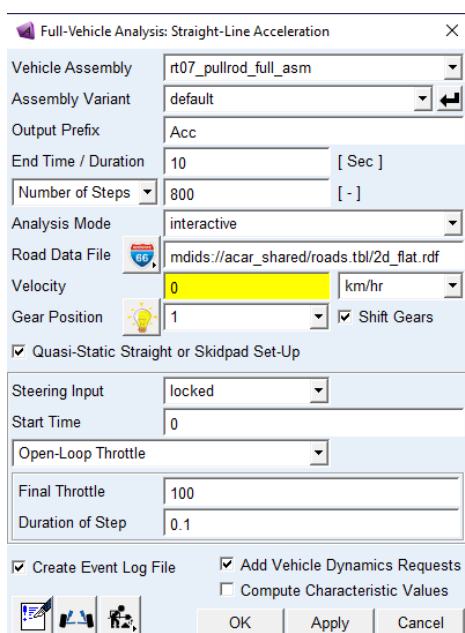


Slika 23. FEM analiza poprečnih ramena

6. USPOREDBA DVA MODELA

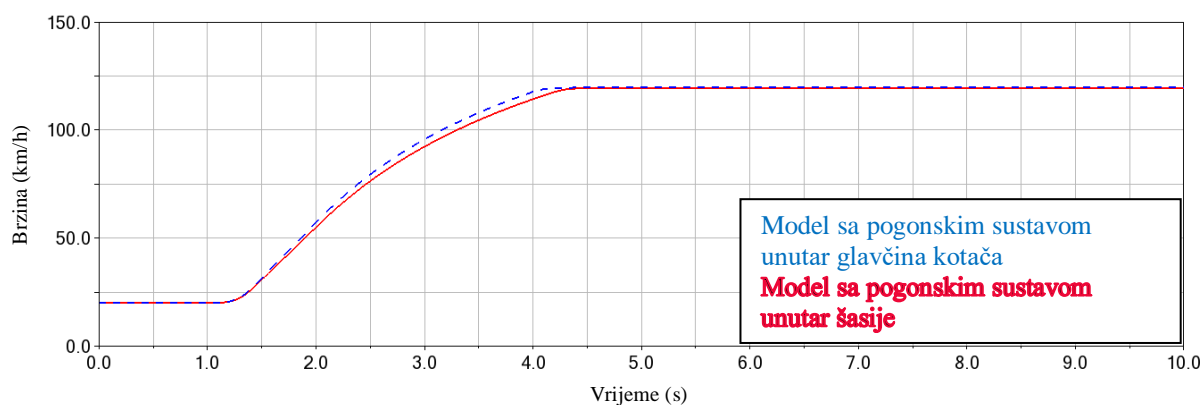
6.1. Procedura ubrzanja

Procedura ubrzanja odabrana je kao prva procedura kojom će se usporediti model u kojem je pogonski sustav montiran na šasiju sa onim kojem je pogonski sustav, odnosno elektromotori i reduktori smješteni unutar stražnjih kotača. Procedura ubrzanja je vrlo jednostavna, u njoj vozilo kreće iz stacionarnog položaja te ubrzava maksimalnom akceleracijom do određene brzine koja je limitirana mapom motora. Na slici 24. prikazani su i ostali parametri koji definiraju ovu proceduru.



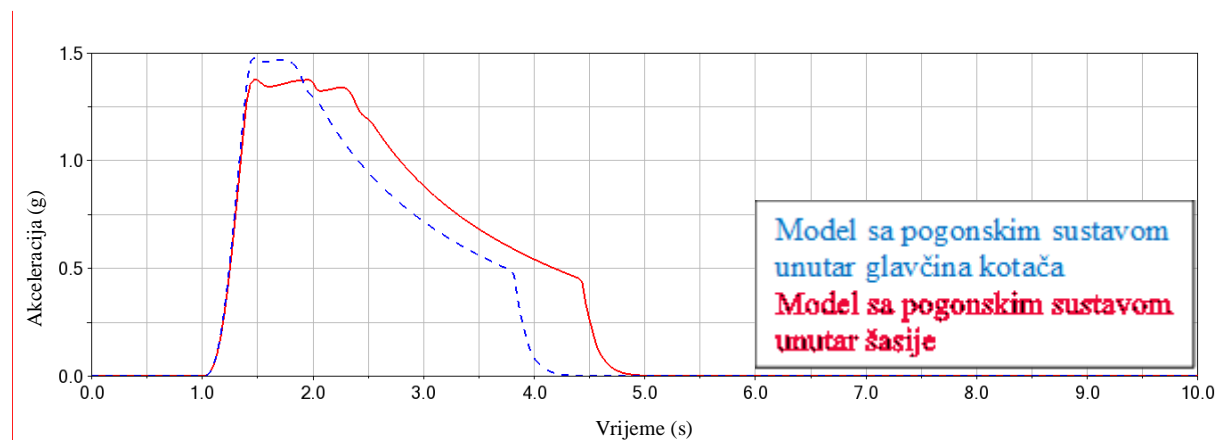
Slika 24. Parametri procedure ubrzanja

Na slici 25. prikazani su rezultati simulacije, odnosno graf brzina. Model sa smještenim pogonskim sustavom unutar glavčine kotača postiže maksimalnu brzinu u kraćem vremenu u odnosu na model sa smještenim pogonskim sustavom unutar šasije što je rezultat smanjene mase prvog modela. Maksimalna brzina modela iznosi 119.7 km/h.



Slika 25. Graf brzina

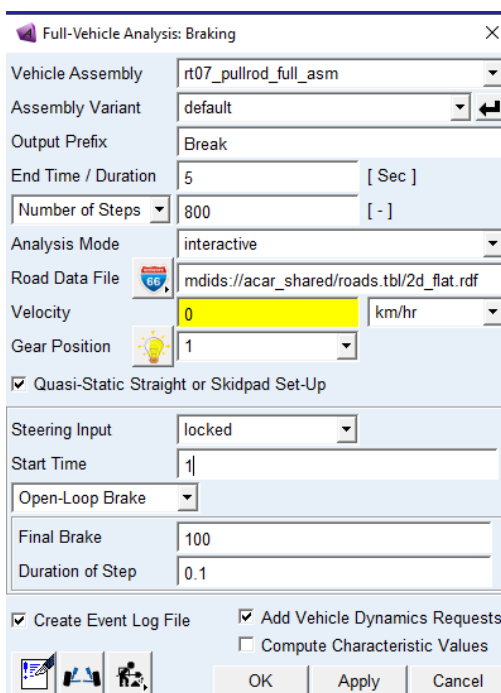
Na slici 26. je prikazan graf uzdužne akceleracije. Na grafu možemo vidjeti da model sa smještenim pogonskim sustavom unutar glavčine kotača postiže veću akceleraciju zbog smanjene mase u odnosu na model sa smještenim pogonskim sustavom unutar šasijske. Ovdje dolazi do izražaja važnost uštede mase. Maksimalna akceleracija lakšeg modela iznosi 1.48 g, dok težeg iznosi 1.37 g. Slovo g je oznaka za gravitacijsku akceleraciju, ona iznosi $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.



Slika 26. Graf uzdužne akceleracije

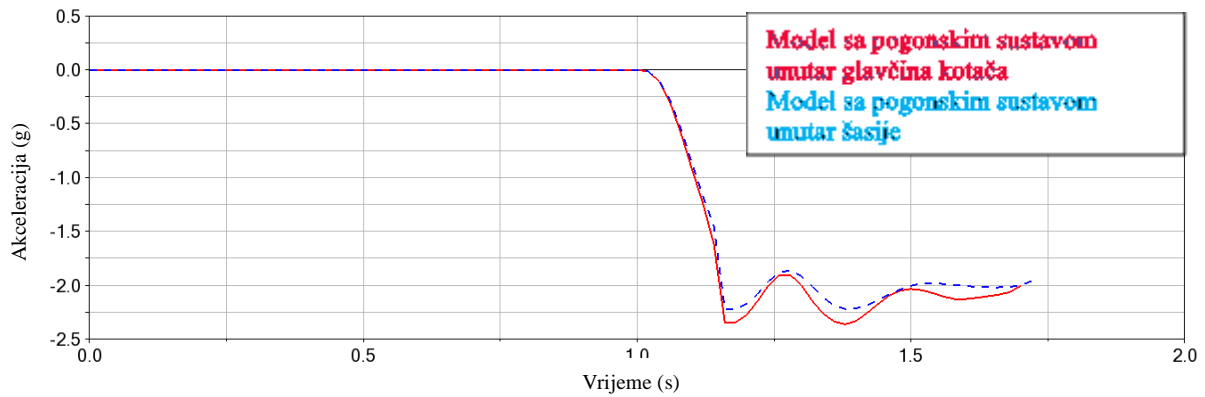
6.2. Procedura kočenja

Procedura kočenja provodi se na način da se model kreće zadanom brzinom, te je u jednom trenu apliciran maksimalan pritisak u kočnicama. Procedura je vrlo kratka i jednostavna, a na slici 27. su prikazani ostali parametri. Vozilo kreće kočiti maksimalnim pritiskom pedale nakon jedne sekunde.



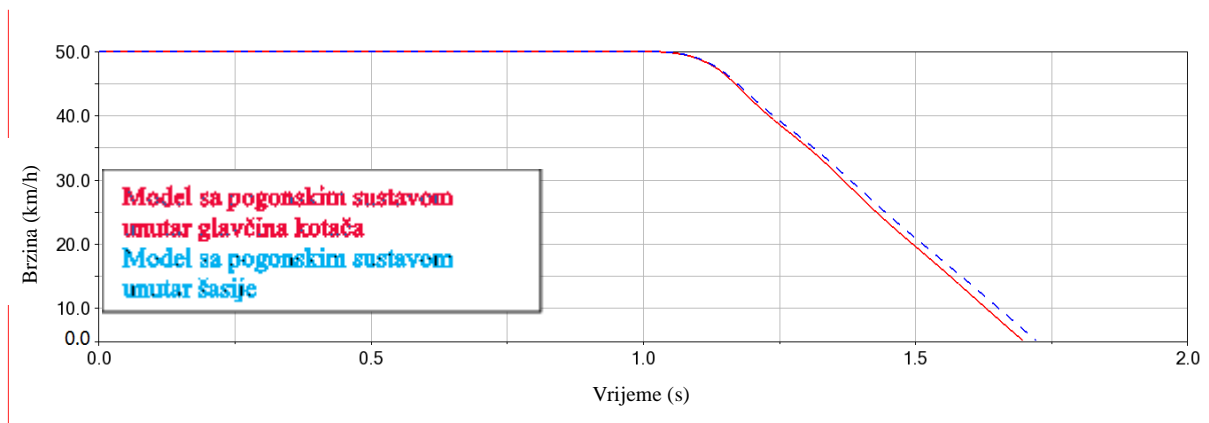
Slika 27. Parametri procedure kočenja

Kod procedure kočenja također je dominantan model sa smještenim pogonskim sustavom unutar glavčina kotača. Na grafu možemo vidjeti da taj model postiže puno veću deceleraciju što je također posljedica značajno manje mase u odnosu na drugi model. Kod uzdužne dinamike momenti inercije ne zauzimaju toliku važnost kao kod lateralne, pa je ovdje utjecaj povećanog momenta inercije gotovo zanemariv. Procedure su provedene za dvije različite brzine sa kojih se vozilo kreće zaustavljati. Na slici 28. prikazana je uzdužna deceleracija za kočenje sa 50 km/h. Na ovom grafu vidljivo je da se model sa manjom masom postiže veću deceleraciju od -2.33 g u odnosu na -2.22 g koju postiže drugi model. Također možemo vidjeti da deceleracije nije konstantna, jer model ne dopušta da kotači proklizuju pa pušta pedalu kočnice u trenucima kada bi kotači proklizali.



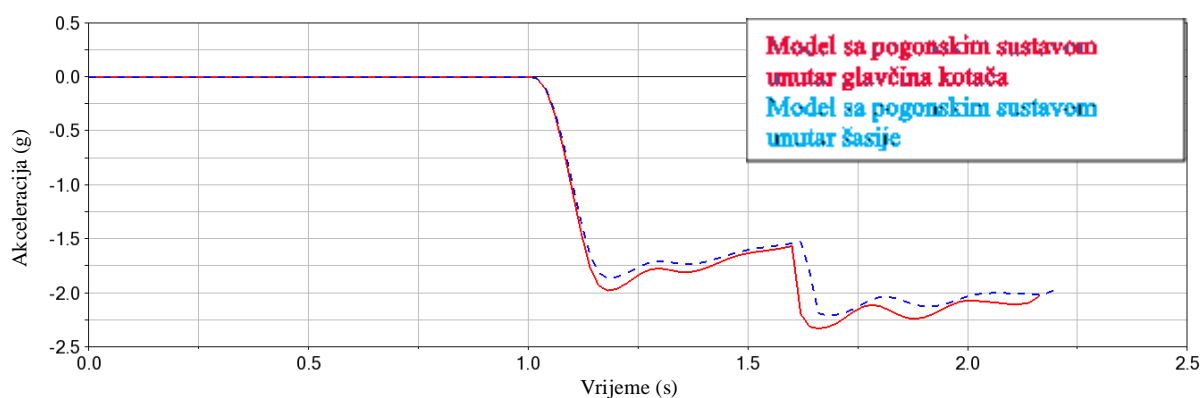
Slika 28. Graf uzdužne deceleracije sa 50 km/h

Na slici 29. prikazan je graf brzina. Model sa smještenim pogonskim sustavom unutar glavčine kotača zaustavlja se u kraćem vremenu (0.025 sekundi) u odnosu na model sa smještenim pogonskim sustavom unutar šasije što je rezultat smanjene mase prvog modela.



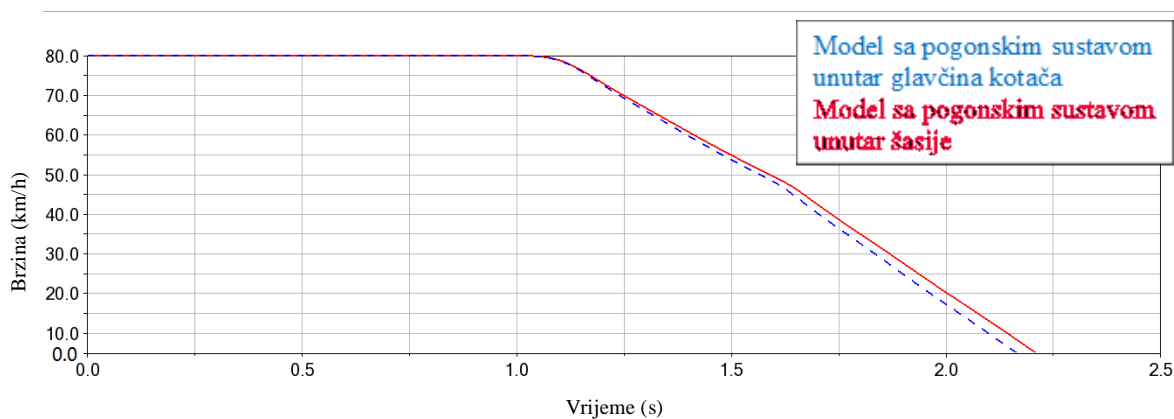
Slika 29. Graf brzine od 50km/h do 0 km/h

Graf uzdužne deceleracije sa brzine 80 km/h gotovo je identičan onome sa 50 km/h ali razlika između dva modela je malo veća (0.16 g). Model sa manjom masom naravno postiže veću deceleraciju (slika 30.).



Slika 30. Graf uzdužne deceleracije sa 80 km/h

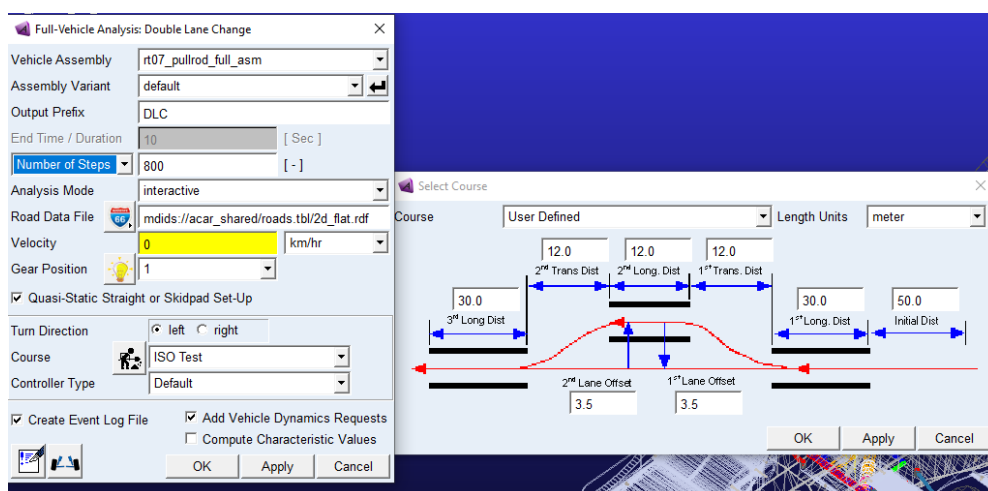
Slika 31. daje podatke za kočenje sa 80 km/h. Podaci su jako slični podacima za kočenje sa 50 km/h, ali razlika između dva modela je sada veća. Lakši model prije se zaustavlja od težeg modela (0.035 sekundi).



Slika 31. Graf brzine od 80km/h do 0 km/h

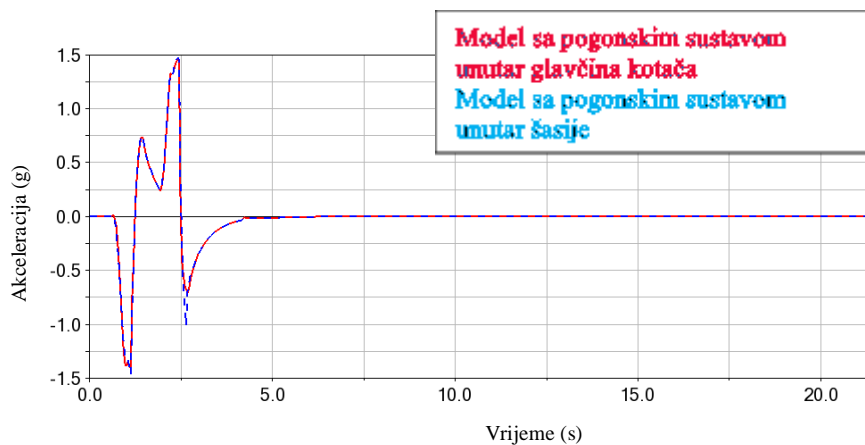
6.3. Procedura dvostruke izmjene trake

Procedura dvostruke izmjene trake predviđena za ispitivanje poprečne dinamike vozila. Provodi se na način da se vozilo kreće konstantnom brzinom po jednoj traci, te u jednom trenutku vozilo naglo mijenja traku pokušavajući zadržati smjer kretanja. Nakon definirane udaljenosti vozilo se vraća u traku kojom se ranije kretalo. Brzina kroz cijelu proceduru trebala bi biti konstantna jer je zahtjev da je papučica gasa kroz cijelu proceduru u istom položaju. Parametri simulacije nisu u skladu sa normama za cestovna vozila, nego su prilagođeni kako bi bočna dinamika formule FSB Racing Team-a došla do svojih limita. Na taj način biti će lakše uočiti razlike između uspoređivanih modela (slika 32.). Procedure su provedene sa brzinama od 30 km/h i 50 km/h kako bi razlike bile izraženije, ali to nažalost nije postignuto. Dodatnim povećanjem brzine vozilo ne prolazi zadanom putanjom.



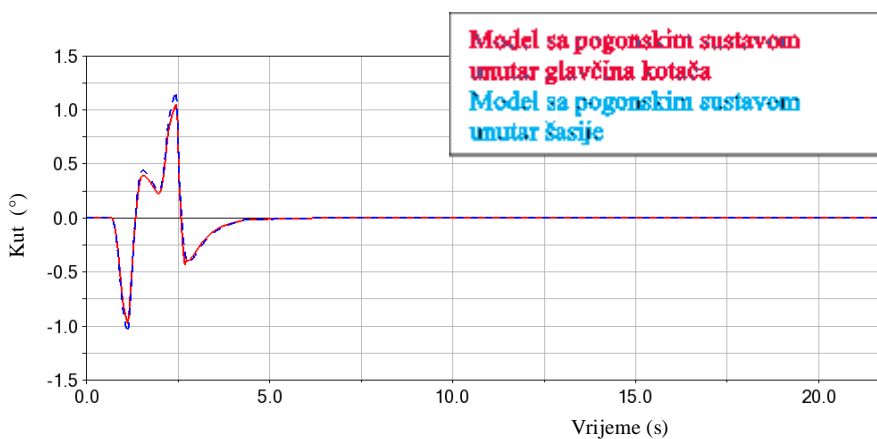
Slika 32. Parametri procedure dvostruke izmjene trake

Kod procedure dvostruke izmjene trake model sa smještenim pogonskim sustavom unutar glavčine kotača postiže manju bočnu akceleraciju u odnosu na model sa smještenim pogonskim sustavom unutar šasije što je rezultat povećanih polarnih momenata inercije kod vozila sa pogonskim sustavom unutar glavčine kotača. Razlika u akceleracijama između modela iznosi gotovo zanemarivih 0.016 g (slika 33.).



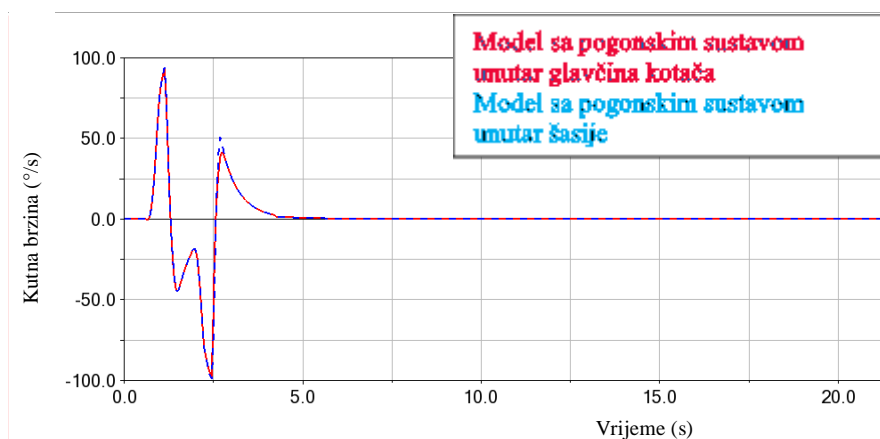
Slika 33. Graf bočne akceleracije

Na slici 34. prikazan je kut valjanja vozila. Model sa većom masom više se valja kod promjene pravca od vozila smanjene mase. Razlike u ovom slučaju su male te iznose 0.14° .



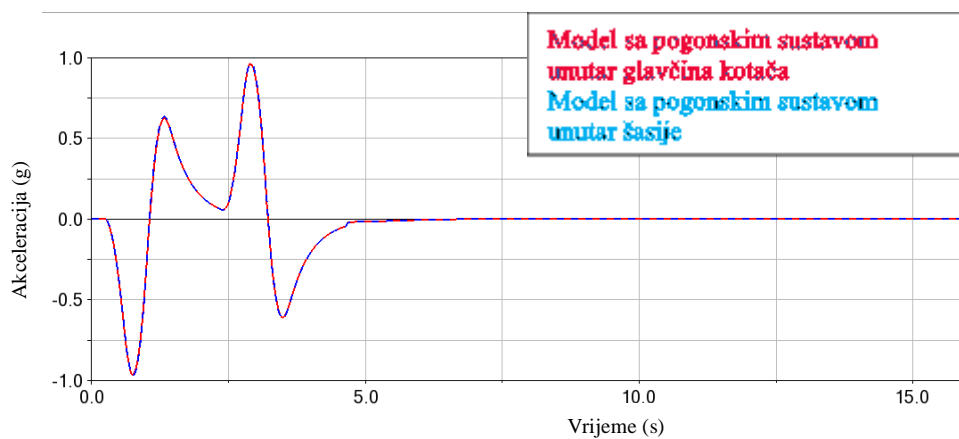
Slika 34. Graf kuta valjanja vozila

Slika 35. prikazuje graf brzine zakreta oko vertikalne osi. Razlika pri 50 km/h je mala i u vršnoj vrijednosti iznosi $0.1^\circ/\text{s}$.



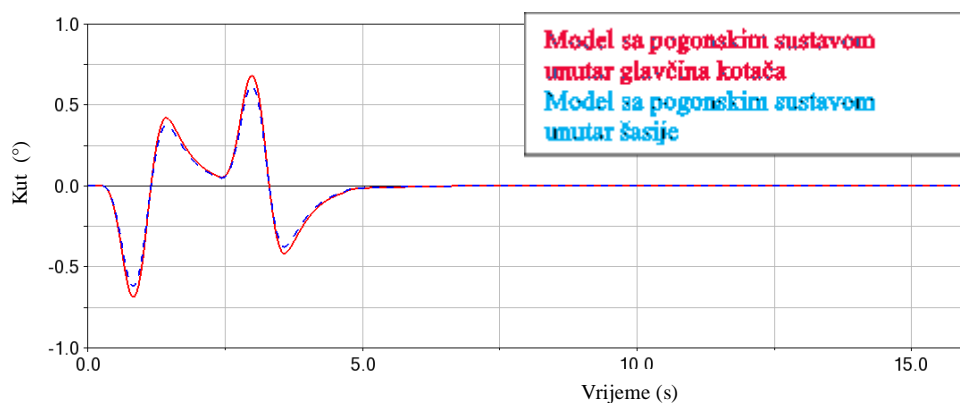
Slika 35. Graf brzine zakreta oko vertikalne osi

Na slici 36. prikazana je bočna akceleracija vozila. Oba modela postižu podjednaku bočnu akceleraciju kod manje brzine.



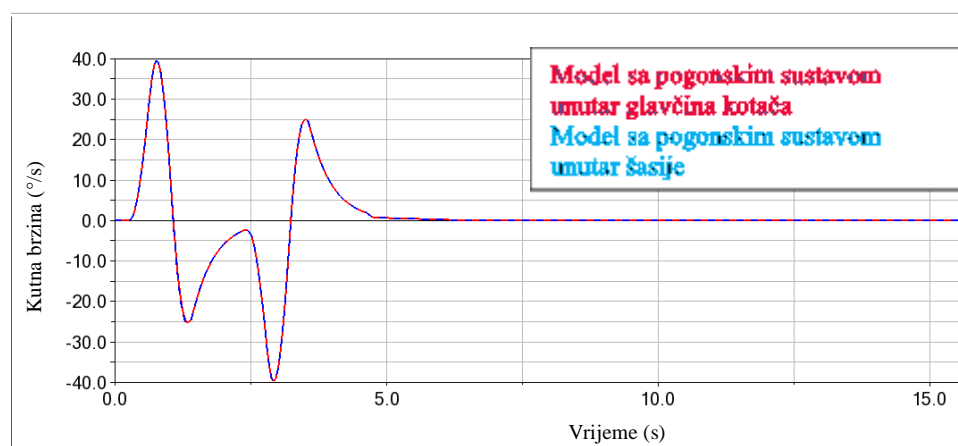
Slika 36. Graf bočne akceleracije

Na slici 37. prikazan je kut valjanja vozila. Model sa pogonskim sustavom unutar glavčina kotača postiže veći kut valjanja. Razlika u kutu valjanja između dva modela iznosi 0.65° .



Slika 37. Graf kuta valjanja vozila

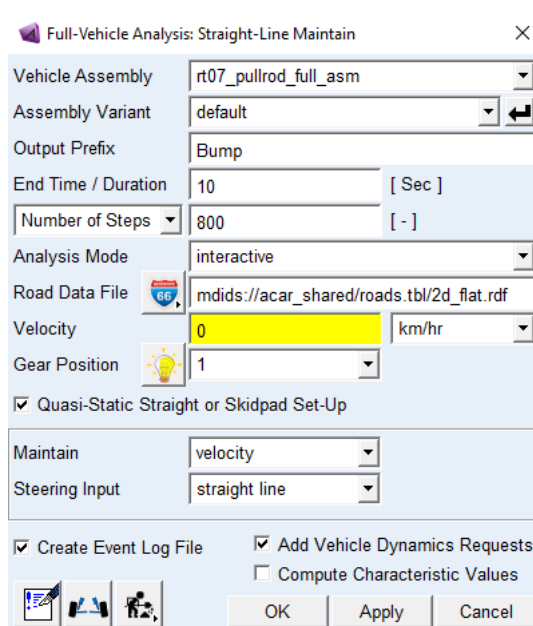
Slika 38. prikazuje graf brzine zakreta oko vertikalne osi. Nema razlika u kutu zakreta između uspoređivanih modela.



Slika 38. Graf brzine zakreta oko vertikalne osi

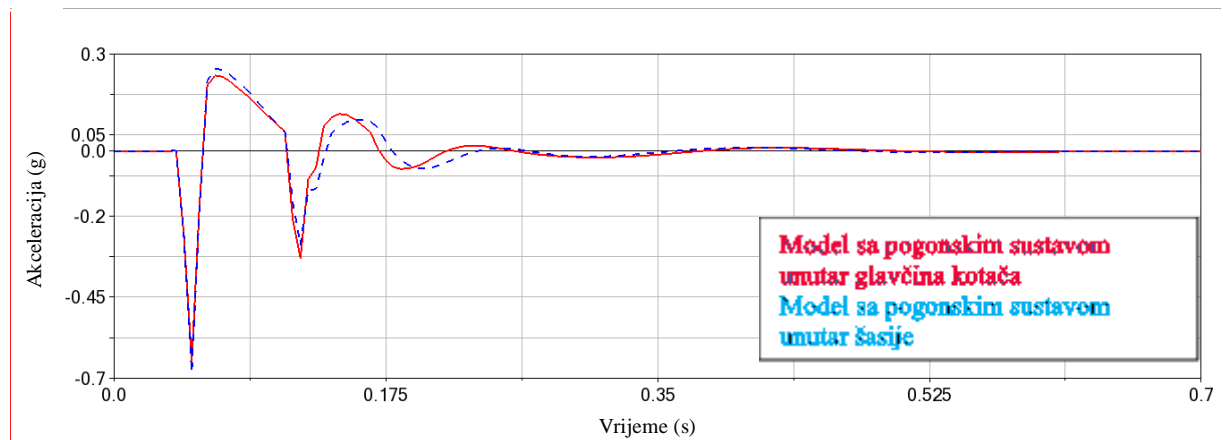
6.4. Procedura održavanja konstantne brzine s vertikalnom pobudom

U ovoj proceduri vozilo se kreće konstantnom brzinom te prelazi preko kanala na stazi koji je postavljen okomito na stazu. Prepreka je postavljena kako bi mogli usporediti vertikalnu dinamiku neovještene mase, i njezin utjecaj na performanse vozila. Vozilo nailazi na prepreku brzinom od 80 km/h unutar prve sekunde (slika 39.).



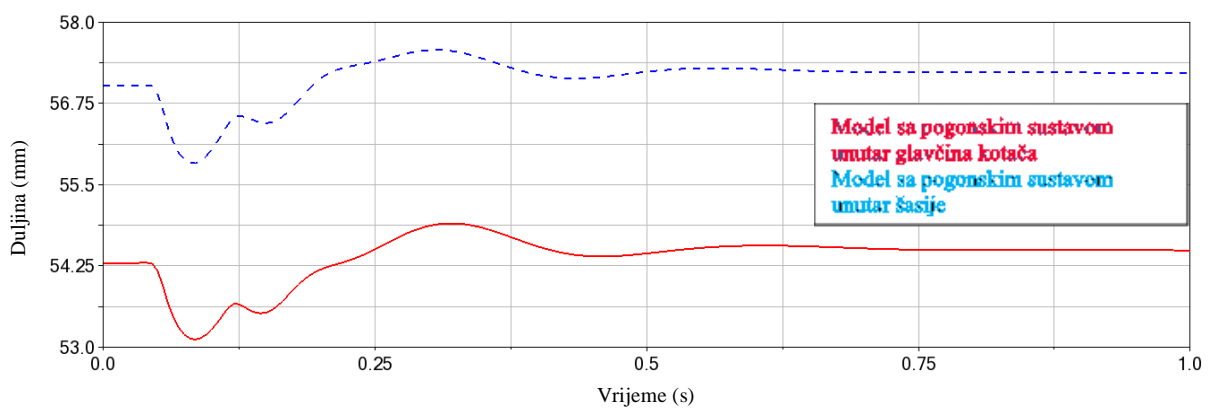
Slika 39. Parametri procedure održavanja brzine s vertikalnom pobudom

Graf vertikalne akceleracije vozila pokazuje da vozilo veće mase postigne veću vertikalnu akceleraciju, razlika iznosi 0.6 g (slika 40.).



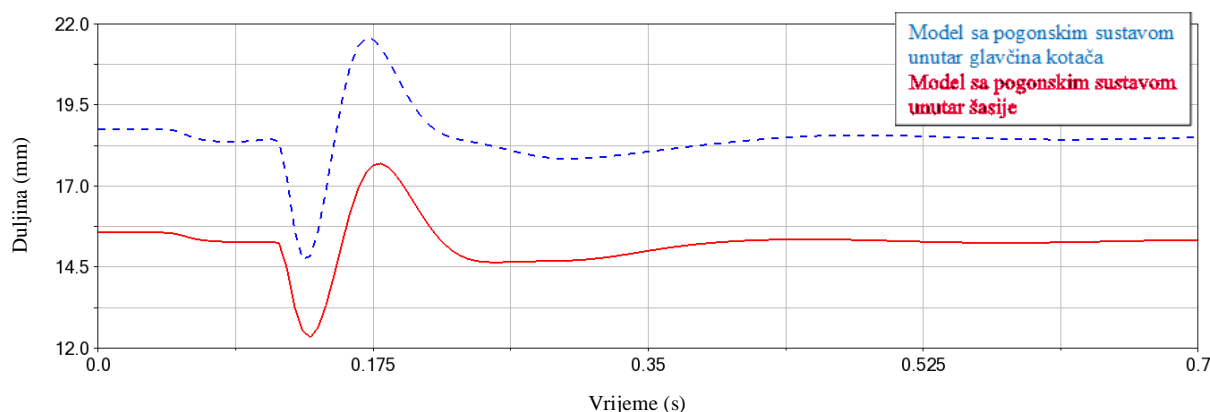
Slika 40. Graf vertikalne akceleracija vozila

Vertikalni pomak ovještene mase vozila veći je kod modela sa smještenim pogonskim sustavom unutar šasije u odnosu na model sa smještenim pogonskim sustavom unutar glavčine kotača zbog veće mase prvog modela (slika 41.). Maksimalna vrijednost vertikalnog pomaka ovještene mase modela sa smještenim pogonskim sustavom unutar šasije veća je za 2.67 mm.



Slika 41. Graf vertikalnog pomaka ovještene mase vozila

Vertikalni pomak neovještene mase veći je kod modela sa smještenim pogonskim sustavom unutar glavčine kotača u odnosu na model sa smještenim pogonskim sustavom unutar šasije zbog veće mase sklopa kotača kod prvog modela. U maksimalnoj vrijednosti iznosi 3.85 mm (slika 42.).



Slika 42. Graf vertikalnog pomaka neovještene mase vozila

6.5. Zaključak nakon usporedbe 2 modela

Provedene procedure ukazuju da razlika u masi ima jako veliku ulogu u pogledu bočne i uzdužne dinamike. Različitim razmještajem komponenata pogonskog sustava mijenjaju se polarni momenti inercije vozila. Ranije je spomenuto da se kod trkaćih vozila teži da polarni momenti inercije budu što manji kako bi vozilo bilo što agilnije. Budući da se pogonski sustav seli iz sredine šasije u kotače momenti inercije se u tom slučaju povećavaju. Također, povećavaju i iznos neovještene mase što nepovoljno utječe na samu upravljivost bolida. Usprkos tim nedostacima ovaj koncept ima puno više prednosti. Na dosadašnjem bolidu veliki problem bio je hlađenje motora i baterije. Motori i reduktori smješteni u kotačima puno se lakše i bolje hlade nego oni smješteni unutar šasije. Također, ovaj koncept je puno kompaktniji i lakši te pruža puno lakši smještaj ostalih komponenti unutar šasije. Razlika u masi je čak devetnaest kilograma što je jako velika razlika u svijetu automoto sporta. Takvoj razlici u masi pridonijela je i činjenica da nisu potrebne dodatne poluosovine kao kod motora koji je smješten unutar šasije. Ovo je i važna stepenica prema pogonskom sustavu sa četiri elektromotora koji omogućuje upravljanje momentom na sva četiri kotača (engl. torque vectoring).

7. ZAKLJUČAK

U sklopu rada opisan je način na koji je organizirano natjecanje Formula Student i rečeno je nešto o FSB Racing Team-u, njegovim uspjesima i planovima u budućnosti. Dalje, opisani su osnovni parametri ovjesa i kinematske značajke. U slijedećem poglavlju navedene su neke osnove dinamike sustava više tijela te neke osnove o programskom paketu ADAMS Car. U četvrtom poglavlju opisan je način izrade modela u ADAMS-u odnosno, opisan je postupak preinake generičkog modela u model koji vjerno opisuje formulu kojom se studenti FSB Racing Team-a natječu na Formula Student natjecanjima. Modelirana su dva modela čije će performanse biti uspoređene u zadnjem poglavlju ovog rada. Cijeli postupak popraćen je i slikama radi lakšeg razumijevanja. Slijedeće poglavlje opisuje način određivanja materijala ovjesa pomoću programskih paketa ADAMS Car i Abaqus. Maksimalne sile određene su simulacijom postupnog ubrzavanja vozila na zakrivljenoj putanji konstantnog radijusa. Kasnije su sile dobivene simulacijama u ADAMS-u korištene za proračun krutosti i čvrstoće metodom konačnih elemenata u Abaqusu. Na kraju, u zadnjem poglavlju su provedene brojne simulacije s ciljem usporedbe dva modela. Također su komentirani rezultati koji pokazuju da model koji ima pogonski sustav smješten unutar glavčina stražnjih kotača ima znatno bolje performanse što je posljedica velike uštede mase zbog kompaktnog dizajna pogonskog sustava. U tom slučaju neovješena masa je veća, ali ukupna masa vozila je značajno smanjena što je jedan od glavnih zahtjeva pri konstruiranju natjecateljskog vozila. Taj koncept vozila je odabran za iduću sezonu jer je to također važan korak prema pogonskom sustavu smještenom u sva četiri kotača koji omogućuje upravljanje momentom. Programski paketi sve više su zastupljeni kod odabira najboljih koncepata u timu, što za posljedicu ima ostvarivanje sve boljih rezultata te izradu formule koja smješta FSB Racing Team rame uz rame sa najboljim europskim timovima.

LITERATURA

- [1] Carroll S., Tune to Win, Aero Publishers Inc, Fallbrook, 1978.
- [2] Berljavac P., Završni rad: Analiza ovjesa bolida Formule Student u programskom paketu Adams Car, FSB, Zagreb, 2019.
- [3] Lulić, Z.; Ormuž, K.; Šagi, G. – Motorna vozila, podloge uz predavanja, FSB, Zagreb, 2021.
- [4] Dogančić B. Diplomski rad: Računalna dinamika deformabilnih tijela, FSB, Zagreb, 2015.
- [5] Terze, Z., Eiber, A.: Introduction to Dynamics of Multibody Systems, interna e-skripta za kolegij “Dinamika konstrukcijskih sustava”- dio objavljen u Dynamics, In: Mechanics, e-book, Institute B of Mechanics, University of Stuttgart, pp. 190-300, (EU classification CZ/98/1/82500/PI/i.1.1.b/FPI), 2001.
- [6] Kekez M., Diplomski rad: Razvoj ovjesa bolida Formule Student, FSB, Zagreb, 2016.