

# Analiza naprezanja hibridnog okvira bicikla

---

Vodolšak, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:707571>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-16**

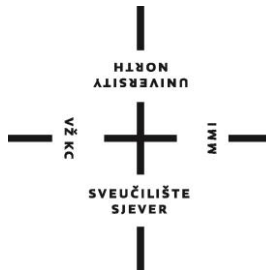


Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



DIPLOMSKI RAD br. 087/STR/2023

**ANALIZA NAPREZANJA HIBRIDNOG**  
**OKVIRA BICIKLA**

Nikola Vodolšak

Varaždin, srpanj 2023.



**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**  
**Studij strojarstva**



DIPLOMSKI RAD br. 087/STR/2023

**ANALIZA NAPREZANJA HIBRIDNOG**  
**OKVIRA BICIKLA**

Student:

Nikola Vodolšak,

0069084434

Mentor:

Doc. dr. sc. Jasna

Leder Horina, dipl. ing. stroj

Varaždin, srpanj 2023.

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Strojarstvo

STUDIJ Sveučilišni diplomski studij strojarstva

PRISTUPNIK Nikola Vodolšak

MATIČNI BROJ 0069084434

DATUM 6.7.2023.

KOLEGIJ Numeričko modeliranje

NASLOV RADA Analiza naprezanja hibridnog okvira bicikla

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Stress analysis of hybrid bicycle frame

MENTOR dr.sc. JASNA LEDER HORINA

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc.dr.sc. Matija Bušić, predsjednik povjerenstva
2. doc.dr.sc. Zlatko Botak, član povjerenstva
3. doc.dr.sc. Jasna Leder Horina, član povjerenstva
4. doc.dr.sc. Tomislav Veliki, član povjerenstva
- 5.

## Zadatak diplomskog rada

BROJ 087/STR/2023

OPIS

U diplomskom radu je potrebno napraviti analizu naprezanja uz pomoć softvera za metodu konačnih elementa za hibridni okvir bicikla. Konstrukcija hibridnog okvira bicikla proizlazi iz postojećih okvira bicikala, ali uz nadogradnju pojedinih dijelova okvira bicikla dobiva se novi okvir te se stoga naziva hibridni okvir. Kod analize naprezanja promatrat će se različiti poprečni presjeci okvira bicikla koji su opterećeni stvarnim eksploatacijskim uvjetima tokom vožnje postavljajući ih kao rubne uvjete analize. Uz analizu različitih poprečnih presjeka napraviti će se analiza tri različite vrste materijala kako utječu na naprezanja i odabir poprečnog presjeka. U radu je potrebno koristiti stručnu literaturu iz područja rada te navesti korišteno.

ZADATAK URUČEN

6.7.2023.



Jasna Leder Horina



Sveučilište  
Sjever



### IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Nikola Vodolšak (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/~~\_\_\_\_\_~~/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Analiza naprezanja hibridnog okvira bicikla (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

Nikola Vodolšak

(vlastoručni potpis)

Sukladno čl. 83. Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Sukladno čl. 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje znanstvena i umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.

## **Predgovor**

*Ovim radom, htio bih se na početku beskrajno zahvaliti svojim roditeljima koji su me tijekom cijelog mog školovanja bodrili i pomagali mi u svakom pogledu. Od srca sam im zahvalan na svoj pruženoj potpori i savjetima. Isto tako veliko hvala mojim bakama koje su uvijek imale vjere u mene i u Boga za savladavanje svih prepreka na koje sam nailazio tijekom studiranja.*

*Posebno bih se zahvalio svojoj curi Anamariji za šest prelijepih godina zajedno kroz koje me je u svakoj situaciji pokušala shvatiti i pomoći mi koliko je to bilo moguće.*

*Isto tako puno dugujem dobrim kolegama, prijateljima, profesorima i asistentima koji su uvijek bili na raspolaganju za bilo kakve nedoumice i pitanja.*

*Za kraj želio bih reći kako mi je bila izrazita čast surađivati s mentoricom doc. dr. sc. Jasnou Leder Horinou, mag. ing. mech. koja mi je uvijek rado uskočila u pomoć s kvalitetnim savjetima, idejama i odgovorima na pitanja tijekom pisanja ovog rada. Puno hvala na svemu!*

## Sažetak

Ovaj diplomski rad koncipiran je tako da se je konstruirala vlastita konstrukcija hibridnog okvira bicikla s osnovnim dimenzijama baziranim na opsežnom istraživanju izvora. Na samom početku objašnjene su glavne razlike između bicikala, te su pobrojane glavne vrste okvira bicikla danas u uporabi. Vlastitim dizajnom pojedinih oblika cijevi okvira, došlo se do dva finalna modela koja se geometrijom temelje na osnovnom štapnom modelu/konceptu. U središnjem dijelu razmatrale su se analize konačnim elementima s obzirom na tri najčešća materijala korištena pri izradi bicikala. Slučajevi opterećenja u tim analizama izvedeni su tako da se čim više pokušaju približiti stvarnim eksploatacijskim uvjetima okvira bicikla tijekom vožnje. Dobivenim rezultatima odabran je najadekvatniji materijal koji se je zatim primijenio na numeričke analize vlastita dva dizajna okvira, pod već spomenutim opterećenjima. Na kraju je odabran i objašnjen superiorniji okvir hibridnog bicikla preko rezultata numeričkih analiza.

**Ključne riječi:** bicikl, okvir, hibridni okvir, geometrija, model, konstruiranje, aluminij, titan, čelik, poprečni presjek, FEA analiza, opterećenja, konačni elementi, mreža, naprezanje, produljenje, pomaci



## Summary

This master thesis is based on idea of constructing a new type of hybrid bicycle frame with basic dimensions acknowledged from an extensive research of many sources. At the very beginning, the main differences between bicycles are explained. After that, some of the main types of bicycle frames in use today are listed. With perception of general geometry of concept model, two new bicycle frames were constructed. There are small differences between their design but the main change are shapes and cross sections of tubes. In the central part, few finite element analysis were conducted with usage of the three most common materials used in the bicycles manufacturing. The load cases in these analysis were performed to simulate actual operating conditions of the bicycle frame during riding. Based on the obtained results, the most adequate material was selected and then was applied to the numerical analysis of two frame designs, under the certain load cases. Finally, a superior hybrid bike frame was selected and explained with brief conclusion based on FEA analysis.

**Keywords:** bicycle, frame, hybrid frame, geometry, model, construction, aluminum, titanium, steel, cross section, FEA analysis, loads, finite elements, mesh, stress, strain, deformation

## Popis korištenih kratica

<b>BB</b>	<i>Bottom Bracket</i> – mjesto/otvor uležištenja pogona
<b>BB drop</b>	<i>Bottom Bracket drop</i> – visinsko sniženje otvora uležištenja pogona
<b>MTB</b>	<i>Mountain bike</i> – brdski bicikl
<b>CX</b>	<i>Cyclo Cross</i>
<b>BMX</b>	<i>Bicycle Moto Cross</i>
<b>Al 6061-T6</b>	Vrsta aluminijske legure
<b>AISI 4130</b>	Vrsta čelika
<b>Ti-3Al-2,5V</b>	Vrsta titanske legure
<b>TIG</b>	<i>Tungsten Inert Gas</i> – zavarivanje volframovom elektrodom u zaštiti inertnim plinom
<b>CAD</b>	<i>Computer Aided Design</i> – računalno potpomognuti dizajn
<b>VHybridC</b>	Konceptualni model okvira
<b>VHybrid1</b>	Prvi konstruirani model okvira za eksploataciju
<b>VHybrid2</b>	Drugi konstruirani model okvira za eksploataciju
<b>FEA</b>	<i>Finite Element Analysis</i> – analiza konačnim elementima
<b>STEP</b>	Vrsta datoteke dobivena CAD modeliranjem

## Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	$\text{mm}^2$	površina poprečnog presjeka
$R$	mm	radijus većeg kruga
$r$	mm	radijus manjeg kruga
$\pi$	-	konstanta
$V$	$\text{mm}^3$	volumen cijevi
$l$	mm	efektivna duljina cijevi
$m$	kg	masa cijevi
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	gustoća materijala
$\mathbf{k}$	-	lokalna matrica krutosti
$\mathbf{K}$	-	globalna matrica krutosti
$\mathbf{B}$	-	matrica funkcija oblika za deformacije
$\mathbf{B}^T$	-	transponirana matrica funkcija oblika za deformacije
$\mathbf{D}$	-	matrica elastičnosti
$V_E$	$\text{mm}^3$	volumen elementa
$\mathbf{U}$	-	vektor ukupnih/svih pomaka u elementu
$h$	m	visina
$g$	$\text{m/s}^2$	gravitacijska konstanta ubrzanja
$G_V$	N	težina kojom vozač djeluje na bicikl
$v$	m/s	udarna brzina
$u$	m/s	inicijalna/početna brzina
$F_{ap}$	N	sila u amortizerima pri padu
$d$	m	maksimalni hod amortizera
$\sigma_{max}$	MPa	maksimalno naprezanje
$\varepsilon_{max}$	mm/mm	maksimalno produljenje/deformacija
$u_{max}$	mm	maksimalni pomaci
$\sigma_{dop}$	MPa	dopušteno naprezanje
$S$	-	faktor sigurnosti
$E$	GPa	Youngov modul elastičnosti
$\sigma_{0,2}$	MPa	granica razvlačenja

$\sigma_M$	MPa	vlačna čvrstoća
$\nu$	-	Poissonov koeficijent

# SADRŽAJ

Predgovor.....	I
Sažetak.....	II
Summary.....	III
Popis korištenih kratica .....	IV
Popis oznaka .....	V
1. Uvod .....	1
1.1. Zdravlje .....	1
1.2. Natjecanja i biciklističke zajednice.....	1
1.3. Briga za okoliš .....	2
1.4. Dijelovi bicikla.....	2
1.5. Okvir bicikla kao fokus.....	3
2. Vrste okvira bicikla i odabir .....	5
2.1. Okvir oblika dijamanta (engl. <i>diamond shape</i> ).....	9
2.2. Vrste okvira oblika dijamanta .....	11
2.2.1. Brdski bicikli .....	11
2.2.2. Cestovni bicikli.....	12
2.2.3. <i>Gravel</i> bicikli .....	13
2.2.4. <i>Touring</i> bicikli .....	13
2.2.5. Jednobrzinski bicikli (engl. <i>Single-speed bicycles</i> ).....	14
2.2.6. Teretni bicikli (engl. <i>Cargo bicycle</i> ) .....	15
2.2.7. Hibridni bicikli .....	15
2.2.8. <i>Cyclo-cross</i> (CX) bicikli.....	16
2.2.9. <i>Bicycle moto cross</i> (BMX) bicikli .....	17
2.3. Materijali, dimenzije i geometrija okvira.....	18
2.3.1. Materijali okvira bicikala.....	18
2.3.2. Dimenzije i geometrija hibridnog okvira.....	23
2.3.3. Poprečni presjeci cijevi i ostali elementi okvira .....	26
2.3.4. Spojevi kod bicikala .....	30
3. Konstruiranje i proračun modela bicikala .....	32
3.1. Prvi model okvira bicikla - VHybridC.....	32
3.2. Drugi model okvira bicikla - VHybrid1 .....	34
3.3. Treći model okvira - VHybrid2 .....	38
4. FEA analiza u Ansysu .....	44

4.1. Ansys Workbench 2023. R1 Student .....	44
4.1.1. Kartica - Inženjerski podaci (engl. <i>Engineering data</i> ) .....	45
4.1.2. Kartica - Geometrija (engl. <i>Geometry</i> ).....	45
4.1.3. Kartica - Model.....	46
4.1.4. Kartice - Postavljanja, Rješenja i Rezultati (engl. <i>Setup, solution, results</i> ) ...	49
5. Rezultati i diskusija .....	54
5.1. FEA simulacije VHybridC okvira.....	54
5.1.1. Prikaz rezultata za slučaj statičkog sjedenja VHybridC okvira.....	55
5.1.2. Utjecaj materijala na okvir bicikla.....	61
5.2. FEA simulacije VHybrid1 i VHybrid2 okvira.....	63
5.2.1. Konvergencija i rezultati VHybrid1 i VHybrid2 .....	63
5.2.2. Usporedba VHybrid1 i VHybrid2 okvira .....	66
6. Zaključak .....	69
7. Literatura .....	70
Popis slika.....	73
Popis tablica.....	76
Prilozi.....	77

# 1. Uvod

Biciklizam je danas jedan od najpopularnijih vrsta transporta u svijetu. Iako ga se često poistovjećuje s profesionalnim sportom on privlači i različite hobiste, te rekreativce koji vide bicikliranje kao zdravu naviku i korisnu tjelovježbu. Općenito se pod pojmom biciklizam podrazumijeva korištenje konstrukcije, najčešće na dva kotača, koja omogućuje kretanje u prostoru isključivo uz pomoć ljudske snage, to jest, radom mišića.

Svakim danom sve više bicikala dolazi na ceste, pa stoga postoji podatak koji govori da se u svijetu svake godine proizvede više od 100 milijuna bicikla [1], bilo to na industrijski ili amaterski način.

Danas rijetko koja osoba nije u svome životu pokušala svladati biciklističke vještine koje uključuju održavanje ravnoteže i upravljanje biciklom pri vožnji određenom brzinom. Njihovim svladavanjem omogućuje se spoznaja ljepote biciklizma, te se vozačima otvaraju nova vrata za različite pothvate koji pridonose i za dobrobit čovječanstva i za samu planetu.

## 1.1. Zdravlje

Često se na biciklizam gleda kao na izuzetno zdravu tjelovježbu koja stimulira cijelo tijelo, a ponajviše nožne mišiće. Vježbe izdržljivosti do kojih dolazi tijekom vožnje bicikla imaju izuzetno pozitivan utjecaj na čovjekovo zdravlje, a prema medicini, njihovim prakticiranjem smanjuje se rizik od razvoja kardiovaskularnih bolesti, dijabetesa tipa 2 i određene vrste karcinoma. Bicikliranje pozitivno utječe na razinu kolesterola, krvni tlak i tjelesnu građu. Osim na fizičku kondiciju djeluje i na poboljšanje psihološkog stanja, te smanjenje stresa [2].

Kako bi sve od navedenog poprimilo efekt, potrebno je kvalitetno osmisлити dizajn bicikla i paziti na ergonomičnost konstrukcije. Svaki biciklist ponajprije se mora ugodno osjećati u vožnji biciklom.

## 1.2. Natjecanja i biciklističke zajednice

Biciklizam kao sport unosi i natjecateljski duh u samu vožnju, pa se stoga već od prošlog stoljeća održavaju različite utrke i natjecanja po Olimpijskim igrama. Neke od najpoznatijih biciklističkih utrka su Tour de France, Giro d'Italia, Vuelta Espana, Amstel Gold Race i ostale.

Biciklizam se upravo radi takvih događanja razvio do stupnja na kojem je danas, a razvojem tehnologije dolazi i nova revolucija u biciklizmu u obliku električnih bicikala. Iako popularni, električni bicikli još uvijek teško dostižu interes ljudi po pitanju pristupačnosti i raznolikosti koje nude klasični bicikli.

Svakako je bitno za napomenuti da se na razvoju može uvelike zahvaliti cjelokupnoj biciklističkoj zajednici koja se ne sastoji samo od profesionalaca, već i od raznih amaterskih proizvođača. Današnjom opremom i eksperimentalnim pristupom sve se više postižu razna poboljšanja po pitanju konstrukcije, materijala, načina izrade, te ostalih utjecajnih parametara. Testiranja, uz analize, su ključna ako se želi proizvesti kvalitetan i superioran primjerak bicikla koji će se koristiti na različitim natjecanjima gdje aerodinamika, čvrstoća i masa igraju ključnu ulogu.

### **1.3. Briga za okoliš**

Mnoštvo biciklista koristi ovakav transport upravo zbog reduciranja emisija CO<sub>2</sub> ispušnih plinova. Vožnja bicikla 25 minuta dnevno umjesto vožnje automobilom smanjuje emisiju ugljičnog dioksida za 165 kg godišnje [1]. Osim smanjenja zagađenja, bicikliranjem je moguće financijski uštedjeti reduciranjem kupnje naftnih derivata, te se isto tako izbjegavaju kaotične prometne gužve u gradu.

Za brigu o okolišu bitno je i u samom procesu proizvodnje paziti kojim materijalima i postupcima proizvodimo određene dijelove bicikla. Bitno je prepoznati zadovoljavajući materijal, te razraditi postupak u proizvodnji kako ne bi došlo do velikih količina škarta. Upravo do tih saznanja došlo se praktičnim iskustvom kroz mnogo godina.

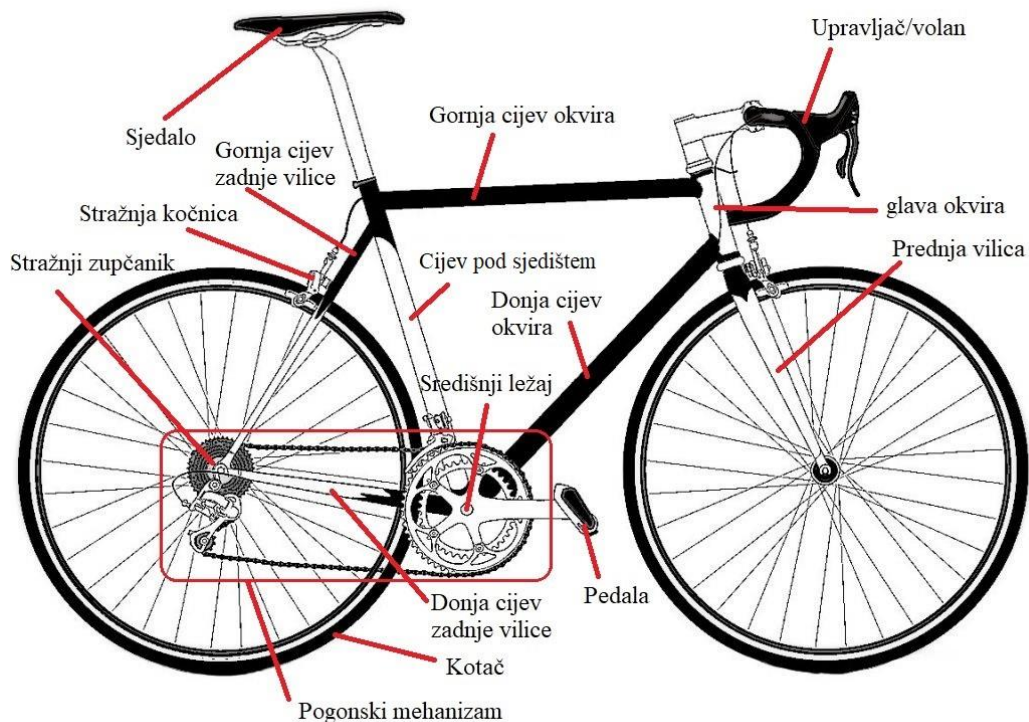
### **1.4. Dijelovi bicikla**

Svaki model bicikla posjeduje svoje značajke koje ga svrstavaju u određenu kategoriju. Iako naizgled različiti, svi bicikli imaju relativno slične osnovne konstrukcijske dijelove na kojima počiva sami koncept i princip rada. Kako se ovim radom fokus stavlja na samu konstrukciju bicikla bitno je pravilno podijeliti i protumačiti osnovne dijelove.

Glavna podjela dijelova prikazana je na slici 1.1. Na slici se jasno može vidjeti da se klasični bicikli sastoje od dva kotača, koji u paru mogu biti različitih dimenzija. Kotači se razlikuju ovisno od tipova bicikala i prema uvjetima za koje su namijenjeni. Središnji i najvažniji dio



predstavlja upravo okvir bicikla koji je i tema ovog diplomskog rada. On se sastoji od nekoliko cijevi međusobno povezanih u rešetkastu konstrukciju. Detaljnija razrada okvira bit će predstavljena u daljnjem dijelu rada. Svaki bicikl mora imati pogonski mehanizam koji je izveden preko zupčanika i lanca. Isto tako se vrlo često u taj mehanizam implementira sustav za reguliranje omjera prijenosa preko različitih veličina lančanika kako bi se olakšalo pedaliranje pri uzbrdicama. Slika 1.1 nadalje prikazuje upravljač za upravljanje biciklom pri vožnji, te sjedalo za vozača. Prednji kotač je s okvirom povezan preko vilice.



Slika 1.1 Osnovni dijelovi bicikla [55]

## 1.5. Okvir bicikla kao fokus

Ukratko se može reći kako se djelomični dijamantni oblik okvira bicikla prvi puta spominje 1884. i vezan je za model zvan „Humbert safety“ dizajnera Thomasa Humberta, a prikazan je na slici 1.2 [3].



Slika 1.2 "Humbert safety" bicikl dizajnera Thomasa Humberta, 1884. godine [3]

Kako ni prvi dizajn nije bio perfektni primjer *diamond shape* oblika tako će se i u ovome radu razmotriti slučajevi sa zavijenim cijevima okvira bicikla gdje su ispunjeni osnovni zahtjevi na takav okvir.

Spomenuto je da okvir bicikla predodređuje svaki bicikl za njegovu namjenu, pa se upravo s tom činjenicom pristupilo eksperimentalnom dizajnu više vlastitih modela, te provedbi određenih simulacija u ANSYS 2023. R1 programu. Detaljno uspoređujući rezultate numeričke analize, došlo se do određenih zaključka s mehaničke strane. Provedene analize bazirane su prema postavkama raznih znanstvenih članaka, prema literaturi i vlastitoj intuiciji.

Primarni cilj ovog rada je pokazati optimalni dizajn između više vlastitih modela s aspekta mehaničkih svojstava materijala uz pojašnjenja određenih prednosti i nedostataka. Također se pokušao demonstrirati način izvođenja kompleksnih Ansys analiza uz provedbe numeričkih simulacija, snagom računala.

## 2. Vrste okvira bicikla i odabir

Kroz povijest bicikli su se drastično mijenjali po svome dizajnu. Nije oduvijek postojao samo spomenuti dijamanтни oblik okvira, već su prvi bicikli imali sasvim drugačiji koncept od današnjih. Iako su postojali kotači, oni su vrlo često bili različitih dimenzija tako da je prednji bio puno veći od stražnjeg. Materijal kotača se isto tako razlikovao, pa je u počecima bila ne rijetka pojava drvenih kotača bicikala. Na slici 2.1 je vidljiv jedan *high-wheeler* model kojeg se smatra pretečom modernih bicikala. Osim što se ističe njegov ogromni kotač promjera 1,4 m, bitno je obratiti pozornost i na njegov okvir. Takav okvir sastojao se samo od dvije cijevi od kojih je jedna zaobljena, te je ona spajala stražnju osovinu kotača i prednju glavu na koju se montirala upravljačka cijev prednje vilice. Pogon se nalazio na prednjem kotaču, a za pokretanje je bio zaslužan rad biciklista koji se preko momenta prenosio s pedala na osovinu.

Ovaj cjelokupni bicikl nosio je naziv “*Duplex Excelsior*“, a proizveden je od proizvođača *Bayliss & Thomasa*, 1879. godine [3].



Slika 2.1 *High-wheeler* model bicikla [3]

Kako su bicikli postojali sve popularniji dolazilo je i do njihovog spontanog unapređivanja. Najprije se u razvoju krenulo k ujednačavanju promjera stražnjih i prednjih guma, pa se nastojalo pronaći najbolje rješenje za prijenos snage i zatim se počelo najviše baviti optimiranjem okvira bicikla.

Stoga se danas upravo prema okviru raspoznaju pojedini bicikli, te se svrstavaju u određenu kategoriju namjene. Biciklizam se kroz prošlo stoljeće toliko proširio da danas postoji na desetke vrsta različitih tipova bicikla. Svaki od tih vrsta ima svoje prednosti i mane u

određenom aspektu vožnje, na različitim terenima i u različitim uvjetima. U nastavku će ukratko biti predstavljeni najpopularniji tipovi okvira različitih bicikla s kratkim opisima i grafičkim prikazom na kraju. Dijamantni okvir bit će zasebno razmatran kao primarna skupina okvira.

#### 1. Prolazni okvir (engl. *Step-through/Open/Drop*)

- Ova vrsta okvira bicikla ima posebnost u tome što mu je gornja cijev pozicionirana izuzetno nisko ili je profilirana u određenom obliku koji ne ometa vozača pri sjedanju na bicikl i prebacivanju noge s jedne na drugu stranu. Prikaz ove značajke dobro se vidi na slici 2.2 a).
- Koriste se vrlo često kao dostavni bicikli ili pri putovanjima gdje se često silazi s bicikla.
- Razvijeni su primarno kao okviri za ženski spol zbog omogućavanja da pri sjedenju, suknje vise na normalan način, te su namijenjeni i za starije osobe s ograničenom pokretljivošću
- Najveći nedostatak im je što uslijed jednostavnije konstrukcije, cijevi moraju biti većeg poprečnog presjeka čime se povećava ukupna težina i cijena.
- Nepažnja pri strukturnom dizajnu može dovesti do pretjeranog savijanja, što rezultira nižom učinkovitošću pedaliranja i smanjenim vijekom trajanja okvira.
- Često je potrebno dodavati dodatne elemente da bi se održala strukturna stabilnost konstrukcije i spriječile neželjene pretjerane deformacije [4].

#### 2. Konzolni okvir (engl. *Cantilever*)

- Na konzolnom okviru bicikla prikazanog na slici 2.2 b), gornje cijevi zadnje vilice nastavljaju se dalje od cijevi ispod sjedišta i zakrivljuju prema dolje kako bi se spojile s donjom cijevi.
- Konzolni okviri popularni su na kruzer biciklima, *lowrider* biciklima i biciklima za akrobaciju na stražnjem kotaču.
- Uglavnom jedine ravne cijevi na konzolnim okvirima su cijev pod sjedištem i cijev glave okvira [4].

#### 3. Leđni ležeći okvir (engl. *Recumbent*)

- Ovakav okvir bicikla stavlja biciklista u opušten ležeći položaj.

- Ergonomični su, te se kod njih samim položajem tijela vozača djeluje na aerodinamičnost bicikla.
- Postoji širok raspon konfiguracija ovih okvira u izvedbama dugih i kratkih međuosovinskih cijevi, različitih profila cijevi nestandardnih duljina, pogona na stražnje ili prednje kotače nogama ili rukama [5].

Na slici 2.2 c) može se vidjeti primjer ovakvog bicikla s velikom, glavnom cijevi pod sjedištem i prednjim pogonom.

#### 4. Trbušni ležeći okvir (engl. *Prone*)

- Slično kao i leđni okvir, ovaj tip stavlja biciklista u ležeći položaj, ali potrbuške.
- Konstrukcija okvira izvedena je tako da cijevi budu zaobljene na mjestima gdje je bitna ergonomija udobnosti sjedišta, dok se pedaliranje ostvaruje preko pogona koje je najčešće smješten na zadnjoj osovini okvira [6].
- Na slici 2.2 d) izvedena je konstrukcija ležećeg okvira s ravnim cijevima što omogućava lakšu izradu.
- Ovakav okvir vrlo je opasan zbog velike izloženosti biciklista, pa je stoga bitno paziti na mehanička svojstva materijala od kojih je sastavljen, te na cjelokupnu čvrstoću konstrukcije.
- Postoje izvedbe gdje geometrija bicikla kombinira zakrivljene i ravne cijevi i izvedbe gdje su korištene samo jedne od njih.

#### 5. Iskrižani okvir (engl. *Cross/Girder*)

- Iskrižani okvir se u osnovi sastoji od dva križna člana, koji tvore križ. Vertikalni element je cijev ispod sjedišta, a okomito na njega je glavna cijev koja čini samu "kralježnicu" bicikla. Ta cijev se može produžiti kako bi formirala stražnje nosače baš kao što je to prikazano na slici 2.2 e). Spomenuta okomitost nije uvijek nužna.
- Ovakva vrsta okvira bicikla manje je geometrijski stabilna nego uobičajeni dijamantni okvir, tako da svoju čvrstoću dobiva korištenjem upravo ovakvih iskrižanih cijevi i spojeva čime se narušava estetika bicikla
- Ovakvi okviri danas se mogu rijetko vidjeti, a najpopularniji su bili u Europi tijekom druge polovice 20. stoljeća [7, 8].

#### 6. Rešetkasti okvir (engl. *Truss*)

- Okvir sličan iskrižanom okviru samo što se koriste dodatne cijevi za formiranje rešetkaste konstrukcije [9].
- Ne standardni oblik sjedala kao na modelu sa slike 2.2 f).
- Sve cijevi su uglavnom izvedene kao ravne s manjim poprečnim presjekom.

#### 7. Monokok jednodijelni okvir (engl. *Monocoque*)

- *Monocoque* okvir sastoji se samo od šuplje ljuske okvira.
- Bez unutarnje je strukture i najčešće je napravljen iz jednog dijela.
- Kao što se vrlo dobro vidi na slici 2.2 g) često se koristi kod trkaćih bicikala zbog aerodinamike i male mase.

#### 8. Preklopni okvir (engl. *Folding*)

- Ovakva vrsta okvira omogućuje vozaču jednostavno sklapanje bicikla pri ulasku u zgrade, javni prijevoz, te pri samom skladištenju [10].
- Cijevni elementi su uglavnom manjeg poprečnog presjeka s najvećim poprečnim presjekom gornje/glavne cijevi, a cjelokupna konstrukcija je kompaktno izvedena. Prikaz jednog takvog dizajna je na slici 2.2 h).
- Često se okviri proizvode manjih dimenzija, a podešavanje za vozačevu visinu vrši se preko mogućnosti produljivanja cijevi sjedala i upravljača.
- Cjenovno su skuplji od nesklopivih okvira bicikala [10].

#### 9. *Penny-farthing/High-wheel* okvir

- Jedni od prvih vrsta okvira koji su konstruirani.
- Otežano sjedanje na bicikl zbog velikog prednjeg kotača.
- Zbog nestabilnosti često je dolazilo do prevrtanja i puknuća cijevi okvira tih bicikala.
- Okvir je jedna cijev koja prati vanjski opseg prednjeg kotača, a zatim se nastavlja do osovine stražnjeg kotača. Izdanak za lakše sjedanje nalazi se iznad stražnjeg kotača [11].
- Modernija izvedba ovog povijesnog bicikla prikazana je na slici 2.2 i)

Na slici 2.2 prikazani su pojedini bicikli s nabrojanim vrstama okvira. Može se primijetiti kako svaki ima jedinstveni dizajn koji mu daje određene prednosti, ali i nedostatke nad drugima. Uglavnom se bicikli na slici 2.2 pod c), d), g) proizvode za određene kupce i po narudžbi. Sastavni elementi na tim modelima okvira mogu uvelike varirati ovisno o konstruktoru, te određenim namjenama bicikala. Tipovi bicikala na slici 2.2 pod e), f), i) su glavnom povijesne vrste, no različiti entuzijasti ih još uvijek izrađuju. Samim pogledom na njihove slike mogu se uočiti različiti konstrukcijski i estetski problemi. Preostala tri tipa bicikla a), b) i h) danas su uz dijamantni okvir najpopularniji u proizvodnji širom svijeta.



Slika 2.2 Tipovi bicikla s okvirom: a) prolazni okvir, b) konzolni okvir, c) leđni ležeći okvir, d) trbušni ležeći okvir, e) iskrižani okvir, f) rešetkasti okvir, g) monokok okvir, h) preklopni okvir, i) high wheel okvir [56,57,58,59,60,61,62,63,64]

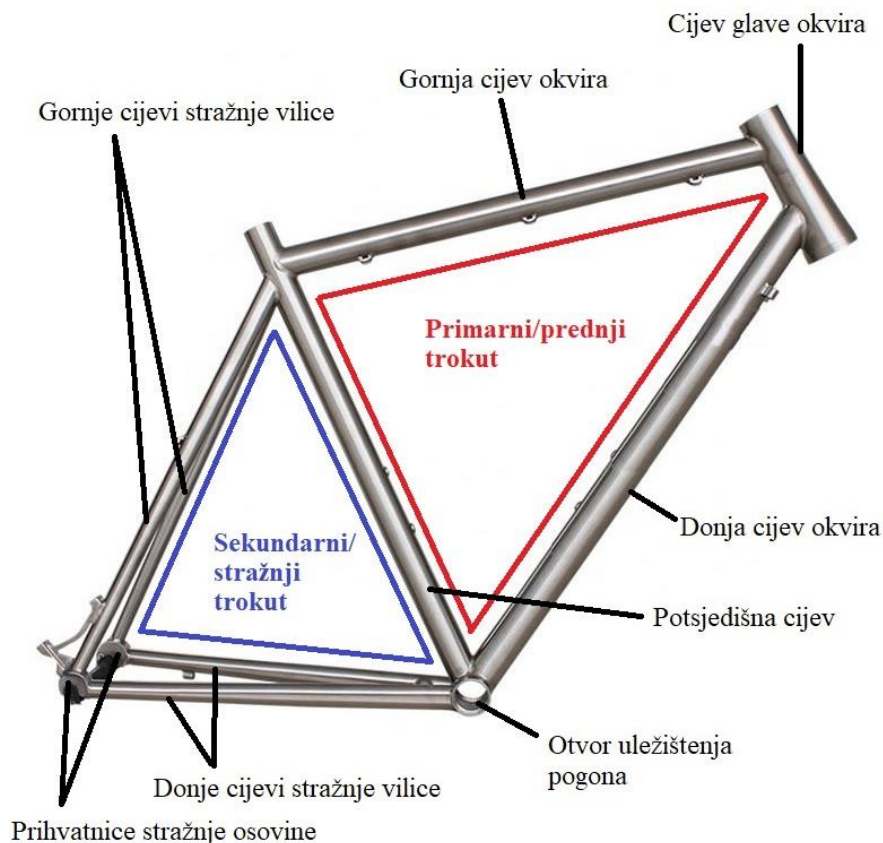
## 2.1. Okvir oblika dijamanta (engl. *diamond shape*)

Nakon različitih vrsta u konačnici je zaživio već spomenuti *diamond shape* tip okvira koji će se nadalje u radu razmatrati u svojim različitim varijacijama. Na slici 2.3 upravo je prikazan

idealni oblik takvog okvira gdje se jasno vidi da je dobio ime po tome što geometrijom podsjeća na dijamant u pogledu iz profila.

Promatrajući iz profila vide se dva opisana trokuta koja nose naziv glavni i sporedni trokut dijamantnog okvira. Prednji trokut zapravo nema oblik trokuta zbog toga što postoji razmak kod spajanja na cijev glave okvira [12]. Ova značajka konstruirana je na taj način isključivo radi poboljšanja mehaničkih svojstava, veće izdržljivosti, te jednostavnije izrade. Radi takvih svojstava moguće je primijeniti cijevi manjeg poprečnog presjeka čime se smanjuje ukupna masa bicikla.

Slika 2.3 prikazuje elemente povezane u glavni “trokut“ okvira bicikla, a oni su: gornja cijev okvira, donja cijev okvira, cijev pod sjedištem i cijev glave okvira. Sporedni, stražnji trokut čine ista cijev ispod sjedišta, gornje cijevi stražnje vilice i donje cijevi stražnje vilice.



Slika 2.3 Glavni elementi okvira dijamantnog oblika [12]

Definirano je da svaki dijamantni oblik okvira bicikla treba ispunjavati sljedeće zahtjeve:

- gornja cijev okvira mora povezivati cijev glave okvira s cijevi ispod sjedišta



- donja cijev okvira mora povezivati cijev glave okvira i kućište središnjeg pogonskog uležištenja
- donje cijevi stražnje vilice trebaju povezivati otvor uležištenja pogona (engl. *bottom bracket* - BB) i prihvatnice stražnje osovine kotača
- gornje cijevi zadnje vilice moraju spajati određeno područje cijevi ispod sjedišta s prihvatnicama stražnje osovine kotača [3]

## 2.2. Vrste okvira oblika dijamanta

Dijamantni okviri koji ispunjavaju osnovnu definiciju dijamantnog oblika mogu biti izvedeni na različite načine. Upravo prema tome danas i dijelimo bicikle koji prema određenoj konstrukciji pokazuju svoje prednosti nad drugima. Nadalje su kratko navedene osnovne vrste *diamond shape* bicikala koji su najzastupljeniji na tržištu. Njihove cijene mogu drastično varirati ovisno o materijalima i kvaliteti konstrukcijske izrade. Ovaj rad baziran je na konstrukcijama hibridnih okvira čiji će dizajn biti objašnjen uz prikaz rezultata provedenih analiza.

### 2.2.1. Brdski bicikli

Imaju nekoliko naziva od kojih je najčešći brdski bicikli (engl. *mountain bikes* – MTB). Ovi bicikli su dizajnirani za ne cestovni (engl. *off-road*) biciklizam, imaju čvrste okvire i kotače, gume širokih gazišta i poprečne suspenzije koje se spajaju na stražnju vilicu za ublažavanje udaraca uslijed neravnog terena, te iznenadnih skokova. Materijali okvira često su kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima.

Okvir je izuzetno izdržljiv, te se uglavnom sastoji od dva odvojiva dijela koja su rijetko izrađena od ravnih cijevi okruglog poprečnog presjeka. Vrlo često se kod ovakvih bicikala eksperimentira sa samim dizajnom tj. konstrukcijom. Prikaz tipičnog okvira ovakvih bicikala prikazan je na slici 2.4.



*Slika 2.4 Brdski (MTB) okvir bicikla iz dva dijela [65]*

### **2.2.2. Cestovni bicikli**

Inače poznati kao cestovni (engl. *road*) trkaći bicikli koji imaju lagane okvire s minimalnim dodacima, spuštenu upravljajuću ruku kako bi se omogućila aerodinamičnost položaja u vožnji, uske visokotlačne gume za minimalni otpor kotrljanja i više lančanika za stupnjeve prijenosa snage.

Ovakvi okviri često su napravljeni od aluminija zbog mase, te su izvedeni bez suspenzije (Slika 2.5). Cijevi su ravne s okruglim poprečnim presjekom, često prijelaznog poprečnog presjeka. Prednje vilice su im krute.



*Slika 2.5 Cestovni/trkaći okvir bicikla [66]*

### 2.2.3. Gravel bicikli

Bicikli slični cestovnim, ali se kod njih okvir izrađuje nešto kraćih dimenzija gornje cijevi tako da vozač ne mora biti toliko spuštenog položaja u vožnji. Mogu se voziti na neravnim podlogama, ali primarno služe za dulje vožnje po cestovnim putevima bez fokusa na brzinu i aerodinamičnost. Geometrija *gravel* bicikla je takva da se težina bolje raspoređuje i to tako da se većim udjelom težine djeluje na stražnjem kotaču u usporedbi s cestovnim biciklom [13].

Okviri su primarno izrađeni od legura čelika i legura aluminija, no postoje i skupe izvedbe s titan legurom. Poprečni presjek cijevi je uglavnom okrugao. Ovi bicikli daju izuzetnu stabilnost na različitim terenima zbog veće međuosovinske udaljenosti koja omogućuje ugradnju većih kotača [14,15]. Prikaz jednog *gravel* okvira bicikla je na slici 2.6.



Slika 2.6 Prikaz *gravel* okvira [67]

### 2.2.4. Touring bicikli

Ova vrsta bicikala namijenjena je za dugačke rute i putovanja, te za rekreativne svrhe. Stoga je dizajn samog okvira bicikla takav da je međuosovinski razmak nešto veći kako bi se nesmetano mogli montirati različiti nosači stvari (Slika 2.7). Primarno se ovakvim biciklima želi postići udobnost pri vožnji, pa se stoga pazi pri odabiru materijala koji je često čelik ili titan. Tako je omogućena dobra fleksibilnost koja se u novije vrijeme, zbog zamora materijala, često smanjuje kako bi se postigla određena krutost samog bicikla. Cijevi okvira su sličnog poprečnog presjeka kao kod cestovnih bicikala, ali nešto veće debljine. Karakteristično je da su donje cijevi stražnje vilice nešto duže od ostalih vrsta bicikala upravo radi nesmetanog

pedaliranja i montiranja različitih tereta na bočne strane. Mogu, ali ne moraju imati suspenziju prednje vilice [16].



Slika 2.7 Touring okvir s velikim međuosovinskim razmakom [68]

### 2.2.5. Jednibrzinski bicikli (engl. *Single-speed bicycles*)

Glavna karakteristika ovih bicikala je da imaju samo jedan stupanj prijenosa tj. samo jednu brzinu. Često se koriste za gradsku vožnju, a manje za neravni teren zbog izrazitog napora koji je potreban za savladavanje uzbrdica. Jednostavni su za održavanje, a okvir im je vrlo sličan cestovnim biciklima, samo što se vozača ne stavlja u optimalni aerodinamični položaj. Jeftini su i jednostavni za proizvodnju, a ujedno dovoljno robusni za grubo rukovanje. Ovi bicikli jedni su od najboljih primjera dijamantnog okvira upravo radi ravnih cijevi i ispravno definirane geometrije po pravilima (Slika 2.8). Izrađuju se od aluminijsa, a prednje vilice su im krute [19, 20].



Slika 2.8 Prikaz jednibrzinskog okvira bicikla [67]

### 2.2.6. Teretni bicikli (engl. *Cargo bicycle*)

Tip dijamantnog okvira koji vrlo često ima potporne cijevi u svrhu dodatne čvrstoće i stabilnosti pri prijevozu tereta. Služe za teške radne uvijete i naglasak im je na ergonomičnosti biciklista pri vožnji. Postoje različite izvedbe, uglavnom s velikim međuosovinskim razmakom. Cijevi su izrađene od određenih vrsta čelika, a mogu biti ravne ili zakrivljene ovisno o načinu na koji se određena vrsta tereta prevozi. Cijela konstrukcija je robusna i bez dodatne suspenzije prikazana upravo na slici 2.9 [19, 22].



*Slika 2.9 Okvir ojačanog teretnog bicikla za transport [69]*

### 2.2.7. Hibridni bicikli

Hibridni bicikli kombiniraju karakteristike cestovnih, touring i brdskih bicikala, te su dizajnirani za razne rekreacijske, putničke i prijevozne svrhe. Dok su primarno namijenjeni za korištenje na cesti, također se mogu koristiti i na relativno glatkim neasfaltiranim stazama ili kolnim stazama. Oni su opće namijene, a karakterizira ih stabilnost, udobnost i jednostavnost za korištenje. Hibridni bicikli obično preuzimaju ravni upravljač i uspravan položaj sjedenja od brdskog bicikla kojeg mnogi biciklisti smatraju udobnim i praktičnim. Hibridi su manje težine, te imaju tanje kotače s glatkim gumama cestovnih bicikala što omogućuje veću brzinu i manje napore pri vožnji cestom. Hibridni bicikli često imaju predviđena mjesta za montiranje nosača i torbi za prijevoz stvari, slično kao touring bicikli. Cijevi okvira su često različitih oblika, te mogu biti nekonstantnog poprečnog presjeka. Ovi okviri znaju imati eksperimentalni dizajn

koji uglavnom ispunjava uvijete dijamantnog okvira (Slika 2.10). Prednje vilice izvode se na različite načine, te nisu egzaktno definirane [17,18,19].



*Slika 2.10 Prikaz hibridnog okvira koji posjeduje elemente drugih vrsta okvira [70]*

### **2.2.8. *Cyclo-cross* (CX) bicikli**

*Cyclo-cross* bicikli otprilike nalikuju trkaćim biciklima koji se koriste u cestovnim utrkama. Glavne razlike između njih su da CX imaju malo drugačiju geometriju okvira i veće razmake između vilica za mogućnost korištenja širih kotača. Vrlo često konstrukcija izbjegava potporne mostove između stražnjih vilica kao što to prikazuje slika 2.11. Obično je geometrija okvira nešto „opuštenija“ nego kod cestovnog bicikla, tj. nema tolike uspravnosti cijevi pod sjedištem, što omogućuje veću stabilnost na mekom tlu. Također, međuosovinski razmak može biti malo duži, što daje osjećaj stabilnosti i kontrole pri vožnji na neravnom terenu. Materijali okvira odabrani su s ciljem proizvodnje laganog, ali čvrstog, te pouzdanog okvira. Mala težina je cijenjena zbog lakoće nošenja bicikla tijekom trčanja u utrkama. Aluminijski okviri bili su popularni kod CX bicikala, ali danas je ipak najpopularniji kompozitni materijal i to s karbonskim vlaknima [22].



Slika 2.11 Cyclo Cross okvir bicikla [71]

### 2.2.9. *Bicycle moto cross (BMX) bicikli*

BMX bicikli dizajnirani su za vratolomije, trikove i utrke na zemljanim stazama. Vozač je u polusjedećem položaju upravo kako bi se osiguralo težište koje omogućuje lakše izvođenje spomenutih trikova. Jeftiniji, niskobudžetni bicikli obično su izrađeni od čelika, a bicikli za vratolomije većih zahtjeva uglavnom su od specijalnog čelika (*chromoly*), poput laganog čelika AISI 4130. BMX trkaći bicikli proizvedeni su iz aluminija ili karbonskih vlakana. Općenito ovi okviri su manjih dimenzija u usporedbi s drugim biciklima, pa određenu krutost postižu većom debljinom stijenki cijevi (Slika 2.12) [23].



Slika 2.12 Kompaktni BMX okvir bicikla za akrobacije i trikove [72]

## **2.3. Materijali, dimenzije i geometrija okvira**

Sukladno standardnoj kvalifikaciji bicikala, sljedeći korak u radu je odabir vrste bicikla za proračun. Kako je već objašnjeno, hibridni bicikli kombinacija su nekoliko osnovnih vrsta koja u konačnici čini svestranu i pouzdanu konstrukciju. Kako svaki okvir bicikla ima svoje prednosti i mane, bitno ih je istaknuti.

Popularnost hibrida danas je strahovito u usponu jer većina biciklista želi upravo raznolikost mogućnosti korištenja svojih bicikala. Takvim zahtjevima udovoljava upravo odabrani tip okvira koji se lako prilagođava uvjetima vožnje. Iako nemaju naglasak na aerodinamičnosti i brzini [24], treba znati da u konstrukciji ipak sadržavaju elemente cestovnih/trkaćih bicikala; poput iznimno male mase i ponekad krutih prednjih vilica. Za neravne terene postoji mogućnost montiranja širih guma koje postižu bolje prijanjanje s grubom površinom. Takva montaža omogućena je većim razmakom između prihvatnica prednjih i stražnjih vilica na koje nasjedaju osovine kotača. Za dulja putovanja izuzetno je bitno osjećati se ugodno pri vožnji, te imati sve potrepštine pri ruci. Stoga se razvojem hibrida krenulo u dodavanje različitih nosača i montažnih točaka na okvir kako bi vozač po potrebi mogao prilagoditi bicikl prema zahtjevima putovanja [24].

Kako dobre, postoje i one lošije strane hibridne konstrukcije. Najveća mana ovih okvira je loša suspenzija što automatski utječe na van cestovnu vožnju. Iako su relativno stabilni na neravnom terenu, udobnost im je u tim uvjetima nešto lošija. Višestupanjski lančani prijenos često uslijed vibracija i većih napreznja može dovesti do skupljih kvarova [24]. Ovakvi okviri nemaju puno drugih mana, no često se javljaju problemi kod ostalih elemenata koji generalno čine ovaj bicikl.

Uz sve navedeno, potrebno je prepoznati kada i na kojem terenu koristiti hibridne bicikle. Svaki okvir ima svoje granice izdržljivosti koje je potrebno pravovremeno spoznati kako ne bi došlo do ljudskih ozljeda ili pak do oštećenja bicikla. Upravo zato, proizvođači bicikala danas izrazito paze na odabir materijala pri izradi okvira bicikala.

### **2.3.1. Materijali okvira bicikala**

Svaki proizvod ima preferirane materijale od kojih se izrađuje, pa stoga i okvir bicikla kao takav zahtjeva određena mehanička svojstva materijala pri proizvodnji, te kasnije u eksploataciji. Povijesno gledano prvi bicikli bili su izrađivani od drveta, ali su se kroz godine razvijali, da bi u 21. stoljeću imali nekoliko glavnih materijala za okvire bicikala. Odabir



materijala važan je dio pri analizama jer upravo on odlučuje o čvrstoći okvira. Visoka tlačna i vlačna čvrstoća okvira jamči sigurnost vozača i povećava vijek trajanja okvira bicikla [25].

Okviri bicikala danas su uglavnom izrađeni od legura metala poput čelika, aluminijskih legura i titan legura ili od kompozita s kombiniranim strukturnim vlaknima ugljika, stakla ili aramida.

Metali su izotropni što znači da imaju podjednaku čvrstoću i krutost u svim smjerovima, te im je čvrstoća najveća za najmanju težinu, to jest, kada se koriste kao cijevna konstrukcija u klasičnom uzorku dijamantnog okvira. Kompoziti su anizotropni materijali, pa su zato čvrsti i kruti duž osi vlakana. Kod njih se sama čvrstoća konstrukcije može regulirati preko vlakana/ojačala koja mogu biti različitih vrsta, oblika i pozicionirana na različitim mjestima po potrebi [26]. Svaki materijal daje različite performanse i u konačnici utječe na cijenu.

#### □ **ALUMINIJ 6061-T6**

Ovaj materijal uglavnom se koristi za opću namjenu u konstruiranju i proizvodnji. Za okvire bicikla koristi se kovani aluminij. Rastaljeni aluminij se lijeva u kalup, zatim valja, kuje ili ekstrudira u konačni oblik. Sama oznaka 6061-T6 ima određeno značenje samog materijala, a uglavnom prva znamenka (6xxx - xx) označava glavni legirajući element koji u ovom slučaju predstavlja magnezij ili silicij. Druga znamenka (x0xx - xx), ako nije broj nula, označava određenu modifikaciju legure. Treća i četvrta znamenka (xx61 - xx) su proizvoljni brojevi za označavanje određene legure u seriji. Posljednja dva znaka (xxxx - T6) predstavljaju vrstu i postupak kaljenja kovanih aluminijskih legura [27]. Mnoge vrste aluminijskih legura mogu se očvrstnuti kroz dva procesa koji se nazivaju kaljenje i starenje (precipitacijsko očvršćivanje). To se postiže zagrijavanjem i hlađenjem materijala kroz kontrolirani proces kako bi se ojačale veze između njegovih molekula. Proces čini materijal tvrdim i krućim. Sekundarni proces starenja pomaže mikroskopskim kristalima da rastu unutar materijala kako bi međusobno povezali njegovu strukturu [28].

T6 stanje obično se postiže homogenizacijom legure lijevanog aluminijskog aluminija na 450°C tijekom nekoliko sati, kaljenjem i zatim procesom starenja/očvršćivanja na 120°C tijekom 24 sata. Al 6061-T6 izvrstan je za mnoge primjene. Pristupačan je, lako se strojno obrađuje, odličan je za zavarivanje i lako se anodizira. Kada se dobiva konačno T6 stanje, vlačna čvrstoća takve legure povećava se za 139%, sa 130 MPa na 310 MPa [28].

Iako je Al 6061-T6 prilično mekan materijal u usporedbi s drugim aluminijskim legurama, svejedno je izuzetno pogodan za biciklističku industriju [28].

Svaki materijal ima različita kemijska, fizička i mehanička svojstva. Kako se u ovome radu provode analize koje zahtijevaju podatke mehaničkih svojstava materijala upravo su ona najbitnija. Stoga su u tablici 1. navedene upravo te karakteristične vrijednosti za Al 6061-T6 uz dodatak za lakoću manipulacije pri obradi i cijene toga materijala.

#### □ AISI 4130 čelik

Čelik se koristi za izradu okvira za bicikle puno dulje od bilo kojeg drugog modernog materijala. Ovisno o potrebama, izrađuju se različite vrste legura čelika. Legura 4130 je među biciklistima poznatija kao *chrome-moly* i sadrži: oko 1% kroma, 0,8% mangana, 0,3% ugljika, 0,3% molibdena, 0,2% silicija, te manje od 0,05% sumpora i fosfora . Više od 95% legure je čisto željezo. Tehnički ispravna oznaka za ovu leguru prema američkom standardu je "AISI 4130" ili prema europskom standardu "25 CrMo4". Upravo je i prema samom nazivu čelika protumačeno koliko kojeg kemijskog elementa sadrži legura. Prva znamenka (4xxx) predstavlja oznaku za krom – molibden čelike. Drugi broj označava različite udjele glavnih elemenata, ovisno o vrsti legure. Kod legure 4130 brojke govore da ima: 1% kroma i 0,3% molibdena. Posljednja dva broja, ako postoje, predstavljaju postotak ugljika, izražen u 1/100 postotka [27].

Spomenuta legura trebala bi se kovati između 1230°C i 950°C. Što je niža završna temperatura kovanja, to će veličina zrna biti finija. Ako se pak legura kuje na preniskoj temperaturi, postoji opasnost od stvaranja nejednolike strukture u određenim područjima kovanog dijela, što zahtijeva normalizaciju/žarenje prije daljnje toplinske obrade. Toplinska obrada nakon kovanja provodi se kako bi se čelik učinio pogodnim za strojnu obradu i zadovoljio ograničenja mehaničkih svojstava potrebnih za posebne primjene čelika [29].

S gustoćom od 7833 kg/m<sup>3</sup>, odabrani čelik je tri puta teži od aluminijskog, a dva puta teži od titana.

Neke legure čelika jače su i kvalitetnije od popularnog CrMo, ali se ne koriste za izradu okvira bicikala zbog nekih drugih nedostataka [27]. Općenito se može reći kako legura čelika AISI 4130 predstavlja vrhunski legirani čelik korišten za srednje i vrlo velike mehaničke komponente za koje je potrebna mogućnost dobre obradivosti i pouzdanog zavarivanja [30].

#### □ TITAN Ti-3Al-2,5V

Titana ima relativno puno u Zemljinoj kori, ali proces njegove ekstrakcije iz rude je ekstremno skup, što utječe na cijenu okvira bicikla. Baš poput aluminijskih i čeličnih okvira, titan je legura kod koje također postoje različite kvalitete dostupne proizvođačima okvira. Legure titana koje se obično koriste za izradu su Ti-3Al-2,5V i Ti-6Al-4V. Legura Ti-3Al-2,5V (sadrži 3% aluminijske i 2,5% vanadijske) najčešća je vrsta koja se koristi za okvire od titana. Ti-6Al-4V cijev je znatno čvršća, pa je kao rezultat toga s njom teže raditi, te se ponekad ona koristi za okvire visokih performansi [31].

Prema tablici 1. lako se može zaključiti da iako je skoro duplo teži od aluminijske, titan je još uvijek lakši od čelika. Promatrajući elongaciju prije loma koja iznosi i do 30%, titan je i u tom pogledu nadmašio čelične i aluminijske legure [27]. Ovakvo svojstvo omogućuje mu veliku savitljivost prije nego što dođe do loma, a da se time ne narušuje sama struktura konstrukcije. Iako je puno izdržljiviji od prethodnih materijala, ipak je manje zastupljen u eksploataciji. Glavni razlog ovoga je već prethodno spomenut, a to je njegova cijena. Osim nje važno je naglasiti da je titan teško zavarivati i obrađivati. Čak i najmanja nesavršenost tijekom postupka zavarivanja može uzrokovati katastrofalne greške na zavarenim mjestima. Obrada titana zahtijeva puno znanja, iskustva i kvalitetne alate [27].

Titane legure nemaju povoljan omjer krutosti i težine. Veći promjer cijevi povećava krutost, ali povećava i težinu. Tanje stijenke cijevi smanjuju težinu, ali ako su pretanke, okvir će se lako izviti. Aluminijske, koji teži upola manje, dozvoljava konstrukciju cijevi većeg promjera s dovoljno debelim stijenkama dok je kod titana potrebno paziti upravo na tu debljinu kako okvir ne bi imao preveliku masu [27].

Zadnje svojstvo koje je bitno za spomenuti je da titan nije sklon korodiranju, pa stoga okvir bicikla ne treba bojati i posebno štiti od ogrebotina i krhotina koje bi mogle uzrokovati oštećenja [31].

Tablica 1. Svojstva najčešće korištenih materijala u izradi okvira bicikla [73,74]

Materijal	Al 6061-T6	AISI 4130 (25 CrMo4)	Ti-3Al-2,5V
Youngov modul elastičnosti – $E$ [GPa]	69	205	100
Granica razvlačenja – $\sigma_{0,2}$ [MPa]	276	460	500
Vlačna čvrstoća – $\sigma_M$ [MPa]	310	560	620
Poissonov koeficijent – $\nu$	0,33	0,29	0,3
Gustoća – $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2700	7833,41	4480
Elongacija prije loma [%]	≈ 17	21,5	15 – 30 (max.)
Zavarljivost i obradivost	Odlična/dobra	Odlična	Slaba/umjerena
Cijena [€/kg] – okvirno	30,73	8,61	75

#### □ Kompozitni materijali

Kako ovi materijali nisu predmet razmatranja u ovome radu bit će samo ukratko spomenuti. Kompozitni materijali nastali su kombinacijom najmanje dva različita materijala, obično s različitim fizikalnim i kemijskim svojstvima, tako da je dobiveni materijal bolji od bilo kojeg kombiniranog materijala pojedinačno. Sastoje se od matrice i ojačala, a u biciklističkoj industriji najbolji predstavnik je kompozit ojačan ugljičnim vlaknima. Može se reći kako ih odlikuje izuzetna čvrstoća i krutost [27].

Slojevi ojačala se mogu polagati pod različitim kutovima, kako bi se formirao laminat željenih karakteristika. tj. vlakna jednog sloja mogu biti paralelna s vlaknima susjednog sloja ili pod kutom (primjerice 45°). Upravo o tome ovise i već spomenuta mehanička svojstva kompozita [27].

Ovi materijali danas se uglavnom koriste pri izradi okvira trkaćih i brdskih bicikala, ali se predviđaju kao materijali koji će se sve više koristiti u budućnosti biciklizma.

### 2.3.2. Dimenzije i geometrija hibridnog okvira

Biciklizam je danas prisutan u svim životnim dobima ljudi, pa je stoga bitna mogućnost personalizacije dimenzije okvira kao i cjelokupnog bicikla. Današnji bicikli su prilagodljivi u nekoliko segmenata, a to su najčešće visina sjedišta i samog bicikla, te nagib volana. Ove prilagodbe uglavnom ne zadovoljavaju sve zahtjeve vozača, pa se upravo zato javlja potreba za izmjenom veličine konstrukcije, a element koji tu ima najviše utjecaja je okvir.

Gotovo se svi bicikli proizvode u nekoliko standardnih dimenzija, a sve to zbog udobnosti i ergonomičnosti korisnika. Kako se danas najčešće kupnja obavlja preko interneta, postoje kalkulatori veličine bicikala. U nastavku će jedan od njih ukratko biti objašnjen i povezan s tablicama veličina.

#### □ Kalkulator i tablice dimenzija bicikla

Postoje mnogi alati za pronalazak idealne veličine bicikla. Najširi u upotrebi je jednostavni kalkulator dimenzija koji daje dovoljno dobre podatke o potrebnoj veličini. On funkcionira na principu unošenja parametara na temelju kojih se vrši usporedba podataka u bazi tablica. Karakteristične veličine koje se unose u program kalkulatora su dob, spol, visina biciklista, duljina unutarnje strane noge vozača, tj. udaljenost od stopala do mjesta doticaja vozača sa sjedištem i slično. Nakon pohrane svih podataka, dobivaju se rezultati za veličinu bicikla.

U ovome radu parametri su uneseni u kalkulator kao na slici 2.13. Povratna informacija dobivena je u obliku glavne, te nekoliko alternativnih veličina bicikla. Odabirom najpovoljnije, pristupa se tablicama za očitavanje mjera pojedinih elemenata ili se već u sklopu programa dobiva ispis preporučenih dimenzija segmenata okvira bicikla.

Bike for	an adult
Bike type	trekking_city_hybrid
Your height	190 cm

Measure your inseam length. It should be in the 84-95 cm range.

Inseam length: 90 cm

Recommended bike size

Bike frame size: 58 cm

You can also consider the following frame sizes:

21.5", 22", 22.5", 23", 23.5"

55 cm, 56 cm, 57 cm, 59 cm, 60 cm

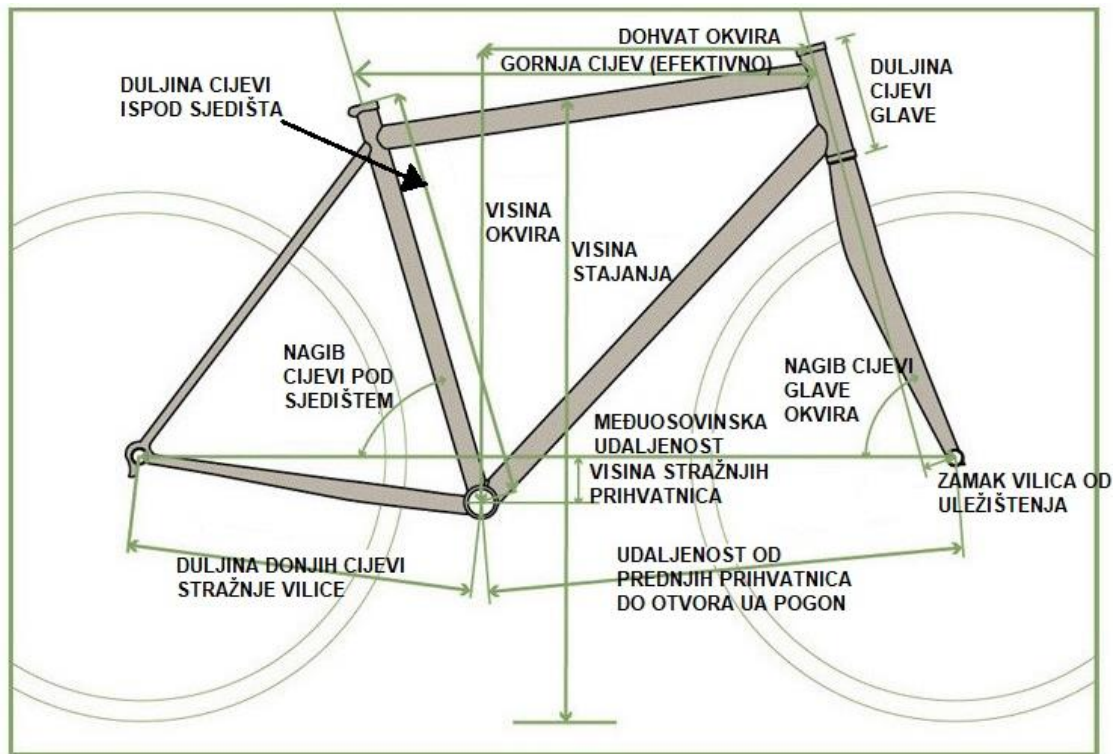
Slika 2.13 Kalkulator za određivanje veličine bicikla/okvira bicikla [32]

□ **Geometrija hibridnog bicikla**

Na temelju prethodno izračunate okvirne veličine bicikla, potrebno je konstruirati geometriju određenih dimenzija koja će u radu predstavljati vlastite modele. Prema slici 2.14 mogu se lako predočiti glavne dimenzije cijevi okvira koje proizvođači koriste pri dizajniranju. Ove dimenzije nisu uvijek konstantne, te variraju od proizvođača i od modela. Prikazom tablice 2. vidi se da su primarno definirane osnovne dimenzije glavnih cijevi, međuosovinski razmak, kutevi nagiba cijevi konstrukcije, te još neke mjere koje nisu direktno u fokusu ovoga rada. Ova tablica kreirana je po uzoru na [33], te su podcrtane vrijednosti preuzete iz nje i implementirane na vlastitu geometriju.

Tablica 2. Popis dimenzija/veličina pojedinih elemenata geometrije bicikala proizvođača „Soma Fabrication“ s podcrtanim preuzetim mjerama [33]

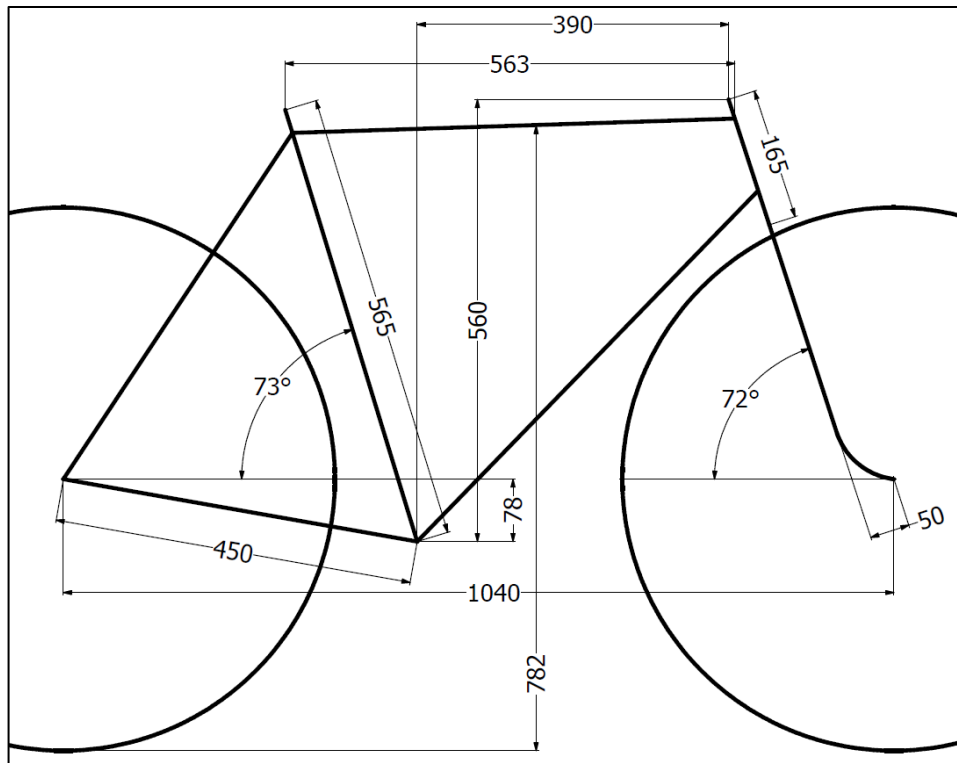
Hrvatski naziv	Engleski naziv	Dimenzije/veličine				
Veličina bicikla	<i>Size</i>	52	54	56	58	61
Duljina cijevi ispod sjedišta [mm]	<i>Seat tube</i>	495	515	535	555	585
Gornja cijev, efektivna duljina [mm]	<i>Top tube, effective</i>	540	555	565	580	600
Nagib cijevi glave okvira [°]	<i>Head tube angle</i>	71	71,5	<u>72</u>	72	72
Nagib cijevi pod sjedištem [°]	<i>Seat tube angle</i>	73,5	73,5	<u>73</u>	73	72,5
Duljina donjih cijevi stražnje vilice [mm]	<i>Chainstay length</i>	450	450	<u>450</u>	450	450
Duljina cijevi glave okvira [mm]	<i>Headtube length</i>	175	144	<u>165</u>	185	210
Visina stražnjih prihvatnica od otvora za uležištenje pogona [mm]	<i>Bottom bracket drop - BB drop</i>	50	80	80	80	80
Visina stajanja [mm]	<i>Standover height</i>	752	777,3	784,9	805,2	835,7
Udaljenost od prednjih prihvatnica do otvora za pogon [mm]	<i>Front center</i>	595	601	602	618	627
Međuosovinska udaljenost [mm]	<i>Wheelbase</i>	1040	1040	<u>1040</u>	1055	1070
Visina okvira [mm]	<i>Frame stack</i>	567	580	600	622	643
Dohvat okvira [mm]	<i>Frame reach</i>	369	381	381	389	397
Zamak vilica od uležištenja [mm]	<i>Fork rake</i>	43	45	45	45	45



Slika 2.14 Vizualni prikaz pojedinih dimenzija geometrije [33]

Iako je za problematiku ovog rada preporučena veličina bicikla 58, uzeto je da će bicikl biti alternativne veličine 56, te su iz tablice preuzete određene dimenzije upravo za nju. Na slici 2.15 prikazana je geometrija prema kojoj su izrađeni modeli. Vidljivo je da duljina cijevi ispod sjedišta iznosi 565 mm, efektivna duljina gornje cijevi iznosi 563 mm, prednja cijev glave okvira 165 mm, a donje cijevi stražnjih vilica 450 mm. Međuosovinski razmak iznosi 1040 mm dok je visina između prihvatnica stražnjih osovina i otvora za uležištenje pogona 78 mm. Kutovi na slici 2.15 su preuzeti iz tablice 2. Ostale kotirane dimenzije nisu od nikud preuzete, već su produkt upravo ovih glavnih pobrojanih stavki izraženih u milimetrima na slici.

Važno je za napomenuti kako je u radu za sva tri modela zadržana ista geometrija uz podložnost promjeni oblika i dimenzija donje cijevi okvira, te gornjih i donjih cijevi stražnje vilice. Mijenjani su i oblici poprečnih presjeka cijevi.



Slika 2.15 Grafički prikaz odabranih dimenzija geometrije u milimetrima (mm) prema kojima su kreirani modeli

Odabrane duljine cijevi i njihovi poprečni presjeci za različite modele selektirani su na temelju proučavanja raznih kalkulatora veličina i ostale literature, gdje je najviše preuzeto iz knjige [40]. U tom biciklističkom priručniku navedene su različite metode određivanja dimenzija pojedinih dijelova. Neke od njih su usvojene, a neke dimenzije su pak napravljene prema vlastitoj intuiciji i tablici veličina okvira bicikala.

### 2.3.3. Poprečni presjeci cijevi i ostali elementi okvira

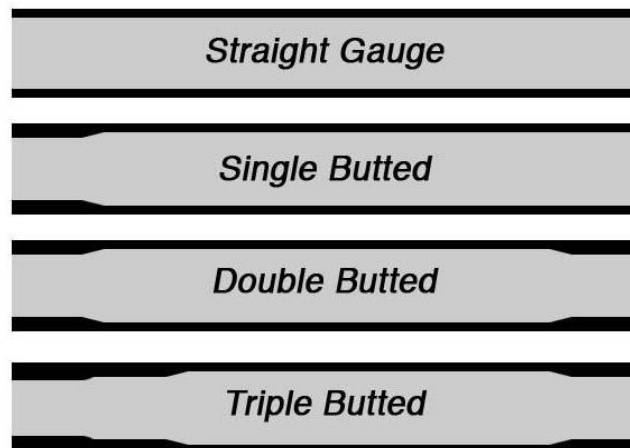
Konvencionalne metalne cijevi imaju konstantnu debljinu stijenke i poznate su kao ravne cijevi (engl. *straight gauge*). Kod čeličnih, aluminijskih ili titanskih okvira više kvalitete, unutarnji promjer stijenke cijevi varira duž njezine duljine. To znači da su stijenke cijevi deblje na krajevima, gdje je potrebna dodatna čvrstoća, a tanje u sredini radi smanjenja težine [2]. Izrađuju se postupkom utiskivanja materijala cijevi na kalup pomoću valjaka, a raspored debljine materijala dobiva se prethodnim *mandrel* prešanjem [76]. Ovakve cijevi su poznate



kao okrugle cijevi promjenjivog poprečnog presjeka/promjenjive debljine stijenke (engl. *butted tubes*), te se pojavljuju u tri osnovna oblika:

- *Single butted* cijev – stijenka ove cijevi je deblja na jednom kraju dok je na preostaloj dužini cijevi stijenka konstantne debljine.
- *Double butted* cijev – cijev je jednake debljine na oba kraja, a između njih je jednoliko stanjena.
- *Triple butted* cijev – oba kraja cijevi imaju najdeblje stijenke, zatim se ponovo na jednom kraju izvodi prijelaz na nešto tanju stijenku dok se naposljetku u sredini izvodi najtanja stijenka [2].

Slika 2.16 prikazuje vertikalni/profilni presjek okruglih cijevi na kojem se vidi kako se debljina presjeka mijenja s duljinom, tj. vide se mjesta na kojima dolazi do smanjivanja/povećavanja poprečnog presjeka. Vanjski promjer cijevi je uvijek konstantan.



Slika 2.16 Prikaz uzdužnog presjeka cijevi na kojem se može vidjeti promjena debljine stijenke na pojedinim duljinama [75]

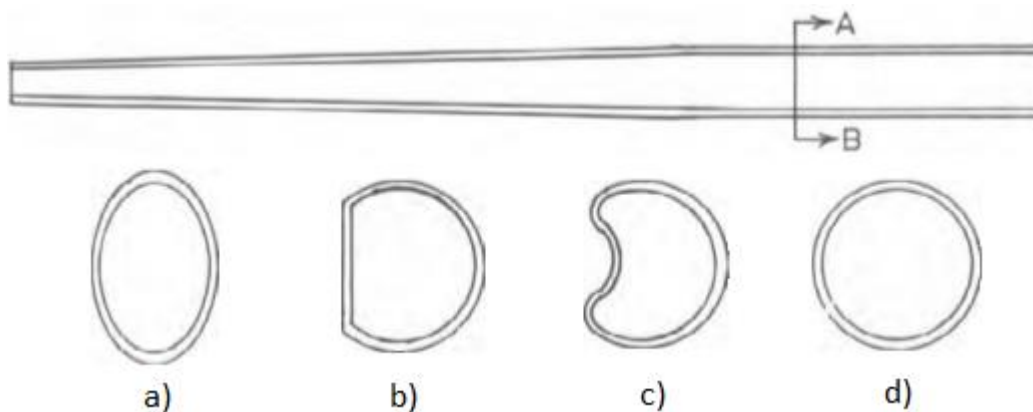
Pobrojane okrugle varijacije cijevi uglavnom se koriste kod cijevi ispod sjedišta, te kod donje i gornje cijevi okvira bicikala. Nedostatak im je to što je sredina cijevi osjetljivija na udubljenja i zamor [2]. Također ovakve izvedbe su puno skuplje od običnih/ravnih cijevi zbog kompliciranije proizvodnje [19].

S druge strane, složeni (ne okrugli) profili/poprečni presjeci cijevi okvira bicikala najčešće se proizvode vodenim oblikovanjem (engl. *hidroforming*). Vodeno oblikovanje je najinovativnija i najpreciznija metoda oblikovanja cijevi. To je ujedno skup, ali i isplativ način

za proizvodnju nekonvencionalnih, jednodijelnih struktura, te dizajna cijevi s većim omjerom čvrstoće/krutosti i težine. Za razliku od mehaničkog oblikovanja ili utiskivanja, strojevi za hidroformiranje koriste tekućinu pod hidrauličkim pritiskom za širenje i oblikovanje cijevi unutar zatvorenih matrica. Ove polovice matrice imaju negativni kalup koji nalikuje konačnom obliku ili značajkama cijevi. Primjenom ove tehnike cijevima se omogućuje da budu bez pretjeranih šavova, a da budu složenih kontura. Tolerancije oblika dobivenih ovim postupcima su  $\pm 0,5$  mm [42]. Postupak vodenog oblikovanja predviđen je za oblikovanje poprečnih presjeka nekonvencionalnih šupljih cijevi kod svih modela ovoga rada.

#### □ Izvedba stražnjih cijevi

Poprečni presjek zadnjih cijevi isto se može mijenjati, te postoji nekoliko osnovnih oblika. Slika 2.17 prikazuje četiri varijacije od kojih su u ovome radu korišteni oblici b) i d), a nose nazive jednostrano spljoštene (engl. *flattened*), te okrugle cijevi (engl. *round*). Preostale dvije nekoristene vrste su: a) okrugle - ovalne - okrugle (engl. *round-oval-round*) i c) užlijebljene (engl. *fluted*). Također je na istoj slici moguće vidjeti kako stražnje cijevi postoje i u izvedbi sužavanja poprečnog presjeka na jednom kraju dok danas postoje i sužavanja na oba kraja [40].

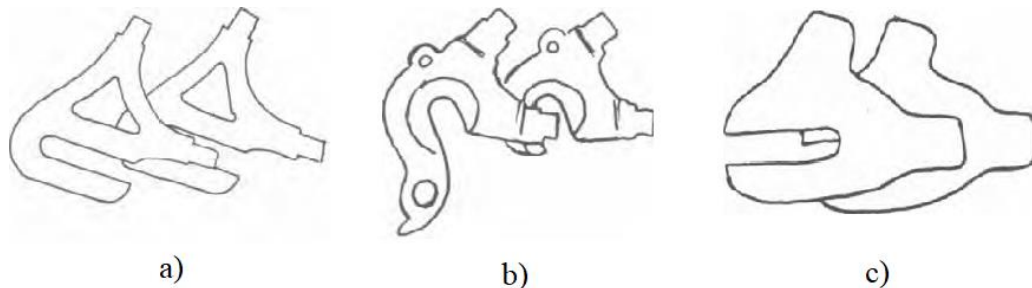


Slika 2.17 Izvedbe cijevi stražnje vilice s obzirom na poprečni presjek: a) okrugle - ovalne - okrugle cijevi, b) jednostrano spljoštene cijevi, c) užlijebljene cijevi, d) okrugle cijevi [40]

#### □ Stražnje prihvatnice

Općenito postoje tri primarne varijacije prihvatnica koje su pobrojane i prikazane na slici 2.18. Stražnje prihvatnice osovine na okvirima u ovome radu dizajnirane su nešto drugačije, te će biti pobliže objašnjene u drugom dijelu rada. Generalni oblici su:

- a) Standardne cestovne prihvatnice (engl. *Standard road dropouts*)
- b) Vertikalne prihvatnice (engl. *Vertical dropouts*)
- c) Trkaće ili stražnje opterećene prihvatnice (engl. *Track/Rear loading dropouts*) [40]



Slika 2.18 Prikaz osnovnih varijacija prihvatnica: a) standardne cestovne b) vertikalne c) trkaće/stražnje opterećene prihvatnice [40]

Većina njih iskovana je ili laserski izrezana od čelika visoke kvalitete. Danas se uglavnom koriste standardizirane prihvatnice koje su jeftinije od vlastitog dizajna. Za bicikle posebne namjene i izvanserijske okvire, prihvatnice se ponekad izrađuju ručno.

#### □ Ojačanja okvira – mostovi

Potrebno je spomenuti i dodatna ojačanja stražnjeg, sekundarnog trokuta, a ona su predstavljena u obliku gornjeg i donjeg mosta (engl. *bridge*) koji povezuje nasuprotne, lijeve i desne cijevi stražnje vilice.

Donji mostovi (engl. *chainstay bridges*) važni su iz dva glavna razloga, a to su da se njihovom primjenom povećava krutost stražnjem trokutu i da omogućuju pričvršćivanje stražnjeg blatobrana na određeni način. U određenoj izvedbi služe i za montiranje postolja za uspravno odlaganje bicikla (engl. *bike kickstand*). Najčešće varijacije donjih mostova mogu biti u obliku standardnog mosta, standardnog mosta s navojem, standardnog mosta malog promjera, mosta U – oblika, konkavnog mosta i mosta koji se umeće u provrt kroz cijevi vilica (engl. *drilled through bridge*). Okviri ne moraju nužno imati mostove, no oni su rijetkost [41].

Gornji mostovi (engl. *brake bridges*) uglavnom služe za montiranje kočnica što direktno znači da moraju biti kvalitetno dizajnirani i napravljeni. Stoga postoji nekoliko vrsta od kojih je najjednostavniji standardni – ne ojačani most. Ostali mogući oblici su još; standardni – jednostavno ojačani most, standardni – prirubnicom ojačani most (engl. *standard – flanged*

*reinforcement bridge*), standardni – cilindričnom glavom ojačani most (engl. *standard – with cylindrical boss bridge*), te most V – oblika [41].

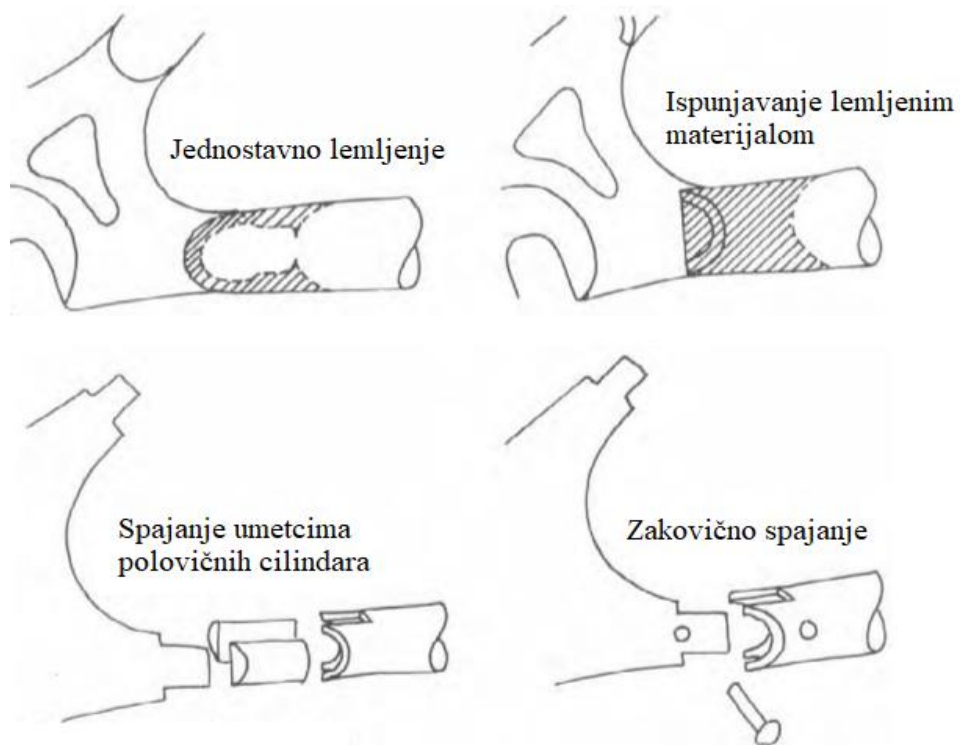
#### **2.3.4. Spojevi kod bicikala**

Vlastiti modeli izrađeni su kao jedinstveno tijelo (engl. *solid*), pri čemu su stvarni izgledi zavara zanemareni. Ovakav princip korišten je samo zbog pojednostavljenja cjelokupnog modela, te kasnijih simulacija u drugom programu koje bi produljile vrijeme izračuna. Kako bi se približilo stvarnim uvjetima i izgledu okvira svi prijelazi između pojedinih cijevi izvedeni su s određenim radijusom koji simulira prikaz kutnog zavara. Ovakva pojednostavljena simulacija spoja nema prevelikog utjecaja na ukupne rezultate, pa je stoga zadovoljavajuća.

U praksi je pri izradi okvira bicikla najčešći postupak elektrolučnog zavarivanja netaljivom volframovom elektrodom pod zaštitom inertnog plina (engl. *tungsten inert gas – TIG*) [35]. Osim TIG zavarivanja često se koriste još dvije metode za spajanje elemenata okvira bicikala. Jedna od njih je tvrdo lemljenje (engl. *brazing*) koje se najlakše opisuje kao proces u kojem se dodatni metal zagrijava neposredno iznad točke taljenja i raspoređuje na dvije susjedne cijevi gdje se hladi i stvara spoj. Za dodatni materijal često se koriste mjed, bakar ili srebro [36]. Posljednji postupak spajanja cijevi se koristi kod čeličnih okvira, a koristi dodatne elemente zvane krute spojnice ili uške (engl. *lugs*). Uške predstavljaju vanjske priključke izrađene od komada čelika (ponekad nehrđajućeg čelika) koje se postavljaju preko krajeva cijevi i leme. Spojnice povećavaju čvrstoću spoja raspoređivanjem rastaljenog dodatnog metala preko veće površine putem kapilarnog djelovanja [37].

##### **□ Spajanje prihvatnica s okvirom**

Općenito se razlikuju postupci jednostavnog lemljenja, ispunjavanja lemljenim materijalom, te zakovičnog spajanja prihvatnica (Slika 2.19). Kako bi se pojednostavio način proizvodnje uglavnom se koristi postupak jednostavnog lemljenja zbog manjih troškova izvođenja. Zakovični spoj je isto tako prilično jednostavan, no negativna strana mu je dulja izrada zbog potrebe za dodatnim korakom bušenja provrta. Vrlo je važno postići zadovoljavajući omjer između cijene, kvalitete i jednostavnosti pri serijskim proizvodnjama okvira bicikala.



Slika 2.19 Ilustracija četiri osnovna oblika spajanja prihvatnica s okvirom [40]

### 3. Konstruiranje i proračun modela bicikala

#### □ Autodesk Inventor Professional 2023.

Pri uvodu u sam postupak konstruiranja i modeliranja potrebno je predstaviti program u kojem su modeli odabrane geometrije izrađeni.

Autodesk Inventor je aplikacija računalom potpomognutog dizajna (engl. *Computer Aided Design – CAD*) koja služi za 3D mehanički dizajn, simulaciju, vizualizaciju i izradu tehničke dokumentacije, a razvijena je od strane kompanije Autodesk. Program uključuje alate za određivanje parametara, izravno uređivanje i modeliranje slobodnih oblika kao i mogućnosti pretvorbe modela u više različitih CAD formata [34].

#### 3.1. Prvi model okvira bicikla – VHybridC

VHybridC zamišljen je kao osnovna štapna konstrukcija koja bi općenito predstavljala konceptualni model željenih dimenzija. Upravo zato i nosi u nazivu slovo „C“ što predstavlja koncept (engl. *concept*)

Sve cijevi modela su izvedene kao ravne, dimenzija opisanih u poglavlju 2.3.2. Poprečni presjek svakog elementa ovog okvira izveden je kao kružni vijenac konstantne površine. To znači da su cijevi jednolikog poprečnog presjeka na svakom svojem dijelu. Površinu kružnog vijenca moguće je jednostavno izračunati po formuli:

$$A = (R^2 - r^2) \cdot \pi \quad (1)$$

Kako bi se izračunala okvirna masa okvira bicikla potrebno je odrediti pojedine mase zasebnih cijevi, te ih sve skupa zatim zbrojiti. Za to je prvotno potrebno odrediti volumen svake od cijevi prema formuli:

$$V = A \cdot l \quad (2)$$

Kada se odredi i volumen cijevi, moguće je pomoću još jedne jednostavne formule doći do konačne mase promatrane cijevi. Ona glasi:

$$m = V \cdot \rho \quad (3)$$

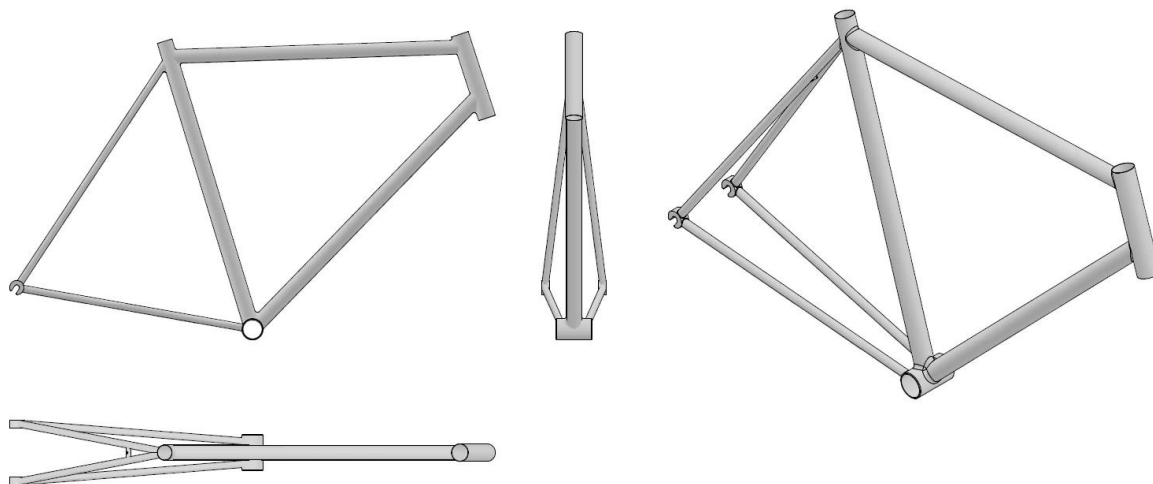
Definiranjem svih masa cijevi okvira moguće je proračunati ukupnu sumu za konstrukciju i to prema izrazu (4). Vrijednosti od  $m_1$  do  $m_7$  predstavljaju mase pojedinih cijevi dok  $m_8$  predstavlja procijenjenu masu prihvatnica, zavara i mostova zajedno. Za izbor materijala početno je odabran aluminij koji će se u kasnijim analizama mijenjati.

$$\sum_{i=1}^8 m_i = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7 + m_8 \quad (4)$$

Upravo se na prilogu 1., 2. i 3. mogu vidjeti procjene masa pojedinih elemenata konceptualnog okvira s ukupnom sumom. Iz podataka za aluminijski okvir može se izvući zaključak da je okvir izuzetno lagan, a na to najviše utječu tanke cijevi konstantne površine poprečnog presjeka. Za titan (prilog 2.) i čelik (prilog 3.) konstrukcija je nešto teža, no sigurno postoje druge prednosti ostalih mehaničkih svojstava.

Materijali uvijek imaju svoje prednosti i nedostatke, pa je stoga bitno dobro ih poznavati. Pri finalnom odabiru često najveći utjecaj ima sama cijena, a masa se ne promatra kao kritični faktor okvira.

Nakon osvrta na masu, bitno je za spomenuti da je na konceptualni model hibridnog okvira predviđena mogućnost montiranja različitih elemenata nosača upravo zbog ravnog oblika cijevi. To podrazumijeva različite držače boca, držače prtljage i slično. Međuosovinski razmak je konstantan i dovoljno velik za sve namjene odabrane vrste bicikla. S time se daje naglasak na prijevoz lakšeg tereta, ugodnu dugotrajnu vožnju na različitim terenima, te laku upravljivost biciklom. Prihvatnice stražnje osovine izvedene su pojednostavljeno, bez pretjeranog naglaska na montiranje zupčastog prijenosa s više stupnjeva. Njihov oblik napravljen je kao polukružni s utorom za osovinu. Isto tako pojednostavljeni su spojevi između: donjih cijevi stražnje vilice, stražnjih prihvatnica i gornjih cijevi stražnje vilice. Gornja cijev okvira primarnog trokuta je gotovo horizontalna, tj. malog je nagiba. Donja cijev je ravna i direktno spaja otvor uležištenja pogona i cijev glave okvira. Između cijevi stražnje vilice nalazi se samo jedan potporni most i to s gornje strane konstrukcije. On je standardnog ne ojačanog tipa, vanjskog promjera 5 mm, te unutrašnjeg 3,2 mm. Okvir konceptualnog modela bicikla izrađen u softveru Autodesk Inventor prikazan je na slici 3.1.

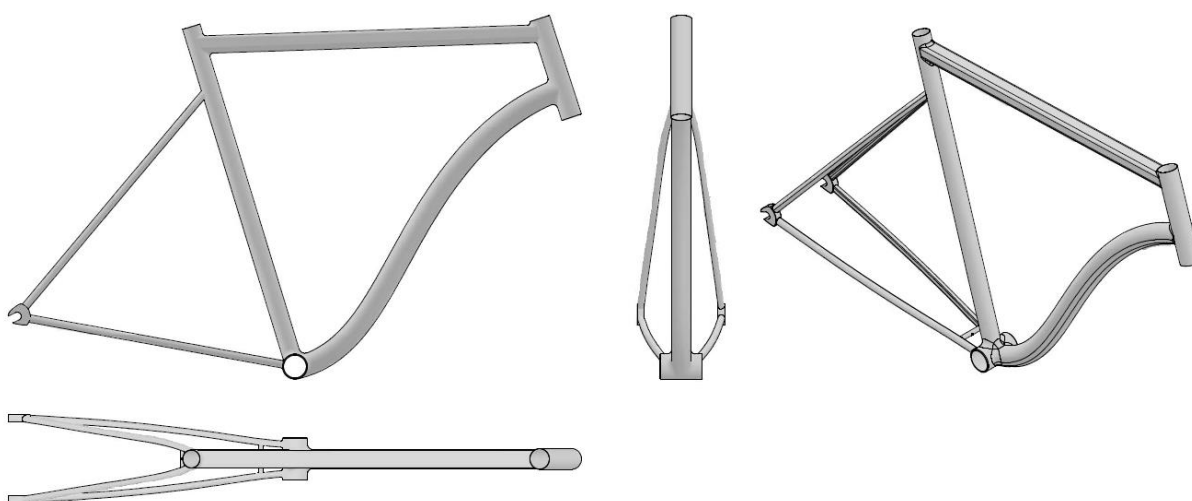


*Slika 3.1 Model izrađenog VHybridC okvira iz različitih pogleda*

### **3.2. Drugi model okvira bicikla – VHybrid1**

Na VHybrid1 modelu hibridnog bicikla izmijenjena je osnovna geometrija gdje je promijenjen oblik cijevi, te su cijevi drugačijeg poprečnog presjeka. Ovakva izvedba utječe na samu masu okvira, pa se prema priložima 4., 5., 6. uočava da je za ovaj model najlakša izvedba od aluminijske legure, a najteža od čelika. Za sva tri slučaja materijala ukupna masa je relativno mala čemu se danas sve više teži u praksi.

Slika 3.2 prikazuje izrađeni drugi model hibridnog bicikla iz svih pogleda, temeljen na već spomenutim osnovnim dimenzijama.



*Slika 3.2 Prikaz izmodeliranog VHybrid1 okvira iz različitih pogleda*

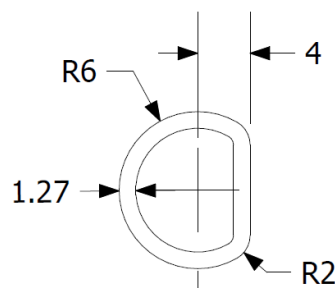


Za razliku od prvotne konstrukcije ovaj okvir bicikla ima potpuno drugačiji oblik donje cijevi. Ona je izvedena u obliku slova „S“ što nije česta pojava i što predstavlja dodatni trošak zbog težine izrade ovakve cijevi. Istraživanjem literature navodi se kako zakrivljene cijevi potencijalno mogu povećati krutost i čvrstoću što je od izuzetne važnosti ako se naiđe na neravan teren prilikom vožnje. Sve to ipak na kraju ovisi o samoj konstrukciji, materijalu, kvaliteti proizvodnje i ostalim aspektima. Ako se pak na ovakav okvir postave suspenzijske prednje vilice s duljim putem hoda, tada zakrivljenost donje cijevi omogućava dodatan prostor za tlačenje cjelokupnog kotača. Moderan dizajn uključuje savijene cijevi koje privlače pažnju na bicikl, pa je i to jedan od razloga za razmatranje [38].

Negativna strana ovakvog oblika je težina. Najkraća udaljenost između dviju točaka je ravna linija, pa je stoga zakrivljena cijev duža od ekvivalentne ravne cijevi. Dodatna duljina daje dodatnu težinu. Naravno, razlika nije vrlo značajna, te je bitna samo kada se pokušava napraviti konstrukcija što manje mase. Sve zakrivljene cijevi zahtijevaju jedan dodatni korak tijekom proizvodnje. Upravo takvo savijanje nije uvijek ni jednostavan posao zbog materijala o kojem se radi, te njegovoj sklonosti deformiranju i popuštanju [38].

Iduća važna promjena u ovom okviru je promjena oblika cijevi stražnje vilice. Ravne cijevi su zamijenjene savijenima i to tako da se cijevi postepeno šire od otvora za uležištenje pogona do prihvatnica stražnje osovine. Isti princip primijenjen je na gornje cijevi stražnje vilice. Upravo zato moguće je proizvesti kraće stražnje cijevi čime se direktno utječe na udaljenost između pogonskog lančanika i stražnjeg lančaničkog sklopa, to jest, učinkovitiji je prijenos snage [38].

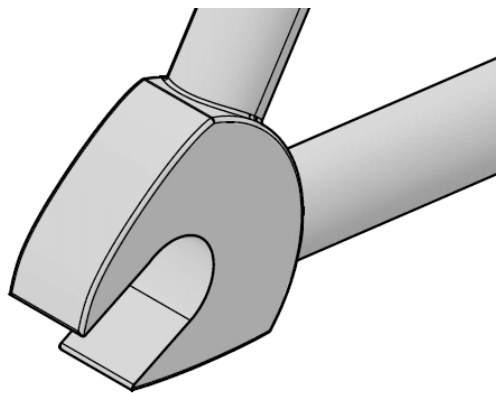
Slika 3.3 prikazuje dimenzije poprečnog presjeka stražnjih cijevi VHybrid1 modela koje su konstantne po cijeloj duljini elementa.



*Slika 3.3 Dimenzije poprečnog presjeka svih stražnjih cijevi VHybrid1 bicikla izražene u milimetrima (mm)*

VHybrid1 također ima spuštene gornje cijevi stražnje vilice što znači da su one pozicionirane za 70 mm niže od spoja gornje i cijevi pod sjedištem. Prema izvorima ovakav dizajn okvira bicikla daje dodatni komfor prilikom vožnje te poboljšava lateralnu krutost [39]. Dizajneri bicikala također tvrde da se poboljšava aerodinamika vožnje zahvaljujući kompaktnom stražnjem trokutu što ga čine spuštene stražnje cijevi [39].

Prihvatnice ni na ovome okviru nisu standardne, te ih je potrebno dizajnirati na adekvatan način prilikom konstruiranja. Stoga su napravljeni vlastiti modeli koji su pojednostavljeni, ali oblikom podsjećaju na trkaće, pobrojane u poglavlju 2.3.3. Njihov finalni prikaz za okvir VHybrid1 je na slici 3.4. S dimenzijama prihvatnica nije se ulazilo u detalje u ovome radu.



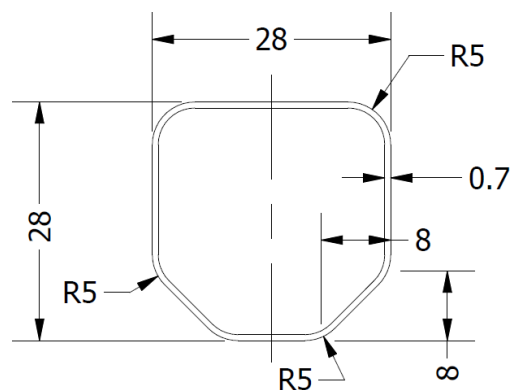
*Slika 3.4 Proizvoljni oblik prihvatnica za VHybrid1 okvir*

Sličnost s trkaćima je odabrana upravo zbog oblika za pričvršćivanje, čvrstoće i razloga da one mogu bolje podnijeti česta i snažnija pedaliranja biciklom. Budući da hibridni bicikli imaju mogućnost montaže većih kotača, između stražnje gume i cijevi sjedala može biti vrlo malo prostora, pa je stoga bitna mogućnost barem malog podešavanja tog razmaka preko utora prihvatnica [40]. Njihovo spajanje s okvirom je moguće na nekoliko načina dok je najkritičnije mjesto spajanja upravo s donjim cijevima stražnje vilice. Ovaj spoj je izložen naprezanjima tijekom cijele vožnje i veća je vjerojatnost pojave loma od preostalih mjesta spojeva na okvirima [40]. Oba spomenuta VHybridC i VHybrid1 modela pokušavaju simulirati spoj jednostavnim lemljenjem kao što je to prikazano u poglavlju 2.3.4. na slici 2.19.

VHybrid1 modelom izmijenjen je i poprečni presjek gornje i donje cijevi okvira. Prema [41], provedeno je nekoliko analiza u kojima je praćena ukupna deformacija, posmična sila, aksijalna sila, savijanje i torzijski moment. Promatrali su se poprečni presjeci poput kružnog vijenca, izduženog kružnog vijenca, jače izduženog kružnog vijenca, te ovalnog/jajolikog

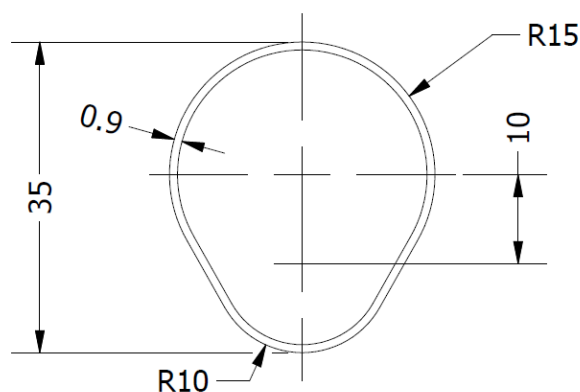
šupljeg presjeka. Zaključeno je kako se pri ovalnom presjeku cijevi javlja najmanja ukupna deformacija. Okvir kružnog presjeka pokazuje najveću ukupnu deformaciju u usporedbi s drugim okvirima različitog poprečnog presjeka. Isto tako u članku je izneseno da okvir kružnog presjeka generira veću silu smicanja od ostalih. U okviru jače izduženog sferičnog presjeka, posmična sila je minimalna što je povoljna pojava u aspektu čvrstoće [41].

Ovakvim tezama za VHybrid1 konstruiran je poprečni presjek gornje cijevi vrlo sličan kombinaciji ovalnog i pravokutnog presjeka. Na slici 3.5 prikazan je upravo taj poprečni presjek s konstantnom debljinom stijenke u iznosu od 0,7 mm. Odstupanjem od standardnih oblika htjela se je prikazati reakcija upravo nešto drugačijeg presjeka za kojeg još nisu provedene analize i dobiveni relevantni rezultati.



*Slika 3.5 Prikaz poprečnog presjeka gornje cijevi VHybrid1 modela s izraženim dimenzijama u milimetrima (mm)*

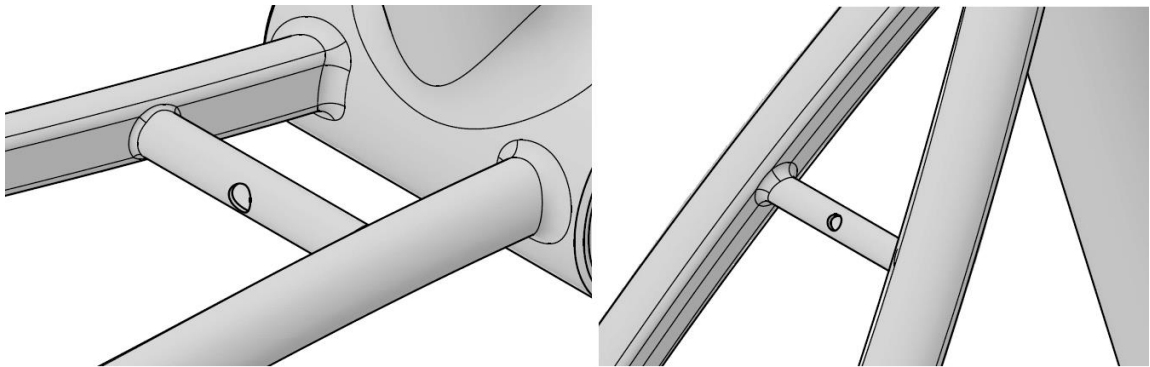
Donja cijev izvedena upravo ovalno/jajoliko kako bi se dobile određene pobrojane prednosti. Na slici 3.6 vidi se poprečni presjek s određenim dimenzijama. Debljina stijenke cijevi je 0,9 mm kao i na ostalim modelima. Donja cijev većih je dimenzija poprečnog presjeka, te se pri konstrukciji nije previše obraćalo pozornost na njezinu masu.



*Slika 3.6 Dimenzije poprečnog presjeka donje cijevi izražene u milimetrima (mm)*

Za okvir VHybrid1 korištena su oba tipa mosta iz poglavlja 2.3.3. Donji spada u kategoriju standardnih mostova, te na sebi ima otvore za prolaz zraka. Vanjski promjer donjeg mosta izveden je kao 8 mm, dok je unutarnji promjer 6,5 mm. Kada se koristi dizajn manjeg promjera kao što je ovaj, dobra je ideja koristiti čim deblju stijenku cijevi kako bi se nadoknadila manja čvrstoća. Komad cijevi manjeg vanjskog promjera nije tako čvrst kao komad većeg promjera s istom debljinom stijenke [41]. Gornji most modeliran je kao standardni - ne ojačani tip, vanjskog promjera 5 mm, te unutrašnjeg 3,2 mm. Obično se ovakva izvedba koristi zbog smanjenja troškova proizvodnje jer bi uslijed ojačanja došlo do promjene u cijeni. Pri montaži potrebno je paziti na pritezanje središnjeg vijka u provrt mosta zbog mogućnosti pojave velikih sila i opasnosti od deformiranja cijevi [41].

Na slici 3.7 prikazan je bliži pogled na samu konstrukciju mostova.

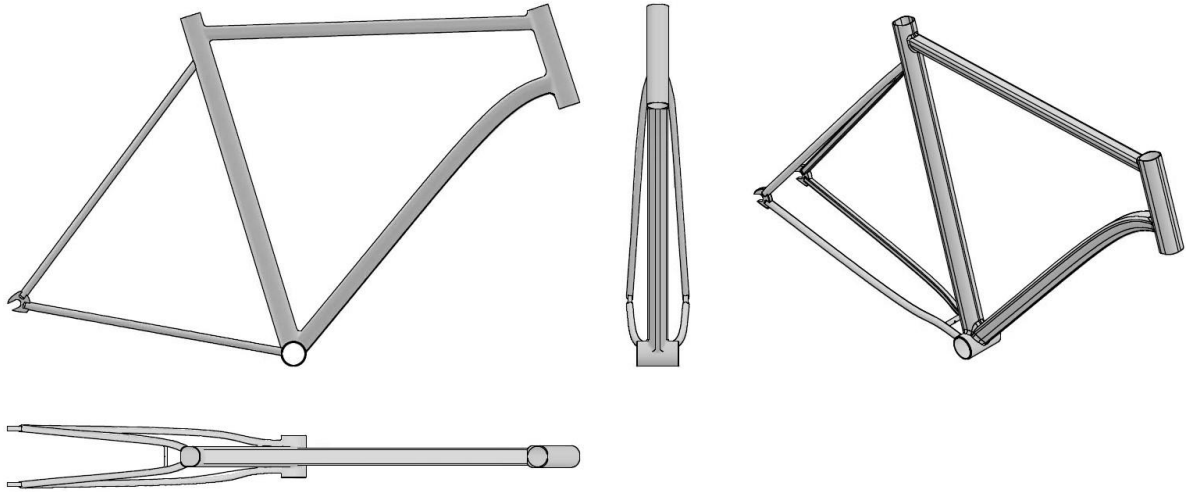


*Slika 3.7. Standardni donji most (lijevo) i standardni ne ojačani gornji most (desno) VHybrid1 okvira bicikla*

### **3.3. Treći model okvira – VHybrid2**

Treći, ujedno i zadnji model okvira bicikla, konstruiran je na sličan način kao prethodni. Ipak, postoje razlike koje će se provjeriti i usporediti u analizama sljedećeg poglavlja.

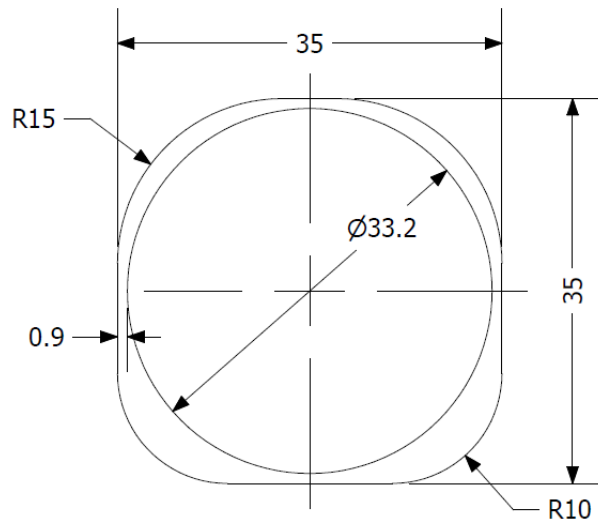
Slika 3.8 prikazuje posljednji VHybrid2 okvir iz svih pogleda, nešto drugačije geometrije, ali zadržanih osnovnih dimenzija cjelokupnog okvira.



*Slika 3.8. Prikaz gotovog modela VHybrid2 okvira iz različitih pogleda*

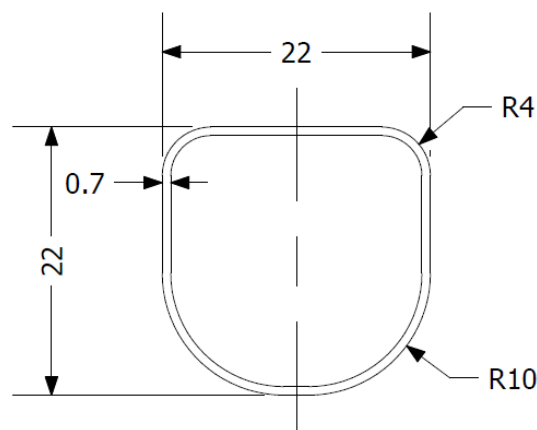
Za razmatranje ovakvih elemenata ideja je proizašla iz literature i internetskih izvora koji navode da se donje cijevi osim standardnog “S” oblika mogu izvoditi i s djelomičnim varijacijama. Promatrajući ne cestovne bicikle uočeno je da puno njih ima donju cijev izvedenu kao na VHybrid2 modelu. Takav element za razliku od ravne cijevi ipak dodatno povećava masu, ali nešto manje nego donja cijev VHybrid1 okvira bicikla. Ovaj zaključak može se donijeti i uspoređujući npr. prilog 6. i prilog 9. prema kojima se vidi masa donjih cijevi za čelične modele.

Cijevni elementi trećeg okvira bicikla imaju drugačije poprečne presjeke u odnosu na prethodne. Sve cijevi izvedene su s konstantnom debljinom osim cijevi glave okvira koja je u ovom slučaju zamišljena kao puni komad kojem je prvo izbušen provrt određenog promjera, te je zatim tokaren na tražene mjere. Poprečni presjek ove cijevi je nekonvencionalnog oblika, prikazan na slici 3.9. Unutrašnji provrt je okrugli zbog stupa volana koji ulazi u njega i omogućuje rotaciju oko središnje osi.



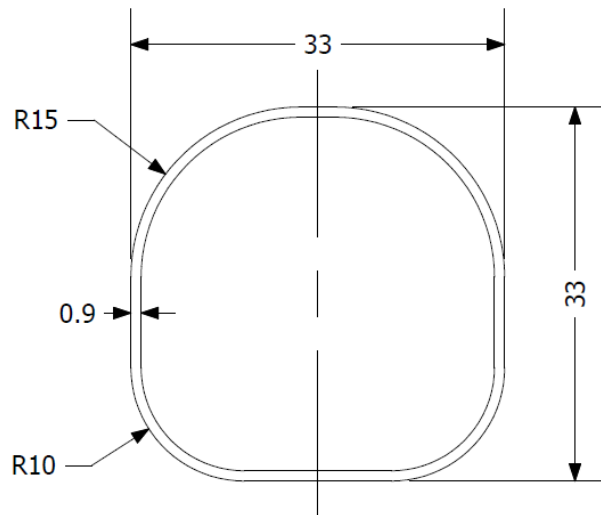
*Slika 3.9 Nekonvencionalni poprečni presjek cijevi glave okvira s mjerama izraženim u milimetrima (mm)*

Iduću cijev koju je potrebno opisati je gornja cijev okvira. Ona je izvedena pod malim kutom u odnosu na horizontalu. Poprečni presjek nije standardnog oblika. Slika 3.10 prikazuje dimenzije i debljinu gornje cijevi trećeg modela.



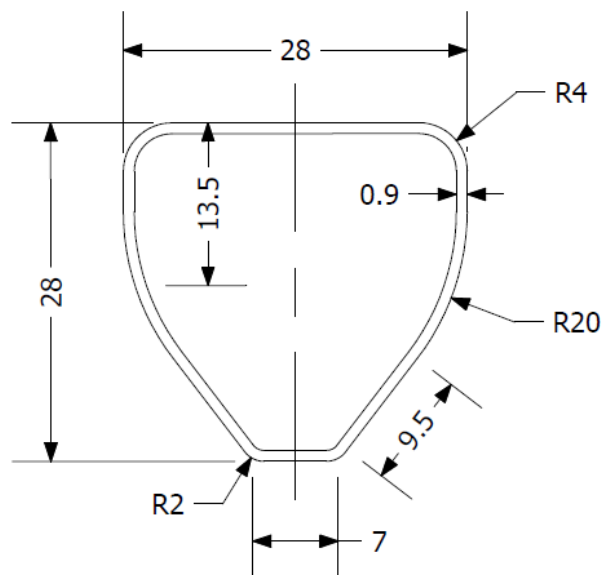
*Slika 3.10 Prikaz poprečnog presjeka i debljine stijenke gornje cijevi VHybrid2 okvira s prikazom dimenzija u milimetrima (mm)*

Cijev ispod sjedišta je u ovome modelu eksperimentalno modelirana kao ne cilindrična. Podešavanje visine stupa sjedišta svejedno je moguće, samo što poprečni presjek mora biti istog oblika kao i ova cijev pod sjedištem. Ovo može predstavljati dodatan trošak pri izradi, ali kako se u ovome radu ne stavlja fokus na cijenu, zadržan je konstruirani oblik. Iduća slika 3.11 prikazuje presjek takve cijevi.



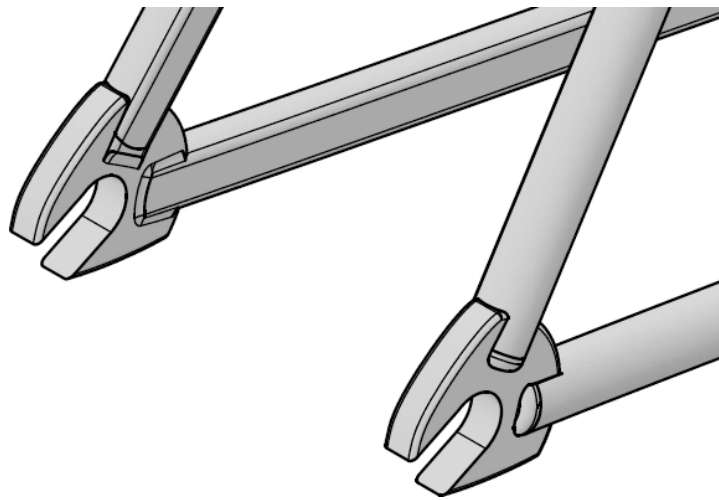
Slika 3.11 Presjek cijevi ispod sjedišta uz prikaz karakterističnih mjera izraženih u milimetrima (mm)

Preostala cijev prednjeg trokuta okvira čije dimenzije nisu navedene je donja cijev. Uz već spomenuti nekonvencionalni oblik, samom modeliranju poprečnog presjeka pristupilo se je također intuitivno bez obzira na prepreke u proizvodnji. Vodenim oblikovanjem čak ni ovakvu cijev, prikazanu na slici 3.12, ne bi bilo nemoguće izvesti.



Slika 3.12 Poprečni presjek donje cijevi djelomičnog oblika „S“ sa svim dimenzijama izraženim u milimetrima (mm)

Pregledom stražnjeg trokuta VHybrid2 modela vidi se kako su stražnje prihvatnice osovine u odnosu na prethodni okvir nešto tanje, ali je zadržan njihov profilni oblik. Slika 3.13 u fokus stavlja izvedbu tih prihvatnica. One su nešto više zaobljenijih vanjskih rubova, ali glavna razlika sa VHybrid1 je u načinu njihovog spajanja s gornjim i donjim cijevima stražnje vilice. U poglavlju 2.3.3. pobrojane su osnovne četiri vrste pripajanja od kojih se u ovom primjeru htjelo djelomično simulirati spajanje ispunjavanja lemom i to tako da su cijevi izrezane prema profilu prihvatnica, te umetnute u njih.

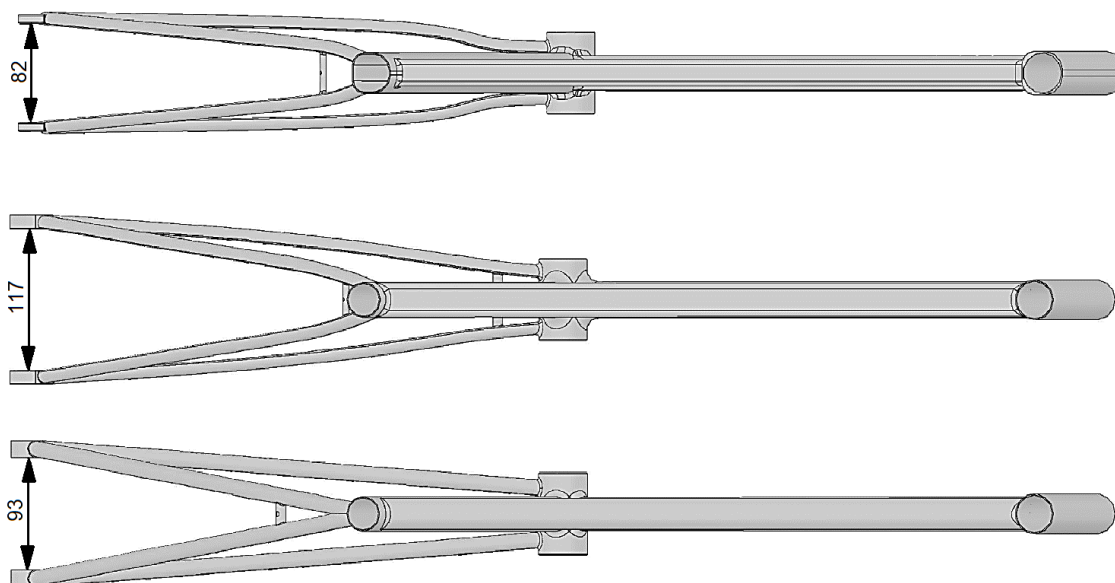


*Slika 3.13 Tanja izvedba pripojenih stražnjih prihvatnica VHybrid2 okvira*

Kao i prethodna dva modela, VHybrid2 također posjeduje drugačije dizajnirane stražnje cijevi. One su napravljene sa stepenastim prijelazom, to jest, dolazi do naglog širenja na mjestu gdje se dolazi kotača kako bi se ostvario dovoljan prostor između njih. Ova značajka povećava mogućnost montiranja dodatnih stražnjih nosača, ali i omogućuje montažu većeg pneumatika. Pri kraju donjih cijevi često se postavlja već spomenuti *kickstand*.

Na slici 3.14 prikazana su sva tri modela iz pogleda odozgo. Promatrajući stražnje vilice, uočava se da je najveći razmak prihvatnica (117 mm) konstruiran pri VHybrid1, dok je najmanji (82 mm) na VHybrid2 modelu. Duljina između prihvatnica na konceptualnom modelu (93 mm) općenito je zamišljena da prihvaća stražnju osovinu s kasetnim lančanicima kojih bi bilo deset. Na VHybrid1 predviđeno je staviti trinaest kasetnih lančanika dok su na VHybrid2 okviru ograničeni stupnjevi prijenosa uz pomoć sedam lančanika.





Slika 3.14 Pogled odozgo na sva tri okvira, VHybrid2, VHybrid1 i VHybridC uz dimenzije razmaka stražnjih prihvatnica u milimetrima (mm)

Poprečni presjek stražnjih cijevi izveden je kao jednostrano spljoštena varijanta, dimenzija profila istih kao stražnje cijevi kod drugog modela (Slika 3.3).

Gornji most na VHybrid2 okviru konstruiran je kao standardni - ne ojačani, te je pozicioniran na nešto nižoj poziciji s obzirom na spoj gornjih stražnjih cijevi s cijevi ispod sjedišta. Donji je udaljen za 55 mm od centralne osi koja prolazi kroz središte otvora za nožni pogon. Oba mosta istih su dimenzija kao u drugom modelu.

Pri promatranju okvira bicikla, moguće je vidjeti da se središte otvora za montiranje pedala nalazi na nižoj visini od središta stražnje osovine kotača. Ta visinska razlika već je prethodno prikazana na slici 2.15 kao dimenzija od 78 mm. Ako je otvor uležištenja pogona pozicioniran bliže tlu (veća visinska razlika), za iste postavke visine sjedišta vozača, spušta se cjelokupno težište i poboljšava iskustvo bicikliranja. S druge strane ako je *BB drop* manji (manja visinska razlika), manja je i vjerojatnost da će vozač udariti pedalom o tlo pri pedaliranju u zavoju. Za takav *BB drop*, uz konstantni osovinski razmak, materijal i debljinu cijevi, proizlaze kraće donje cijevi stražnje vilice, kraća cijev pod sjedištem i kraća donja cijev primarnog trokuta. Sve to rezultira lakšim i čvršćim okvirom [43]. U ovome radu, za sva ti modela visinsko sniženje otvora je postavljeno identično.

## 4. FEA analiza u Ansysu

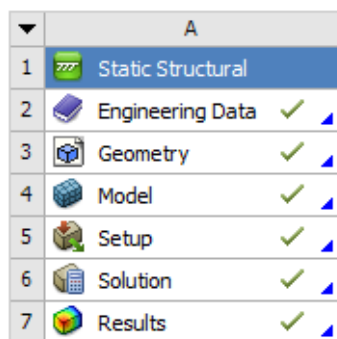
Prije prelaska na prikaz samog postupka analize i rezultata, potrebno se je ukratko osvrnuti na korišteni program. Isto tako potrebno je spomenuti samu statičku FEA analizu (engl. *Finite Element Analysis*), te korištene elemente. Važno je ispravno definirati rubne uvijete/ograničenja koji su postavljeni u više slučajeva različitih opterećenja.

### 4.1. Ansys Workbench 2023. R1 Student

Tvrtka Ansys razvija inženjerske softvere za simulaciju korištenja proizvoda tijekom njihovog životnog ciklusa. Mehanički softver za analizu pomoću konačnih elemenata koristi se za simulaciju raznih računalnih modela, elektronike ili strojnih komponenti za analizu čvrstoće, žilavosti, elastičnosti, raspodjele temperature, elektromagnetizma, protoka fluida i slično. *Ansys* program se uglavnom koristi za određivanje funkcionalnosti proizvoda s različitim specifikacijama, bez izrade testnih proizvoda ili provođenja testova sudara, a on ujedno posjeduje mogućnosti pred – procesora, procesora i post – procesora [44].

Većina *Ansys* simulacija izvodi se korištenjem *Ansys Workbench* sustava, koji je jedan od glavnih proizvoda istoimene tvrtke. Korisnici/konstruktori obično rastavljaju komplicirane strukture na male komponente od kojih se svaka zasebno modelira i testira pomoću FEA numeričkih simulacija [44].

U ovome radu provedena je statička analiza (engl. *static structural*) okvira bicikla koji je samo jedan od modula već spomenutog *Workbencha*. Slika 4.1 prikazuje osnovne kartice odabrane vrste analize koje je potrebno definirati za uspješnu provedbu i dobivanje ispravnih rezultata.



Slika 4.1 Kartice postavki statičke strukturne analize

#### **4.1.1. Kartica - Inženjerski podaci (engl. *Engineering data*)**

Postavke ovog dijela programa uglavnom su vezane za sam materijal. Moguće je odabrati različite vrste predefiniranih ili definirati vlastiti materijal po zahtjevima. Za svaki od odabranih materijala ručno su upisane vrijednosti mehaničkih svojstva definirane prema tablici 1. iz poglavlja 2.3.1. Osim tih osnovnih svojstava, program dozvoljava upis raznih drugih postavki materijala koje se primjenjuju u slučaju analiza drugih vrsta. Pa je stoga moguće definirati materijal s obzirom na njegova fizička svojstva, razne postavke linearne elastičnosti i hiper elastičnosti, postavke plastičnosti, svojstva puzanja, definiranje životnog vijeka materijala, viskoelastičnost i mnoge druge.

#### **4.1.2. Kartica - Geometrija (engl. *Geometry*)**

Sama geometrija konstrukcije izrađuje se u jednom od predefiniranih programa *Ansys* sustava za modeliranje. Uobičajeno su ponuđeni *Space Claim* i *Design Modeler*. Ulaskom u ove uređivače moguće je kreirati konstrukciju od početka do finalnog izgleda CAD modela.

*Space Claim*ova tehnologija 3D izravnog modeliranja prvenstveno se predočava kroz njegovo korisničko sučelje od četiri funkcije alata: povlačenje, premještanje, popunjavanje i kombiniranje [45].

S druge strane modeliranje je moguće pomoću *Design Modeler* potprograma. On pruža funkcije koje uključuju izradu detaljne geometrije, pojednostavljenje/modificiranje CAD geometrije i alate za izradu konceptualnog modela [46].

Ovaj rad baziran je na opciji kartice “geometrija“ koja omogućava uvođenje postojeće konstrukcije izrađene u nekom drugom programu. Postupak kojim je ovo ostvareno kreće od gotovog modela u *Autodesk Inventoru* gdje je on spremljen u obliku STEP datoteke. STEP datoteka je široko korišten oblik razmjene podataka opisan normom za enkodiranje ISO 10303, te može predstavljati 3D objekte u računalno potpomognutom dizajnu uz povezane informacije svih elemenata konstrukcije [47].

Zatim je potrebno napraviti uvođenje (engl. *import*) u *Ansys* pri čemu se učitava kompletan model. Nakon postavljanja, konstrukcijom je moguće dodatno manipulirati, te ju doraditi prema potrebama za računalne numeričke analize.

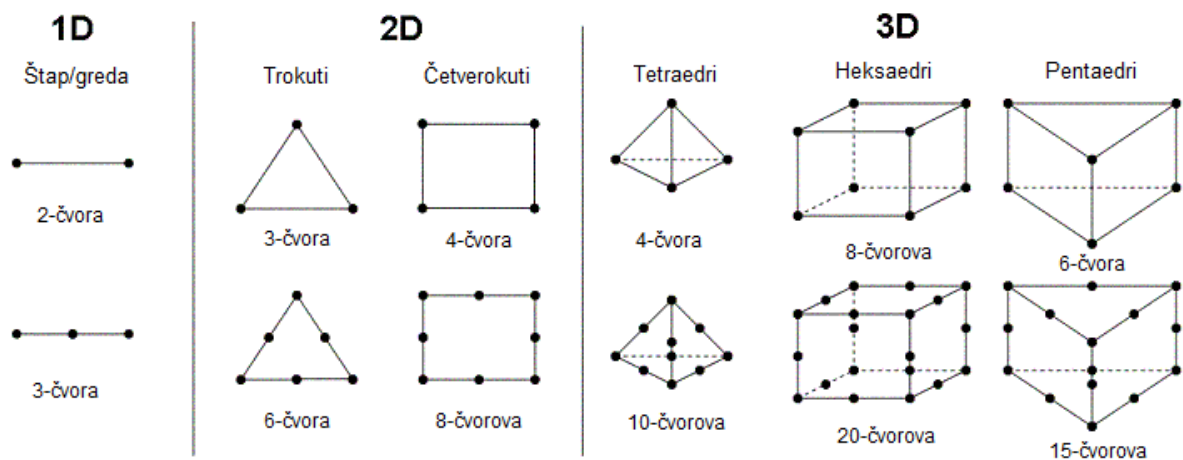
### 4.1.3. Kartica - Model

Otvaranjem ove kartice ulazi se u potprogram *Ansys Mechanical Enterprise*. Pri samom pokretanju učitava se generirani model kojemu na početku treba dodijeliti definirani materijal. Slijedi primjena automatski generirane mreže (engl. *mesh*) koju je moguće dodatno profiniti i urediti po potrebama. Ovaj postupak će u danjem dijelu rada biti detaljnije pojašnjen.

#### □ Konačni elementi i mreža modela

Ukratko, postoji nekoliko vrsta konačnih elemenata koji se prema geometriji dijele na 1D, 2D i 3D elemente. 1D su osnovni štapni elementi, te u najjednostavnijoj izvedbi imaju samo dva čvora. 2D predstavljaju površinske elemente čiji su osnovni oblici trokut ili četverokut, a najčešće se primjenjuju trokutasti elementi s 3 čvora i trokutasti elementi sa 6 čvorova. Oni mogu imati i mnoge nepravilne oblike. Budući da uzimaju u obzir naprezanje i deformaciju ravnine, često se koriste za rješavanje problema 2D elastičnosti. 3D elementi se obično koriste za diskretizaciju volumena. Izvedeni su iz 2D elemenata i koriste se kada složeni problem nije moguće pojednostaviti, te kada su potrebni precizniji rezultati. Na slici 4.2 prikazani su osnovni elementi u varijacijama s uključenim i bez dodatnih središnjih čvorova. Brojem ukupnog broja čvorova utječe se na rezultate tako da njihovim rastom povećava preciznost rezultata, ali i vrijeme procesuiranja [48].

Elementi višeg reda (engl. *quadratic*) za prednost imaju veći stupanj točnosti po elementu i bolje se prilagođavaju zadanoj geometriji. Elementi nižeg reda (engl. *linear*) su poželjniji u slučaju manjeg broja mreža i bržeg dobivanja rješenja. Osnovna razlika je u tome što *quadratic* elementi posjeduju dodatni međučvor, a *linear* elementi ih nemaju. [48]



Slika 4.2 Osnovni 1D, 2D i 3D elementi viših i nižih redova, tj. s i bez međučvorova [48]

Analiza kontinuiranog stvarnog objekta je teška zbog činjenice da sadrži beskonačno mnogo čestica što rezultira beskonačnim brojem stupnjeva slobode gibanja. Stoga se numeričke metode koriste za pojednostavljenje objekta diskretizacijom. Ona predstavlja postupak nastanka mreže u kojem se beskonačni broj stupnjeva slobode gibanja svodi na sustav s konačnim brojem stupnjeva [48].

Uvijek se teži postići balans između vremena rješavanja problema i kvalitete dobivenih rezultata. Stoga je općenito gledajući najbolje koristiti umjerenu veličinu mreže i njenih elemenata kako bi se smanjio utjecaj čekanja rezultata na životni ciklus proizvoda, na troškove izvođenja simulacija, te na vrijeme potrebno za izmjenu dizajna [48].

Važno je za napomenuti kako se mreža može korigirati na bitnijim dijelovima i tako postići određena kvaliteta rezultata. U radu je za sva tri modela korištena početna automatski generirana mreža koja je nestrukturirana, te se sastoji od tetraedarskih konačnih elemenata koji imaju međučvor.

Numeričkim metodama/proračunima se zapravo za svaki konačni element pretpostavlja rješenje diferencijalne jednačbe u obliku interpolacijskih funkcija i zavisnih varijabli u čvorovima [49].

Izvedbu proračuna moguće je prema [49] podijeliti u tri primarne faze. U sam proračun se kreće nakon definiranja diskretiziranog modela. Prvi korak je da se formira globalna matrica krutosti (**K**), te određivanje globalnih vektora pomaka i opterećenja. Kako je spomenuto da su u ovome radu korišteni tetraedri drugog reda, općenito izvod lokalne matrice krutosti za 3D elemente glasi: [49]

$$\mathbf{k} = \int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV_e \quad (5)$$

Iduća faza je rješavanje linearnog sustava od  $n$  jednačbi s  $n$  nepoznanica:

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} \quad (6)$$

Da bi se ovakav sustav mogao riješiti potrebno je napraviti inverziju matrice krutosti iz prijašnje formule i pomoću poznatog vektora sila ( $F$ ) odrediti pomake ( $U$ ) koji predstavljaju translacije i rotacije svih čvorova konstrukcije. Također se dobivaju nepoznate reakcije oslonaca [49].

Treća faza obuhvaća izračun deformacija, naprežanja, temperatura, te ostalih veličina koje se temelje na osnovi dobivenih pomaka čvorova [49]. Upravo na ovakvom postupku temelji se i računalna FEA analiza.

Po shvaćanju elemenata i principa izračuna potrebno je fizički u programu podesiti određene stavke za procesuiranje. Postavke simulacija zadaju su tako da je maksimalna veličina elementa za simulacije konceptualnog modela postavljena isključivo na 10 mm. Tranzicija u postavkama dimenzioniranja postavljena je na sporu opciju (engl. *slow*) što omogućava manju brzinu rasta između susjednih elemenata mreže u cjelokupnoj strukturi i daje bolje rezultate. Opcija zaglađivanja (engl. *smoothing*) podignuta je na visoku varijantu (engl. *high*) čime se pomiču elementi i čvorovi s obzirom na susjedne, u svrhu poboljšanja kvalitete mreže. Ove postavke prikazane su na slici 4.3 za program *Ansys*.

<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Quadratic
<input type="checkbox"/> Element Size	10, mm
<b>Sizing</b>	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	Default (2)
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Transition	Slow
Span Angle Center	Medium
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	1087, mm
Average Surface Area	1362,3 mm <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	2,7826e-004 mm
<b>Quality</b>	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
<input type="checkbox"/> Target Element Quality	Default (5,e-002)
Smoothing	High
Mesh Metric	None
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0,272
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No

Slika 4.3 Postavke mreže VHybridC modela na početne simulacije za odabir materijala.

#### 4.1.4. Kartice - Postavljanja, Rješenja i Rezultati (engl. *Setup, solution, results*)

Ove tri kartice služe za otvaranje *Ansys Mechanical Enterprisea* u kojem se prvo definiraju postavke ograničenja i opterećenja. Kategorija rješenja u tom potprogramu služi za odabir grafičkih i numeričkih prikaza željenih veličina. Rezultati se ispisuju u obliku izvještaja kojeg je nakon programskog procesuiranja moguće pregledati.

Za odabir grafičkog prikaza rezultata promatralo se je ekvivalentno naprezanje (engl. *equivalent stress*) prema *von Mises* teoriji/kriteriju, promatralo se je ekvivalentno elastično relativno produljenje/deformacija (engl. *equivalent elastic strain*), te ukupni pomaci (engl. *total deformation*).

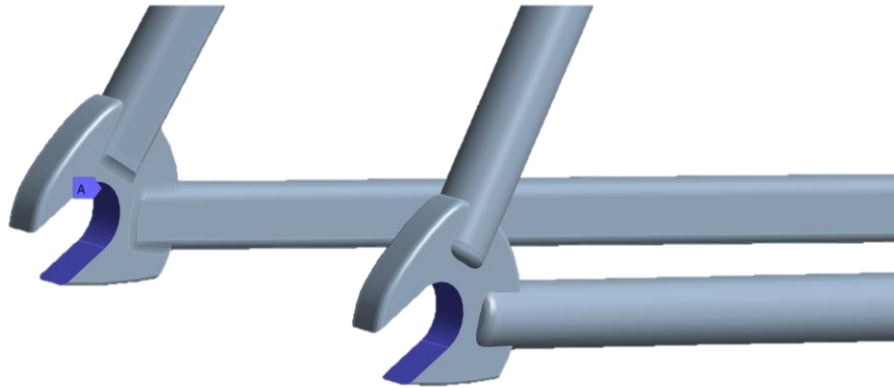
##### □ Ograničenja i proračun

Prije izvođenja simulacija izuzetno je bitno pravilno postaviti rubne uvijete za promatranu konstrukciju. Ti uvjeti pokušavaju osigurati da se određeni elementi FEA analize ponašaju u skladu sa stvarnim uvjetima u praksi, koji im predstavljaju određena ograničenja.

Pri statičkoj analizi uvijek je potrebno postaviti uklještenje (engl. *fixed support*) na određeni dio modela, pa su stoga i ovdje ograničeni svi pomaci i rotacije na stražnjim prihvatnicama s unutrašnje površine. Ovakva postavka ne pojavljuje se u stvarnosti jer je okvir bicikla zapravo oslonjen na dva kotača koja nisu fiksirana za pod, već dolazi do određene fleksibilnosti cjelokupnog bicikla tijekom vožnje.

Imaginarna prednja vilica povezana je krutom vezom (engl. *rigid*) s unutrašnjom površinom cijevi glave okvira bicikla. Ova pretpostavka proizišla je iz toga da se dodatna cijev upravljača umeće unutar cijevi glave okvira i tako sprečava deformacije i savijanja povećanjem ukupne krutosti i čvrstoće. Uležištenje vilice kreirano je kao udaljeni oslonac (engl. *remote displacement*) na koordinatama koje predstavljaju centar prednjeg kotača. Po  $x$  - osi oslonac je pozicioniran na 596 mm od sredine otvora uležištenja pogona. Po  $y$  - osi pomaknut je na visinu od 78 mm što predstavlja visinsku razliku *BB drop*. Referentnoj geometriji cijevi glave ograničeni su pomaci u smjerovima  $y$  i  $z$ , te kutovi zakreta oko  $x$  i  $y$  osi.

Na ovaj način pokušano je što više približiti se eksploatacijskim uvjetima okvira u praksi. Na slici 4.4 prikazana je izvedba uklještenja stražnjih prihvatnica VHybrid2 bicikla, dok slika 4.5 prikazuje vezu okvira i udaljenog prednjeg oslonca istog modela. Na svim FEA analizama rubni uvjeti su postavljeni identično.



Slika 4.4 Prikaz stražnjeg rubnog uvjeta na prihvatnice u obliku nepomičnog oslonca/uklještenja



Slika 4.5 Prikaz prednjeg udaljenog oslonca kruto povezanog s modelom VHybrid2

#### □ Opterećenja i proračun

Za iduće postavke situacija opterećenja na okvir bicikla korištena je vlastita intuicija, te se željelo što bolje simulirati stvarne uvijete kod kojih djeluju sile. Pri takvome razmišljanju od velike koristi bila je i literatura, a najviše toga preuzeto je i dorađeno prema [50, 51, 52, 53, 54]. U konačnici dobila su se četiri slučaja:

- Statičko sjedenje na biciklu

Prvi slučaj opterećenja simulira vozača koji sjedi na biciklu u mirnoj vožnji. Sjedište je opterećeno težinom biciklista što je zadano preko udaljene sile (engl. *remote force*) koja djeluje na unutrašnju stijenku cijevi ispod sjedišta. Koordinate hvatišta ove sile su po  $x$  - osi -160 mm i po  $y$  - osi 600 mm gledano od središta otvora za uležištenje pogona.



Ovo ishodište vrijedi za sve slučajeve. Kako pri vožnji ne dolazi do pedaliranja, noge vozača su statički naslonjene na pedale koje su u horizontalnom položaju. Za provedbu analize korištena je prosječna masa vozača od 100 kg. Jednostavnom relacijom:

$$G_V = 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 100 \text{ kg} = 981 \text{ N} \quad (7)$$

određena je težina kojom vozač djeluje na bicikl. U statičkom položaju procijenjeno je da se na sjedište primjenjuje 85% ukupne težine dok na volanu djeluje 10% preostale težine biciklista, a na pedale otpada 5%. To znači kako se cijev ispod sjedišta opterećuje sa silom od 833,9 N koja djeluje vertikalno prema dolje u smjeru  $y$  - osi, a 5% djeluje vertikalno prema dolje što simulira silu od 49 N koja predstavlja odmaranje nogu. Preostalih 10% koji čine 98,1 N ukupne tlačne sile, djeluju na volanu, tj. neposredno na cijev glave okvira bicikla s obje strane, pod istim kutom kao cijev glave okvira prema tlu. Pozicija samog hvatišta sila na upravljaču je prema koordinatama po  $x$  - osi na 415 mm,  $y$  - osi na 620 mm, te po  $z$  - osi 260 mm, odnosno -260 mm s druge strane. Ove koordinate mjerene su od središta uležištenja pogona i vrijede za sve slučajeve s opterećenjem na volanu. Ovakva udaljena sila povezana je s okvirom preko krute veze.

- Stajanje na pedalama

Situacija u kojoj vozač bicikla stoji na pedalama i direktno djeluje na okvir preko uležištenja, postavka je upravo za drugi slučaj. Uz navedeno, biciklist se također drži rukama za upravljač, te ga u tom nagnutom položaju dodatno tlači. Kao i u prethodnoj situaciji vozač ima masu od 100 kg. Odlučeno je kako će na otvor uležištenja pogona djelovati 80% sveukupne mase, a 20% na upravljaču. Stoga sila od 785 N djeluje vertikalno prema dolje ( $y$  - os), a sile u iznosima po 98 N sa svake strane fiktivnog upravljača, paralelno s cijevi glave okvira (pod istim kutem).

- Naglo kočenje prednjim i stražnjim kočnicama

Uslijed naglog kočenja dolazi do sila koje se javljaju na okviru. Udaljena sila djeluje na fiktivnu vilicu iz osovine prednjeg kotača u iznosu od 400 N. Ona preko krute vilice djeluje na cijev glave okvira, a njeno ishodište je na istim koordinatama kao i udaljeni oslonac prethodno spomenut. Usmjerena je u negativnom smjeru  $x$  - osi. Iduća je sila

koja se u stvarnosti javlja na stražnjoj osovini tj. prihvatnicama i djeluje u negativnom smjeru  $x$  - osi. Ona u ovoj simulaciji nema utjecaja zbog potrebe za stavljanjem fiksnog oslonca na stražnje prihvatnice, te je stoga zanemarena. Na pedalama se pretpostavlja da djeluje 15% ukupne mase, što predstavlja silu od 147 N u negativnom smjeru  $y$  - osi. Cijev ispod sjedišta s unutrašnje je strane opterećena vertikalnom silom prema tlu u iznosu od 687 N. Posljednjih 15% otpada na sile na upravljaču koje su u ovoj situaciji pod većim kutom, podijeljene na dvije komponente. Po  $y$  - osi djeluje 35 N prema dolje, a po  $x$  - osi djeluje komponenta sile od 65 N u pozitivnom smjeru.

- Pad bicikla s visine

Za ovakav specifičan slučaj odlučeno je kako će se pretpostaviti pad bicikla i vozača s određene visine na nižu razinu. Bicikl ima fiktivnu suspenzijsku prednju vilicu koja se ponaša kao amortizer, te ima maksimalni hod od 0,05 m.

Ovakav događaj u praksi se često događa prilikom prelaska s nogostupa na kolnik koji nema prijelaz pod određenim kutom već dolazi do direktnog pada. Ukupne sile koje se javljaju pri takvom slučaju mogu se analitički odrediti prema sljedećim izrazima. Na početku prema [51] potrebno je definirati visinu  $s$  koje dolazi do pada bicikla. Ovdje je korišteno da je:

$$h = 0,2 \text{ m} \quad (8)$$

Iz [51] slijedi formula za udarnu brzinu ( $v$ ) bicikla preko kinematičke relacije za pravocrtno gibanje:

$$v = \sqrt{(2 \cdot g \cdot h) - u^2} \quad (9)$$

gdje su:

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$u = 0 \text{ m/s}$$

Kako je inicijalna brzina bicikla ( $u$ ) u smjeru tla prije pada jednaka nuli, slijedi rezultat za udarnu brzinu:

$$v = 1,98 \text{ m/s} \quad (10)$$

Idući korak je određivanje udarne sile u amortizeru preko poznate udarne brzine i relacije rad - energija. Takva relacija riječima se može izreći da je promjena kinetičke energije promatranog objekta jednaka radu izvršenom nad objektom [51]. Formulacija glasi:

$$\frac{1}{2}m(v^2 - u^2) = F_{ap} \cdot d \quad (11)$$

gdje je:

$$m = 100 \text{ kg}$$

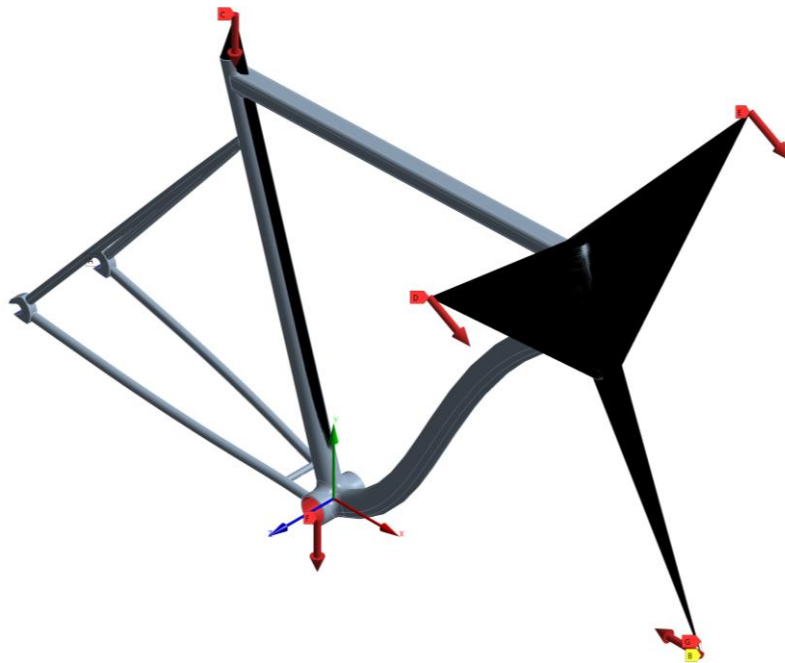
$$d = 0.05 \text{ m}$$

U konačnici se dobiva iznos udarne sile amortizera pri padu:

$$F_{ap} = 3920,4 \text{ N} \quad (12)$$

Kako bi se simulirao ovaj slučaj, postavljeno je da sila amortizera pri padu djeluje na unutrašnjost cijevi za uležištenje pogona. Ovime se je htjelo postići stvarno opterećenje koje se javlja uslijed težine vozača mase 100 kg pri padu s visine 0,2 m, a da pri tome vozač stoji i ima noge na pedalama u horizontalnom položaju. Sila djeluje vertikalno prema dolje u cjelokupnom iznosu.

Prikaz svih opterećenja koja djeluju kroz slučajeve na okvir vidljiv je na slici 4.6.



Slika 4.6 Sva opterećenja kroz slučajeve, prikazana na modelu VHybrid1

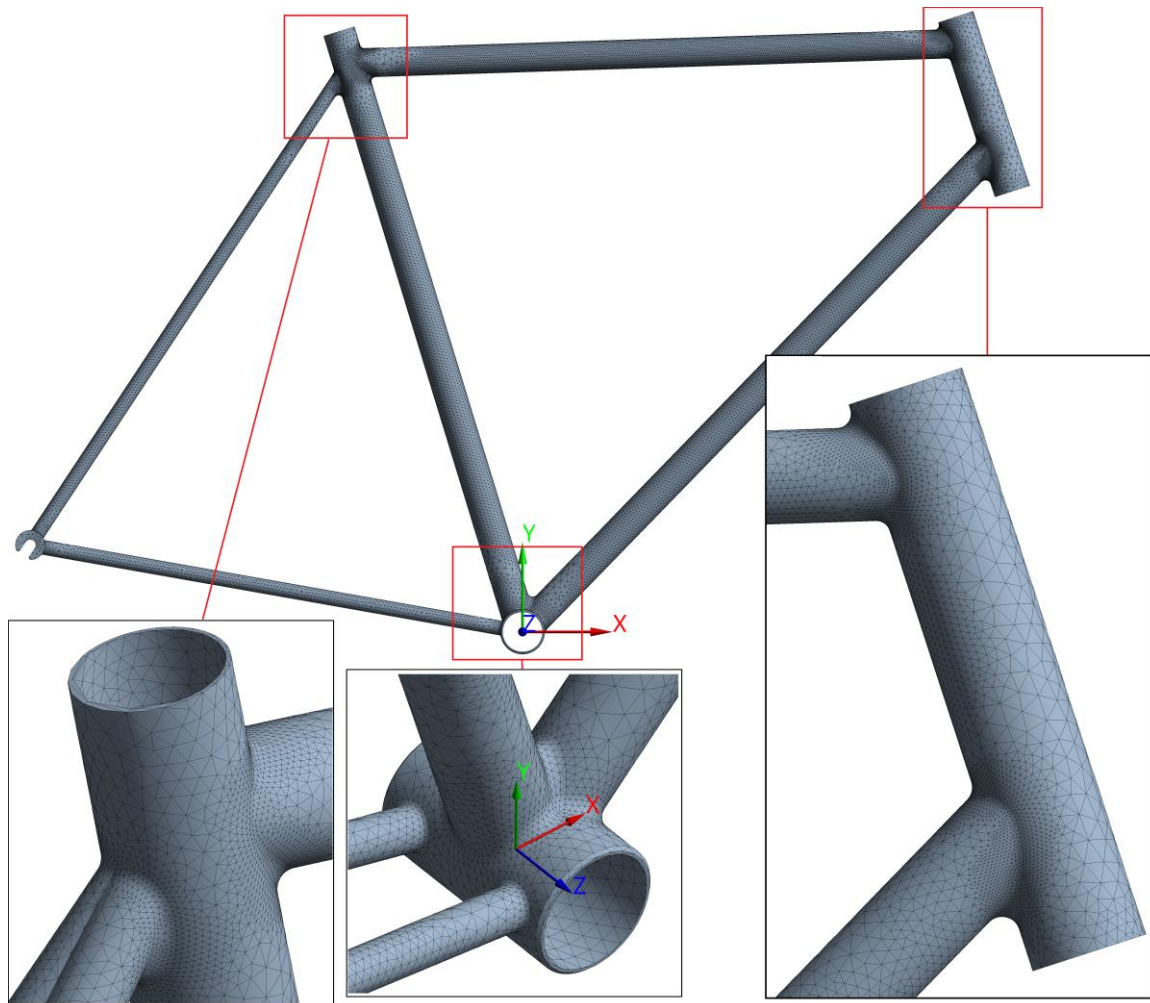
## 5. Rezultati i diskusija

Početna analiza zamišljena je da se četiri slučaja opterećenja provjere na VHybridC modelu s izmjenom svakog od tri materijala. To znači da je na navedenom okviru, za materijale aluminijski, titana i čelika, napravljena simulacija svih situacija opterećenja i ograničenja prethodno nabrojanih u poglavlju 4.1.4. Nakon dobivenih rezultata statičkih linearnih analiza, ukratko je razmotren najbolji materijal s obzirom na naprezanja, deformacije i ukupne pomake. Odabirom zadovoljavajućeg materijala, nad modelima VHybrid1 i VHybrid2 provode se kvalitetnije analize po pitanju preciznosti, u svrhu razumijevanja utjecaja pojedinih oblika elemenata i cjelokupne geometrije. Temeljem svih podataka, zaključno se odabire model veće čvrstoće s obzirom na naprezanja.

### 5.1. FEA simulacije VHybridC okvira

Prve analize modela VHybridC provedene su korištenjem aluminijski kao osnovnog materijala konstrukcije. Mreža je izvedena automatski, prema opisu postavka za početne simulacije, uz dodatak opcije dimenzioniranja površine (engl. *face sizing*) čime se je dodatno profinila mreža elemenata na spojnim mjestima cijevi. Ta mjesta simuliranih zavara koriste elemente veličine 2,5 mm kao što se može grafički prikazati preko slike 5.1. Postavka veličine zanemarivanja nepotrebnih zaobljenja i ostalih nefunkcionalnih značajki (engl. *defeature size*) postavljena je na 0,1 mm pri svakom dimenzioniranju površina spojeva pojedinih cijevi.

Zbog većeg broja potrebnih simulacija, u FEA analizama za odabir adekvatnog materijala VHybridC okvira, nije se radila konvergencija rezultata zbog ograničenosti na računalne resurse. Samo rezultati dobiveni uz pomoć početne mreže uzeti su u obzir.



*Slika 5.1 Izgled mreže za FEA simulacije VHybridC okvira s obzirom na materijale*

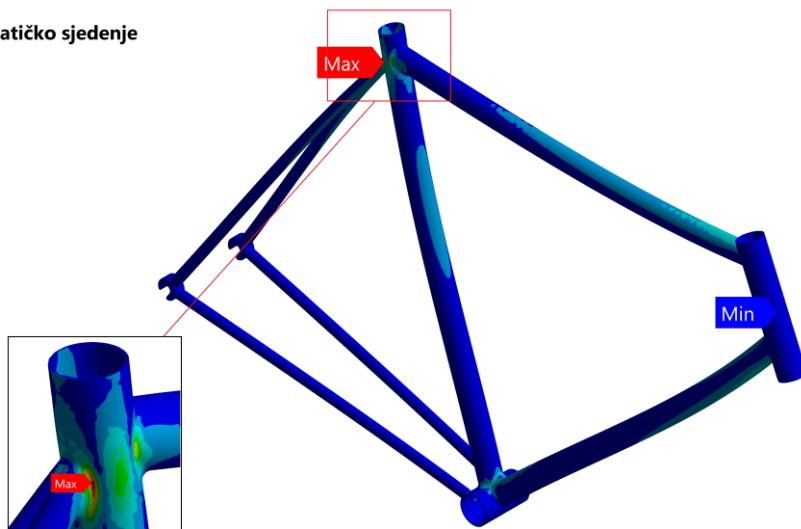
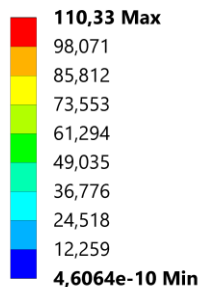
### **5.1.1. Prikaz rezultata za slučaj statičkog sjedenja VHybridC okvira**

U nastavku je prikaz dobivenih grafičkih rezultata za VHybridC od Al 6061-T6. Slika 5.2 ilustrira naprezanja dok slika 5.3 relativno produljenje/deformacije. Slika 5.4 prikazuje ukupne pomake cjelokupne konstrukcije. Za svaku analizu uključeno je prikazivanje pozicija minimalnih i maksimalnih vrijednosti rezultata na modelu. Grafička vizualizacija FEA analiza modela postavljena je na povećanje od 0,5 puta. Ovime se omogućava bolja vidljivost pomaka pojedinih elemenata okvira bicikla pri izvijanju, a da se pritom ne utječe na numeričke rezultate.

**O: VHybridC-Al 6061-T6- statičko sjedenje**

Ekvivalentno naprezanje

Mjerna jedinica: MPa



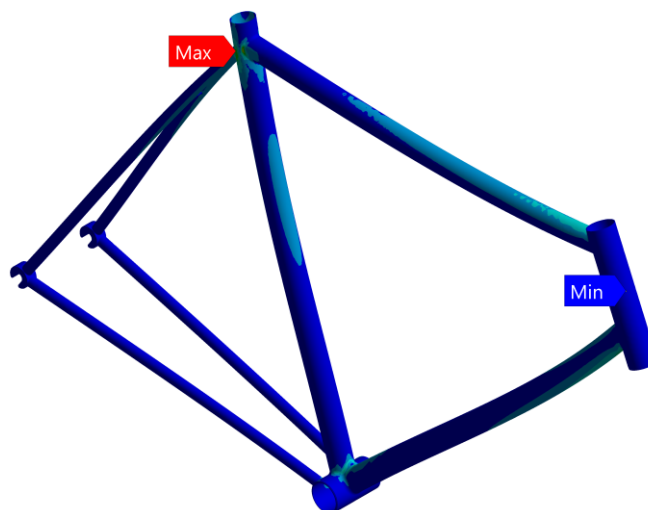
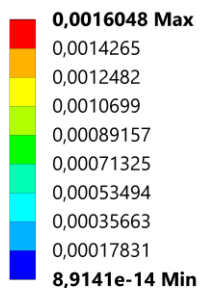
*Slika 5.2 Rezultati ekvivalentnih naprezanja kod FEA VHybridC modela za slučaj statičkog sjedenja korištenjem Al 6061-T6*

Na slici 5.2 izdvojen je uvećani segment koji prikazuje mjesto na kojem je najveće naprezanje i deformacija. Ta pozicija je upravo simulirani zavar u kojem se gornje cijevi stražnje vilice spajaju s cijevi ispod sjedišta. Na slici 5.3 prikazane su već spomenute deformacije okvira, te mjesta na kojima se one javljaju.

**O: VHybridC-Al 6061-T6- statičko sjedenje**

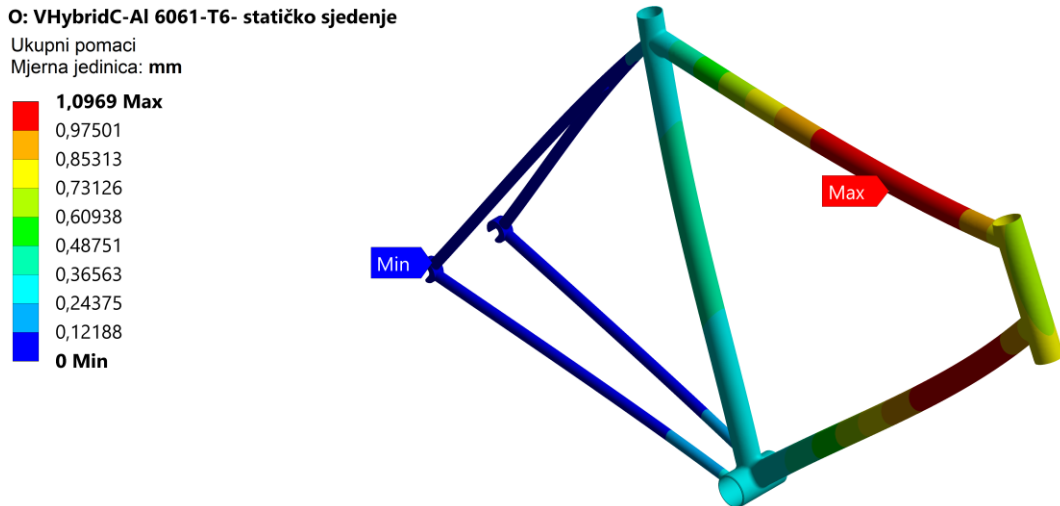
Ekvivalentno produljenje/deformacija

Mjerna jedinica: mm/mm



*Slika 5.3 FEA rezultati ekvivalentnih deformacija VHybridC okvira od Al 6061-T6 za slučaj statičkog sjedenja*

Idući rezultat FEA analiza je prikaz ukupnih pomaka VHybridC modela pri slučaju statičkog sjedenja u vožnji za Al 6061-T6. Može se vidjeti kako pri takvom općenitom opterećenju dolazi do malih pomaka dok se najveći od njih javlja u gornjoj cijevi prednjeg trokuta (Slika 5.4). Donja cijev isto ima ponešto veći pomak, ali ni on nije kritičan.



*Slika 5.4 FEA rezultati ukupnih pomaka VHybridC okvira od Al 6061-T6 za slučaj statičkog sjedenja*

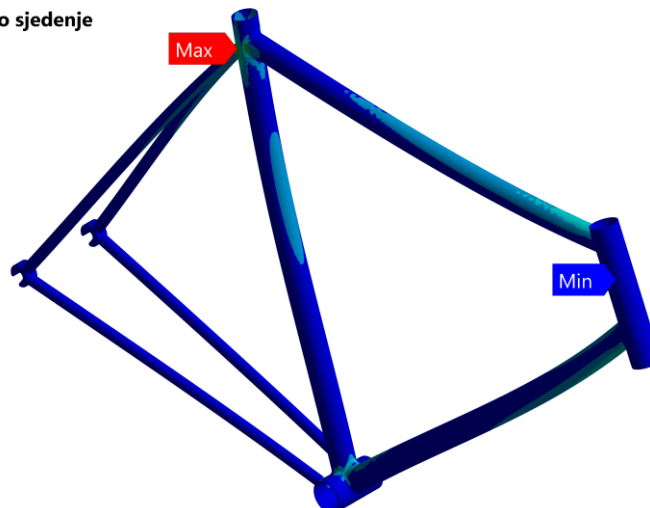
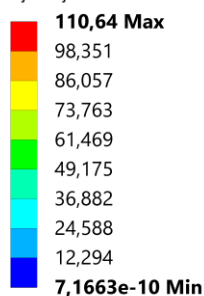
Idući materijal koji će se razmatrati je titan legura. Za ove simulacije postavljeni su isti rubni uvjeti i opterećenja kao za prethodni materijal. Mreža je identična za sve slučajeve ispitivanja. Na sljedećim slikama 5.5, 5.6, 5.7, redom su prikazane FEA analize s dobivenim grafičkim i numeričkim rezultatima za VHybridC okvir napravljen od Ti-3Al-2,5V.

Slika 5.5 daje grafičku vizualizaciju ekvivalentnog naprežanja. Može se zaključiti da usporedbom s aluminijem dolazi do neznatnog povećanja od 0,31 MPa što je i dalje ispod granice razvlačenja za odabranu leguru titana.

**P: VHybridC-Ti-3Al-2,5V- statičko sjedenje**

Ekvivalentno naprezanje

Mjerna jedinica: MPa



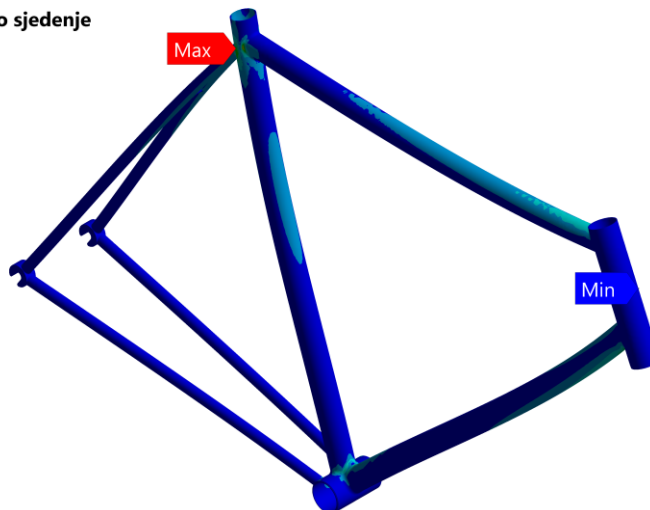
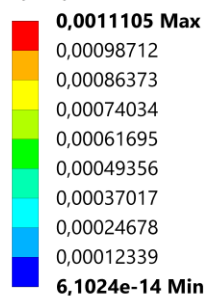
*Slika 5.5 FEA rezultati ekvivalentnih naprezanja VHybridC okvira od Ti-3Al-2,5V za slučaj statičkog sjedenja*

Ekvivalentna deformacija za titan na slici 5.6 prikazuje nešto manju vrijednost od aluminijsa, a isto se kao i najveće naprezanje pojavljuje na istom mjestu što je i očekivano.

**P: VHybridC-Ti-3Al-2,5V- statičko sjedenje**

Ekvivalentno produženje/deformacija

Mjerna jedinica: mm/mm



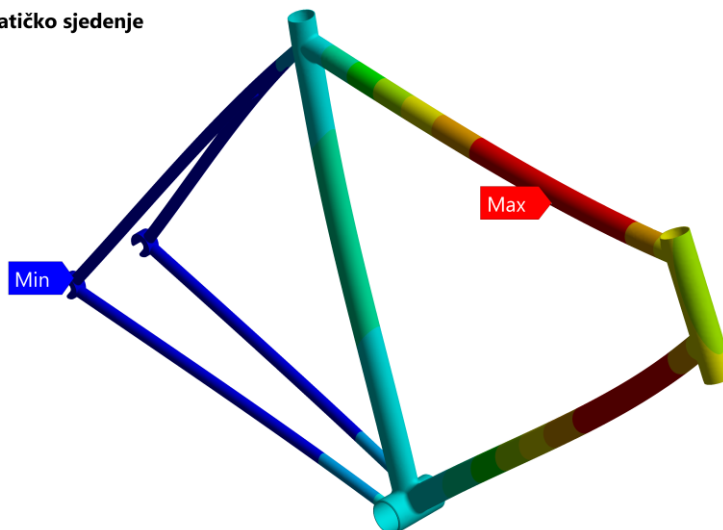
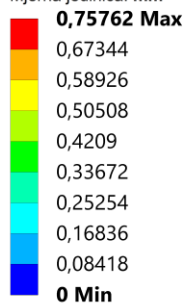
*Slika 5.6 FEA rezultati ekvivalentnih deformacija VHybridC okvira od Ti-3Al-2,5V za slučaj statičkog sjedenja*

Pomaci su i dalje najveći na prednjem dijelu gornje cijevi, a po iznosu su manji od pomaka uslijed korištenja aluminijsa (Slika 5.7). Kao što je i očekivano, najmanji pomaci javljaju se kod svih slučajeva u stražnjim privatnicama, zbog postavke nepomičnog oslonca.



**P: VHybridC-Ti-3Al-2,5V- statičko sjedenje**

Ukupni pomaci  
Mjerna jedinica: mm

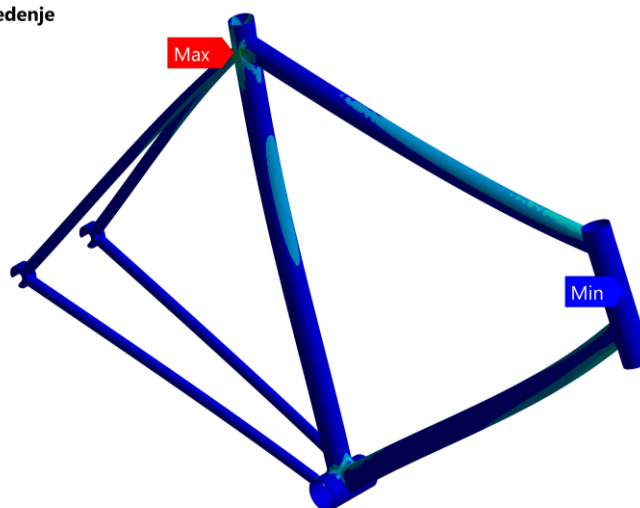
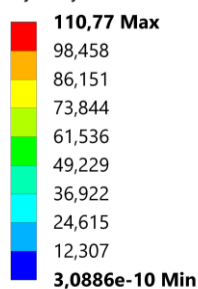


*Slika 5.7 FEA rezultati ukupnih pomaka VHybridC okvira od Ti-3Al-2,5V za slučaj statičkog sjedenja*

Kao zadnji materijal prokomentirat će se analize AISI 4130 čelika za slučaj statičkog sjedenja. Prema slikama 5.8, 5.9, 5.10 može se reći kako se sveukupni rezultati nisu puno izmijenili. Najveća razlika može se uočiti u ekvivalentnom produljenju koje je podosta manje nego pri korištenju preostala dva materijala. Ukupni pomaci također su duplo manji, ali se pojavljuju na približno istim mjestima.

**K: VHybridC-AISI 4130- statičko sjedenje**

Ekvivalentno naprezanje  
Mjerna jedinica: MPa

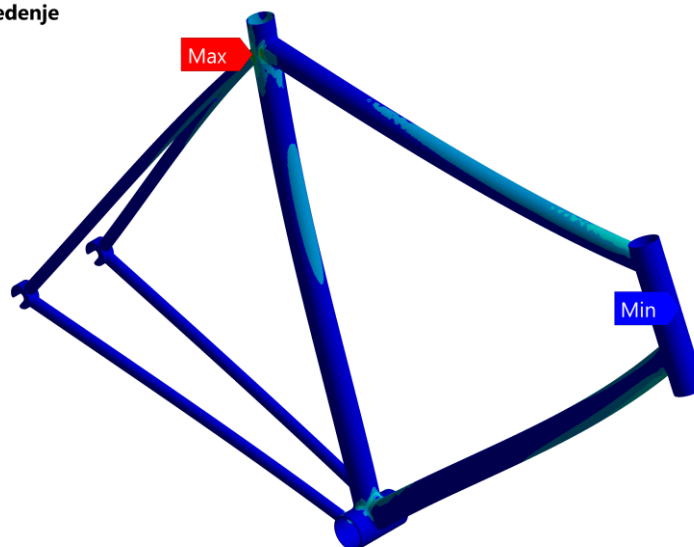
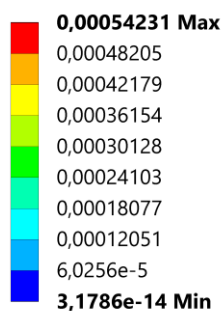


*Slika 5.8 FEA rezultati ekvivalentnih naprezanja VHybridC okvira od AISI 4130 za slučaj statičkog sjedenja*

**K: VHybridC-AISI 4130- statičko sjedenje**

Ekvivalentno produljenje/deformacija

Mjerna jedinica: mm/mm

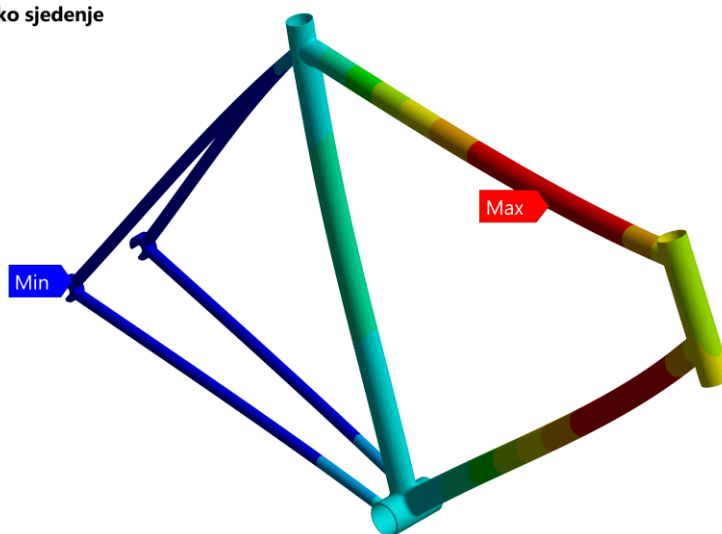
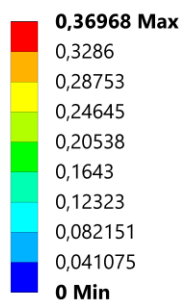


*Slika 5.9 FEA rezultati ekvivalentnih deformacija VHybridC okvira od AISI 4130 za slučaj statičkog sjedenja*

**K: VHybridC-AISI 4130- statičko sjedenje**

Ukupni pomaci

Mjerna jedinica: mm



*Slika 5.10 FEA rezultati ukupnih pomaka VHybridC okvira od AISI 4130 za slučaj statičkog sjedenja*

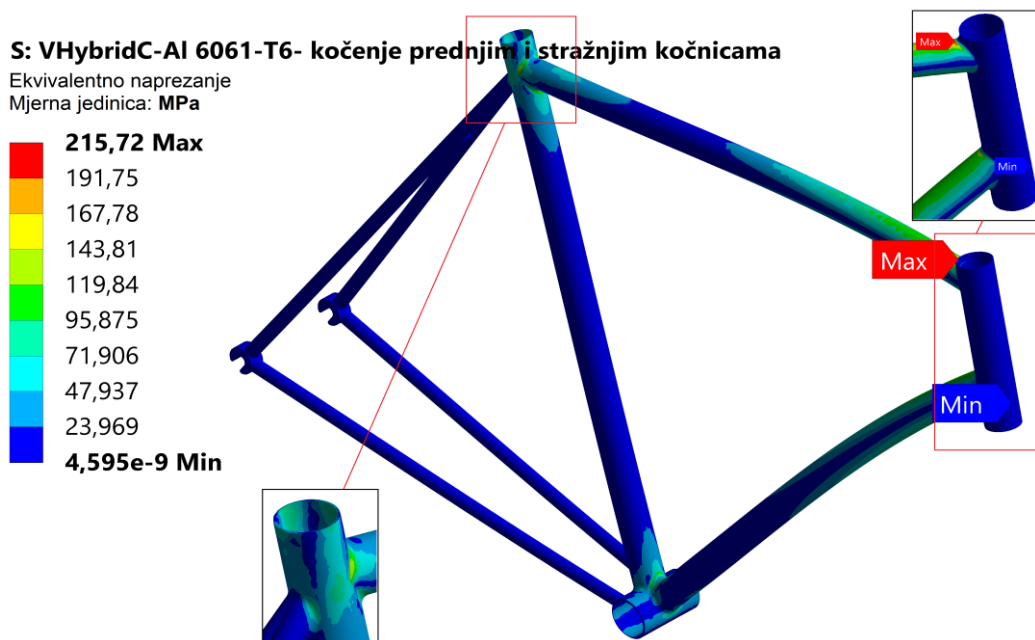
Ostali slučajevi opterećenja s rezultatima priloženi su u obliku grafičke vizualizacije na kraju rada. Svi rezultati će biti u nastavku prikazani u obliku tablice 3. i kratko prokomentirani.

Tablica 3. Rezultati FEA analiza VHybridC okvira za sve slučajeve i materijale

Vrsta opterećenja	Materijal	Max. pomaci – $u_{max}$ [mm]	Max. produljenje – $\varepsilon_{max}$ [mm/mm]	Max. naprezanje – $\sigma_{max}$ [MPa]
Statičko sjedenje	Al 6061-T6	1,097	0,0016	110,33
	Ti-3Al-2,5V	0,757	0,0011	110,64
	AISI 4130	0,369	0,0005	110,77
Stajanje na pedalama	Al 6061-T6	1,698	0,0014	97,04
	Ti-3Al-2,5V	1,173	0,0009	97,26
	AISI 4130	0,572	0,0004	97,35
Naglo kočenje	Al 6061-T6	4,740	0,0031	215,72
	Ti-3Al-2,5V	3,274	0,0021	215,42
	AISI 4130	1,598	0,0010	215,36
Pad s visine	Al 6061-T6	4,163	0,0071	<u>488,88</u>
	Ti-3Al-2,5V	2,875	0,0049	490,09
	AISI 4130	1,403	0,0024	<u>490,58</u>

### 5.1.2. Utjecaj materijala na okvir bicikla

Prema tablici 5. dobivenoj iz priloženih rezultata simulacija moguće je pomno pratiti materijale, te njihov utjecaj na strukturu pod različitim opterećenjima. Uspoređujući maksimalna naprezanja, moguće je zaključiti da se za sve materijale pri određenom slučaju opterećenja, ona puno ne mijenjaju. Mjesto najveće koncentracije naprezanja predstavlja spoj gornjih cijevi stražnje vilice i cijevi ispod sjedišta, osim u slučaju naglog kočenja u kojem se najveće naprezanje javlja u gornjoj cijevi pri spoju s cijevi glave okvira (Slika 5.11). Provjerom maksimalnih naprezanja prema granici razvlačenja pojedinih materijala (Tablica 1.), utvrđeno je da samo titanska konstrukcija zadovoljava sve slučajeve naprezanja. To se može vidjeti iz podatka na kojima je maksimalno naprezanje za titan u kritičnom slučaju pada s visine ispod granice razvlačenja, što ne dovodi konstrukciju u plastično područje već ona i dalje ostaje u linearnom elastičnom području. Za aluminij i čelik pri padu s visine od 0,2 m vrijednost maksimalnog naprezanja prelazi granicu razvlačenja, te konstrukcija ulazi u plastično područje u kojem se javljaju trajne deformacije. Vrijednosti ova dva kritična naprezanja su podcrtane u tablici 3.



Slika 5.11 FEA analiza naglog kočenja VHybridC okvira s prikazom kritičnih mjesta naprezanja

Kako je u praksi uobičajeno koristiti faktore sigurnosti, na ovom primjeru mogao bi se primijeniti faktor 2. Ovaj faktor je izuzetno bitan je o njemu ovise i ljudski životi, to jest ljudi koji će koristiti bicikl za vožnju. Za primijenjeni faktor sigurnosti moguće je dobiti dopušteno naprezanje pomoću kojeg se proračunska naprezanja provjeravaju. Dopušteno naprezanje mora biti veće od proračunskog, a moguće ga je dobiti preko relacije:

$$\sigma_{dop} = \frac{\sigma_{0,2}}{s} \quad (13)$$

Ako bi se primijenio spomenuti faktor sigurnosti na odabrane materijale, maksimalna naprezanja bi tada morala biti manja od 138 MPa za aluminij, 230 MPa za čelik, te 250 MPa za titan. Prema ovakvim vrijednostima niti jedan materijal FEA analizama ne bi zadovoljavao sve slučajeve opterećenja na konstrukciju. Aluminij bi zadovoljavao samo naprezanja uslijed statičkog sjedenja i stajanja na pedalama, dok bi čelik uz to zadovoljavao i maksimalna naprezanja za slučaj naglog kočenja.

Za relativno produljenje može se ukratko reći da je to deformacija s obzirom na početnu duljinu. Ovaj rad bavi se tematikom linearnog područja rastezanja, gdje nakon prestanka djelovanja sile ne dolazi do trajnog produljenja/deformacije već se materijal vraća u početno stanje. Maksimalna deformacija javlja se na mjestima pojave maksimalnog naprezanja i ukoliko to naprezanje prelazi granicu razvlačenja, dolazi do trajne deformacije. Ako bi se u ovome radu

zanemario faktor sigurnosti, prema osnovnim simulacijama slučajeva opterećenja, aluminij i čelik bi pri padu s visine imali trajnu deformaciju u iznosima 0,0071 i 0,0024.

Za kraj mogu se spomenuti vrijednosti pomaka koji su očekivani, to jest, da su oni najveći za sve slučajeve pri korištenju aluminija, a najmanji pri korištenju čelika.

U konačnici Ti-3Al-2,5V legura se nameće kao najbolji izbor za daljnje simulacije preostala dva okvira. Iako nije idealan odabir zbog već spomenute ne dovoljne čvrstoće pri korištenju određenog faktora sigurnosti, te zbog svoje visoke cijene, ipak će biti razmatran kao najbolji materijal od tri analizirana. Prema maksimalnim pomacima i deformacijama svrstava se u „zlatnu sredinu“, a ponajviše je odabran zbog najvećeg zadovoljavanja u pogledu maksimalnih naprezanja, promatranih s i bez faktora sigurnosti.

Većim računalnim resursima moguće bi bilo dobiti preciznije rezultate, pa bi stoga možda aluminijska i čelična legura zadovoljavale kritični slučaj opterećenja, ali bi najvjerojatnije opet podbacile u slučaju korištenja faktora sigurnosti. Bitno bi bilo provjeriti i utjecaje debljina stijenki na naprezanja svakog od materijala, ali ovo neka zasad ostane samo kao pretpostavka i mogućnost za buduća ispitivanja.

## **5.2. FEA simulacije VHybrid1 i VHybrid2 okvira**

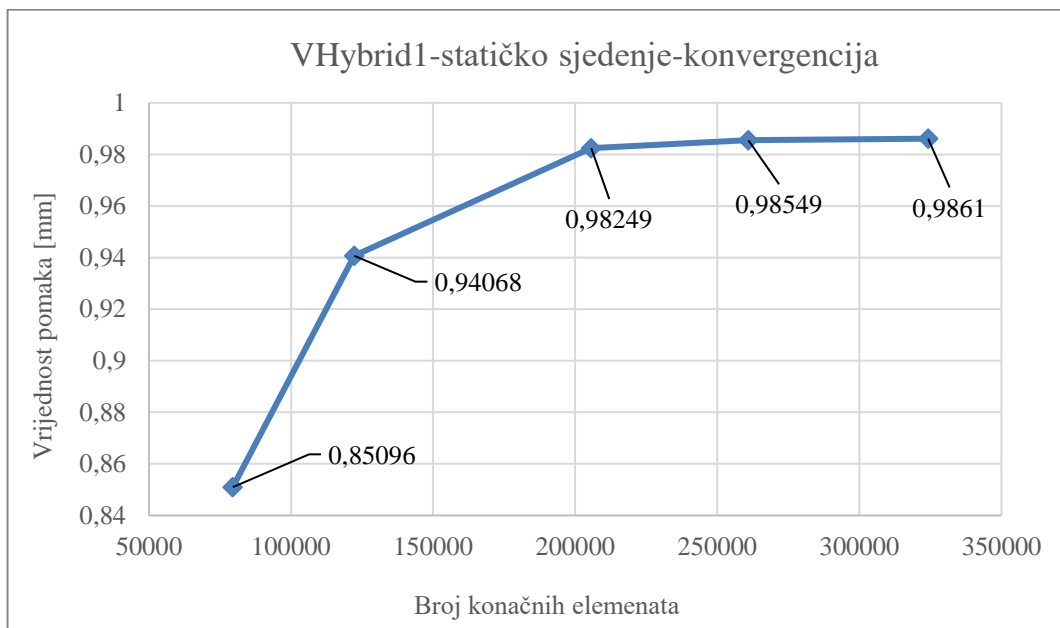
VHybrid1 i VHybrid2 okviri provjeravat će se na iste uvijete kao i konceptualni model. Razlika u simulacijama je ta, da se za osnovi materijal postavlja samo titanska legura. Ovo je odlučeno na temelju rezultata prijašnjeg poglavlja, te zbog toga što su svi modeli geometrijski isti s obzirom na debljinu stijenki i udaljenosti između elemenata. Razlika između okvira je i u obliku pojedinih cijevi kojima se željelo ispitati određeno poboljšanje/pogoršanje rezultata.

### **5.2.1. Konvergencija i rezultati VHybrid1 i VHybrid2**

Dimenzijama su ovi okviri bazirani na konceptualnom, ali je došlo do izmjene pojedinih oblika i poprečnih presjeka kao što je to opisano u poglavlju 3.2. i poglavlju 3.3.

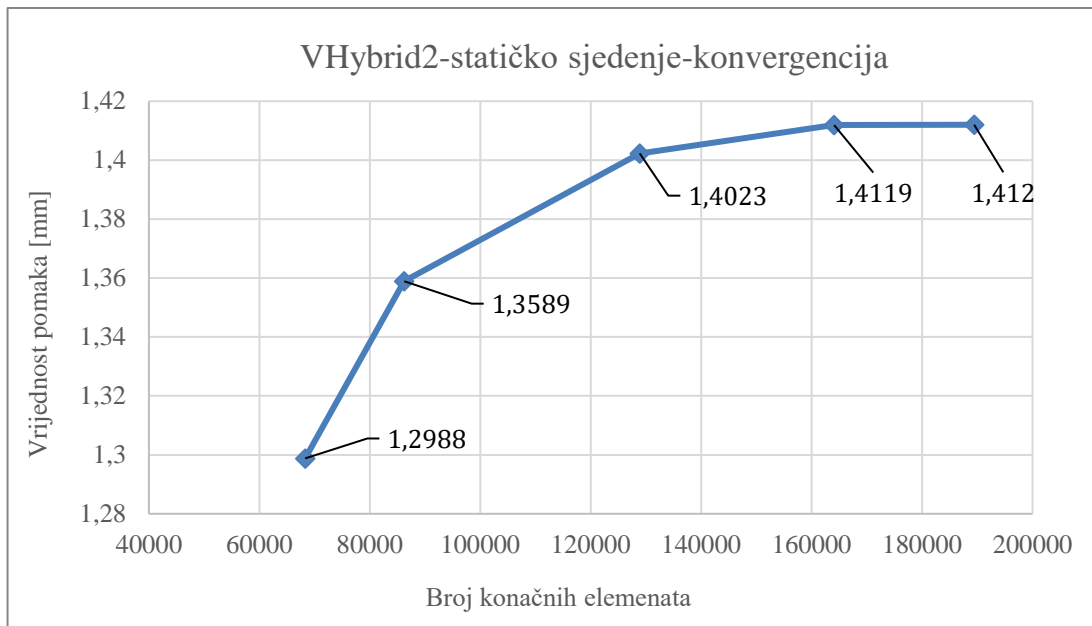
Mreža okvira VHybrid1 generirana je automatski, nestrukturirano. Veličina elemenata postavljena je za početak na 10 mm, ali će se u ovom slučaju pokušati izvesti konvergencija rezultata preko povećanja broja elemenata. Ovaj postupak koristi se za dobivanje preciznijih rezultata uz korištenje više računalnih resursa. Kvaliteta mreže redom je mijenjana samo preko

veličine konačnih elemenata (engl. *element size*), a te vrijednosti su 10 mm, 7 mm, 5 mm, 4 mm i 3 mm. Izvođenjem takvih iterativnih postupaka u svrhu konvergencije rezultata ukupnih pomaka prikazan je upravo na slici 5.12. Također se može vidjeti i broj ukupnih elemenata, pa se dolazi do zaključka da između treće, četvrte i pete kvalitete mreže nema prevelike razlike u veličini pomaka, to jest, postigla se je konvergencija rezultata, Upravo zbog ovakvog enormnog broja elemenata, FEA simulacije ostalih slučajeva opterećenja bit će razmatrane s mrežom visoke kvalitete kao što je ona u četvrtoj iteraciji za statičko sjedenje.



Slika 5.12 Grafikon konvergencije vrijednosti pomaka VHybrid1 okvira pri statičkom sjedenju

Konvergencija mreže VHybrid2 okvira strukturirana je na sličan način, samo što je došlo do male promjene u promjeni veličina elemenata pri iteracijama. Vrijednosti veličine elemenata kod ove konvergencije su 13 mm, 10 mm, 7 mm, 6 mm i 5,5 mm. Razlog tome je što je već pri nešto manjem broju konačnih elemenata došlo do konvergencije rezultata ukupnih pomaka, pa se radi ograničenosti računalnih resursa zaustavilo daljnje nepotrebno poboljšavanje mreže (Slika 5.13). Ukupno dobiveni podaci svih slučajeva opterećenja, za oba modela, uz konvergiranu mrežu prikazani su u tablici 4.



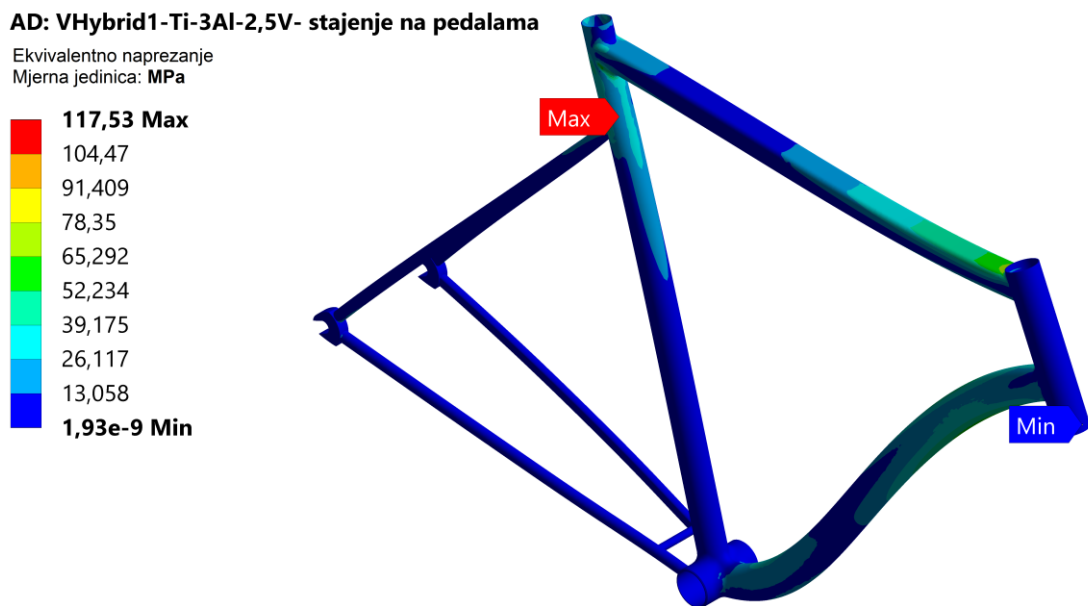
Slika 5.13 Grafikon konvergencije vrijednosti pomaka VHybrid2 okvira pri statičkom sjedenju

Tablica 4. Rezultati FEA analiza svih slučajeva opterećenja za VHybrid1 i VHybrid2 okvir od titana

Ti-3Al-2,5V	Statičko sjedenje		Stajanje na pedalama		Naglo kočenje		Pad s visine	
	VHybrid1	VHybrid2	VHybrid1	VHybrid2	VHybrid1	VHybrid2	VHybrid1	VHybrid2
Max. naprezanje – $\sigma_{max}$ [MPa]	144,18	141,27	117,53	119,04	167,47	183,77	600,82	569,04
Max. produženje – $\epsilon_{max}$ [mm/mm]	0,001473	0,001601	0,001209	0,001305	0,001691	0,001872	0,006174	0,006340
Max. pomaci – $u_{max}$ [mm]	0,9861	1,4119	1,4826	2,1731	2,6106	3,7243	4,7031	7,0088

## 5.2.2. Usporedba VHybrid1 i VHybrid2 okvira

Kao kratki osvrt na dobivene rezultate iz tablice 4. može se reći da oba okvira uglavnom zadovoljavaju kriterij maksimalnog naprezanja osim u posljednjem, kritičnom slučaju. Naime, VHybrid1 u dva slučaja postiže manja maksimalna naprezanja od VHybrid2 okvira. Na slici 5.14 može se vidjeti kako je pri stajanju na pedalama mjesto maksimalnog naprezanja upravo na spoju stražnjih gornjih cijevi i cijevi ispod sjedišta. Za VHybrid2 naprezanje se nalazi na istom mjestu, samo u nešto većem iznosu.



*Slika 5.14 FEA analiza stajanja na pedalama VHybrid1 okvira s prikazom kritičnih mjesta naprezanja*

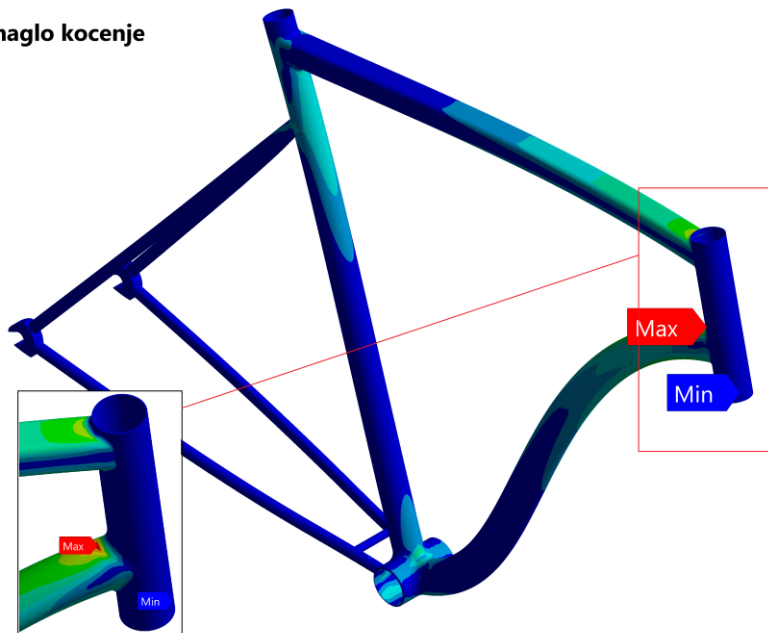
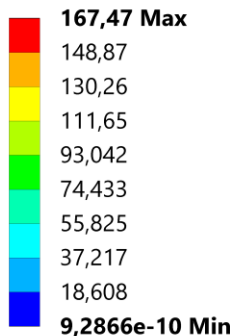
Kod slučaja naglog kočenja ponovno se manja maksimalna naprezanja javljaju pri VHybrid1 modelu, ali na drugom mjestu okvira. Upravo slika 5.15 daje dobru predodžbu tog mjesta blizu spoja cijevi glave i donje cijevi primarnog trokuta konstrukcije.



### AE: VHybrid1-Ti-3Al-2,5V-naglo kočenje

Ekvivalentno naprezanje

Mjerna jedinica: MPa



Slika 5.15 FEA analiza naglog kočenja VHybrid1 okvira s prikazom kritičnih mjesta naprezanja

Slučajevi statičkog sjedenja i pada s visine dali su rezultate koji idu u korist VHybrid2 okviru. Izuzetno je važno primijetiti da vrijednosti ekvivalentnih naprezanja oba okvira za slučajeve pada s visine ne zadovoljavaju uvjet na granicu razvlačenja, tj. prelaze ju. To znači kako bi se pri padu s visine od 0,2 m oba okvira trajno deformirala i materijal bi prešao u plastično područje deformacija.

Razmatranjem svih maksimalnih naprezanja s faktorom sigurnosti iz formule (13) može se reći kako bi svi slučajevi, osim kritičnog, zadovoljavali faktor 2 jer ne prelaze vrijednost od 250 MPa što je u tom slučaju postavljeno kao uvjet.

Promatrajući maksimalna produljenja/deformacije pri kojima maksimalna naprezanja zadovoljavaju granice razvlačenja uočava se da je u svim slučajevima ta deformacija manja za VHybrid1 okvir. Ista stvar događa se i s pomacima koji su manji pri primijenjenim opterećenjima na VHybrid1 okviru.

Konačno se može izreći:

- Iako je VHybrid1 konstrukcija okvira u dva slučaja opterećenja lošija s obzirom na pojave maksimalnih naprezanja, svejedno je za ostale dvije promatrane veličine (ekvivalentna deformacija i ukupni pomaci) bolja u odnosu na VHybrid2 u svim slučajevima.

- Sigurnost VHybrid1 konstrukcije upitna je za primjenu u praksi zbog kritičnog naprezanja pri slučaju pada s visine.
- Uspoređujući mase okvira prema tablicama (prilog 5. i prilog 8.) vidi se da je VHybrid1 ipak nešto lakši, pa mu se i to može istaknuti kao prednost.
- FEA analize provedene su samo simulacija stvarnih uvjeta, za praktičnu konstrukciju potrebno bi bilo dodatno izvesti stvarne testove prema normama (npr. ISO 4210) i provesti ispitivanja s obzirom na materijale, naprezanja i deformacije.
- Kritične slučajeve naprezanja trebalo bi pokušati eliminirati promjenom određene geometrije same konstrukcije okvira. Ovo bi se moglo postići povećanjem debljine stijenki cijevi ili pokušajem korištenja *butted* cijevi promjenjivog poprečnog presjeka. U skladu s [27] ako bi se povećavao poprečni presjek cijevi povećala bi se i krutost titanskog okvira, ali pod cijenu manje udobnosti pri vožnji.
- Redukcijom mase vozača u provedenim analizama moguće je da bi se uklonila pojava kritičnih naprezanja ili bi se barem približilo zadovoljavanju maksimalnih naprezanja s obzirom na granicu razvlačenja.

Prikazi svih rezultata dobivenih FEA analizama konačnih elemenata za VHybrid1 i VHybrid2 priloženi su na kraju rada.

## 6. Zaključak

Bicikli kao štapne konstrukcije na prvi pogled izgledaju podosta jednostavno, no pravim ulaskom u same analize i konstruiranje geometrije pokazalo se kako iza svega stoji kompleksni zadatak s dugotrajnim postupcima ispitivanja metodama pokušaja i pogreške.

Ovim radom pokušano je izrađivanje vlastitih modela okvira bicikala koji bi zadovoljavali uobičajene aspekte pri svakidašnjoj vožnji. Upravo zato odabrana je vrsta hibridnih bicikala koji bi trebali zadovoljavati korisnika u svakom pogledu različitih opterećenja. Dimenzioniranje i određivanje parametara konstrukcije izvedeno je prema dostupnim izvorima za veličine bicikla. Dio geometrije oblikovan je prema vlastitoj intuiciji, pa su se za njih i izvršile određene analize finalna dva modela. Testiranjem tri najkorištenija materijala došlo se je do zaključka da je Ti-3Al-2.5V legura najbolji izbor s obzirom na linearna elastična svojstva. Ovakav rezultat dobiven je FEA analizama. Već konceptualnim modelom došlo se je do kritičnih rezultata s obzirom na naprezanja, što govori da iako je odabran najbolji materijal, bilo bi potrebno ispitati mogućnosti povećanja čvrstoće promjenom debljina stijenki ili drugih karakterističnih mjera modela. Slučajevi opterećenja izvedeni su prema pretpostavkama stvarnih eksploatacijskih uvjeta. Narinuta opterećenja uslijed mase vozača (100 kg) vrlo vjerojatno su pretjerana, ali zbog same sigurnosti su ostavljena na toj vrijednosti. Uz to, za rezultate analiza je promatran i faktor sigurnosti koji još dodatno postrožava uvijete na naprezanja konstrukcije. Konvergiranom FEA analizama finalna dva modela, zaključeno je da je VHybrid1 okvir ipak nešto bolji odabir, ali i dalje je upitno njegovo stavljanje u proizvodnju i eksploataciju. Realnim testovima mogla bi se ispitati stvarna čvrstoća i dati određeni osvrt na kvalitetu izrade konstrukcije.

Dobiveni grafički rezultati statičke analize finalnih okvira dobro prikazuju mjesta najvećih koncentracija naprezanja i ta mjesta su u skladu s očekivanjima, a ovisno o narinutim opterećenjima javljaju se na spoju stražnjih cijevi i cijevi ispod sjedišta, ili blizu spoja cijevi glave okvira s donjom cijevi.

Daljnje detaljnije analize i numerički proračuni uvelike bi pridonijeli poboljšanju konstrukcije, ali za njih bi bilo potrebno mnogo više računalne snage i vremena.

Nikola Vodolšak, 6.7.2023., Krapina



## 7. Literatura

- [1] <https://3sporta.com/20-zanimljivosti-iz-svijeta-biciklizma/>, s interneta, pristupljeno 15.5.2023.
- [2] W. Paveler: The complete book of road cycling & racing, McGraw-Hill, USA, 2009.
- [3] T. Hadland, H.E. Lessing: Bicycle design-an illustrated history, The MIT Press, 2014.
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Step-through\\_frame/](https://en.wikipedia.org/wiki/Step-through_frame/), s interneta, pristupljeno, 20.5.2023.
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Recumbent\\_bicycle/](https://en.wikipedia.org/wiki/Recumbent_bicycle/), s interneta pristupljeno, 21.5.2023.
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/Prone\\_bicycle/](https://en.wikipedia.org/wiki/Prone_bicycle/), s interneta, pristupljeno 25.5.2023.
- [7] <http://www.rijwiel.net/kruisf2e.htm/>, s interneta, pristupljeno 24.5.2023.
- [8] [https://www.sheldonbrown.com/gloss\\_cn-z.html#crossframe/](https://www.sheldonbrown.com/gloss_cn-z.html#crossframe/), s interneta, pristupljeno 25.5.2023.
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Pedersen\\_bicycle/](https://en.wikipedia.org/wiki/Pedersen_bicycle/), s interneta, pristupljeno, 27.5.2023.
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/Folding\\_bicycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Folding_bicycle), s interneta, pristupljeno, 29.5.2023.
- [11] <https://en.wikipedia.org/wiki/Penny-farthing>, s interneta, pristupljeno 30.5.2023.
- [12] [https://en.wikipedia.org/wiki/Bicycle\\_frame](https://en.wikipedia.org/wiki/Bicycle_frame), s interneta, pristupljeno 1.6.2023.
- [13] <https://cycletraveloverload.com/gravel-bike-vs-road-bike-what-is-the-best/>, s interneta, pristupljeno 28.5.2023.
- [14] <https://road.cc/content/feature/road-bike-vs-all-road-bike-vs-gravel-bike-283601>, s interneta, pristupljeno 29.5.2023.
- [15] <https://www.cyclingnews.com/features/types-of-bike-everything-you-need-to-know-and-how-to-pick-the-right-bike-for-you/>, s interneta, pristupljeno 2.6.2023.
- [16] [https://en.wikipedia.org/wiki/Touring\\_bicycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Touring_bicycle), s interneta, pristupljeno 3.6.2023.
- [17] [https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid\\_bicycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_bicycle), s interneta, pristupljeno 3.6.2023.
- [18] <https://www.bikeradar.com/features/what-is-a-hybrid-bike/>, s interneta, pristupljeno 3.6.2023.
- [19] M. Wilkinson: Bicycle Frame Building in the USA, Winston Churchill Travelling Fellow, USA, 2011.
- [20] [https://en.wikipedia.org/wiki/Single-speed\\_bicycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Single-speed_bicycle), s interneta, pristupljeno 3.6.2023.
- [21] [https://en.wikipedia.org/wiki/Cargo\\_bike](https://en.wikipedia.org/wiki/Cargo_bike), s interneta, pristupljeno 4.6.2023.
- [22] [https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclo-cross\\_bicycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclo-cross_bicycle), s interneta, pristupljeno 4.6.2023.
- [23] [https://en.wikipedia.org/wiki/BMX\\_bike](https://en.wikipedia.org/wiki/BMX_bike), s interneta, pristupljeno 4.6.2023.
- [24] <https://discerningcyclist.com/are-hybrid-good-for-commuting-pros-cons/>, s interneta, pristupljeno 4.6.2023.
- [25] K.K. Mishra, V. Chaturvedi: Stress analysis if bicycle frame using Ansys, IRJET, br. 8, svibanj 2021, str. 4655-4660
- [26] S. Mohan: Comfort Bicycle for Urban/Semi-Urban Scenario, Diploma document, NIDA, India, 2005.
- [27] <https://bike.bikegremlin.com/11144/bicycle-frame-materials-explained/#5>, s interneta, pristupljeno 4.6.2023.

- [28] <https://www.velobike.co.nz/blogs/news/aluminium-grades-for-bicycle-components>, s interneta, pristupljeno 25.5.2023.
- [29] <https://steelforge.com/alloy-steel-4130-aisi-4130/>, s interneta, pristupljeno 5.6.2023.
- [30] <https://industeel.arcelormittal.com/fichier/ds-mold-4130/>, s interneta, pristupljeno 6.6.2023.
- [31] <https://www.bikeradar.com/advice/buyers-guides/bike-frame-materials/>, s interneta, pristupljeno 6.6.2023.
- [32] <https://www.omnicalculator.com/sports/bike-size>, s interneta, pristupljeno 6.6.2023.
- [33] <https://www.somafab.com/archives/product/saga-dc-frame-set-disccanti>, s interneta, pristupljeno 5.6.2023.
- [34] [https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk\\_Inventor](https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Inventor), s interneta, pristupljeno 9.6.2023.
- [35] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje\\_TIG\\_postupkom](https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje_TIG_postupkom), s interneta, pristupljeno 9.6.2023.
- [36] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo\\_lemljenje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo_lemljenje), s interneta, pristupljeno 9.6.2023.
- [37] [https://en.wikipedia.org/wiki/Lugged\\_steel\\_frame\\_construction](https://en.wikipedia.org/wiki/Lugged_steel_frame_construction), s interneta, pristupljeno 4.6.2023.
- [38] <https://brainybiker.com/curved-vs-straight-frame-tubing-comparison-and-analysis/>, s interneta, pristupljeno 8.6.2023.
- [39] <https://road.cc/content/feature/what-are-dropped-seatstays-good-267053>, s interneta, pristupljeno 10.6.2023.
- [40] T. Paterek: The Paterek Manual, Kermesse Distributors, Horsham(PA), 2004.
- [41] A. Upadhyay, A. Gupta: Comparative Analysis of Different Cross-Sectional Bicycle Frames, IJRDET, br. 10, listopad 2021.
- [42] <https://www.fairing.com/new-page-2>, s interneta, pristupljeno 10.6.2023.
- [43] <https://bike.bikegremlin.com/832/bicycle-frame-geometry/#2.1>, s interneta, pristupljeno 11.6.2023.
- [44] <https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys>, s interneta, pristupljeno 11.6.2023.
- [45] <https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceClaim>, s interneta, pristupljeno 11.6.2023.
- [46] <https://www.solvusoft.com/en/file-extensions/software/ansys-inc/ansys-designmodeler/>, s interneta, pristupljeno 10.6.2023.
- [47] [https://en.wikipedia.org/wiki/ISO\\_10303-21](https://en.wikipedia.org/wiki/ISO_10303-21), s interneta, pristupljeno 10.6.2023.
- [48] <https://www.graspengineering.com/>, s interneta, pristupljeno 12.6.2023.
- [49] D. Kozak: Metoda konačnih elemenata - uvod i primjeri primjene, Numeričko modeliranje, prezentacija, ožujak 2022.
- [50] M. N. V. Krishna Veni, M. A. Reddy: Conceptual Design of Bicycle Frame, IJETT, br. 2, kolovoz 2016, str. 64-70
- [51] A. M. Zubair: Material, Design & Analysis of Bicycle Frame, Tehnički seminar, JNTU, Ibrahimpatnam, 2014.
- [52] L. Nekić: Numerička analiza čvrstoće okvira kompozitnog brdskog bicikla, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2019.

- [53] T. Tomaszewski: Fatigue life analysis of steel bicycle frame according to ISO 4210, Engineering Failure Analysis, volume 122, travanj 2021.
- [54] A. Husaini, I. Hasanuddin, A. Farhan: Structural Simulations of Bicycle Frame Behaviour under Various Load Conditions, Material Science Forum, volume 961, svibanj 2019, str. 137-147
- [55] <https://www.roadbikerider.com/parts-of-a-bicycle-list/>, s interneta, pristupljeno 11.6.2023.
- [56] <https://www.bikemiamibeach.com/product/retrospec-barron-hybrid-step-thru-21s-399105-1.htm>, s interneta, pristupljeno 15.5.2023.
- [57] <https://www.bikesxpress.com/collections/mens-micargi-beach-cruiser-bikes>, s interneta, pristupljeno 16.5.2023.
- [58] <https://www.performercycles.com/recumbent-bikes/folding-recumbent-front-wheel-drive/>, s interneta, pristupljeno 15.5.2023.
- [59] <https://www.pinterest.com/pin/326651779240188766/>, s interneta, pristupljeno 18.5.2023.
- [60] <https://www.bicycling.com/>, s interneta, pristupljeno 16.5.2023.
- [61] <http://www.tomwbell.com/patents/Semi-Prone.jpg>, s interneta, pristupljeno 19.5.2023.
- [62] <https://www.chegos.pl/file-pedersen-wikimedia-commons-pp-77983025>, s interneta, pristupljeno 19.5.2023.
- [63] [https://en.wikipedia.org/wiki/Lotus\\_108](https://en.wikipedia.org/wiki/Lotus_108), s interneta, pristupljeno 20.5.2023.
- [64] <https://www.bike-eshop.cz/jednokolky/>, s interneta, pristupljeno 20.5.2023.
- [65] <https://www.rivermillcycles.com/product/salsa-blackthorn-carbon-frame-457948-1.htm>, s interneta, pristupljeno 21.5.2023.
- [66] [https://www.balfesbikes.co.uk/bikes/bike-frames/kinesis-gtd-v2-road-bike-frameset-2023-in-silver\\_31571](https://www.balfesbikes.co.uk/bikes/bike-frames/kinesis-gtd-v2-road-bike-frameset-2023-in-silver_31571), s interneta, pristupljeno 21.5.2023.
- [67] <https://tsunamibicycle.com/>, s interneta, pristupljeno 22.5.2023.
- [68] <https://www.thebikehubonline.com/>, s interneta, pristupljeno 22.5.2023.
- [69] <https://www.somafab.com/bikes-frames/frames>, s interneta, pristupljeno 22.5.2023.
- [70] <https://www.marinbikes.com/>, s interneta, pristupljeno 22.5.2023.
- [71] <https://www.cannondale.com/en>, s interneta, pristupljeno 22.5.2023.
- [72] <https://int.mongoose.com/>, s interneta, pristupljeno 23.5.2023.
- [73] <https://www.matweb.com/index.aspx>, s interneta, pristupljeno 24.5.2023.
- [74] <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mta321>, s interneta, pristupljeno 24.5.2023.
- [75] <https://aerotibike.com/titanium-butted-tubing-available-for-your-bike-frame/>, s interneta, pristupljeno 25.5.2023.
- [76] <https://www.reynoldstechnology.biz/materials/how-butted-tubing-is-made/>, s interneta 25.6.2023.
- [77]

## Popis slika

Slika 1.1 Osnovni dijelovi bicikla [55] .....	3
Slika 1.2 "Humbert safety" bicikl dizajnera Thomasa Humberta, 1884. godine [3].....	4
Slika 2.1 High-wheeler model bicikla [3] .....	5
Slika 2.2 Tipovi bicikla s okvirom: a) prolazni okvir, b) konzolni okvir, c) leđni ležeći okvir, d) trbušni ležeći okvir, e) iskrižani okvir, f) rešetkasti okvir, g) monokok okvir, h) preklopni okvir, i) high wheel okvir [56,57,58,59,60,61,62,63,64] .....	9
Slika 2.3 Glavni elementi okvira dijamantnog oblika [12] .....	10
Slika 2.4 Brdski (MTB) okvir bicikla iz dva dijela [65] .....	12
Slika 2.5 Cestovni/trkaći okvir bicikla [66] .....	12
Slika 2.6 Prikaz gravel okvira [67].....	13
Slika 2.7 Touring okvir s velikim međuosovinskim razmakom [68].....	14
Slika 2.8 Prikaz jednobrzinskog okvira bicikla [67] .....	14
Slika 2.9 Okvir ojačanog teretnog bicikla za transport [69] .....	15
Slika 2.10 Prikaz hibridnog okvira koji posjeduje elemente drugih vrsta okvira [70].....	16
Slika 2.11 Cyclo Cross okvir bicikla [71] .....	17
Slika 2.12 Kompaktni BMX okvir bicikla za akrobacije i trikove [72].....	17
Slika 2.13 Kalkulator za određivanje veličine bicikla/okvira bicikla [32].....	23
Slika 2.14 Vizualni prikaz pojedinih dimenzija geometrije [33] .....	25
Slika 2.15 Grafički prikaz odabranih dimenzija geometrije u milimetrima (mm) prema kojima su kreirani modeli.....	26
Slika 2.16 Prikaz uzdužnog presjeka cijevi na kojem se može vidjeti promjena debljine stijenki na pojedinim duljinama [75] .....	27
Slika 2.17 Izvedbe cijevi stražnje vilice s obzirom na poprečni presjek: a)okrugle – ovalne – okrugle cijevi, b)jednostrano spljoštene cijevi, c)užlijebljene cijevi, d)okrugle cijevi [40] .....	28
Slika 2.18 Prikaz osnovnih varijacija prihvatnica: a)standardne cestovne b)vertikalne c)trkaće/stražnje opterećene prihvatnice [40].....	29
Slika 2.19 Ilustracija četiri osnovna oblika spajanja prihvatnica s okvirom [40] .....	31
Slika 3.1 Model izrađenog VHybridC okvira iz različitih pogleda.....	34
Slika 3.2 Prikaz izmodeliranog VHybrid1 okvira iz različitih pogleda .....	34

Slika 3.3 Dimenzije poprečnog presjeka svih stražnjih cijevi VHybrid1 bicikla izražene u milimetrima (mm) .....	35
Slika 3.4 Proizvoljni oblik prihvatnica za VHybrid1 okvir .....	36
Slika 3.5 Prikaz poprečnog presjeka gornje cijevi VHybrid1 modela s izraženim dimenzijama u milimetrima (mm) .....	37
Slika 3.6 Dimenzije poprečnog presjeka donje cijevi izražene u milimetrima (mm) .....	37
Slika 3.7. Standardni donji most (lijevo) i standardni ne ojačani gornji most (desno) VHybrid1 okvira bicikla.....	38
Slika 3.8. Prikaz gotovog modela VHybrid2 okvira iz različitih pogleda .....	39
Slika 3.9 Nekonvencionalni poprečni presjek cijevi glave okvira s mjerama izraženim u milimetrima (mm) .....	40
Slika 3.10 Prikaz poprečnog presjeka i debljine stijenke gornje cijevi VHybrid2 okvira s prikazom dimenzija u milimetrima (mm) .....	40
Slika 3.11 Presjek cijevi ispod sjedišta uz prikaz karakterističnih mjera izraženih u milimetrima (mm).....	41
Slika 3.12 Poprečni presjek donje cijevi djelomičnog oblika „S“ sa svim dimenzijama izraženim u milimetrima (mm) .....	41
Slika 3.13 Tanja izvedba pripojenih stražnjih prihvatnica VHybrid2 okvira .....	42
Slika 3.14 Pogled odozgo na sva tri okvira, VHybrid2, VHybrid1 i VHybridC uz dimenzije razmaka stražnjih prihvatnica u milimetrima (mm).....	43
Slika 4.1 Kartice postavki statičke strukturne analize.....	44
Slika 4.2 Osnovni 1D,2D i 3D elementi viših i nižih redova, tj. s i bez međučvorova [48]....	46
Slika 4.3 Postavke mreže VHybridC modela na početne simulacije za odabir materijala. ....	48
Slika 4.4 Prikaz stražnjeg rubnog uvjeta na prihvatnice u obliku nepomičnog oslonca/uklještenja .....	50
Slika 4.5 Prikaz prednjeg udaljenog oslonca kruto povezanog s modelom VHybrid2.....	50
Slika 4.6 Sva opterećenja kroz slučajeve, prikazana na modelu VHybrid1 .....	53
Slika 5.1 Izgled mreže za FEA simulacije VHybridC okvira s obzirom na materijale.....	55
Slika 5.2 Rezultati ekvivalentnih naprezanja kod FEA VHybridC modela za slučaj statičkog sjedenja korištenjem Al 6061-T6 .....	56
Slika 5.3 FEA rezultati ekvivalentnih deformacija VHybridC okvira od Al 6061-T6 za slučaj statičkog sjedenja .....	56
Slika 5.4 FEA rezultati ukupnih pomaka VHybridC okvira od Al 6061-T6 za slučaj statičkog sjedenja.....	57



Slika 5.5 FEA rezultati ekvivalentnih naprezanja VHybridC okvira od Ti-3Al-2,5V za slučaj statičkog sjedenja .....	58
Slika 5.6 FEA rezultati ekvivalentnih deformacija VHybridC okvira od Ti-3Al-2,5V za slučaj statičkog sjedenja .....	58
Slika 5.7 FEA rezultati ukupnih pomaka VHybridC okvira od Ti-3Al-2,5V za slučaj statičkog sjedenja.....	59
Slika 5.8 FEA rezultati ekvivalentnih naprezanja VHybridC okvira od AISI 4130 za slučaj statičkog sjedenja .....	59
Slika 5.9 FEA rezultati ekvivalentnih deformacija VHybridC okvira od AISI 4130 za slučaj statičkog sjedenja .....	60
Slika 5.10 FEA rezultati ukupnih pomaka VHybridC okvira od AISI 4130 za slučaj statičkog sjedenja.....	60
Slika 5.11 FEA analiza naglog kočenja VHybridC okvira s prikazom kritičnih mjesta naprezanja.....	62
Slika 5.12 Grafikon konvergenije vrijednosti pomaka VHybrid1 okvira pri statičkom sjedenju .....	64
Slika 5.13 Grafikon konvergenije vrijednosti pomaka VHybrid2 okvira pri statičkom sjedenju .....	65
Slika 5.14 FEA analiza stajanja na pedalama VHybrid1 okvira s prikazom kritičnih mjesta naprezanja.....	66
Slika 5.15 FEA analiza naglog kočenja VHybrid1 okvira s prikazom kritičnih mjesta naprezanja .....	67

## Popis tablica

Tablica 1. Svojstva najčešće korištenih materijala u izradi okvira bicikla [73,74].....	22
Tablica 2. Popis dimenzija/veličina pojedinih elemenata geometrije bicikala proizvođača „Soma Fabrication“ s podcrtanim preuzetim mjerama [33].....	24
Tablica 3. Rezultati FEA analiza VHybridC okvira za sve slučajeve i materijale.....	61
Tablica 4. Rezultati FEA analiza svih slučajeva opterećenja za VHybrid1 i VHybrid2 okvir od titana .....	65

## Prilozi

Cijevi	Vanjski radijus - R [mm]	Unutrašnji radijus - r [mm]	Debljina stijenke cijevi [mm]	Površina kružnog vijenca - A [mm <sup>2</sup> ]	Efektivna duljina cijevi - l [mm]	Volumen - V [mm <sup>3</sup> ]	Materijal	Količina cijevi	Masa cijevi [kg]
Gornja cijev	13,00	12,30	0,70	55,64	522	29042,83	Al 6061-T6	1	0,0784
Cijev glave okvira	16,50	15,60	0,90	90,76	165	14975,50	Al 6061-T6	1	0,0404
Donja cijev	14,00	13,10	0,90	76,62	572	43828,61	Al 6061-T6	1	0,1183
Cijev ispod sjedišta	14,50	13,60	0,90	79,45	550	43697,98	Al 6061-T6	1	0,1180
Cijev uležištenja pogona	20,00	18,00	2,00	238,76	68	16235,75	Al 6061-T6	1	0,0438
Gornje cijevi stražnje vilice	6,50	5,50	1,00	37,70	493	18585,66	Al 6061-T6	2	0,1004
Donje cijevi stražnje vilice	6,50	5,50	1,00	37,70	418	15758,23	Al 6061-T6	2	0,0851
Prihvatnice + zavari + mostovi									≈ 0,35
<b>UKUPNO</b>									≈ 0,9344

Prilog 1. Tablica ukupnih masa cijevi VHybridC okvira za aluminijsku leguru

Cijevi	Vanjski radijus - R [mm]	Unutrašnji radijus - r [mm]	Debljina stijenke cijevi [mm]	Površina kružnog vijenca - A [mm <sup>2</sup> ]	Efektivna duljina cijevi - l [mm]	Volumen - V [mm <sup>3</sup> ]	Materijal	Količin a cijevi	Masa cijevi – m [kg]
Gornja cijev	13,00	12,30	0,70	55,64	522	29042,83	Ti-3Al-2,5V	1	0,1301
Cijev glave okvira	16,50	15,60	0,90	90,76	165	14975,50	Ti-3Al-2,5V	1	0,0671
Donja cijev	14,00	13,10	0,90	76,62	572	43828,61	Ti-3Al-2,5V	1	0,1964
Cijev ispod sjedišta	14,50	13,60	0,90	79,45	550	43697,98	Ti-3Al-2,5V	1	0,1958
Cijev uležištenja pogona	20,00	18,00	2,00	238,76	68	16235,75	Ti-3Al-2,5V	1	0,0727
Gornje cijevi stražnje vilice	6,50	5,50	1,00	37,70	493	18585,66	Ti-3Al-2,5V	2	0,1665
Donje cijevi stražnje vilice	6,50	5,50	1,00	37,70	418	15758,23	Ti-3Al-2,5V	2	0,1412
Prihvatnice + zavari + mostovi									≈ 0,375
<b>UKUPNO</b>									≈ 1,3448

Prilog 2. Tablica ukupnih masa cijevi VHybridC okvira za titan leguru

Cijevi	Vanjski radijus - R [mm]	Unutrašnji radijus - r [mm]	Debljina stijenke cijevi [mm]	Površina kružnog vijenca - A [mm <sup>2</sup> ]	Efektivna duljina cijevi - l [mm]	Volumen - V [mm <sup>3</sup> ]	Materijal	Količina cijevi	Masa cijevi - m [kg]
Gornja cijev	13,00	12,30	0,70	55,64	522	29042,83	AISI 4130	1	0,2275
Cijev glave okvira	16,50	15,60	0,90	90,76	165	14975,50	AISI 4130	1	0,1173
Donja cijev	14,00	13,10	0,90	76,62	572	43828,61	AISI 4130	1	0,3433
Cijev ispod sjedišta	14,50	13,60	0,90	79,45	550	43697,98	AISI 4130	1	0,3423
Cijev uležištenja pogona	20,00	18,00	2,00	238,76	68	16235,75	AISI 4130	1	0,1272
Gornje cijevi stražnje vilice	6,50	5,50	1,00	37,70	493	18585,66	AISI 4130	2	0,2912
Donje cijevi stražnje vilice	6,50	5,50	1,00	37,70	418	15758,23	AISI 4130	2	0,2469
Prihvatnice + zavari + mostovi									≈ 0,4
<b>UKUPNO</b>									≈ 2,0957

Prilog 3. Tablica ukupnih masa cijevi VHybridC okvira za čelik

Cijevi	Debljina stijenke cijevi [mm]	Površina poprečnog presjeka - A [mm <sup>2</sup> ]	Efektivna duljina cijevi - l [mm]	Volumen - V [mm <sup>3</sup> ]	Materijal	Količina cijevi	Masa cijevi - m [kg]
Gornja cijev	0,70	66,693	531	35413,98	Al 6061-T6	1	0,0956
Cijev glave okvira	0,90	90,761	165	14975,57	Al 6061-T6	1	0,0404
Donja cijev	0,90	88,648	604	53543,39	Al 6061-T6	1	0,1446
Cijev ispod sjedišta	0,90	79,451	550	43698,05	Al 6061-T6	1	0,1180
Cijev uležištenja pogona	2,00	238,760	68	16235,68	Al 6061-T6	1	0,0438
Gornje cijevi stražnje vilice	1,27	40,970	447	18313,59	Al 6061-T6	2	0,0989
Donje cijevi stražnje vilice	1,27	40,970	417	17084,49	Al 6061-T6	2	0,0923
Prihvatnice + zavari + mostovi							≈ 0,35
<b>UKUPNO</b>							≈ 0,9836

*Prilog 4. Tablica ukupnih masa cijevi VHybrid1 okvira za aluminijsku leguru*

Cijevi	Debljina stijenke cijevi [mm]	Površina poprečnog presjeka - A [mm <sup>2</sup> ]	Efektivna duljina cijevi - l [mm]	Volumen - V [mm <sup>3</sup> ]	Materijal	Količina cijevi	Masa cijevi - m [kg]
Gornja cijev	0,70	66,693	531	35413,98	Ti-3Al-2,5V	1	0,1587
Cijev glave okvira	0,90	90,761	165	14975,57	Ti-3Al-2,5V	1	0,0671
Donja cijev	0,90	88,648	604	53543,39	Ti-3Al-2,5V	1	0,2399
Cijev ispod sjedišta	0,90	79,451	550	43698,05	Ti-3Al-2,5V	1	0,1958
Cijev uležištenja pogona	2,00	238,760	68	16235,68	Ti-3Al-2,5V	1	0,0727
Gornje cijevi stražnje vilice	1,27	40,970	447	18313,59	Ti-3Al-2,5V	2	0,1641
Donje cijevi stražnje vilice	1,27	40,970	417	17084,49	Ti-3Al-2,5V	2	0,1531
Prihvatnice + zavari + mostovi							≈ 0,375
<b>UKUPNO</b>							≈ 1,4263

*Prilog 5. Tablica ukupnih masa cijevi VHybrid1 okvira za titan leguru*

Cijevi	Debljina stijenke cijevi [mm]	Površina poprečnog presjeka - A [mm <sup>2</sup> ]	Efektivna duljina cijevi - l [mm]	Volumen - V [mm <sup>3</sup> ]	Materijal	Količina cijevi	Masa cijevi - m [kg]
Gornja cijev	0,70	66,693	531	35413,98	AISI 4130	1	0,2774
Cijev glave okvira	0,90	90,761	165	14975,57	AISI 4130	1	0,1173
Donja cijev	0,90	88,648	604	53543,39	AISI 4130	1	0,4194
Cijev ispod sjedišta	0,90	79,451	550	43698,05	AISI 4130	1	0,3423
Cijev uležištenja pogona	2,00	238,760	68	16235,68	AISI 4130	1	0,1272
Gornje cijevi stražnje vilice	1,27	40,970	447	18313,59	AISI 4130	2	0,2869
Donje cijevi stražnje vilice	1,27	40,970	417	17084,49	AISI 4130	2	0,2677
Prilhatnice + zavari + mostovi							≈ 0,4
<b>UKUPNO</b>							≈ 2,2382

Prilog 6. Tablica ukupnih masa cijevi VHybrid1 okvira za čelik



Cijevi	Debljina stijjenke cijevi [mm]	Površina poprečnog presjeka - A [mm <sup>2</sup> ]	Efektivna duljina cijevi - l [mm]	Volumen - V [mm <sup>3</sup> ]	Materijal	Količina cijevi	Masa cijevi - m [kg]
Gornja cijev	0,70	51,648	519	26805,31	Al 6061-T6	1	0,0724
Cijev glave okvira	0,9-4,01	219,810	165	36268,65	Al 6061-T6	1	0,0979
Donja cijev	0,90	82,087	591	48513,42	Al 6061-T6	1	0,1310
Cijev ispod sjedišta	0,90	79,451	550	43698,05	Al 6061-T6	1	0,1180
Cijev uležištenja pogona	2,00	238,760	68	16235,68	Al 6061-T6	1	0,0438
Gornje cijevi stražnje vilice	1,27	40,970	469	19214,93	Al 6061-T6	2	0,1038
Donje cijevi stražnje vilice	1,27	40,970	420	17207,40	Al 6061-T6	2	0,0929
Prihvatnice + zavari + mostovi							≈ 0,35
<b>UKUPNO</b>							≈ 1,0098

Prilog 7. Tablica ukupnih masa cijevi VHybrid2 okvira za aluminijsku leguru

Cijevi	Debljina stijenke cijevi [mm]	Površina poprečnog presjeka - A [mm <sup>2</sup> ]	Efektivna duljina cijevi - l [mm]	Volumen - V [mm <sup>3</sup> ]	Materijal	Količina cijevi	Masa cijevi - m [kg]
Gornja cijev	0,70	51,648	519	26805,31	Ti-3Al-2,5V	1	0,1201
Cijev glave okvira	0,9-4,01	219,810	165	36268,65	Ti-3Al-2,5V	1	0,1625
Donja cijev	0,90	82,087	591	48513,42	Ti-3Al-2,5V	1	0,2173
Cijev ispod sjedišta	0,90	79,451	550	43698,05	Ti-3Al-2,5V	1	0,1958
Cijev uležištenja pogona	2,00	238,760	68	16235,68	Ti-3Al-2,5V	1	0,0727
Gornje cijevi stražnje vilice	1,27	40,970	469	19214,93	Ti-3Al-2,5V	2	0,1722
Donje cijevi stražnje vilice	1,27	40,970	420	17207,40	Ti-3Al-2,5V	2	0,1542
Prihvatnice + zavari + mostovi							≈ 0,375
<b>UKUPNO</b>							≈ 1,4698

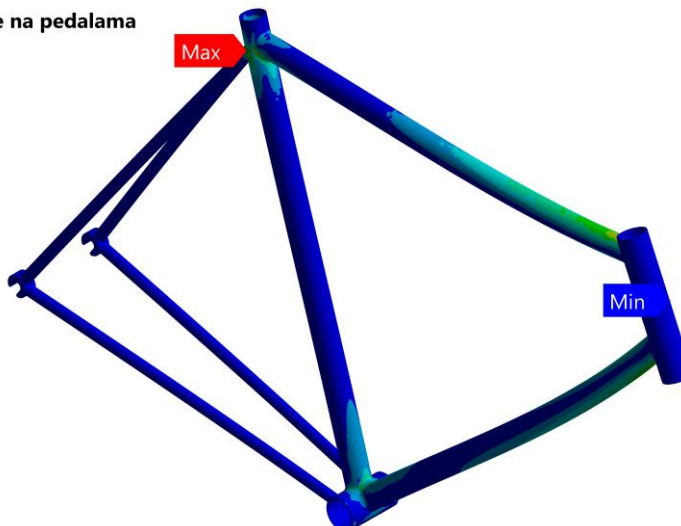
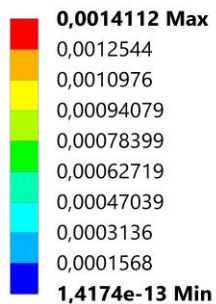
*Prilog 8. Tablica ukupnih masa cijevi VHybrid2 okvira za titan leguru*

Cijevi	Debljina stijenke cijevi [mm]	Površina poprečnog presjeka - A [mm <sup>2</sup> ]	Efektivna duljina cijevi - l [mm]	Volumen - V [mm <sup>3</sup> ]	Materijal	Količina cijevi	Masa cijevi - m [kg]
Gornja cijev	0,70	51,648	519	26805,31	AISI 4130	1	0,2100
Cijev glave okvira	0,9-4,01	219,810	165	36268,65	AISI 4130	1	0,2841
Donja cijev	0,90	82,087	591	48513,42	AISI 4130	1	0,3800
Cijev ispod sjedišta	0,90	79,451	550	43698,05	AISI 4130	1	0,3423
Cijev uležištenja pogona	2,00	238,760	68	16235,68	AISI 4130	1	0,1272
Gornje cijevi stražnje vilice	1,27	40,970	469	19214,93	AISI 4130	2	0,3010
Donje cijevi stražnje vilice	1,27	40,970	420	17207,40	AISI 4130	2	0,2696
Prihvatnice + zavari + mostovi							≈ 0,4
<b>UKUPNO</b>							≈ 2,3142

Prilog 9. Tablica ukupnih masa cijevi VHybrid2 okvira za čelik

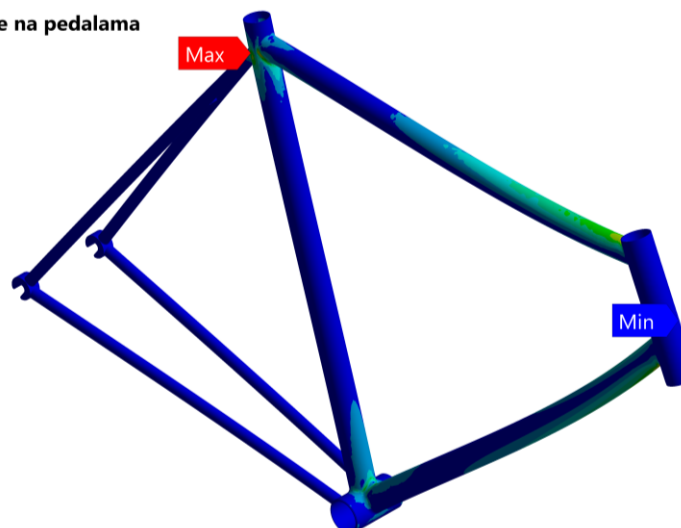
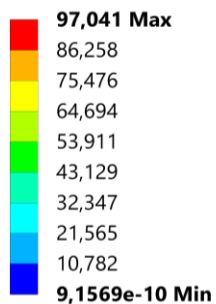
**Q: VHybridC-Al 6061-T6- stajanje na pedalama**

Ekvivalentno produljenje/deformacija  
Mjerna jedinica: mm/mm



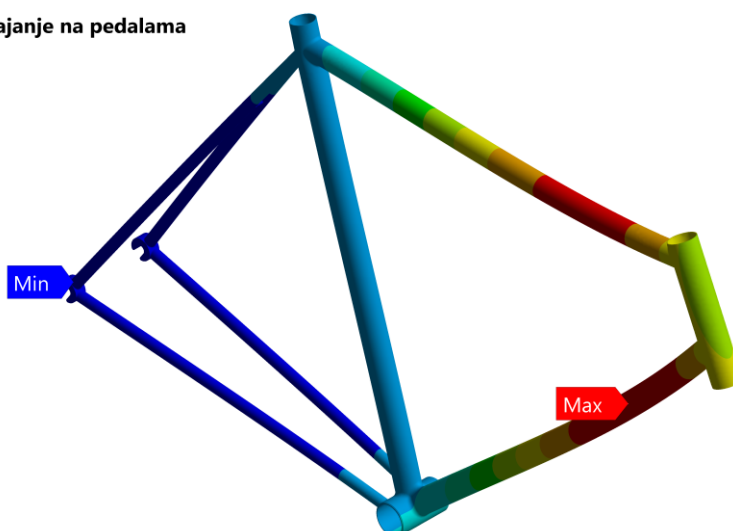
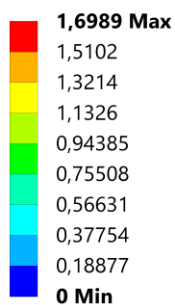
**Q: VHybridC-Al 6061-T6- stajanje na pedalama**

Ekvivalentno naprezanje  
Mjerna jedinica: MPa



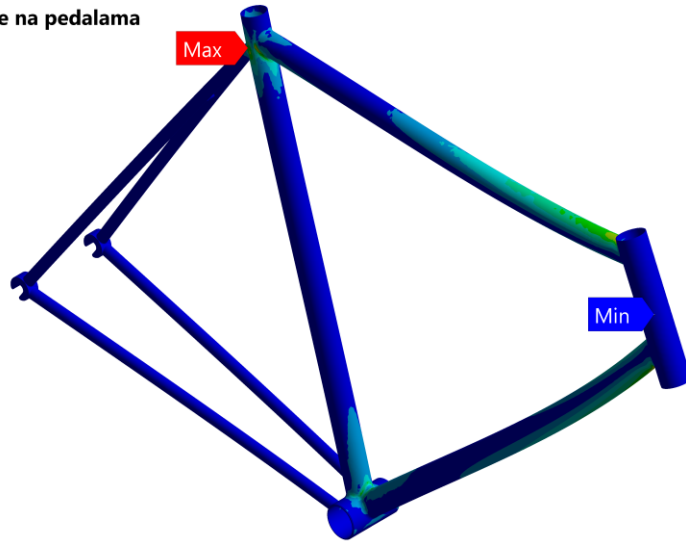
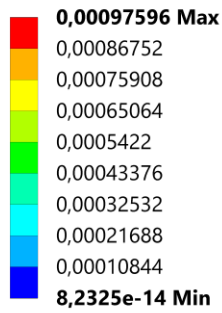
**Q: VHybridC-Al 6061-T6- stajanje na pedalama**

Ukupni pomaci  
Mjerna jedinica: mm

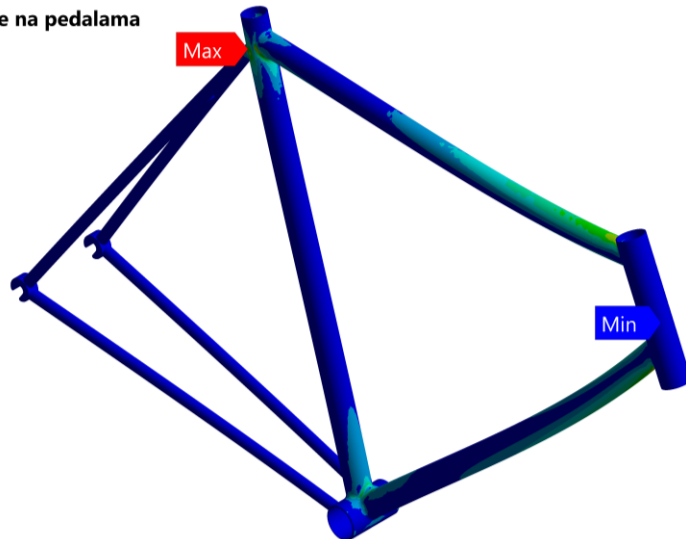
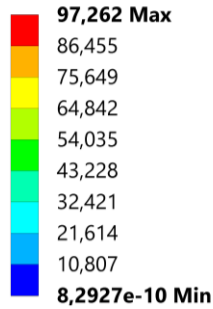


*Prilog 10. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybridC za Al 6061-T6 slučaj stajanja na pedalama*

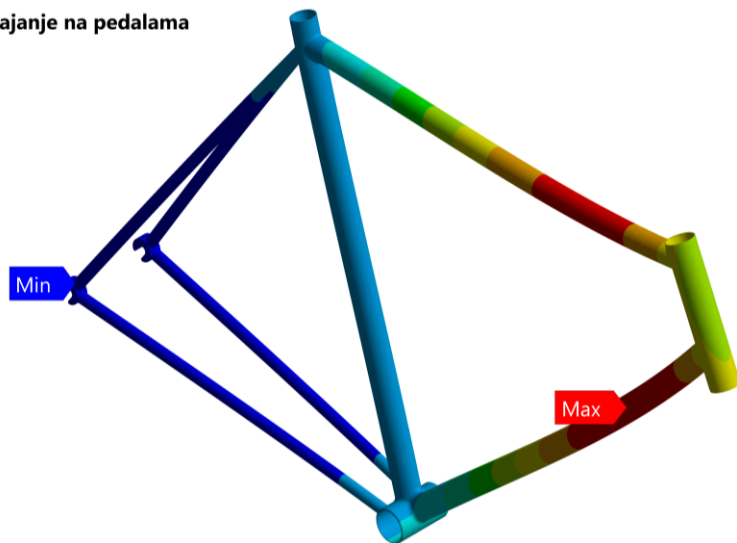
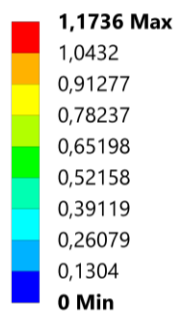
**R: VHybridC-Ti-3Al-2,5V- stajanje na pedalama**  
 Ekvivalentno produljenje/deformacija  
 Mjerna jedinica: mm/mm



**R: VHybridC-Ti-3Al-2,5V- stajanje na pedalama**  
 Ekvivalentno naprezanje  
 Mjerna jedinica: MPa



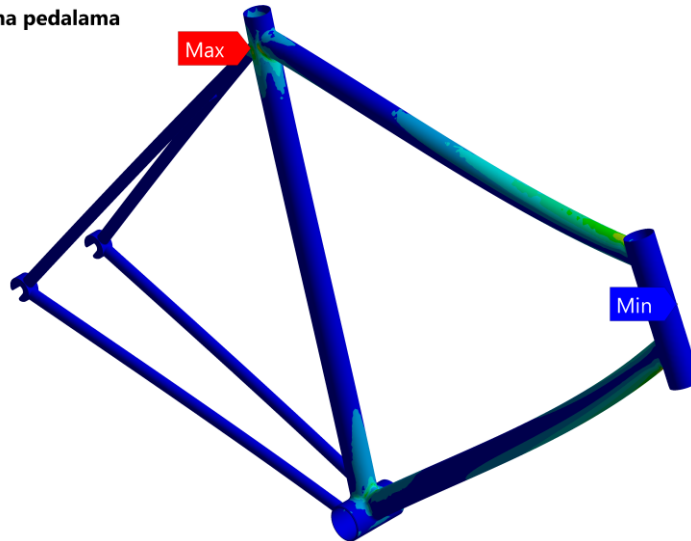
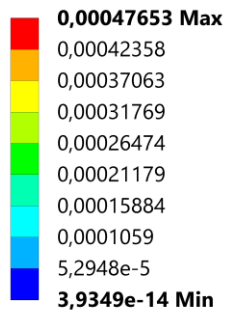
**R: VHybridC-Ti-3Al-2,5V- stajanje na pedalama**  
 Ukupni pomaci  
 Mjerna jedinica: mm



*Prilog 11. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybridC za Ti-3Al-2,5V slučaj stajanja na pedalama*

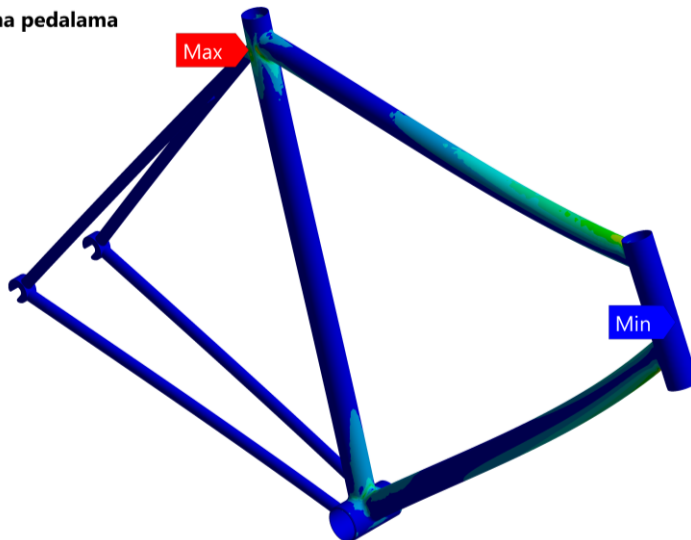
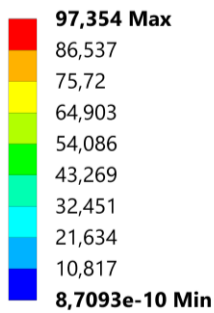
**L: VHybridC-AISI 4130- stajanje na pedalama**

Ekvivalentno produljenje/deformacija  
Mjerna jedinica: mm/mm



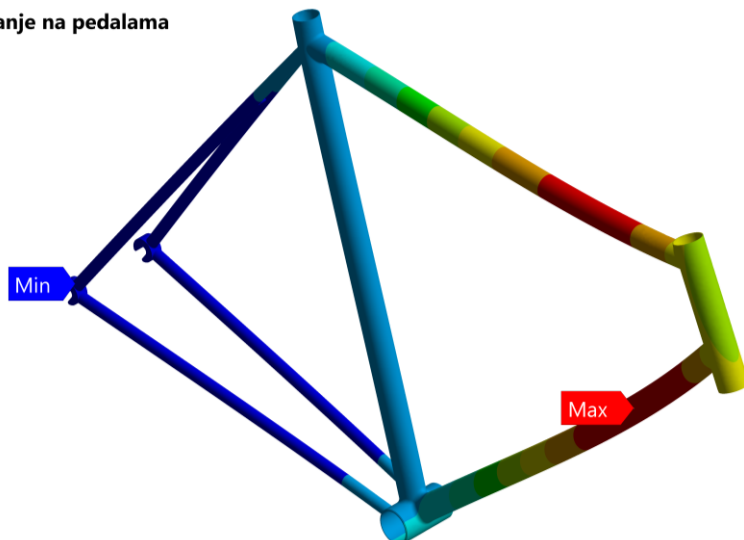
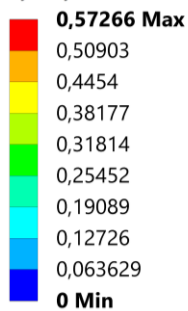
**L: VHybridC-AISI 4130- stajanje na pedalama**

Ekvivalentno naprezanje  
Mjerna jedinica: MPa



**L: VHybridC-AISI 4130- stajanje na pedalama**

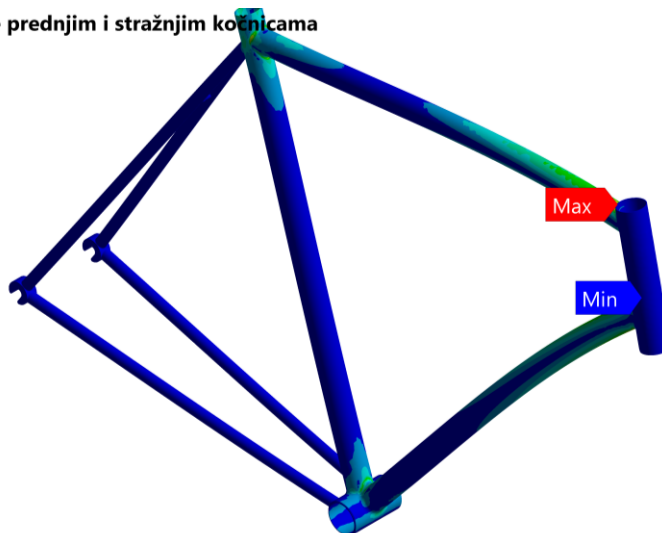
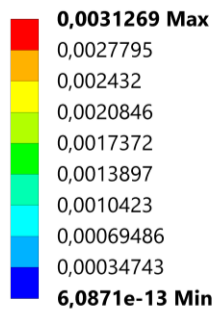
Ukupni pomaci  
Mjerna jedinica: mm



*Prilog 12. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybridC za AISI 4130 slučaj stajanja na pedalama*

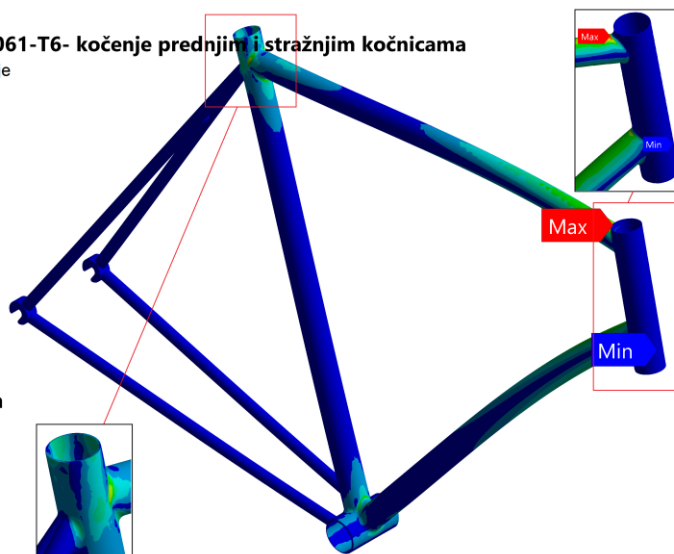
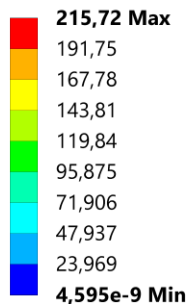
**S: VHybridC-Al 6061-T6- kočenje prednjim i stražnjim kočnicama**

Ekvivalentno produljenje/deformacija  
Mjerna jedinica: mm/mm



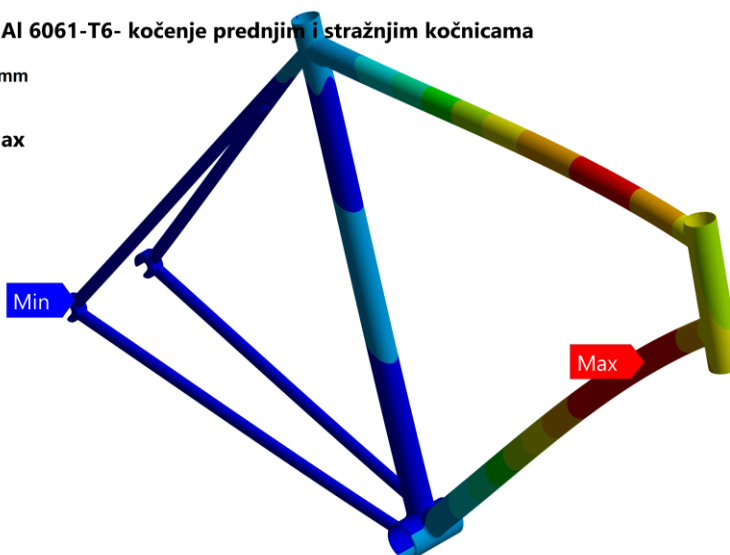
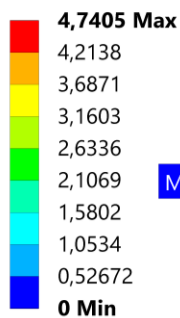
**S: VHybridC-Al 6061-T6- kočenje prednjim i stražnjim kočnicama**

Ekvivalentno naprezanje  
Mjerna jedinica: MPa



**S: VHybridC-Al 6061-T6- kočenje prednjim i stražnjim kočnicama**

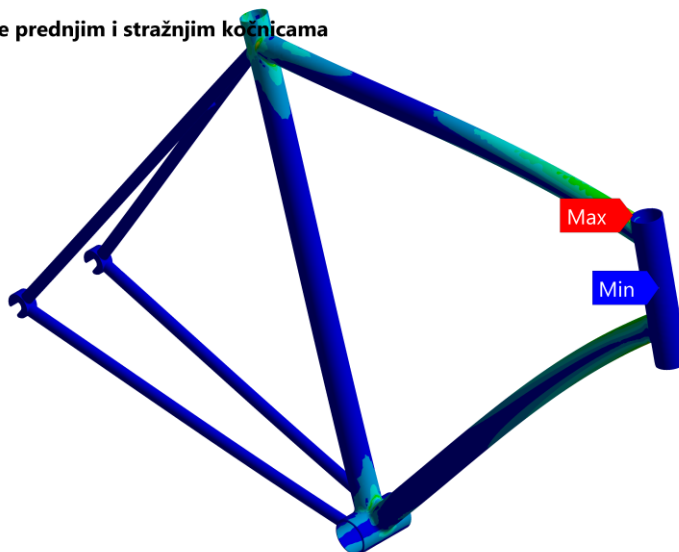
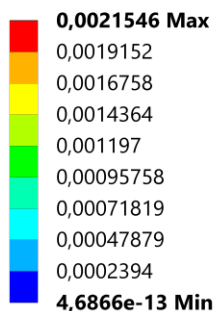
Ukupni pomaci  
Mjerna jedinica: mm



Prilog 13. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybridC za Al 6061-T6 slučaj naglog kočenja prednjim i zadnjim kočnicama

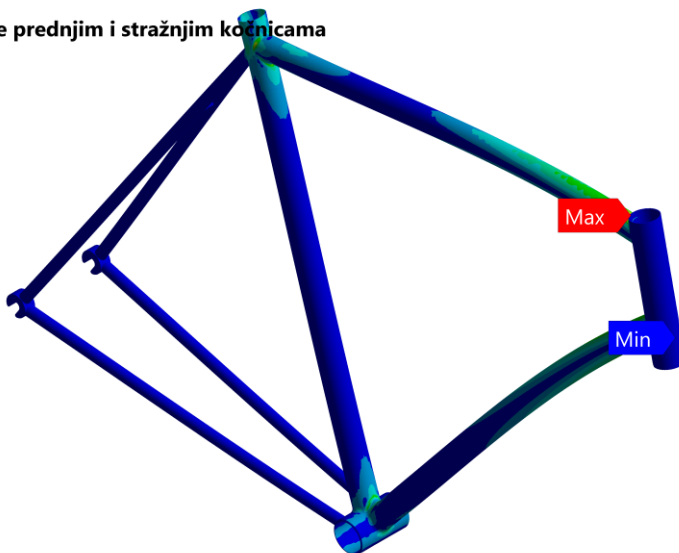
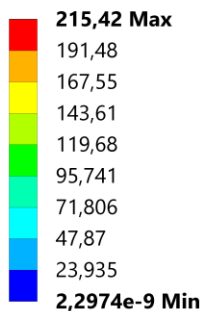
**T: VHybridC-Ti-3Al-2,5V- kočenje prednjim i stražnjim kočnicama**

Ekvivalentno produljenje/deformacija  
Mjerna jedinica: mm/mm



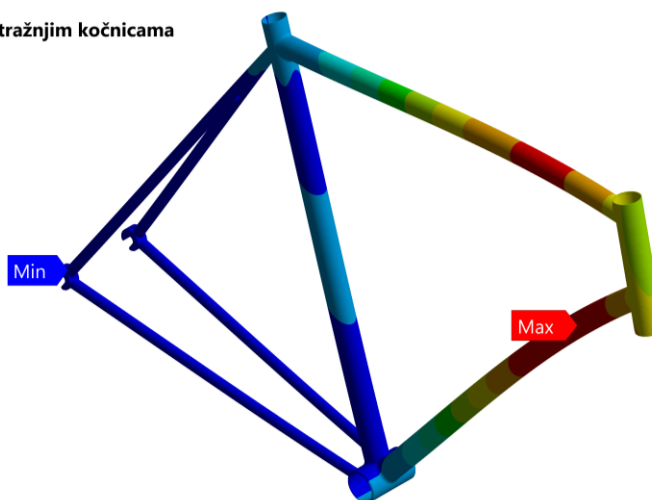
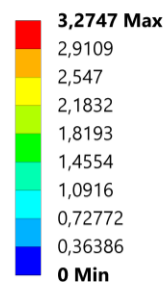
**T: VHybridC-Ti-3Al-2,5V- kočenje prednjim i stražnjim kočnicama**

Ekvivalentno naprezanje  
Mjerna jedinica: MPa



**T: VHybridC-Ti-3Al-2,5V- kočenje prednjim i stražnjim kočnicama**

Ukupni pomaci  
Mjerna jedinica: mm



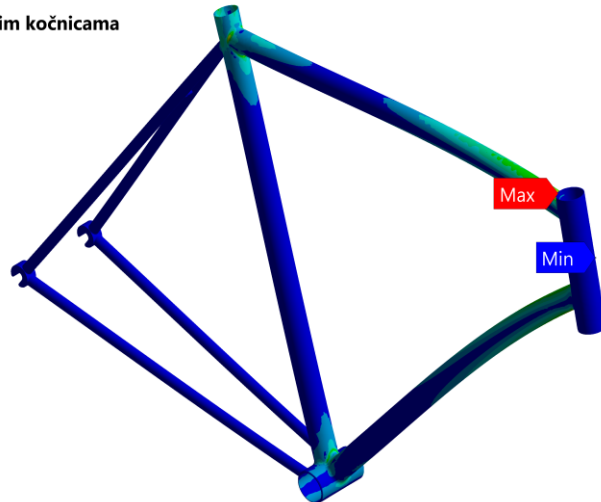
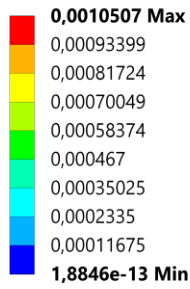
*Prilog 14. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybridC za Ti-3Al-2,5V slučaj naglog kočenja prednjim i zadnjim kočnicama*



**M: VHybridC-AISI 4130- kočenje prednjim i stražnjim kočnicama**

Ekvivalentno produljenje/deformacija

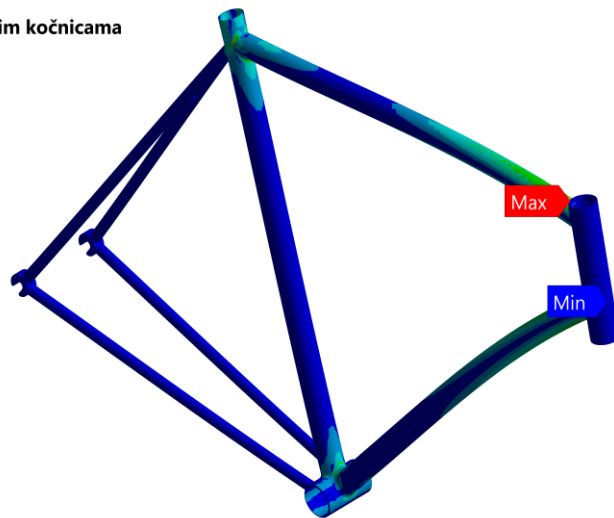
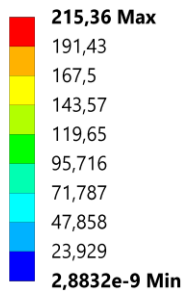
Mjerna jedinica: mm/mm



**M: VHybridC-AISI 4130- kočenje prednjim i stražnjim kočnicama**

Ekvivalentno naprezanje

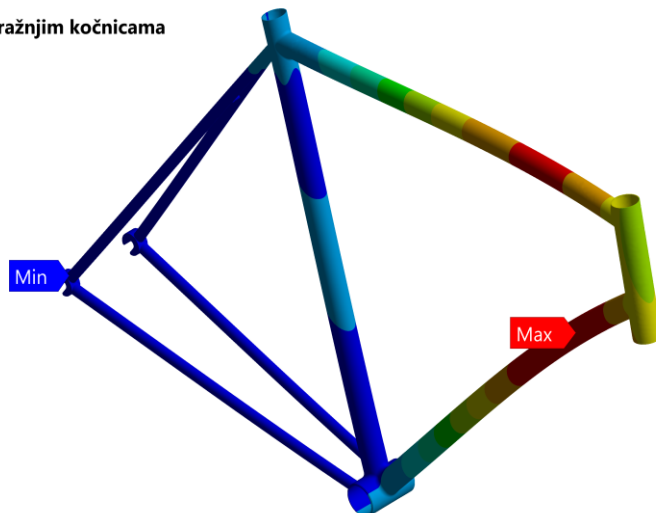
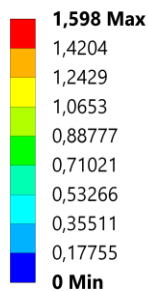
Mjerna jedinica: MPa



**M: VHybridC-AISI 4130- kočenje prednjim i stražnjim kočnicama**

Ukupni pomaci

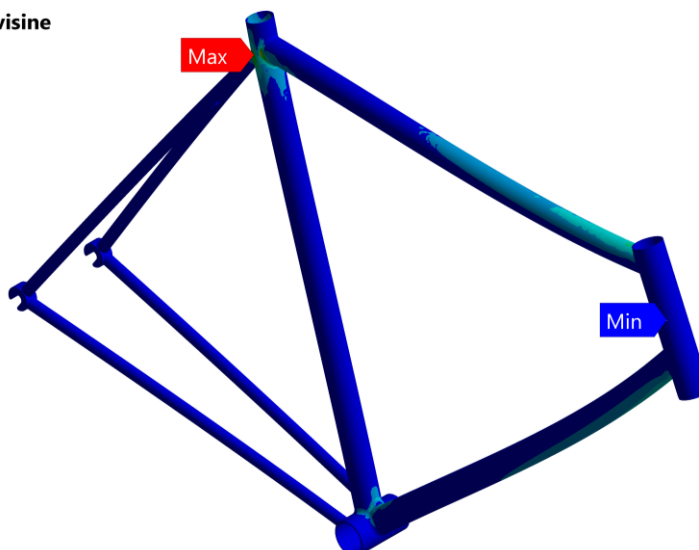
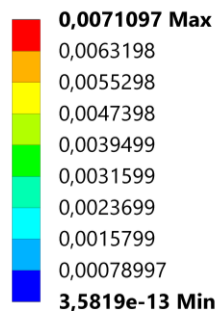
Mjerna jedinica: mm



*Prilog 15. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybridC za AISI 4130 slučaj naglog kočenja prednjim i zadnjim kočnicama*

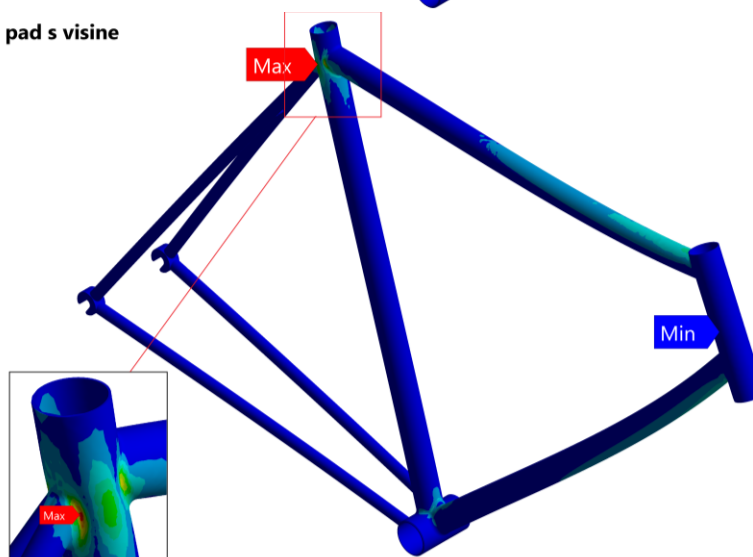
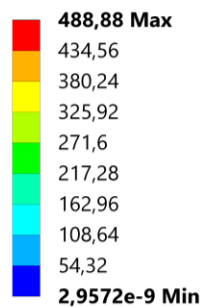
**N: VHybridC-Al-6061-T6- pad s visine**

Ekvivalentno produljenje/deformacija  
Mjerna jedinica: mm/mm



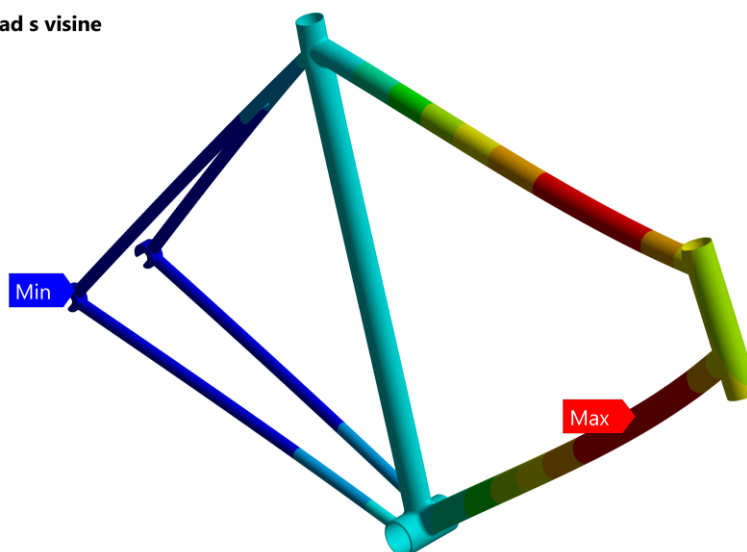
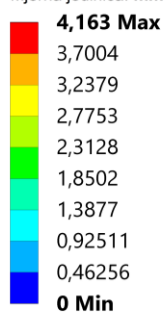
**N: VHybridC-Al-6061-T6- pad s visine**

Ekvivalentno naprezanje  
Mjerna jedinica: MPa



**N: VHybridC-Al-6061-T6- pad s visine**

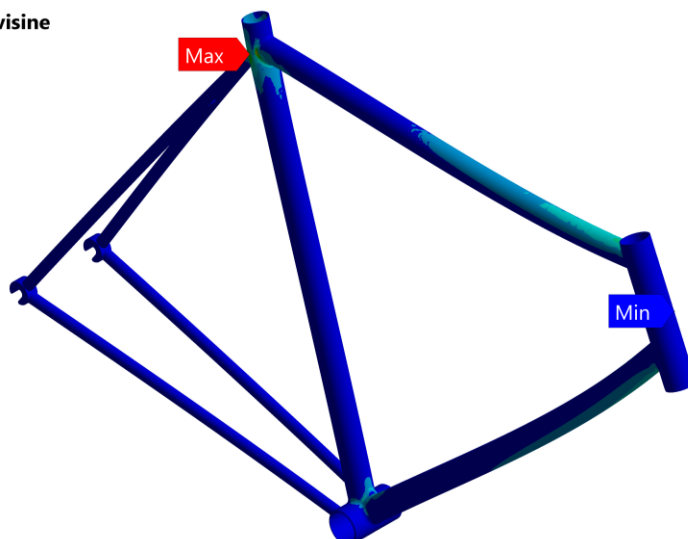
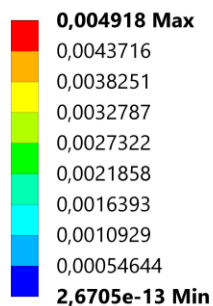
Ukupni pomaci  
Mjerna jedinica: mm



Prilog 16. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybridC za Al 6061-T6 slučaj pada s visine

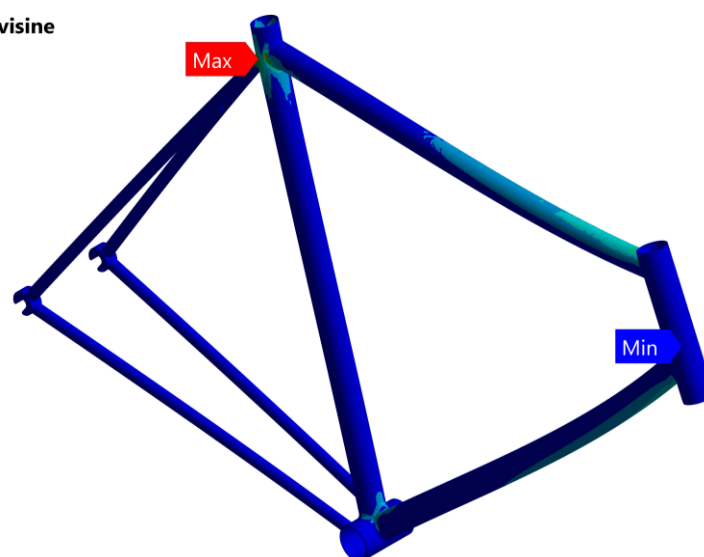
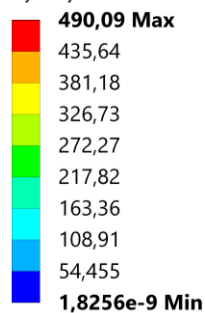
**V: VHybridC-Ti-3Al-2,5V- pad s visine**

Ekvivalentno produljenje/deformacija  
Mjerna jedinica: mm/mm



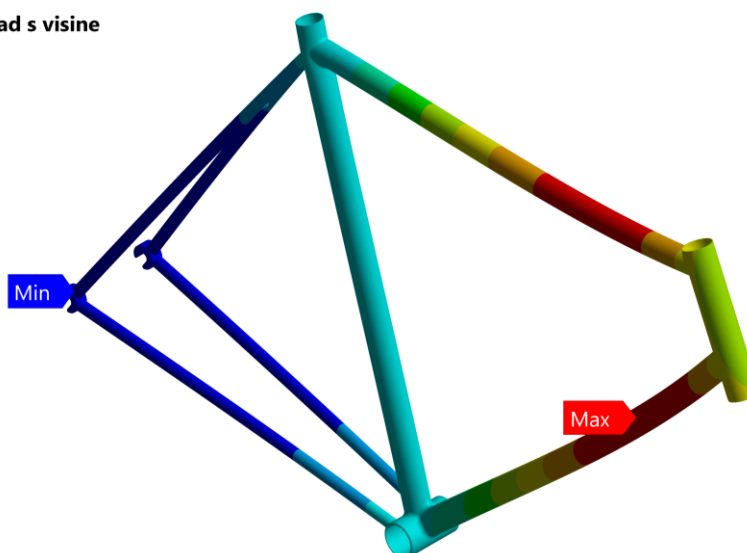
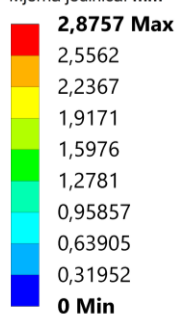
**V: VHybridC-Ti-3Al-2,5V- pad s visine**

Ekvivalentno naprezanje  
Mjerna jedinica: MPa



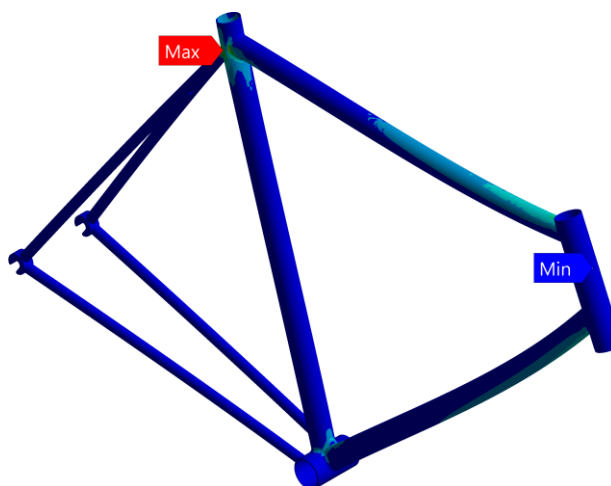
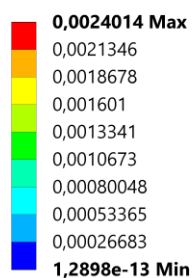
**V: VHybridC-Ti-3Al-2,5V- pad s visine**

Ukupni pomaci  
Mjerna jedinica: mm

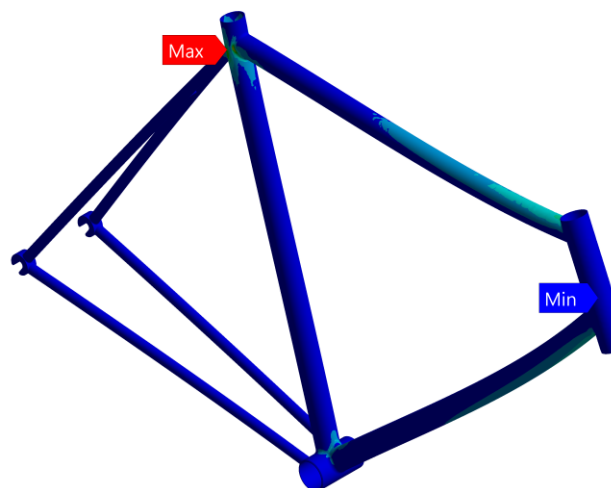
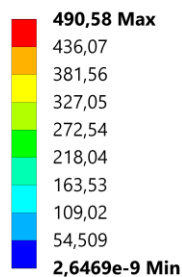


*Prilog 17. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybridC za Ti-3Al-2,5V slučaj pada s visine*

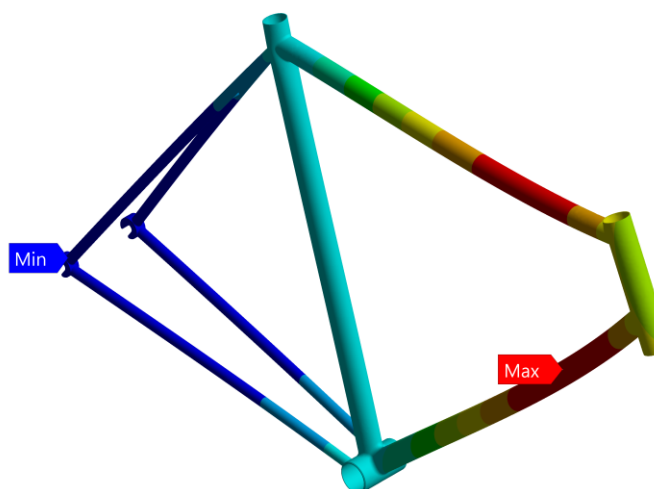
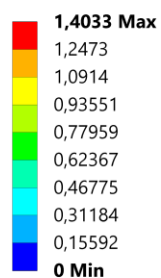
**U: VHybridC-AISI 4130- pad s visine**  
Ekvivalentno produljenje/deformacije  
Mjerna jedinica: mm/mm



**U: VHybridC-AISI 4130- pad s visine**  
Ekvivalentno naprezanje  
Mjerna jedinica: MPa



**U: VHybridC-AISI 4130- pad s visine**  
Ukupni pomaci  
Mjerna jedinica: mm

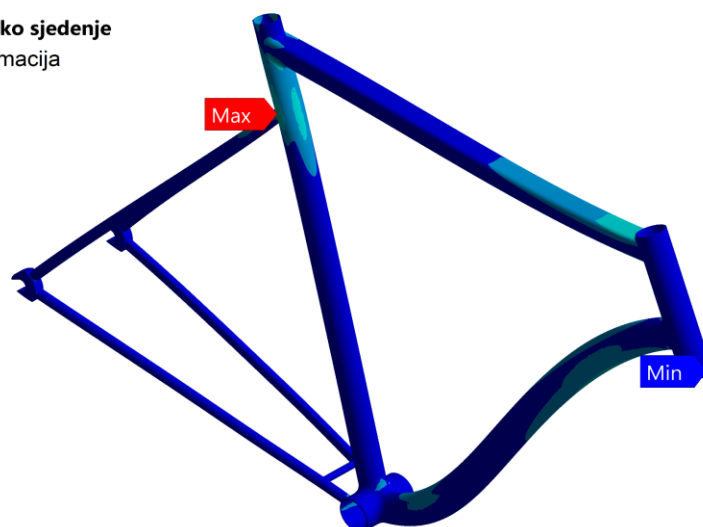
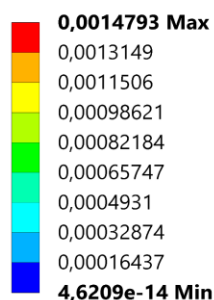


*Prilog 18. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybridC za AISI 4130 slučaj pada s visine*

**X: VHybrid1-Ti-3Al-2,5V-staticko sjedenje**

Ekvivalentno produljenje/deformacija

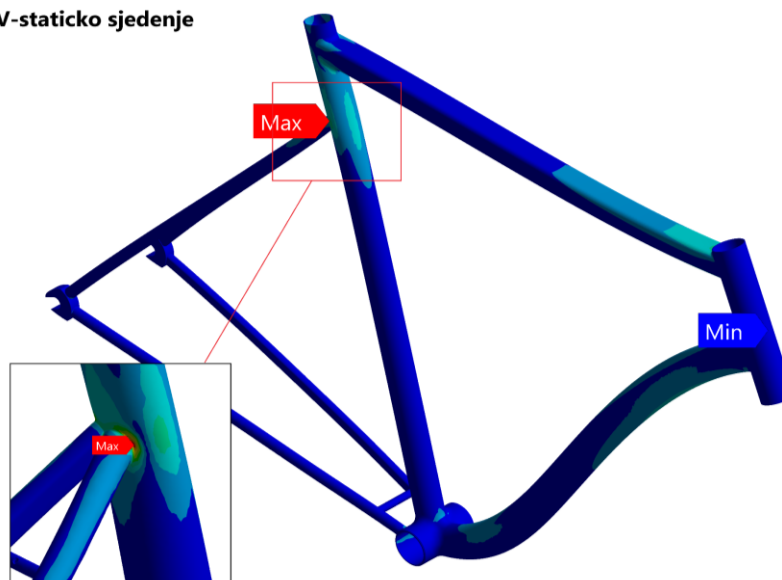
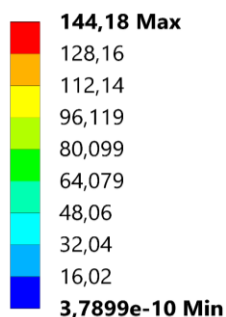
Mjerna jedinica: mm/mm



**X: VHybrid1-Ti-3Al-2,5V-staticko sjedenje**

Ekvivalentno naprezanje

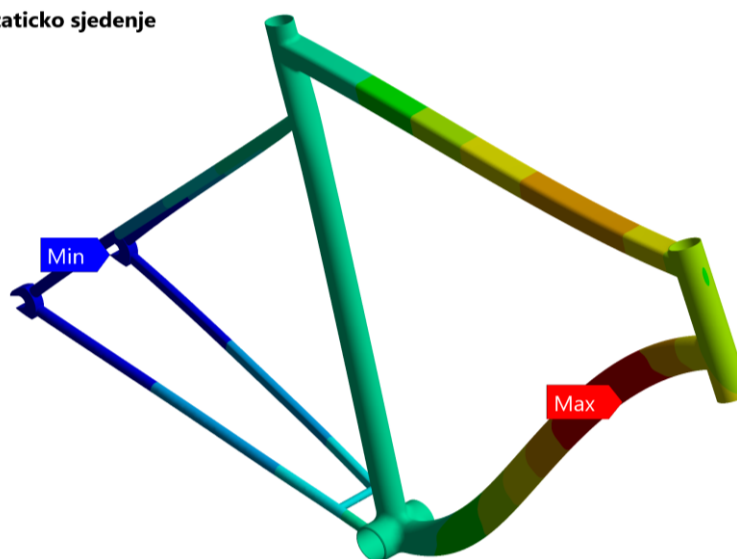
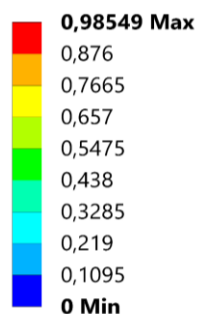
Mjerna jedinica: MPa



**X: VHybrid1-Ti-3Al-2,5V-staticko sjedenje**

Ukupni pomaci

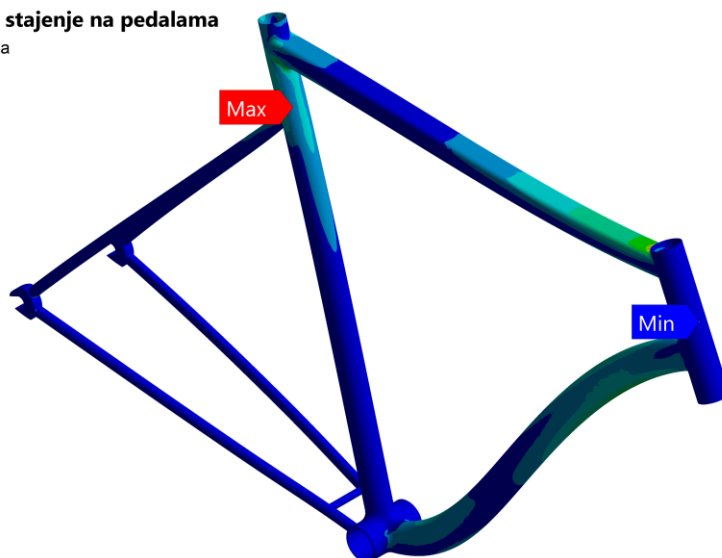
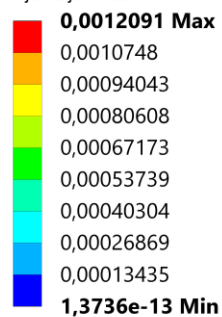
Mjerna jedinica: mm



*Prilog 19. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybrid1 za Ti-3Al-2,5V slučaj statičkog sjedenja*

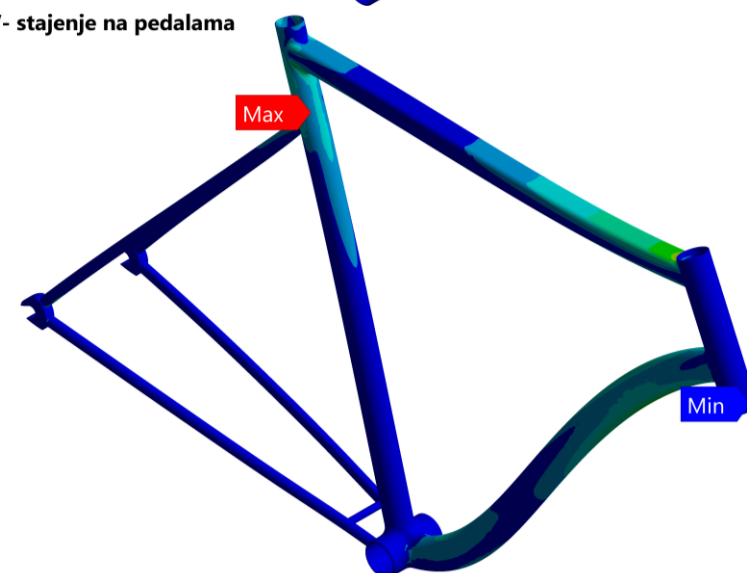
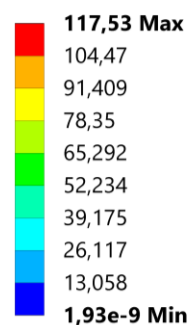
**AD: VHybrid1-Ti-3Al-2,5V- stajenje na pedalama**

Ekvivalentno produljenje/deformacija  
Mjerna jedinica: mm/mm



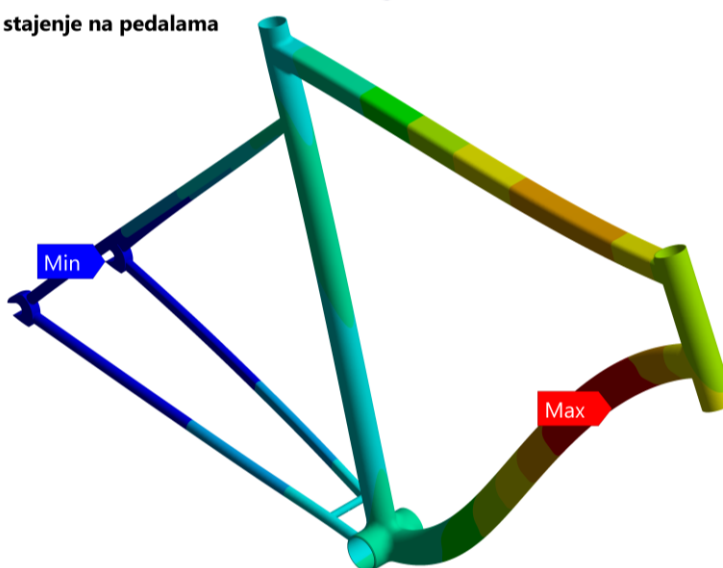
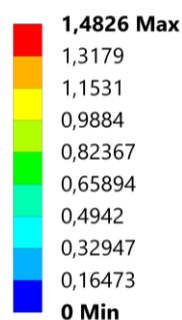
**AD: VHybrid1-Ti-3Al-2,5V- stajenje na pedalama**

Ekvivalentno naprezanje  
Mjerna jedinica: MPa



**AD: VHybrid1-Ti-3Al-2,5V- stajenje na pedalama**

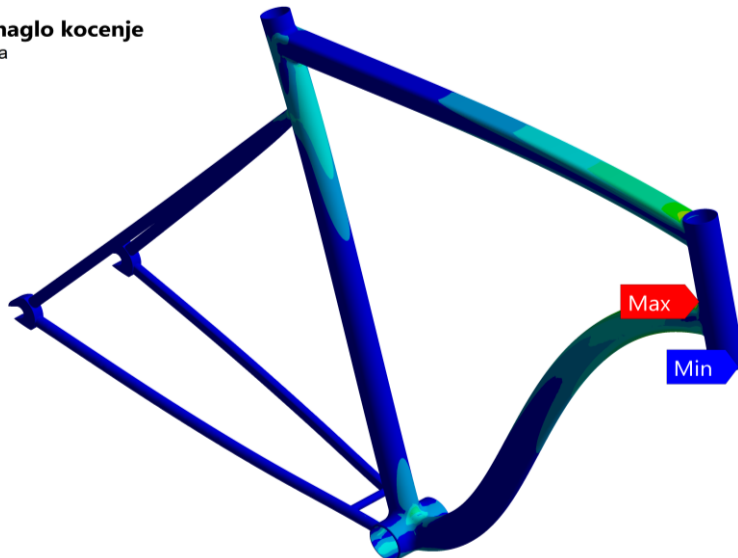
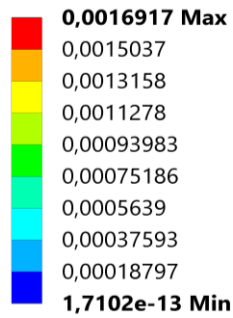
Ukupni pomaci  
Mjerna jedinica: mm



*Prilog 20. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybrid1 za Ti-3Al-2,5V slučaj stajanje na pedalama*

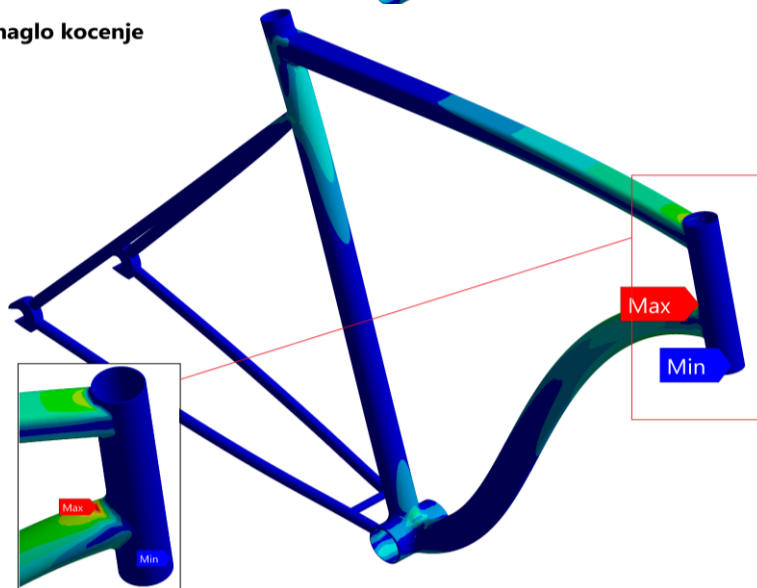
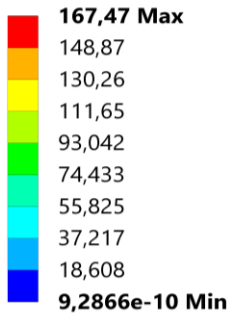
**AE: VHybrid1-Ti-3Al-2,5V-naglo kocenje**

Ekvivalentno produljenje/deformacija  
Mjerna jedinica: mm/mm



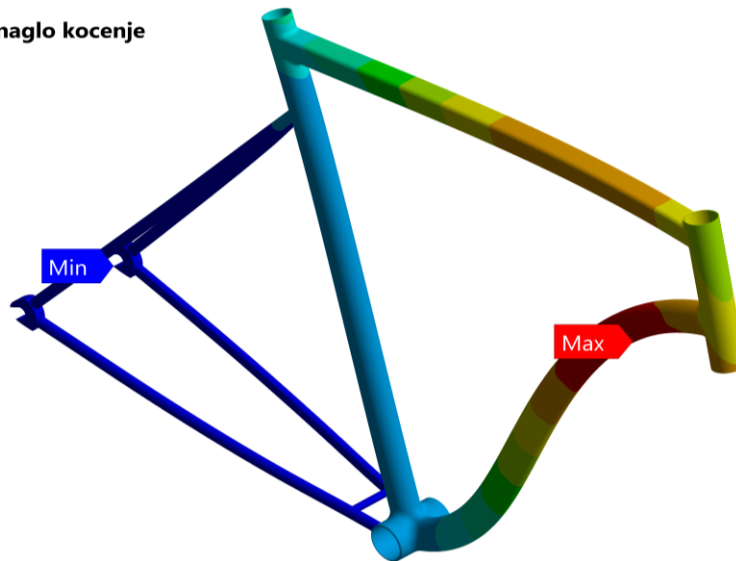
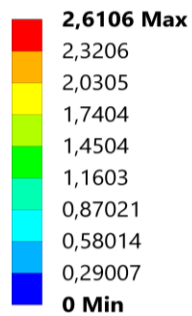
**AE: VHybrid1-Ti-3Al-2,5V-naglo kocenje**

Ekvivalentno naprezanje  
Mjerna jedinica: MPa



**AE: VHybrid1-Ti-3Al-2,5V-naglo kocenje**

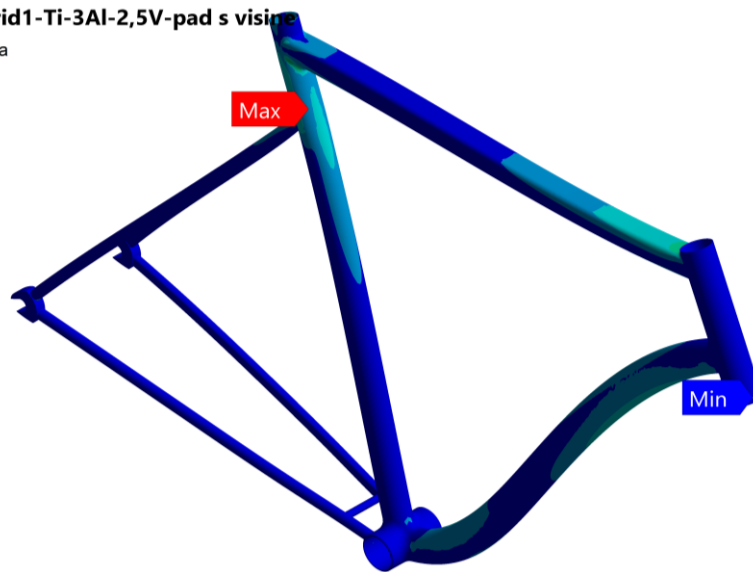
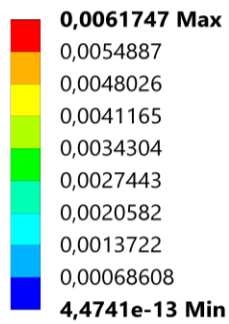
Ukupni pomaci  
Mjerna jedinica: mm



*Prilog 21. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybrid1 za Ti-3Al-2,5V slučaj naglo kočenje*

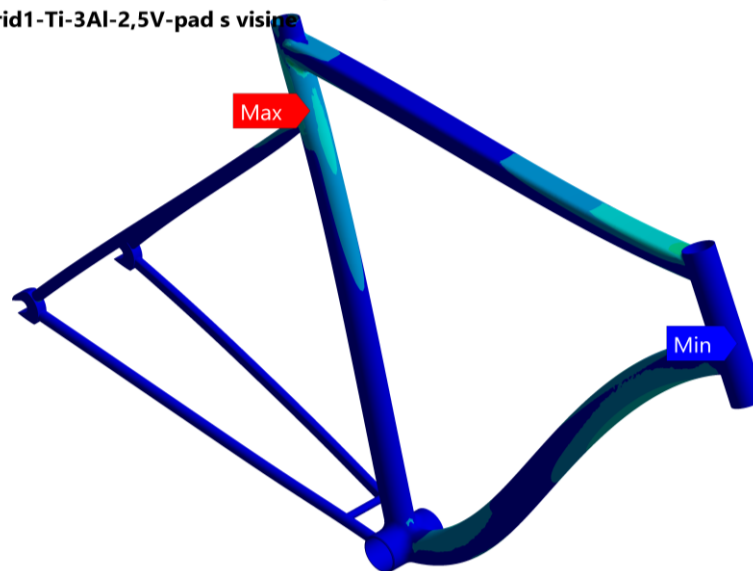
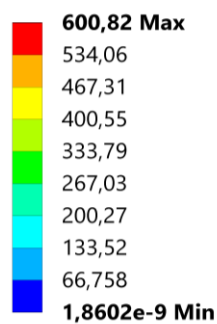
**AF: Copy of Copy of VHybrid1-Ti-3Al-2,5V-pad s visine**

Ekvivalentno produljenje/deformacija  
Mjerna jedinica: mm/mm



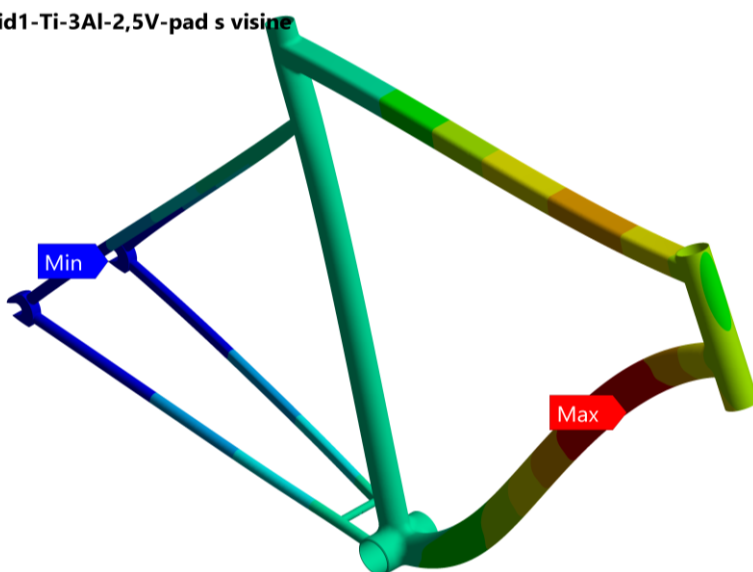
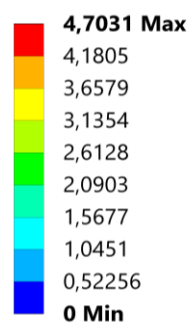
**AF: Copy of Copy of VHybrid1-Ti-3Al-2,5V-pad s visine**

Ekvivalentno naprezanje  
Mjerna jedinica: MPa



**AF: Copy of Copy of VHybrid1-Ti-3Al-2,5V-pad s visine**

Ukupni pomaci  
Mjerna jedinica: mm

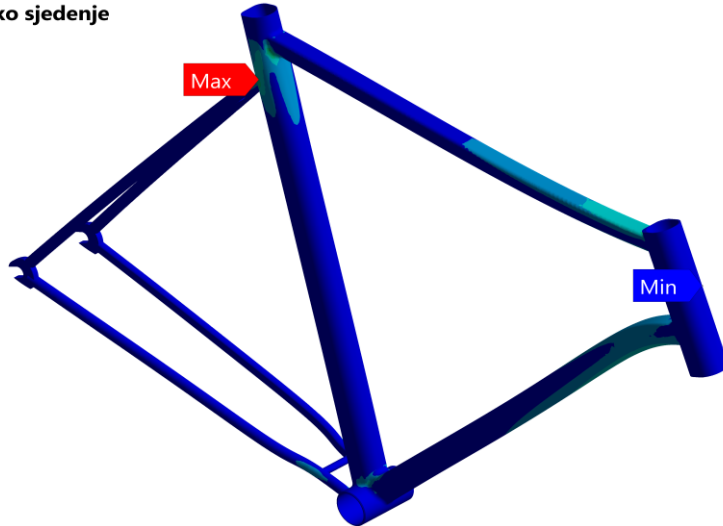
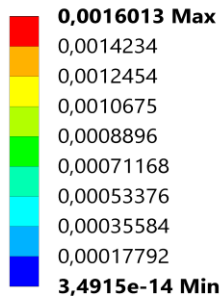


*Prilog 22. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybrid1 za Ti-3Al-2,5V slučaj pada s visine*



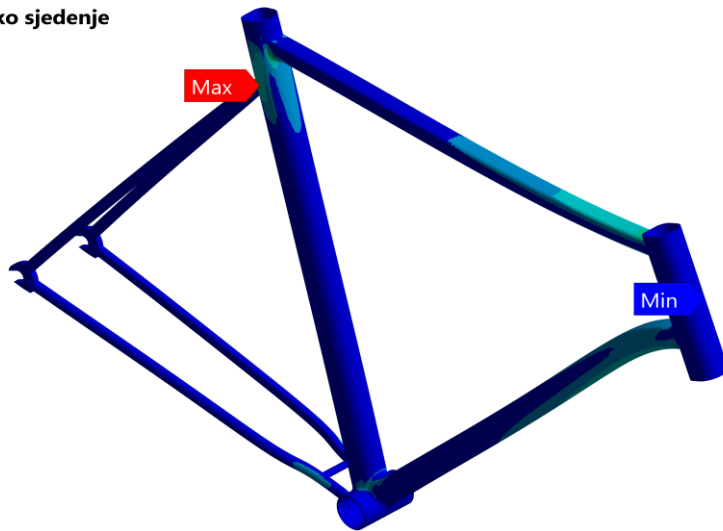
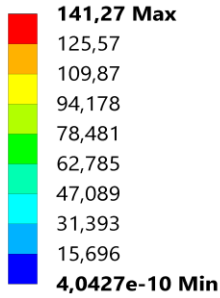
**AG: VHybrid2-Ti-3Al-2,5V- statičko sjedenje**

Ekvivalentno produljenje/deformacija  
Mjerna jedinica: mm/mm



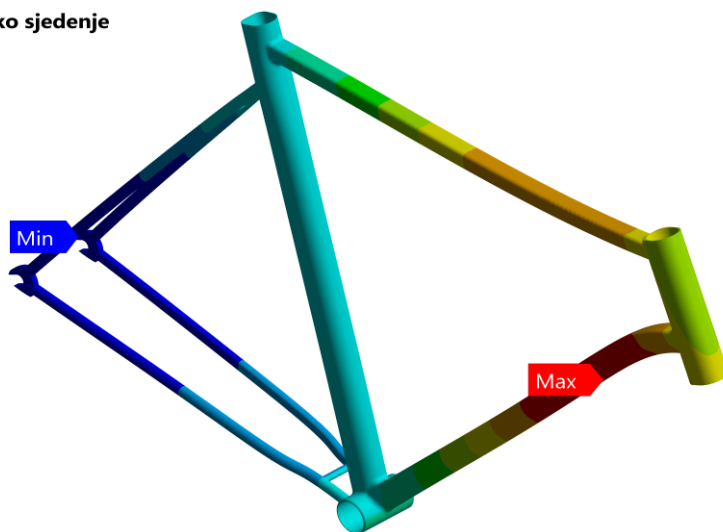
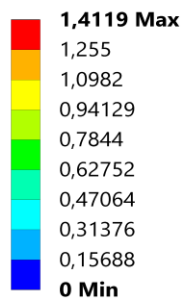
**AG: VHybrid2-Ti-3Al-2,5V- statičko sjedenje**

Ekvivalentno naprezanje  
Mjerna jedinica: MPa



**AG: VHybrid2-Ti-3Al-2,5V- statičko sjedenje**

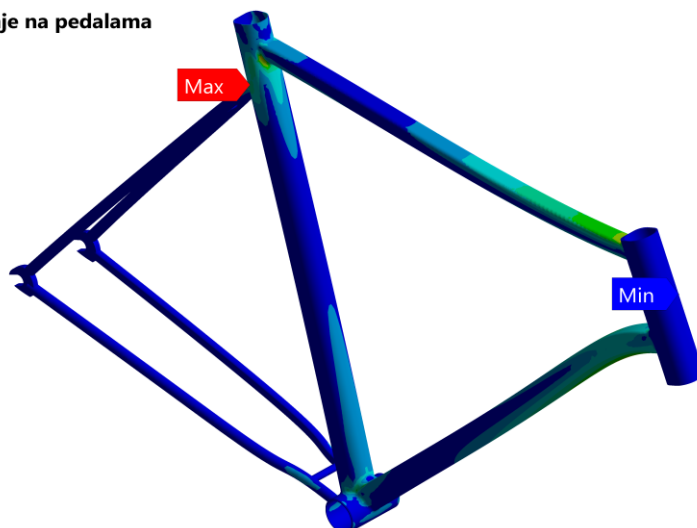
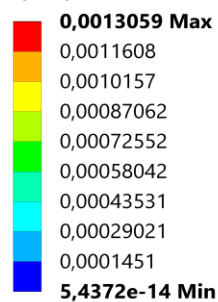
Ukupni pomaci  
Mjerna jedinica: mm



Prilog 23. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybrid2 za Ti-3Al-2,5V slučaj statičko sjedenje

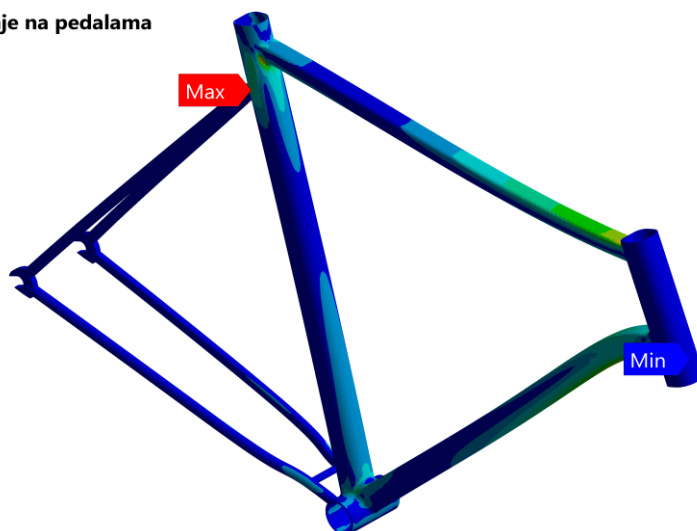
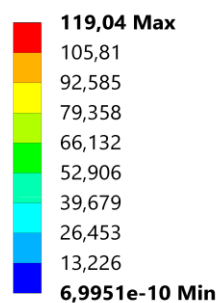
**AH: VHybrid2-Ti-3Al-2,5V- stajanje na pedalama**

Ekvivalentno produljenje/deformacija  
Mjerna jedinica: mm/mm



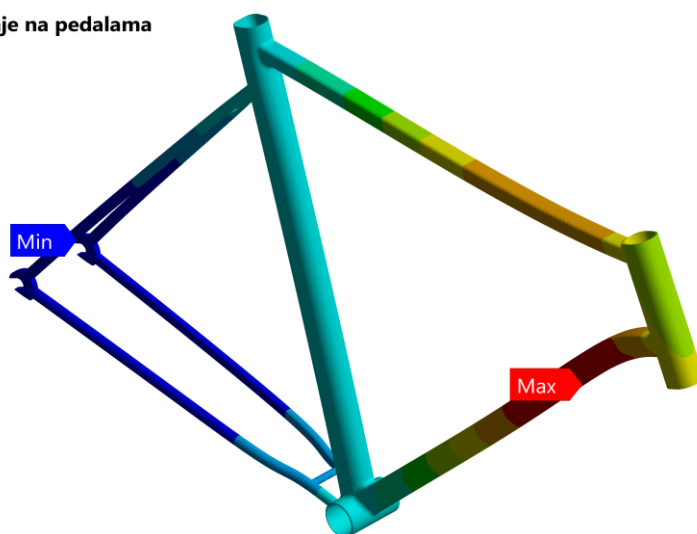
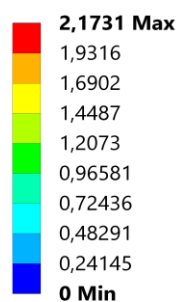
**AH: VHybrid2-Ti-3Al-2,5V- stajanje na pedalama**

Ekvivalentno naprezanje  
Mjerna jedinica: MPa



**AH: VHybrid2-Ti-3Al-2,5V- stajanje na pedalama**

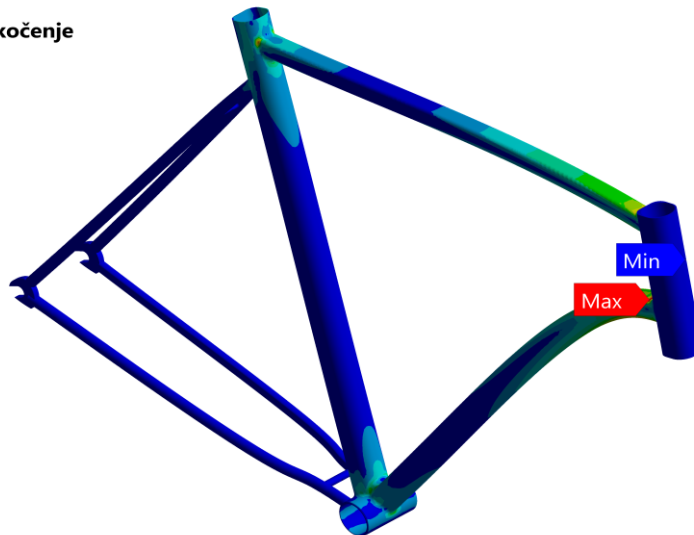
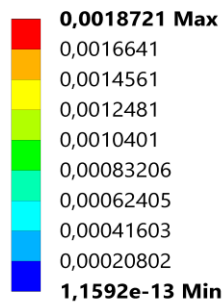
Ukupni pomaci  
Mjerna jedinica: mm



*Prilog 24. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybrid2 za Ti-3Al-2,5V slučaj stajanja na pedalama*

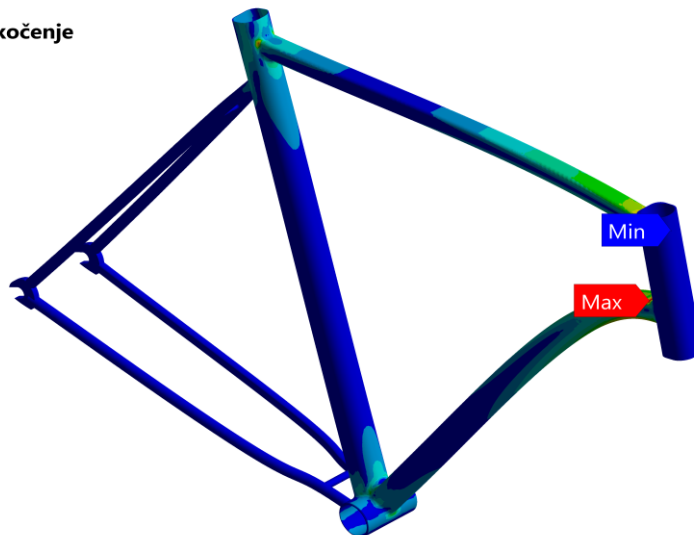
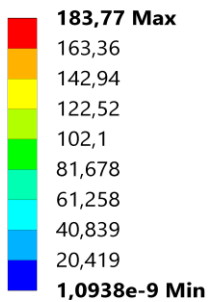
**AI: VHybrid2-Ti-3Al-2,5V- naglo kočenje**

Ekvivalentno produljenje/deformacija  
Mjerna jedinica: mm/mm



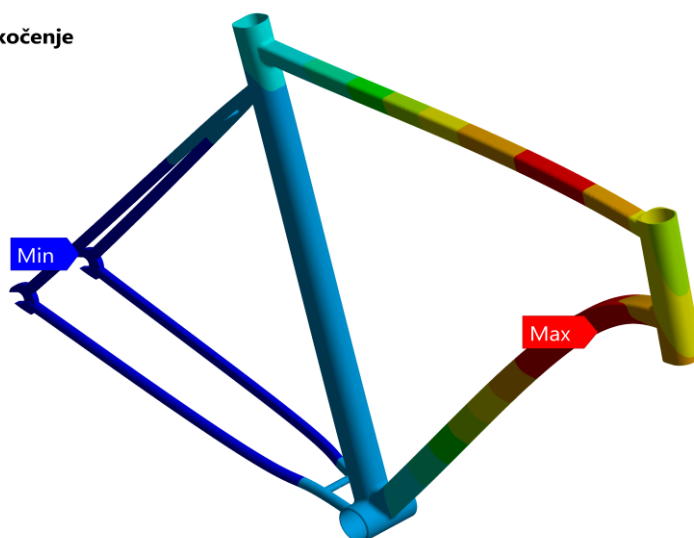
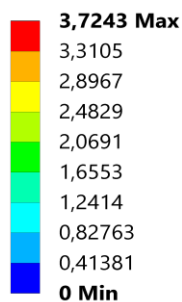
**AI: VHybrid2-Ti-3Al-2,5V- naglo kočenje**

Ekvivalentno naprezanje  
Mjerna jedinica: MPa



**AI: VHybrid2-Ti-3Al-2,5V- naglo kočenje**

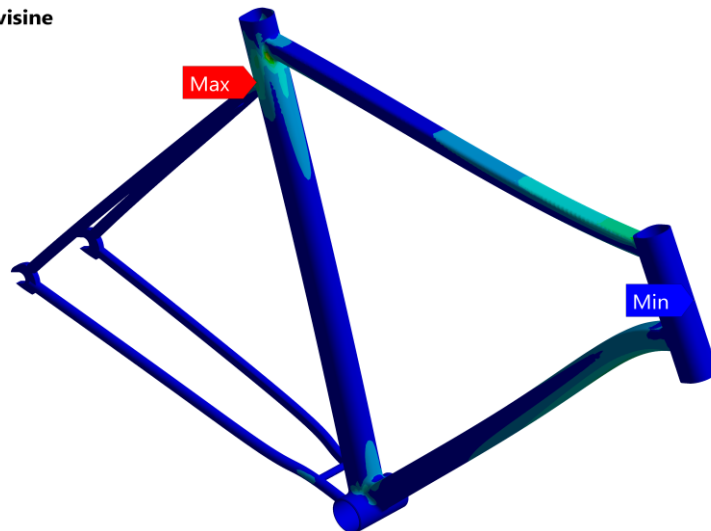
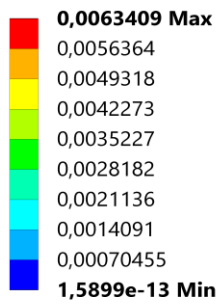
Ukupni pomaci  
Mjerna jedinica: mm



*Prilog 24. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybrid2 za Ti-3Al-2,5V slučaj naglog kočenja*

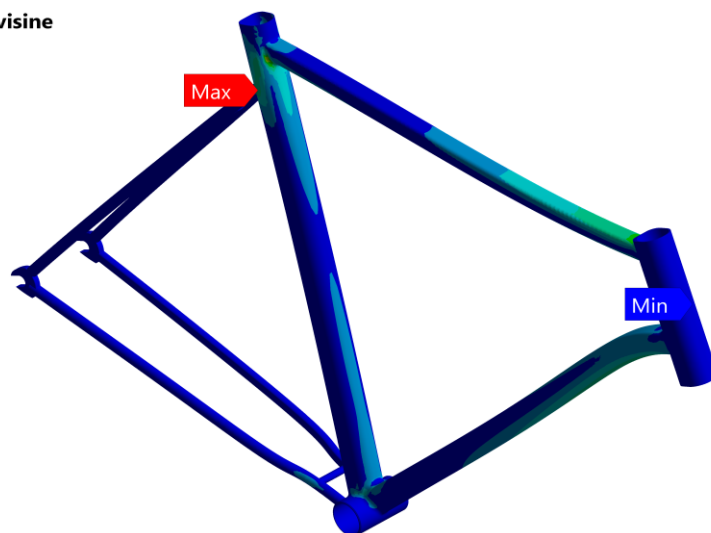
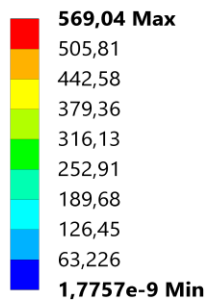
**AJ: VHybrid2-Ti-3Al-2,5V- pad s visine**

Ekvivalentno produljenje/deformacija  
Mjerna jedinica: mm/mm



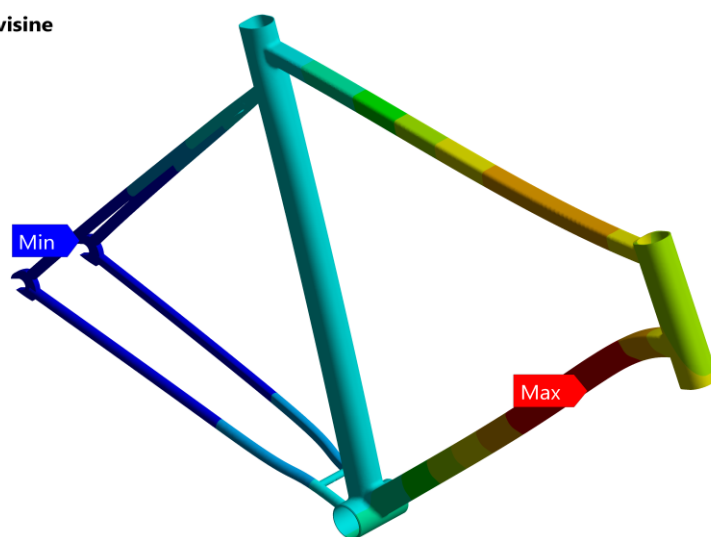
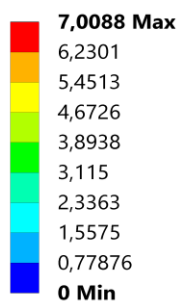
**AJ: VHybrid2-Ti-3Al-2,5V- pad s visine**

Ekvivalentno naprezanje  
Mjerna jedinica: MPa



**AJ: VHybrid2-Ti-3Al-2,5V- pad s visine**

Ukupni pomaci  
Mjerna jedinica: mm



*Prilog 25. Rezultati deformacija, naprezanja i pomaka FEA analiza VHybrid2 za Ti-3Al-2,5V slučaj pada s visine*