

NAČRTOVANJE IN IZDELAVA
KONSTRUKCIJE

STROJNIŠTVO

RAZISKOVALNA NALOGA

MIHA AŽMAN, S4D

MENTOR: NEJC MARINŠEK

2023/2024

ŠOLSKI CENTER LJUBLJANA
SREDNJA ŠOLA ZA STROJNIŠTVO,
KEMIJO IN VAROVANJE

Ključne besede: 3D model
Jeklene cevi
Konstrukcija
Analiza

POVZETEK

Večina današnjih vozil je sestavljena na močni osnovi, ki se imenuje konstrukcija ali okvir vozila. Njen izum je močno vplival na razvoj avtomobilske industrije. V preteklosti se je izdelovala iz različnih materialov, kot so les, jeklo in aluminij, v današnjem času tudi iz karbonskih vlaken. Razvoj materialov je omogočil izdelavo konstrukcije z manjšo maso, ki je postala ključnega pomena za letalsko industrijo ter za svet moto športa. Konstrukcija predstavlja temelj za pritrjevanje ostalih komponent na vozilo, ki skupaj tvorijo celoto. Za dobro načrtovanje konstrukcije je potrebno izdelati 3D model in ga analizirati. V raziskovalni nalogi so predstavljeni načrtovanje, izdelava in analiza konstrukcije iz jeklenih cevi. Konstrukcija je uporabljena za dirkalnik, katerega oblika spominja na Formulo 1. Poleg same funkcionalnosti je v ospredje postavljena tudi varnost in zanesljivo delovanje, tako v mirovanju, kot v gibanju.

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	Cilji in namen naloge.....	1
2	HIPOTEZE	2
3	KONSTRUKCIJA VOZILA	3
3.1	Razvoj konstrukcije vozila	3
3.2	Razlika med konstrukcijo in šasijo	4
3.3	Vrste konstrukcij.....	4
3.3.1	»Monocoque« konstrukcija	4
3.3.2	»Ladder« konstrukcija.....	5
3.3.3	»Backbone« konstrukcija	6
3.3.4	Tubularna konstrukcija.....	7
3.4	Izbira konstrukcije	7
4	NAČRTOVANJE KONSTRUKCIJE.....	8
4.1	Dimenzioniranje v 3D programu	8
4.2	Analiza konstrukcije	9
4.2.1	Analiza čelnega udarca (»Frontal impact analysis«).....	9
4.2.2	Analiza bočnega udarca (»Side impact analysis«)	11
4.2.3	Upogibna analiza (»Flexural analysis«).....	12
4.2.4	Analiza vožnje skozi ovinek (»Curve analysis«)	15
4.2.5	Torzijska upornost na prednjem vzmetenju (»Torsional rigidity front«).....	17
4.2.6	Torzijska upornost na zadnjem vzmetenju (»Torsional rigidity back«)	18
5	DOBAVA MATERIALA	20
6	IZDELAVA KONSTRUKCIJE.....	21
6.1	Rezanje cevi na ustrezno dolžino	21
6.2	Krivljenje cevi z doma izdelano krivilno pripravo	22
6.3	Oblikovanje zaključkov cevi	22
6.4	Varjenje po postopku MAG/TIG.....	23
6.5	Brušenje zvarov	24
7	PRIPRAVA IN IZDELAVA PRIKLJUČKOV ZA VZMETENJE.....	25
8	PREGLED KONSTRUKCIJE IN PRIPRAVA ZA BARVANJE.....	26
9	ZAKLJUČEK	27
9.1	REZULTATI	27
10	VIRI.....	29

KAZALO SLIK

Slika 3.1: Konstrukcija vozila z dodanimi sklopi podvozja [8]	3
Slika 3.2: »Monocoque« konstrukcija[9]	5
Slika 3.3: »Ladder« konstrukcija [10]	6
Slika 3.4: »Backbone« konstrukcija [11]	6
Slika 3.5: Tubularna konstrukcija [12]	7
Slika 4.1: Konstrukcija izdelana v 3D programu	8
Slika 4.2: Priprava za analizo čelnega udarca	10
Slika 4.3: Rezultat analize čelnega udarca	11
Slika 4.4: Priprava za analizo bočnega udarca	11
Slika 4.5: Rezultat analize bočnega udarca	12
Slika 4.6: Priprava za upogibno analizo	14
Slika 4.7: Rezultat upogibne analize	14
Slika 4.8: Priprava za analizo vožnje skozi ovinek	16
Slika 4.9: Rezultat analize vožnje skozi ovinek	17
Slika 4.10: Priprava za analizo torzijske upornosti na prednjem vzmetenju	17
Slika 4.11: Rezultat analize torzijske upornosti na prednjem vzmetenju	18
Slika 4.12: Priprava za analizo torzijske upornosti na zadnjem vzmetenju	19
Slika 4.13: Rezultat analize torzijske upornosti na zadnjem vzmetenju	19
Slika 6.1: Rezanje jeklenih cevi	21
Slika 6.2: Doma izdelana krivilna priprava za krivljenje cevi	22
Slika 6.3: Priprava za oblikovanje zaključkov cevi z vrtalno krono	23
Slika 6.4: Varjenje po varilnem postopku MAG	24
Slika 7.1: Priključek za vzmetenje	25
Slika 8.1: Pregled konstrukcije s spodnje strani	26

KAZALO TABEL

Tabela 4.1: Izračun sile na vsaki pritrditveni točki za upogibno analizo	13
Tabela 4.2: Izračun sile na vsaki pritrditveni točki za analizo vožnje skozi ovinek	15

KAZALO ENAČB

Enačba 4.1: Izračun sile v pritrditveni točki komponente	12
Enačba 4.2: Izračun centrifugalne sile	15

SEZNAM UPORABLJENIH OZNAK IN KRATIC

3D	Trodimenzionalno/-en
MAG	»Metal Active Gas«
TIG	»Tungsten Inert Gas«
SAE	»The Society of Automotive Engineers«
M14	Navoj s premerom $\varnothing 14$
G60	Granulacija z vrednostjo 60
G120	Granulacija z vrednostjo 120

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

a	$\frac{m}{s^2}$	Pospešek
$l; d$	$m; \varnothing$	Dolžina
v	$\frac{m}{s}$	Hitrost
F	N	Sila
m	kg	Masa
T	Nm	Torzijski moment
R_m	MPa	Natezna trdnost
R_e	MPa	Meja tečenja
$\sigma_{Df\ izm}$	MPa	Upogibna trajna dinamična izmenična trdnost
$\tau_{Dt\ izm}$	MPa	Vzvojna trajna dinamična izmenična trdnost
α	$^{\circ}$	Kot, naklon

1 UVOD

Vozila, ki jih danes vidimo v prometu, potrebujejo poleg dobrega motorja, menjalnika, vzmetenja, zavor ter volanskega sklopa tudi močno konstrukcijo za njihovo zanesljivo delovanje. Konstrukcija je poleg funkcionalnosti vozila velikokrat zadolžena za samo varnost voznika in potnikov v primeru prometnih nesreč, saj nase lahko prevzame veliko količino energije pri nenadnih udarcih.

1.1 Cilji in namen naloge

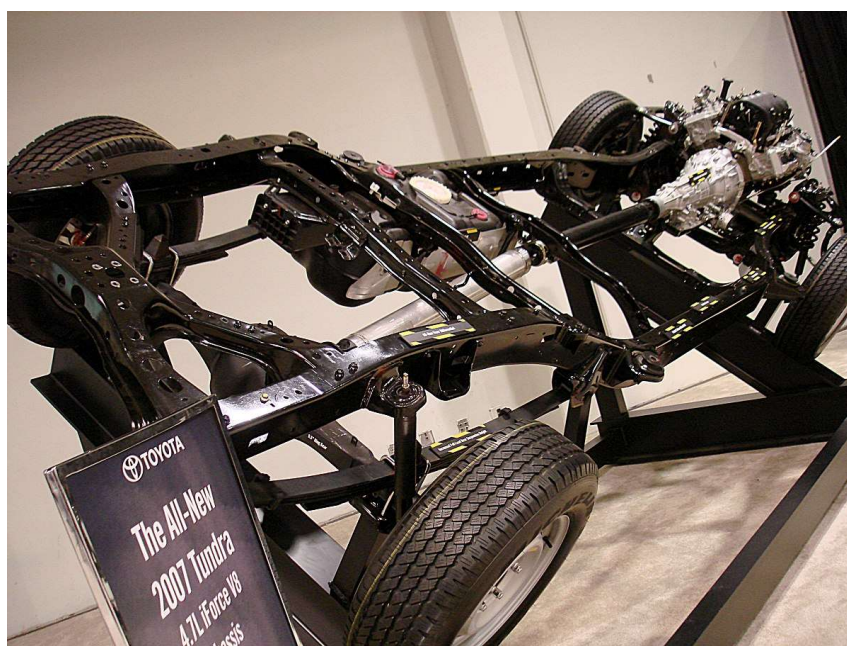
Cilj naloge je izdelava konstrukcije, ki predstavlja funkcionalno in zanesljivo osnovo za nadaljnjo izgradnjo dirkalnika. Izdelana mora biti tako, da je zmožna prenosa zunanjih obremenitev in sil brez da bi pri tem prišlo do prekomerne deformacije ali celo do porušitve.

2 HIPOTEZE

- I. Izdelava dirkalnika, ki ima izgled formule, je možna iz jeklenih cevi.
- II. Možno je krivljenje cevi namesto rezanja cevi.
- III. S postopkom MAG varjenja je možno doseči dovolj dobro kvaliteto varjenja, da je konstrukcija zmožna zdržati vse obremenitve, ki jih povzroča dirkalnik med vožnjo.
- IV. Možna je uporaba šivnih cevi namesto brezšivnih pri izgradnji konstrukcije.
- V. S pomočjo uporabe 3D programov je možna izdelava virtualnega okvirja, ki je kasneje uporabljen kot osnova za izgradnjo pravega okvirja iz jeklenih cevi.
- VI. Možna je izdelava konstrukcije, katere masa ne presega 200 kilogramov.

3 KONSTRUKCIJA VOZILA

Konstrukcija ali okvir predstavlja »kostje« vozila, na katerega so kasneje pritrjeni nekateri sklopi vozila. Le ta prenaša vse obremenitve in sile, ki se pojavljajo tako pri mirovanju kot pri samem premikanju vozila. Okvir je izdelan iz jeklene osnove, v današnjem času tudi iz aluminijevih zlitin in karbonskih vlaken, ki poleg prenosa vseh obremenitev in sil doprinesejo k zmanjšanju teže okvirja vozila, zato so okvirji iz aluminijevih zlitin pogosto uporabljeni pri dirkalnih avtomobilih in izgradnji okvirjev v letalski industriji.



Slika 3.1: Konstrukcija vozila z dodanimi sklopi podvozja. [8]

3.1 Razvoj konstrukcije vozila

Izum okvirja vozil sega v konec 19. stoletja, natančneje okoli leta 1896, ko je bila izumljena prva konstrukcija avtomobila. Idejo za izdelavo so dobili izdelovalci kočij, ki so v izdelavi okvirjev videli dober posel, saj je bil v tistem času prisoten hiter razvoj avtomobilov. Prvotna konstrukcija je bila zgrajena iz lesa in povezana z veznim elementi kot so vijaki ter raznimi lepilnimi sredstvi. Skozi čas so les zamenjali kovinski elementi kot so ogljikova jekla. Za enega izmed prvih avtomobilov z jeklenim okvirjem velja Fordov »Model T« iz leta 1908. V poznih sedemdesetih letih 20. stoletja so za izdelavo okvirjev začeli uporabljati aluminijeve zlitine, ki so znatno zmanjšale samo težo vozila, zato so postajali okvirji, izdelani iz aluminijevih zlitin vedno bolj zanimivi za izdelavo dirkaških vozil. Poleg tega so aluminijevi okvirji zahtevali manjšo količino energije za njihovo izdelavo kot za izdelavo jeklenih okvirjev. [6] V današnjem času so za izdelavo uporabljena tudi karbonska vlakna, vendar je njihova izdelava izjemno zahtevna in draga, zato so take konstrukcije vozil uporabljene le za draga športna vozila in izdelavo vozil Formule 1.

3.2 Razlika med konstrukcijo in šasijo

Večina ljudi trdi, da izraz konstrukcija (okvir) vozila in podvozje (šasija) predstavljata isto stvar, vendar temu ni tako:

- Konstrukcija ali okvir vozila predstavlja osnovo vozila, ki je zadolžena za prenašanje obremenitev in kasnejše pritrjevanje ostalih sklopov vozila. Predstavlja enega izmed bistvenih delov šasije,
- podvozje oziroma šasija vozila predstavlja skupek konstrukcije in ostalih sklopov vozila, kot so vzmetenje, volanski sklop, zavorni sistem ter kolesa. [7]

3.3 Vrste konstrukcij

Poznamo različne vrste okvirjev vozil, ki se med seboj razlikujejo glede na namen in uporabo. Najpogostejše uporabljene vrste konstrukcij vozil lahko razdelimo v štiri glavne skupine.

3.3.1 »Monocoque« konstrukcija

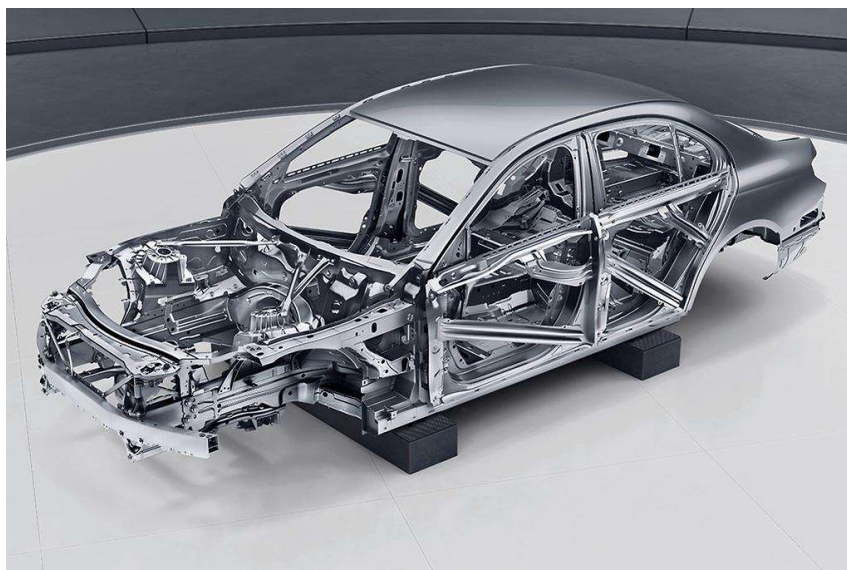
»Monocoque« konstrukcija [5] je okvir, ki je, kot nam že samo ime pove, sestavljen iz ene skupne enote. Je najbolj pogosto uporabljena vrsta okvirja, saj je njena glavna lastnost, da je izjemno zmogljiva, zato je največkrat uporabljena v proizvodnji avtomobilov.

PREDNOSTI:

- Predstavlja eno izmed najbolj varnih različic okvirja v primeru nesreč,
- zmogljiva vrsta okvirja, ki zavzame malo prostora, zato je idealen za izdelavo osebnih vozil,
- dobro prenaša statične in dinamične obremenitve,
- ima majhno maso, kar pripomore k manjši porabi goriva vozila.

SLABOSTI:

- Manj fleksibilna, kar posledično pripomore k slabšemu prilagajanju vozila podlagi, še posebej pri bolj dinamični vožnji,
- zahtevno popravilo v primeru poškodb okvirja, saj je sestavljen iz enega dela.



Slika 3.1: »Monocoque« konstrukcija. [9]

3.3.2 »Ladder« konstrukcija

»Ladder« konstrukcija [5] je vrsta okvirja, ki ima obliko lestve. Osnovo predstavljata dva daljša tramova, ki sta povezana s številnimi prečnimi tramovi, ki poskrbijo za pravilno absorpcijo obremenitev. Uporabljen je predvsem za izdelavo terenskih in tovornih vozil.

PREDNOSTI:

- Enostavna proizvodnja in sestava okvirja,
- je fleksibilna, zato se dobro prilagaja tudi bolj razgibanim podlagam,
- omogoča bolj udobno in mirno vožnjo.

SLABOSTI:

- Vozila, ki uporabljajo to vrsto okvirja so po navadi večja, zato je potrebna previdnost pri vožnji,
- velika masa okvirja, kar pomeni počasnejšo in manj dinamično vožnjo.



Slika 3.2: »Ladder« konstrukcija. [10]

3.3.3 »Backbone« konstrukcija

»Backbone« konstrukcija [5] je vrsta okvirja, ki ima obliko črke H in povezuje prednje in zadnje vzmetenje preko okroglega profila, ki poteka po sredini celotne dolžine konstrukcije.

PREDNOSTI:

- Dober kontakt vozila s podlago zaradi oblike okvirja, kar poveča stabilnost vozila,
- dobra odpornost na udarce in vzvoj zaradi togosti okvirja.

SLABOSTI:

- Visoka cena izdelave ter visoka cena popravila v primeru poškodb.



Slika 3.3: »Backbone« konstrukcija. [11]

3.3.4 Tubularna konstrukcija

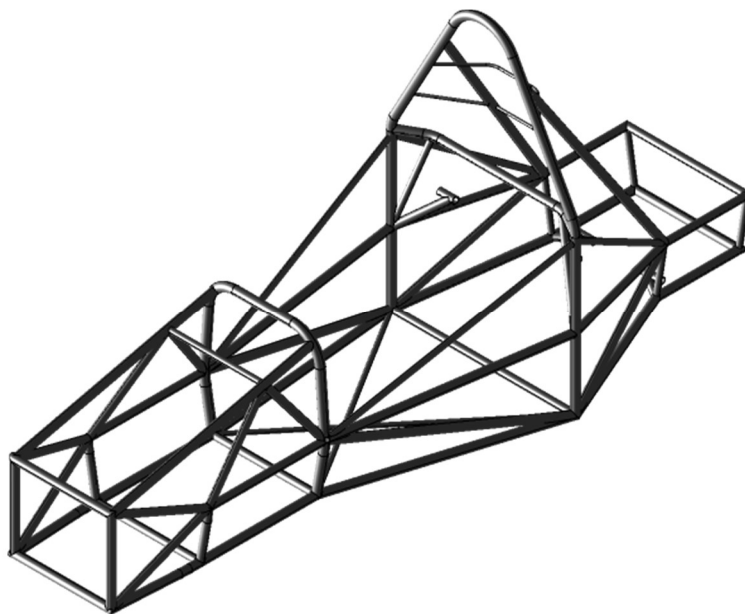
Tubularna konstrukcija [5] je vrsta okvirja, ki je sestavljena iz cevi okroglega profila. Ta vrsta konstrukcije je najpogostejše uporabljena v dirkalnih avtomobilih, saj omogoča veliko varnost, ker konstrukcija tvori tako imenovano »kletko« okoli voznika in ga varuje pri nesrečah.

PREDNOSTI:

- Votle cevi omogočajo lahko konstrukcijo, ki pripomore k manjši masi vozila oziroma dirkalnika,
- zaradi poljubne postavitve cevi je konstrukcija bolj varna in praktična,
- dobro prenašajo zunanje obremenitve pri dinamični vožnji.

SLABOSTI:

- Potrebno je veliko časa za izdelavo, saj niso masovno proizvedene.



Slika 3.4: Tubularna konstrukcija. [12]

3.4 Izbira konstrukcije

Pri izbiranju vrste okvirja dirkalnika je bila na podlagi zgoraj naštetih prednosti in lastnosti okvirjev za izdelavo izbrana TUBULARNA KONSTRUKCIJA, saj njene lastnosti ustrezajo zahtevam, ki jih mora izpolnjevati za ustreznost delovanja dirkalnika.

4 NAČRTOVANJE KONSTRUKCIJE

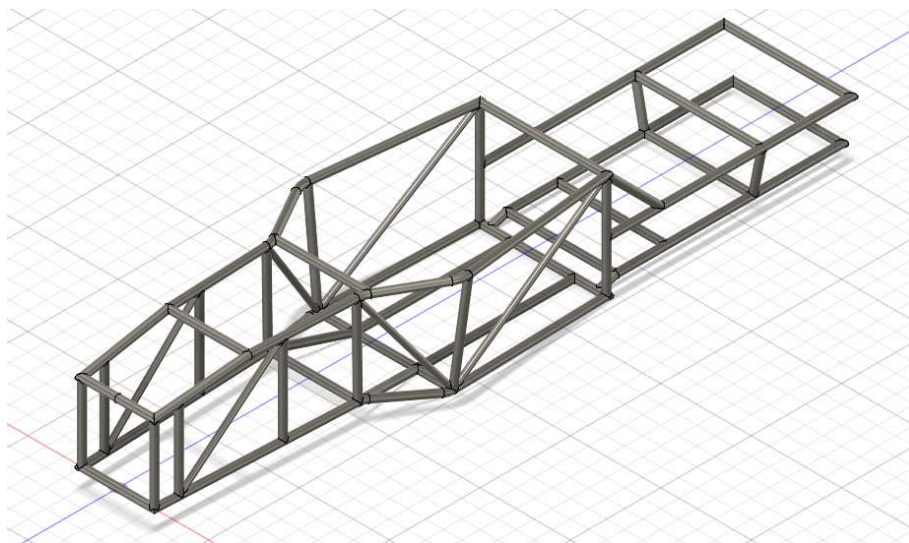
4.1 Dimenzioniranje v 3D programu

Po izbiri vrste konstrukcije je bilo potrebno poiskati idejo za obliko okvirja. S pomočjo dimenzioniranja v trodimenzionalnem prostoru je bila izdelana konstrukcija, ki je ustrezala naslednjim zahtevam:

- Dovolj velik prostor za voznika,
- ustrezna oblika za vpenjanje motorja,
- pravilno postavljene nosilne cevi za prenašanje obremenitev,
- dovolj dolg prednji del, ki ščiti voznika pred trkom,
- prostor za stopalke in sistem za krmiljenje vozila,
- pravilna postavitev cevi za nadaljnjo izdelavo vzmetenja,
- ustrezno vpenjanje sedeža.

Pri tem je bilo potrebno paziti, da je obliko v procesu izdelave možno doseči. Večina cevi je obdelana s pomočjo rezanja, glavne cevi spodnjega in zgornjega obroča pa so izdelane s pomočjo postopka krivljenja, saj ta postopek manj vpliva na zmanjšanje mehanskih lastnosti materiala. V skupnih vozliščih cevi mora biti njihovo število čim manjše, saj bi bila v primeru večjega števila cevi znatno otežena izdelava koncev cevi in bi pri tem bilo potrebno upoštevati drugačne naklone naleganja cevi ene na drugo.

Za izdelavo glavnega dela konstrukcije so bile uporabljene jeklene cevi premera $\varnothing 40\text{ mm}$, za nekatere druge komponente pa cevi premera $\varnothing 30\text{ mm}$, saj nimajo tako velikega pomena pri prenašanju obremenitev. Za izdelavo priključkov za nadaljnjo izdelavo vzmetenja je bilo uporabljeno ploščato jeklo debeline 5 mm . Po končanem modeliranju je bila dobljena končna oblika konstrukcije.



Slika 4.1: Konstrukcija izdelana v 3D programu.

4.2 Analiza konstrukcije

Pred izdelavo konstrukcije je bilo potrebno opraviti analizo 3D modela okvirja. Analiza se deli na dva dela:

- Statična analiza,
- dinamična analiza.

Statična analiza konstrukcije se nanaša na analizo konstrukcije pod vplivom sil in obremenitev, ki delujejo na konstrukcijo, ko vozilo miruje in je njegova hitrost 0. Okvir mora prenašati silo, ki jo ustvarjajo komponente, ki so pritrjene nanjo.

Dinamična analiza konstrukcije se nanaša na analizo konstrukcije pod vplivom sil in obremenitev, ki delujejo na konstrukcijo, ko se vozilo giblje. Zanj je značilno, da je konstrukcija obremenjena s temi silami le takrat, ko je vozilo v gibanju.

Za analizo konstrukcije je bilo opravljenih šest bistvenih analiz:

- Analiza čelnega udarca (»Frontal impact analysis«), [3]
- analiza bočnega udarca (»Side impact analysis«), [3]
- upogibna analiza (»Flexural analysis«), [3]
- analiza vožnje skozi ovinek (»Curve analysis«), [3]
- torzijska upornost na prednjem vzmetenju (»Torsional rigidity front«), [3]
- torzijska upornost na zadnjem vzmetenju (»Torsional rigidity back«). [3]

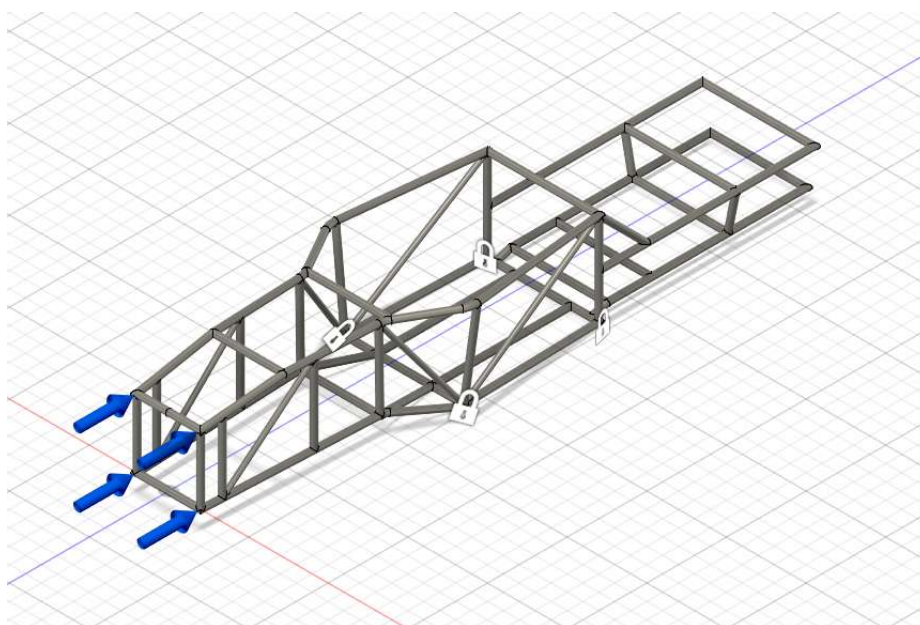
Za analizo so bili uporabljeni parametri, ki so zapisani v pravilniku za izdelavo Formule SAE [4], saj se zahteve, ki so v pravilniku podane, bistveno ne razlikujejo od naših. Formula SAE je tekmovanje v izdelavi dirkalnikov, ki je namenjen študentom po vsem svetu. Študenti tekmujejo v sklopu svoje univerze in jo na tekmovanju tudi zastopajo. Namen tekmovanja je izdelava majhnega dirkalnika, ki ima na videz izgled dirkalnika Formule 1, ki poleg njegove zmogljivosti, zagotavlja tudi varnost, saj dirkalnik na tekmovanju peljejo študenti. Tekmovanje omogoča pametno reševanje sodobnih problemov v moto športu ter podlago za nadaljnji razvoj. V današnjem času je poleg kategorije dirkalnikov z motorjem na notranje izgorevanje prišla v ospredje tudi kategorija dirkalnikov s pogonom na elektriko. Pospeški, ki jih doseže Formula SAE, so tudi boljši od pospeškov dirkalnikov Formule 1. Najboljši trenutni pospešek od 0 do 100 km/h znaša samo 0,956 s. Končna hitrost znaša okoli 120 km/h, vendar ni tako bistvena, saj je hitrostna preizkušnja za Formulo SAE izdelana tako, da so pomembni le pospeški. Poleg časa, potrebnega za vožnjo enega kroga, se ocenjuje tudi oblika, cena in izdelava formule, poslovna predstavitev ter tehnična dovršenost formule.

4.2.1 Analiza čelnega udarca (»Frontal impact analysis«)

Poleg funkcionalnosti je potrebna tudi varnost, ki jo mora konstrukcija vozniku zagotavljati v primeru trka. Konstrukcija je izdelana za vozilo, ki dosega hitrosti tudi preko 200 km/h, zato

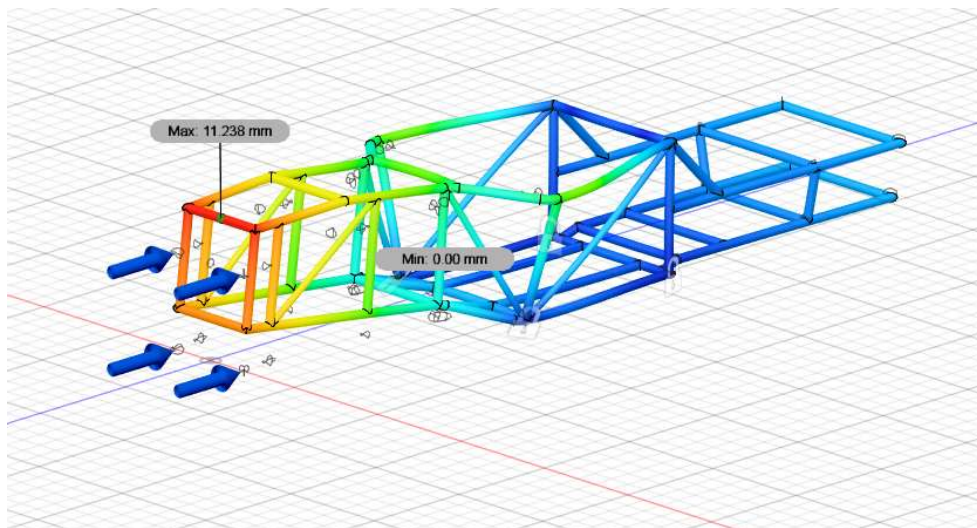
je ena izmed pomembnejših opravljenih analiz, analiza čelnega udarca, ki je bistvenega pomena za voznikovo varnost. Parametri, potrebni za analizo, so črpani iz pravilnika [4], ki pravi, da mora biti vozilo sposobno prenesti $120kN$ sile pri čelnem udarcu z največjim dovoljenim deformacijskim odstopkom, ki znaša manj kot 25 mm . Sila je enakomerno razporejena na prednje cevi, ki tvorijo sprednji del konstrukcije, ki so ob trku najbolj izpostavljene.

Pri analizi je potrebno naprej postaviti točke, kjer bo dirkalnik nepremičen med simulacijo. Najbolj smiselne so štiri točke, ki se nahajajo na ogliščih spodnjega obroča okvirja v območju sedalnega dela, ki so na *Sliki 4.2* označeni s ključavnico. Po določitvi fiksnih točk so določena štiri prijemališča sil. Sila $120kN$, se med njimi enakomerno razporedi in znaša $30kN$ na eno prijemališče. Sila ima smer proti konstrukciji, saj v primeru nesreče deluje sila na okvir, kar prikazujejo modre puščice na *Sliki 4.2*.



Slika 4.2: Priprava za analizo čelnega udarca.

Po pravilni nastavitvi parametrov in izvršeni analizi so bili dobljeni rezultati, ki so prikazani na *Sliki 4.3*. Kot je razvidno, je največji odstop pri analizi znašal $11,238\text{ mm}$, kar je več kot pol manj od dovoljene zgornje meje za deformacijo. Analiza je zato uspešno opravljena in ustreza postavljenim zahtevam.

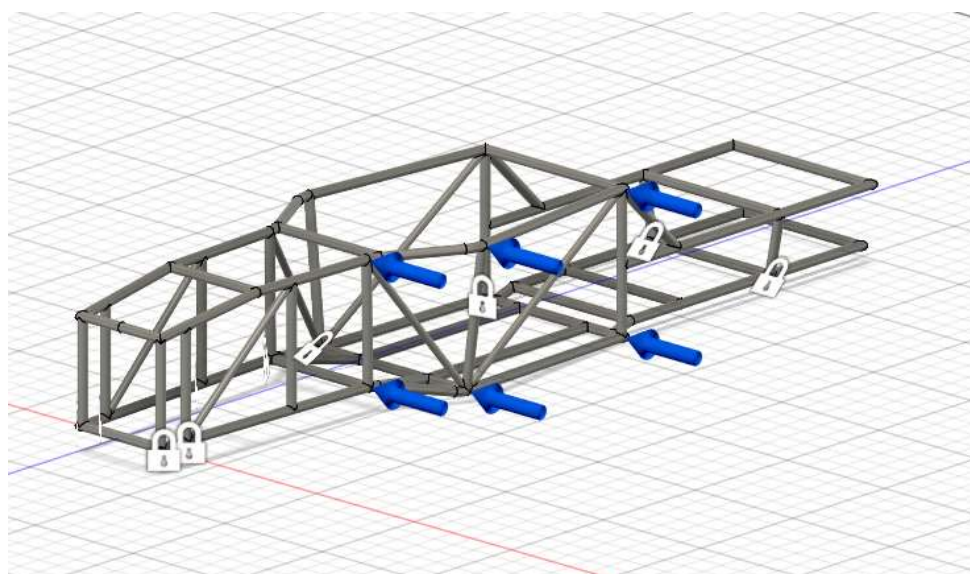


Slika 4.3: Rezultat analize čelnega udarca.

4.2.2 Analiza bočnega udarca («Side impact analysis»)

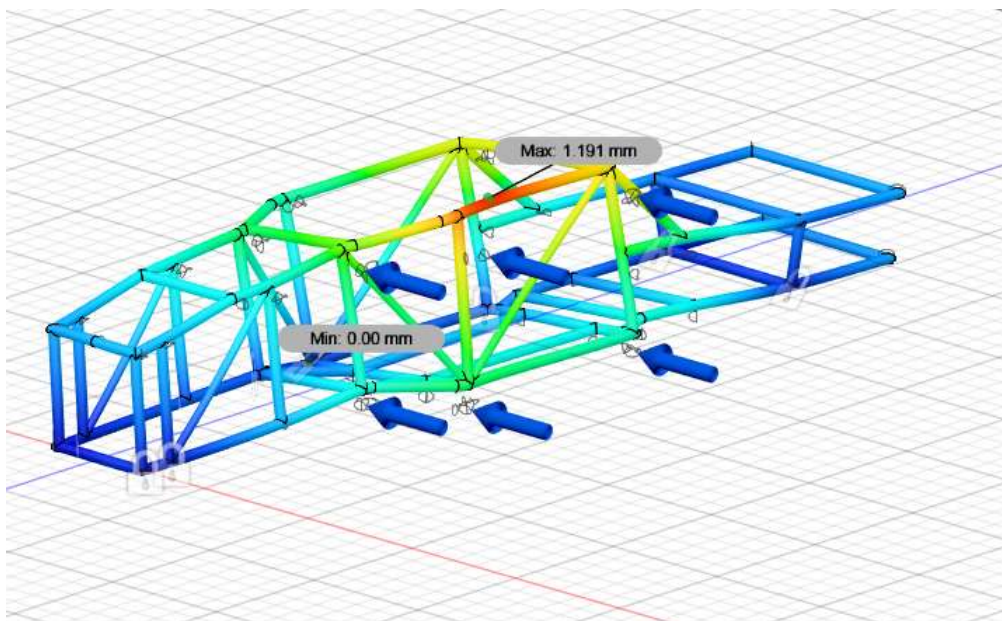
Pri vožnji skozi ovinke na vozilo deluje velika količina centrifugalne sile, zato obstaja nevarnost izgube nadzora nad vozilom in s tem možnost bočnega udarca, zato je smiselno izdelati analizo zanj v primeru nesreče. V pravilniku [4] je podano, da mora konstrukcija v primeru bočnega trka zdržati silo 7 kN , katera pa je enakomerno razporejena na obremenjene cevi.

Pri analizi so bile določene nepremične točke konstrukcije, ki se nahajajo na spodnjem obroču konstrukcije, razen v območju delovanja sile. Določenih je bilo šest prijemališč sil, kot prikazuje *Slika 4.4*. Vrednost 7 kN se razdeli na 6 delov, torej znaša sila na eno prijemališče $1,167\text{ kN}$. Sila ima smer proti konstrukciji.



Slika 4.4: Priprava za analizo bočnega udarca.

Rezultati, pridobljeni s pomočjo analize, so prikazani na *Sliki 4.5*. Največja deformacija znaša le 1,191 mm, kar pa ustreza zahtevam, zato je analiza bočnega trka uspešna.



Slika 4.5: Rezultat analize bočnega udarca.

4.2.3 Upogibna analiza (»Flexural analysis«)

Namen upogibne analize je, ali je upor konstrukcije proti silam, ki jih povzročijo mehanske komponente vozila ter voznik v mirovanju, dovolj velik, da se konstrukcija ne poruši oziroma prekomerno deformira.

Analiza je izvedena tako, da je upoštevana sila vseh bistvenih komponent v vozilu z večjo maso, ki vozilo obremenijo v mirovanju. Izračun sile vsake komponente v točki naleganja se izračuna po *Enačbi 4.1*.

$$F_i = \frac{m \cdot g}{n}$$

Enačba 4.1: Izračun sile v pritrditveni točki komponente.

F_i – sila na pritrditveni točki (točka pritrditve elementa na okvir) [N]

m – masa obremenitve [kg]

g – gravitacijski pospešek ($9,81 \frac{m}{s^2}$)

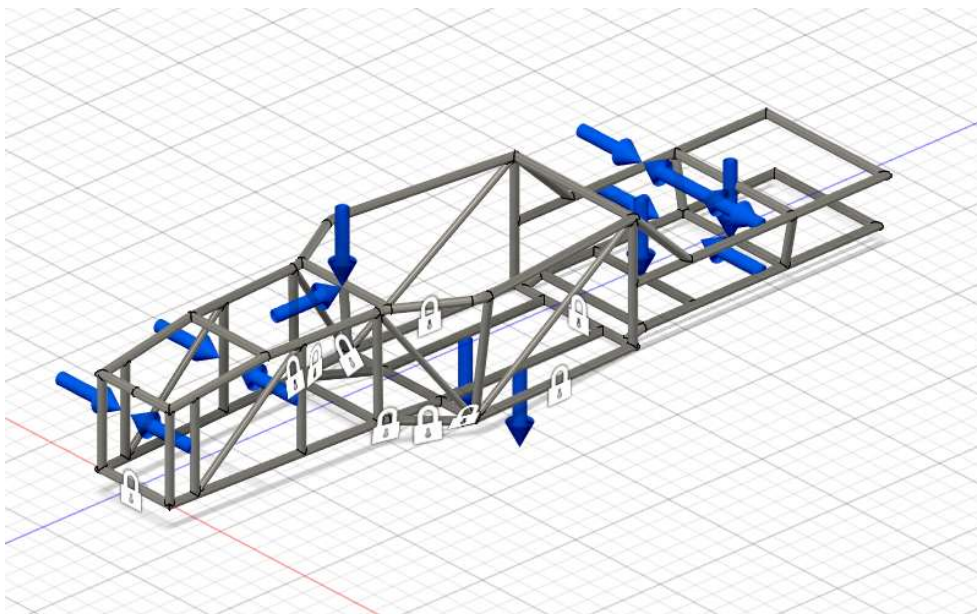
n – število pritrditvenih točk komponent

Za pravilno analizo je potrebna izdelava tabele. Sila vsake komponente v pritrditveni točki je bila izračunana s pomočjo *Enačbe 4.1*. Podatki so razvrščeni v *Tabeli 4.1*.

FLEXURAL ANALYSIS				
Obremenitve	Masa [kg]	Št. pritrditvenih točk	Sila [N]	Sila na vsaki pritr. točki [N]
Voznik	70	4	686,7	171,675
Motor	180	4	1765,8	441,45
Vzmetenje	50	16	490,5	30,66
Volanski sklop	50	2	490,5	245,25
Zavorni sklop	100	4	981	245,25
Kolesa	50	4	490,5	122,63

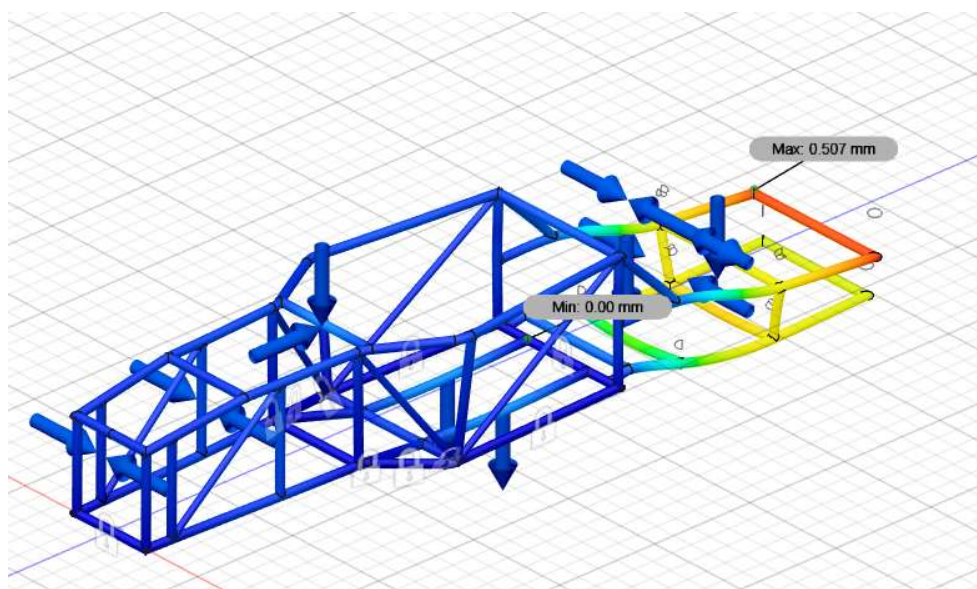
Tabela 4.1: Izračun sile na vsaki pritrditveni točki za upogibno analizo.

Po izračunu vseh sil na pritrditvenih točkah, so bila določena njihova prijemališča, ki se razlikujejo glede na pozicijo vpetja elementov. Število pritrditvenih točk je enako številu prijemališč vseh sil. Nepremične točke so postavljene na spodnji obroč, v območje prednjega in sedalnega dela, kar je razvidno v *Sliki 4.6*.



Slika 4.6: Priprava za upogibno analizo.

Po vnosu parametrov so dobljeni rezultati prikazani v *Sliki 4.7*. Največja deformacija je pričakovano nastala v območju vpetja motornega sklopa in znaša $0,507\text{ mm}$, kar ustreza zahtevam. Analiza je uspešno izvedena in zaključena, saj je rezultat ustrezen.



Slika 4.7: Rezultat upogibne analize.

4.2.4 Analiza vožnje skozi ovinek (»Curve analysis«)

Ena izmed ključnih delov dinamične analize predstavlja analiza deformacije, ki se pojavi zaradi vožnje skozi ovinek. Poleg delovanja statičnih sil, okvir prenaša tudi dinamične obremenitve. Najpomembnejša je centrifugalna sila, katera se izračuna po *Enačbi 4.2*.

$$F_c = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

Enačba 4.2: Izračun centrifugalne sile.

F_c – centrifugalna sila [N]

v – hitrost $\left[\frac{m}{s}\right]$

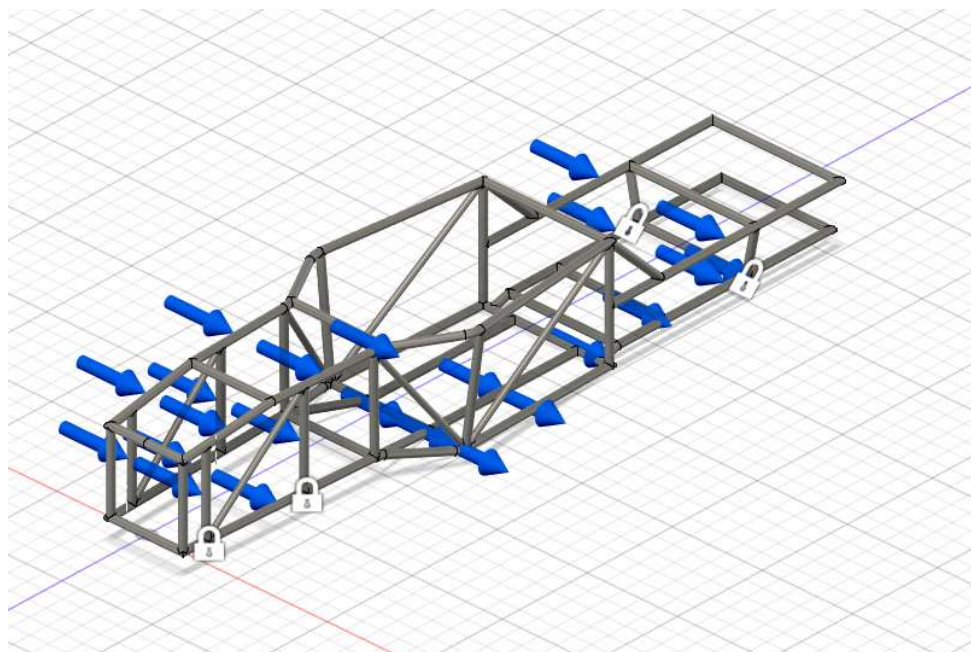
r – radij poti [m]

V pravilniku [4] piše, da se analiza izvede pri hitrosti 60 km/h oziroma 16,67 m/s ter radiusu zavoja vozila 9 m. Masa vozila v celoti znaša 750 kg. Po *Enačbi 4.2* se izvede izračun centrifugalne sile, ki znaša 23157,41 N. *Tabela 4.2* prikazuje centrifugalno silo na vsaki pritrditveni točki.

CURVE ANALYSIS				
Obremenitve	Masa [kg]	Št. pritrditvenih točk	Sila [N]	Sila na vsaki pritr. točki [N]
Voznik	70	4	2161,36	540,34
Motor	180	4	5557,78	1389,45
Vzmetenje	50	16	1543,83	96,49
Volanski sklop	50	2	1543,83	771,91
Zavorni sklop	150	4	4631,48	1157,87
Kolesa	50	4	1543,83	385,96

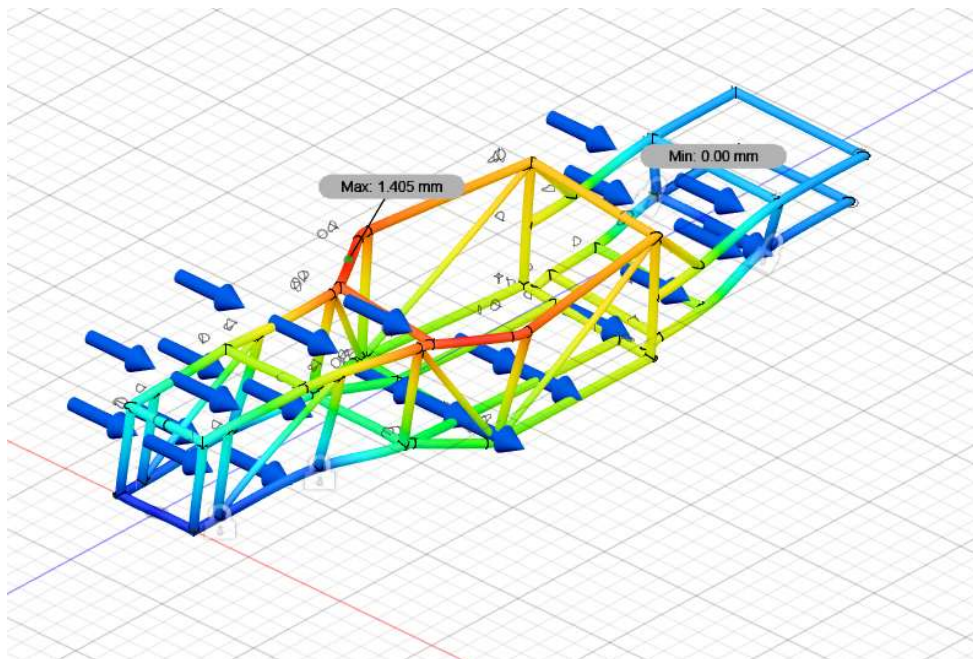
Tabela 4.2: Izračun sile na vsaki pritrditveni točki za analizo vožnje skozi ovinek

Po izračunu sil v vsaki pritrditveni točki so bila določena prijemališča in smer sil. Posebnost analize je, da imajo vse sile enako smer, saj je namenjena simulaciji konstrukcije v ovinku. Nepremične točke so določene na sprednjem in zadnjem delu okvirja kot prikazuje *Slika 4.8*.



Slika 4.8: Priprava za analizo vožnje skozi ovinek.

Sledi analiza dobljenih rezultatov, ki so prikazani v *Sliki 4.9*. Največja deformacija pri analizi vožnje skozi ovinek znaša le 1,405 mm, kar je v mejah postavljenih zahtev. Analiza je zato uspešno opravljena.

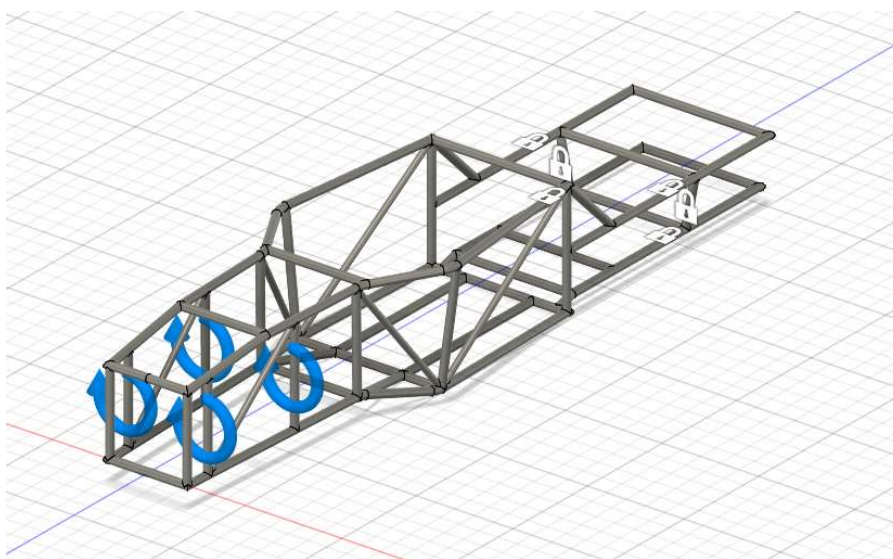


Slika 4.9: Rezultat analize vožnje skozi ovinek.

4.2.5 Torzijska upornost na prednjem vzmetenju (»Torsional rigidity front«)

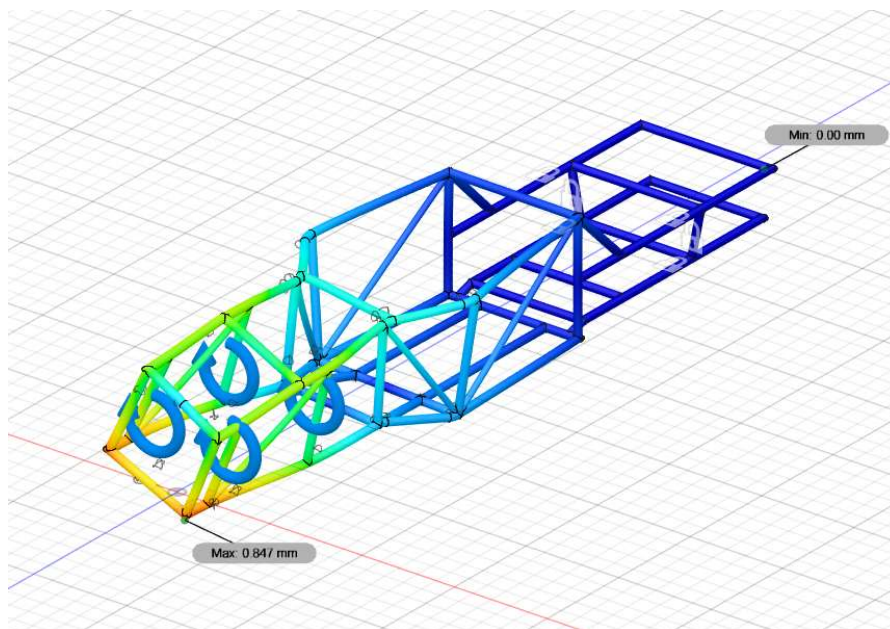
Torzijska upornost vozila je pomemben dejavnik med vožnjo vozila. Pomembna je takrat, ko se vozilo pelje po neenakomerni podlagi. V pravilniku [4] je podano, da mora biti dirkalnik obremenjen z nazivno torzijsko obremenitvijo 1000 Nm .

Pri analizi je določeno območje delovanja torzijskega momenta na prednji konec dirkalnika, na mestu delovanja vzmetenja. Nepremične točke so določene na zadnjem koncu, kjer je vpeto zadnje vzmetenje. Postavitev momentov in nepremičnih točk prikazuje *Slika 4.10*.



Slika 4.10: Priprava za analizo torzijske upornosti na prednjem vzmetenju.

Po opravljeni postavitvi sil in nepremičnih točk je dobljen rezultat, ki ga prikazuje *Slika 4.11*. Največja deformacija pri torzijski obremenitvi prednjega dela dirkalnika znaša $0,847\text{ mm}$, kar ustreza zahtevam, torej je analiza uspešna.

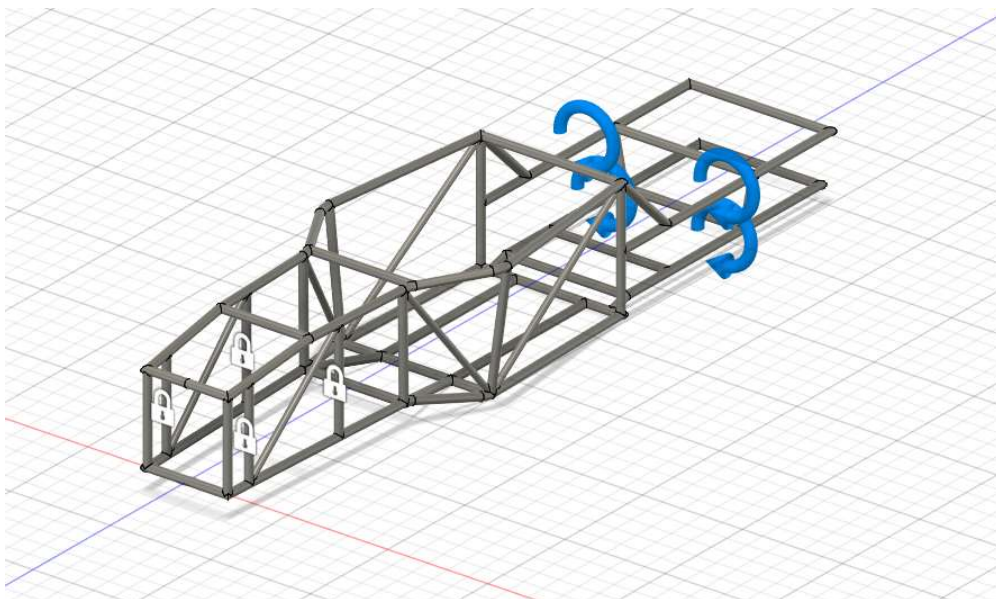


Slika 4.11: Rezultat analize torzijske upornosti na prednjem vzmetenju.

4.2.6 Torzijska upornost na zadnjem vzmetenju (»Torsional rigidity back«)

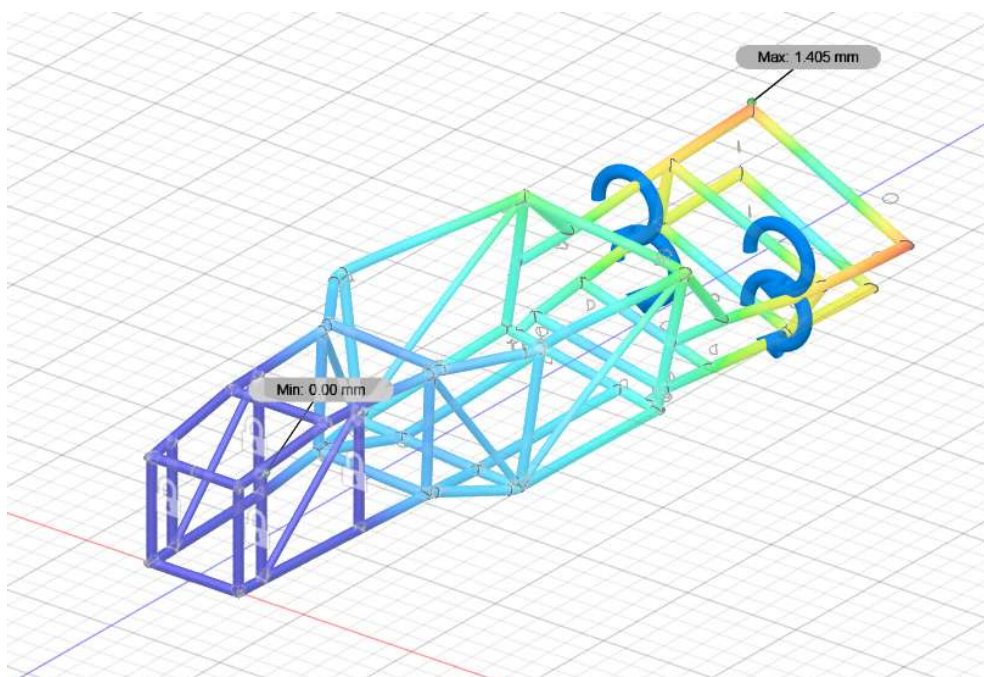
Enako kot pri analizi torzijske upornosti na prednjem vzmetenju je bilo potrebno opraviti tudi analizo torzijske upornosti na zadnjem vzmetenju. Postopek je ravno obraten.

Izhodiščna torzijska obremenitev znaša 1000 Nm . Kot prikazuje *Slika 4.12*, je območje obremenitve postavljeno na območje vpetja zadnjega vzmetenja. Točke nepremičnosti so postavljene na območje vpetja prednjega vzmetenja.



Slika 4.12: Priprava za analizo torzijske upornosti na zadnjem vzmetenju.

Po nastavitvi parametrov je dobljen rezultat, ki ga prikazuje *Slika 4.13*. Največja deformacija znaša 1,405 mm, kar pa je v območju dopustne deformacije konstrukcije vozila.



Slika 4.13: Rezultat analize torzijske upornosti na zadnjem vzmetenju.

5 DOBAVA MATERIALA

Po končanem dimenzioniranju in analizi konstrukcije v 3D modelirniku je potreben izračun količine materiala, ki je potreben za izdelavo. Za izdelavo okvirja so uporabljene šivne jeklene cevi premera $\varnothing 40\text{ mm}$ in cevi premera $\varnothing 30\text{ mm}$. Debelina stene cevi znaša 2 mm . Šivne jeklene cevi so izdelane iz ravne plošče, ki je zvita in zvarjena skupaj na obeh koncih, kjer dobimo tako imenovani »šiv«. To pa povzroči slabše mehanske lastnosti cevi, tudi do 20% v primerjavi z brezšivno cevjo. Šivne cevi so cenejše v primerjavi z brezšivnimi. Kljub temu, da imajo šivne cevi tudi do 20% slabše mehanske lastnosti, izpolnjujejo zahtevane pogoje in so primerne za izdelavo okvirja. Zgornji in spodnji obroč ter ključne povezovalne cevi bodo izdelane iz cevi premera $\varnothing 40\text{ mm}$, saj morajo prenašati velike obremenitve in sile, medtem ko bodo ostali deli okvirja izdelani iz cevi $\varnothing 30\text{ mm}$, saj niso tako ključnega pomena za prenos obremenitev in sil. Poleg cevi je potrebna tudi izdelava priključkov za izdelavo vilic za vzmetenje, zato je bilo potrebno naročiti tudi določeno količino ploščatega jekla debeline 5 mm . Po ocenitvi potrebe po količini materiala je ugotovljeno, da je potrebna naslednja količina materiala:

- Okrogla jeklena cev $\varnothing 40\text{ mm}$, dolžine 38 m ,
- okrogla jeklena cev $\varnothing 30\text{ mm}$, dolžine 40 m ,
- ploščato jeklo $50 \times 5\text{ mm}$, dolžine 3 m .

Pri naročanju cevi, ki so uporabljene pri izgradnji konstrukcije, je potrebno paziti na kvaliteto same cevi. Cevi so iz konstrukcijskega jekla S235. Trdnostne lastnosti jekla S235 [1] so naslednje:

- $R_m = 340\text{ MPa}$,
- $R_e = 225\text{ MPa}$,
- $\sigma_{Df\ izm} = 180\text{ MPa}$,
- $\tau_{Dt\ izm} = 100\text{ MPa}$.

Konstrukcijsko jeklo S235 ima trdnostne lastnosti, ki ustrezajo zahtevanim trdnostnim lastnostim okvirja. Jeklo S235 je torej ustrezno in primerno za izdelavo konstrukcije. Poleg potrebnega materiala je bilo potrebno naročiti potrošnega materiala za izdelavo okvirja, kot so žica za MAG varilni postopek, brusne in rezalne plošče za delo z akumulatorsko kotno brusilko ter vrtalne krone. Za fino brušenje cevi po postopku varjenja se uporablja brusne diske z visoko granulacijo, zato je potrebno v naročilo poleg plošč za grobo brušenje dodati še plošče za fino brušenje. Potrošni material je torej naslednji:

- Varilna žica (debeline $0,8\text{ mm}$), mase 10 kg ,
- rezalna plošča ($125 \times 1 \times 22\text{ mm}$), 50 kosov,
- lamelna brusna plošča G60 ($115 \times 22\text{ mm}$), 10 kosov,
- lamelna brusna plošča G120 ($115 \times 22\text{ mm}$), 10 kosov,
- vrtalna krona $\varnothing 40$, 2 kosa,
- vrtalna krona $\varnothing 30$, 2 kosa.

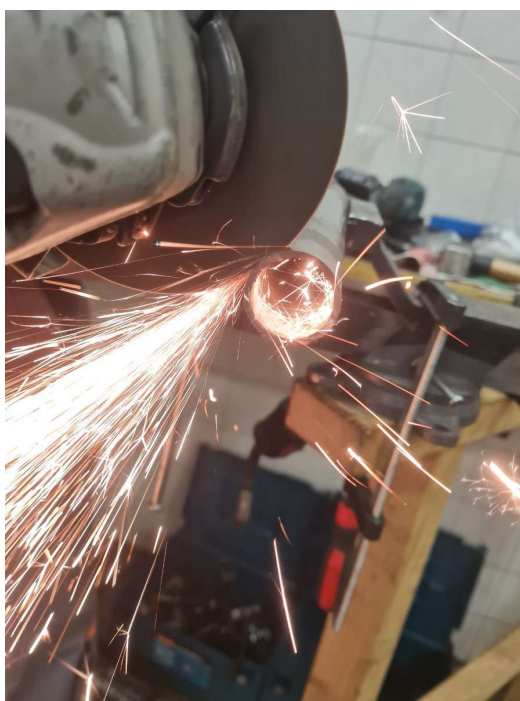
6 IZDELAVA KONSTRUKCIJE

Izdelava same konstrukcije je potekala v petih fazah. Proces izdelave je bil zajeten in zahteven, zato je izdelava okvirja trajala 75 ur. V vsaki fazi izdelave so bili prisotni številni problemi in dileme, ki jih je bilo potrebno sproti reševati. Izdelava se je razdelila na naslednje faze:

- Rezanje cevi na ustrezno dolžino,
- krivljenje cevi z doma narejeno krivilno pripravo,
- oblikovanje zaključkov cevi,
- varjenje cevi po postopku MAG/TIG,
- brušenje zvarov.

6.1 Rezanje cevi na ustrezno dolžino

Prva faza izdelave je torej predstavljala rezanje cevi na ustrezno dolžino. Vsako cev je bilo potrebno odrezati na enako dolžino, kot je bila zabeležena v 3D modelu okvirja. Potem je bilo potrebno cevi s pomočjo tračnega metra izmeriti na ustrezno dolžino in načrtati pozicijo reza z alkoholnim pisalom. Cev je bilo potrebno vpeti v primež in jo s pomočjo kotne brusilke odrezati na ustrezno mero. Pri tem je bilo potrebno paziti na točnost mere ter na varnost, zato je bila uporaba zaščitnih očal ter rokavic obvezna, da se pri postopku ne bi prišlo do opeklin. Ko so bile odrezane vse cevi je bilo potrebno preveriti točnost dimenzij vseh izdelanih cevi. V primeru napake in netočnosti je bila cev še enkrat izdelana po istem postopku. Postopek ni zahteval veliko časa, saj ni bilo prisotnih nobenih problemov in napak.



Slika 6.1: Rezanje jeklenih cevi.

6.2 Krivljenje cevi z doma izdelano krivilno pripravo

Pri načrtovanju šasije je bilo določeno, da bosta spodnji in zgornji obroč osnovne konstrukcije izdelana s postopkom krivljenja in ne s postopkom rezanja. Postopek krivljenja ni bil izveden le zaradi estetskega videza in lepšega izgleda okvirja, temveč tudi zaradi praktičnega pomena, saj se pri rezanju cevi in ponovnem varjenju znatno zmanjšajo mehanske lastnosti materiala v območju rezanja. Pri pravilno izvedenem postopku krivljenja pa je zmanjšanje mehanskih lastnosti skoraj zanemarljivo. Krivljenje je potekalo z doma izdelano krivilno pripravo, ki je bila dovolj natančna za izdelavo in ustrezala zahtevam. Pri postopku krivljenja cevi je nastal problem, ki se je pojavil, ko je bila cev zakrivljena na kot večji od 30°. Prisotno je bilo rahlo gubanje cevi zaradi nenatančnosti krivilne priprave, zato so bile cevi v območju gubanja odebeljene s postopkom varjenja in nato pobrušene s kotno brusilko na ustrezno obliko krivine cevi. Nato je bila preverjena natančnost ukrivljenih cevi in izvedena primerjava s parametri v 3D programu.



Slika 6.2: Doma izdelana krivilna priprava za krivljenje cevi.

6.3 Oblikovanje zaključkov cevi

Velika večina cevi je s svojimi konci nalegala na drugo površino cevi, pri čemer naležna površina ni ravna in se razlikuje glede na kot naleganja cevi. Izdelava zaključkov cevi je potekala s kombinacijo priprave za oblikovanje zaključkov in kotno brusilko, s katero so bili dodatno pobrušeni tisti robovi, kateri se niso najlepše prilegali. Priprava za oblikovanje zaključkov je omogočila natančno vrtanje in oblikovanje zaključkov za vsak naležni kot s pomočjo vrtalne krone. Pri tem postopku je bilo potrebno paziti na varnost, zato je bila uporaba

zaščitnih očal in zaščitnih rokavic bistvenega pomena. Problem se je pojavil, ko je bila potrebna izdelava zaključka cevi, ki se je na enem koncu nalegal na dve cevi hkrati. Rešitev je predstavljalo dodatno oblikovanje cevi s kotno brusilko, ki je proces dela znatno olajšala in prihranila veliko časa. Oblike koncev cevi je bilo potrebno na koncu pregledati za kakršne koli napake, katere pa na koncu niso bile prisotne.



Slika 6.3: Priprava za oblikovanje zaključkov cevi z vrtalno krono.

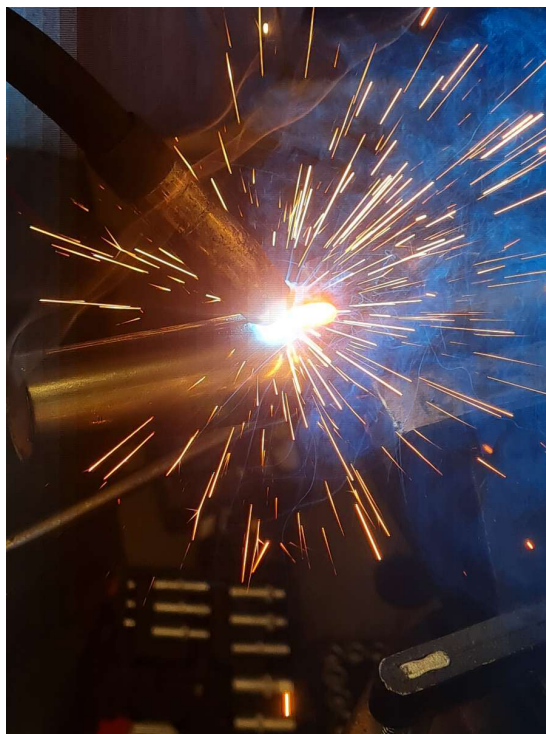
6.4 Varjenje po postopku MAG/TIG

Po oblikovanju zaključkov cevi je sledilo varjenje le teh. Postopek je trajal dolgo časa, saj je bila pri tem delu potrebna natančnost, ker sta kvaliteta in ustrezno prenašanje zunanjih obremenitev ter sil odvisna od kvalitete zvarjenih cevi. Varjenje je potekalo po dveh varilnih postopkih, to sta MAG in TIG.

MAG varilni postopek je pogosto uporabljen pri spajanju dveh debelejših materialov. Pri postopku nastane zvar, ki predstavlja nerazstavljivo zvezo dveh materialov. Pri postopku je uporabljena žica kot dodajalni material in ogljikov dioksid kot zaščitni plin. Možna je tudi uporaba mešanice argona in ogljikovega dioksida, ki omogoča boljše varjenje. [2]

TIG varilni postopek je uporabljen pri spajanju dveh tanjših materialov. Je nekoliko dražji in bolj zahteven postopek v primerjavi z MAG varjenjem. Pri postopku je uporabljena volframova elektroda, ki utekočini material v katerega se doda dodajni material. Varilni plin je lahko argon ali helij, možna pa je tudi njuna kombinacija. [2]

Na podlagi zgoraj opisanih karakteristik je bil za varjenje konstrukcije izbran varilni postopek MAG. Za problematične cone, ki so bile prisotne tam, kjer je bila stena cevi tanjša zaradi nenatančnega oblikovanja koncev cevi, je bila potrebna uporaba varilnega postopka TIG. Pri vozlišču treh cevi je pomemben pravilen vrstni red varjenja, saj morajo biti vse dotikalne točke posameznih cevi zvarjene skupaj. Pri varjenju je bilo poleg natančnega dela potrebno paziti na varnost. Po koncu varjenja je sledil pregled za morebitne nepravilnosti.



Slika 6.4: Varjenje po varilnem postopku MAG.

6.5 Brušenje zvarov

Zvare, ki so bili namenjeni olepševanju krivin ukrivljenih cevi, je bilo potrebno pobrusiti s pomočjo kotne brusilke in brusne plošče. Tudi zvari, ki so bili namenjeni za zapiranje koncev cevi, zgolj iz estetskih razlogov, so bili pobrušeni s brusno ploščo visoke granulacije. Pri brušenju zvarov je bilo potrebno paziti na globino brušenja in s tem na količino odvzetega materiala, saj bi s tem lahko prišlo do oslabiljene točke na konstrukciji.

7 PRIPRAVA IN IZDELAVA PRIKLJUČKOV ZA VZMETENJE

Za nadaljnjo izdelavo vzmetenja dirkalnika je bila potrebna izdelava in pritrditev priključkov, na katere je kasneje potrebna montaža vilic. V celoti je potrebnih 32 priključkov, ki so izdelani iz ploščatega jekla $50 \times 5 \text{ mm}$. S pomočjo kotne brusilke so bili odrezane ravne ploščice iz ploščatega jekla različnih dolžin, ki so bile preoblikovane v priključke. Odrezati je bilo potrebno ploščice dolžine:

- 114 mm (4 kosi),
- 90 mm (8 kosov),
- 65 mm (4 kosi),
- 67 mm (16 kosov).

S pomočjo tračnega metra in pomičnega merila so bile izmerjene ter zarisane središčne izvrtine in oblika priključkov (zaobljeni robovi ter polkrog, ki skrbi za naleganje priključka na okvir). Nato so bile z vrtnim strojem izdelane izvrtine $\varnothing 14 \text{ mm}$, skozi katere mora kasneje priti navojna palica M14. S pomočjo kotne brusilke in brusne plošče so izdelane zaokrožitve in polkrog, ki skrbi za naleganje priključkov na okvir. Sledi varjenje priključkov po postopku MAG, na koncu pa sledi pregled točnosti dimenzij in kvalitete varjenja.



Slika 7.1: Priključek za vzmetenje

8 PREGLED KONSTRUKCIJE IN PRIPRAVA ZA BARVANJE

Ob koncu je sledil pregled celotnega okvirja, točnosti izdelavi ter kvalitete varjenja. Nekatere vare je bilo potrebno na koncu pobrusiti in še enkrat izdelati zgolj iz estetskih razlogov. Dimenzije konstrukcije so nato bile še enkrat v celoti izmerjene, saj je bila potrebna primerjava s konstrukcijo izdelano v 3D programu, ker bi lahko pri postopku varjenja prišlo do nezaželenega ukrivljanja konstrukcije zaradi toplote, ki se sprošča pri postopku varjenja. Temu ni bilo tako, saj je bila konstrukcija znotraj območja zahtevanih dimenzij. Na koncu sledi priprava okvirja za barvanje konstrukcije. Celoten okvir je potrebno krtačiti s pnevmatsko žično krtačo in brusnim papirjem granulacije 600, saj je zunanja plast cevi polna nečistoč, kar bi poslabšalo proces barvanja ter povzročilo morebitno luščenje barve po barvanju vozila. Pri postopku brušenja je potrebno biti natančen in si vzeti čas, saj je rezultat barvanja odvisen od gladkosti površine. Ko je površina ustrezno pobrušena, je bil okvir pripravljen za nadaljnji postopek barvanja.



Slika 8.1: Pregled konstrukcije s spodnje strani

9 ZAKLJUČEK

Konstrukcija predstavlja osnovo za izdelavo večine vozil. Njen razvoj skozi zgodovino je močno vplival na razvoj industrije z vozili, z njo se je razvil tudi svet moto športa. Z uvedbo novih materialov se je znatno povečala njena funkcionalnost, hkrati pa tudi varnost. Skozi raziskovalno nalogo so bili ustvarjeni odgovori na začetne hipoteze, katere so zapisane na začetku te raziskovalne naloge. Še bolj pomembno pa je dejstvo, da je bil dosežen cilj naloge, saj je bila izdelana funkcionalna in varna konstrukcija, ki je ustrezna za nadaljnjo izgradnjo dirkalnika. Z analizami je bilo dokazano, da je okvir zmožen prenašati vse obremenitve z zanemarljivo deformacijo, saj so bile vse analize uspešno opravljene.

9.1 REZULTATI

Vse postavljene hipoteze je mogoče potrditi ali zavrniti, katere so ovrednotene s spodaj podprtimi argumenti.

- I. Izdelava dirkalnika, ki ima izgled formule, je možna iz jeklenih cevi.

S procesom same izdelave in končnim izgledom izdelka je bilo dokazano, da je izdelava dirkalnika iz jeklenih cevi možna, zato je hipoteza **POTRJENA**.

- II. Možno je krivljenje cevi namesto rezanja cevi.

S pomočjo doma izdelanega krivilca cevi je bila mogoče izdelati ukrivljene cevi, ki imajo dovolj dobre mehanske lastnosti za prenašanje zunanjih obremenitev, tako da je hipoteza **POTRJENA**.

- III. S postopkom MAG varjenja je možno doseči dovolj dobro kvaliteto varjenja, da je konstrukcija zmožna zdržati vse obremenitve, ki jih povzroča dirkalnik med vožnjo.

S pravilno tehniko varjenja in nadaljnjo analizo in pregledom konstrukcije je bila dosežena dovolj dobro kvaliteta varjenja po postopku MAG, ki ustreza danim zahtevam, zato je hipoteza **POTRJENA**.

- IV. Možna je uporaba šivnih cevi namesto brezšivnih pri izgradnji konstrukcije.

Z izbiro jeklenih šivnih cevi namesto brezšivnih je bila izdelana konstrukcija, ki je zmožna nadaljnje uporabe, saj ustreza vsem varnostnim zahtevam, torej je hipoteza **POTRJENA**.

- V. S pomočjo uporabe 3D programov je možna izdelava virtualnega okvirja, ki je kasneje uporabljen kot osnova za izgradnjo pravega okvirja iz jeklenih cevi.

Pri načrtovanju, dimenzioniranju in analizi konstrukcije je bila možna uporaba 3D programov, ki predstavljajo ključni faktor za pomoč pri izdelavi okvirja, zato je hipoteza **POTRJENA**.

- VI. Možna je izdelava konstrukcije, katere masa ne presega 200 kilogramov.

Z merjenjem mase konstrukcije po zaključku izdelave je bilo dokazano, da masa okvirja ne presega 200 kilogramov, vendar znaša 180 kilogramov, zato je hipoteza **POTRJENA**.

10 VIRI

- [1] BROZ ŽIŽEK, E. *Načrtovanje konstrukcij*. 2010.
- [2] KRAUT, B. *Krautov strojniški priročnik*. Ljubljana: 17. slovenska izdaja. 2019.
- [3] FUENTES MARTINEZ, A. S., SUAREZ CASTRILLON, A.M., SUAREZ CASTRILLON, A. *Analysis of the chassis structure of a Formula Student racing car*. [na spletu]. 2021. Dostopno: <https://shorturl.at/cAQX6>
- [4] FORMULA SAE, *Formula SAE Rules 2024*. [na spletu]. 2023. Dostopno: <https://shorturl.at/ruCS7>
- [5] TATA AIG TEAM, *Types of Chassis Frames*. [na spletu]. 2023. Dostopno: <https://shorturl.at/biDO6>
- [6] FUEL EXPRESS, *The Evolution of the Car Body*. [na spletu]. 2015. Dostopno: <https://shorturl.at/inrDT>
- [7] KUMAR, E. A., *Chassis Frame: Definition, Types, Material Explained in detail [Notes & PDF]*. [na spletu]. 2022. Dostopno: <https://shorturl.at/rEMOT>
- [8] WIKIPEDIA, *Vehicle frame*. [na spletu]. 2013. Dostopno: <https://shorturl.at/szQ48>
- [9] GRATTON, K., *What is a monocoque body?* [na spletu]. 2020. Dostopno: <https://shorturl.at/blqvz>
- [10] MY CLASS, *Chassis dan Body Kendaraan*. [na spletu]. 2020. Dostopno: <https://shorturl.at/rsY02>
- [11] BLACKSHADOW MOTORS, *1973 Lotus Europa Twin Cam Special*. [na spletu]. 2021. Dostopno: <https://shorturl.at/qwyDV>
- [12] STAMOULIS, S., *2017 TEIWM Racing FSAE Tubular Spaceframe*. [na spletu]. 2019. Dostopno: <https://shorturl.at>

ZAHVALA

Rad bi se zahvalil mentorju Nejcu Marinšku za ves trud in požrtvovalnost, kar je s svojimi dejanji izkazal tekom izdelave raziskovalne naloge. Zahvale gredo tudi Šolskemu centru Ljubljana, Srednji šoli za strojništvo, kemijo in varovanje, Avto centru Šubelj d.o.o. za dovoljenje za uporabo delovnega prostora ter za vozilo, potrebno za izdelavo projekta, družbi Akrapovič d.d. za izdelavo in montažo izpušnega sistema, podjetju Prit d.o.o. za hidravlične ter pnevmatične cevi, podjetju OGM d.o.o. za izdelavo toplotne izolacije ter podjetju Dts d.o.o. za izdelavo potiskanih majic in tiskanje raziskovalnih nalog.