Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Diplomová práce

Návrh rámu pro monopost Formula student

Bc. Tomáš Flajšman

© 2023 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Tomáš Flajšman

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Návrh rámu pro monopost Formula student

Název anglicky

Frame design for Formula student monopost

Cíle práce

Cílem diplomové práce bude vytvořit 3D model rámu pomocí CAD programu a ověřit návrh pomocí pevnostní simulace. Dále bude na hotovém rámu změřena reálná torzní tuhost pro ověření výpočetního modelu.

Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Metodika práce
4. Přehled řešené problematiky
5. Praktická část práce
6. Výsledky a diskuse
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů
9. Přílohy

Doporučený rozsah práce

40 – 50 stran

Klíčová slova

šasi, prostorová příhradová konstrukce, pevnostní analýza, měření torzní tuhost

---

Doporučené zdroje informací

CROLLA, David. A. Automotive engineering: powertrain, chasis system and vehicle body. 2009. ISBN 1856175774.

SEWARD, Derek. Race car design. London: Palgrave/Macmillan, 2014. ISBN 978-1- 137–03014-6.

WILLIAM F.MILLIKEN a DOUGLAS L. MILLIKEN. Race car vehicle dynamics [online]. 1994. Dostupné z: https://www.sae.org/publications/books/content/r-146/

Předběžný termín obhajoby

2022/2023 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Petr Jindra, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 25. 1. 2022

doc. Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2022

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 25. 01. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Návrh rámu pro monopost Formula student" jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2023 _____

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Petru Jindrovi, Ph.D. za vedení této diplomové práce, za jeho ochotu, odborné rady a cenné připomínky, které mi během psaní práce poskytnul. Dále bych chtěl poděkovat celému týmu CULS Prague Formula Racing a rodině za podporu během celého studia.

Návrh rámu pro monopost Formula student

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem rámu pro zavodní monopost Formule student 7. generace. V přehledu řešené problematiky jsou popsány typy konstrukcí šasi pro závodní vozidla. Následně jsou uvedeny typy konstrukcí šasi definované soutěží Formule student. Dále je popsána důležitost torzní tuhosti pro návrh šasi vozidla. V kapitole 5.1 je zdůvodněn výběr prostorového trubkového rámu pro primární strukturu šasi pomocí multikriteriální analýzy. Pro návrh tohoto rámu jsou popsány technické požadavky pravidel soutěže Formule student. V podkapitole č. 5.3 je uveden vývojový proces návrhu rámu nového monopostu. Následně je popsán postup při tvorbě 3D modelu v programu Solidworks. Nový rám se vyznačuje úsporou hmotnosti o 5,79 kg oproti předchozímu monopostu. Návrh rámu a sestavy šasi jsou ověřeny pomocí MKP v programu Ansys Mechanical. Pro ověření výpočetního modelu z programu Ansys Mechanical je na monopostu 7. generace experimentálně změřena torzní tuhost. Tímto měřením byla zjištěna hodnota torzní tuhosti 796,23 Nm / °.

Klíčová slova: šasi, prostorová příhradová konstrukce, pevnostní analýza, měření torzní tuhosti, zavodní automobil, monopost

Frame design for Formula student monopost

Abstract

This Master's thesis is dedicated to the design of a frame for a 7th-generation Formula Student racing car. The overview of the solved issues describes the types of chassis designs for racing vehicles. Subsequently, the types of chassis designs defined by the Formula Student competition regulations are presented. Furthermore, the importance of torsional stiffness to vehicle chassis design is emphasized. Subhapter 5.3 justifies the selection of a spatial tubular frame for the primary chassis structure through multicriteria analysis. The design of this frame adheres to the technical requirements outlined in the Formula Student Competition rules. Subchapter 5.3 focuses on the development process for the frame design of the new Formula Student car. This is followed by a description of the creation of the 3D model in Solidworks. The new frame boasts a weight reduction of 5.79 kg in comparison to the previous Formula Student car. The frame design and chassis assembly are verified using the FEM in Ansys MechanicalTo validate the Ansys Mechanical model of computation, the torsional stiffness of the 7th-generation Formula Student car needed to be experimentally measured. The measurement revealed a torsional stiffness value of 796.23 Nm/°.

Keywords: Frame design for Formula student monopost, Chassis, Finite element method, CAD, Racing car

Obsah

1 Úvod **12**

2 Cíl práce **13**

3 Metodika **13**

4 Přehled řešené problematiky **14**

4.1 Formula student 14

4.2 Disciplíny soutěže Formule student 14

4.2.1 Business Plan Presentation 15

4.2.2 Cost and Manufacturing 15

4.2.3 Engineering Design 15

4.2.4 Acceleration 16

4.2.5 Skid Pad 16

4.2.6 Autocross 17

4.2.7 Endurance 18

4.2.8 Efficiency 19

4.3 Konstrukce šasi závodních automobilů 20

4.3.1 Prostorový trubkový rám 20

4.3.2 Kompozitní monokok 21

5 Praktická část práce **22**

5.1 Volba šasi pro monopost FS07 22

5.2 Technické požadavky pravidel soutěže pro návrh rámu 23

5.2.1 Primární struktura 23

5.2.2 Materiálové požadavky na primární strukturu 25

5.2.3 Požadovaná dokumentace 26

5.2.4 Popis částí primární struktury 27

5.2.5 Kokpit 30

5.3 Konstrukce rámu pro monopost FS07 34

5.3.1 Analýza chyb na rámu předchozího monopostu FS06 35

5.3.2 Změna konceptu šasi monopostu FS07 37

5.4 Tvorba 3D modelu rámu 38

5.4.1 Převedení geometrie podvozkových bodů do CAD modelu 38

5.4.2 Modelování primární struktury rámu 40

5.4.3 Uchycení pohonné jednotky do rámu 42

5.4.4 Hmotnost návrhu šasi na monopostu FS07 44

5.5 Ověření návrhu pomocí pevnostní simulace 45

5.5.1 Ověření primární struktury 45
5.5.2 Ověření návrhu sestavy šasi monopostu FS07 47
5.6 Měření torzní tuhosti monopostu FS07 49
6 Výsledky a diskuse 52
7 Závěr 56
8 Seznam použitých zdroj 57
9 Přílohy 60

Seznam obrázků

Obrázek 1 Bodové hodnocení disciplín soutěže Formule student [Archiv týmu CULS PFR] 14
Obrázek 2 Schéma trati disciplíny Acceleration [Archiv týmu CULS PFR] 16
Obrázek 3 Schéma tratě disciplíny Skid Pad [4] 17
Obrázek 4 Schéma tratě disciplíny Autocross [Archiv týmu CULS PFR] 18
Obrázek 5 Schéma tratě disciplíny Endurance [7] 19
Obrázek 6 Základní konstrukce šasi Lotus Mark 8 [10] [13] 20
Obrázek 7 Kompozitní monokok monopostu McLaren MP4/1 [23] 21
Obrázek 8 Výsledky skóre multikriteriálního výběru pro volbu šasi na monopost FS07 [Archiv týmu CULS PFR] 23
Obrázek 9 Popis primární struktury rámu na monopostu FS07 [Archiv autora] 24
Obrázek 10 Ukázka triangulace primární struktury [20] 24
Obrázek 11 Zkouška tahem pro ocel 25CrMo4 FS07 [Archiv týmu CULS PFR] 26
Obrázek 12 Porovnání rámů na monopostu FS06 a FS07 [Archiv autora] 27
Obrázek 13 Požadované rozměry pro podpory předního a hlavního oblouku [4] 28
Obrázek 14 Sestava nárazové přepážky na monopostu FS07 [Archiv autora] 29
Obrázek 15 Popis prvků boční nárazové zóny [4] 29
Obrázek 16 Výstup řidiče z monopostu FS07 při technické kontrole [Archiv týmu CULS PFR] 30
Obrázek 17 Ochranná obálka proti přetočení monopostu [Archiv autora] 31
Obrázek 18 Šablony pro kontrolu rozměrů kokpitu [4] 31
Obrázek 19 Pozice šablony 95. percentilu v monopostu FS07 [Archiv autora] 32
Obrázek 20 Zádržný systém pro uchycení bederních a ramenních pásů [6] 33

Obrázek 21 Pozice úchytů pásu na monopostu FS07 [Archiv autora] 33
Obrázek 22 Vývojový proces rámu monopostu FS07 [Archiv autora] 34
Obrázek 23 Zadní část rámu monopostu FS06 [Archiv autora] 35
Obrázek 24 Nadzvednuté zadní kolo monopostu FS06 [Archiv týmu CULS PFR] 36
Obrázek 25 Kolize předního tlumiče s rámem monopostu FS06 [Archiv autora] 36
Obrázek 26 Porovnání zadní nápravy na monopost FS06 a FS07[Archiv týmu CULS PFR] 37
Obrázek 27 Kinematický model podvozkových bodů pro monopost FS07 [35] 39
Obrázek 28 Geometrie podvozkových bodů v modelu rámu [Archiv autora] 39
Obrázek 29 Úchyty podvozkových dílů na monopostu FS07 [Archiv autora]..... 40
Obrázek 30 Konstrukce primární struktury rámu na monopost FS07 [Archiv autora] 41
Obrázek 31 Nastavení ořezů trubek rámu [Archiv autora]..... 42
Obrázek 32 Porovnání polohy těžiště motoru na monopost FS06 a FS07 [Archiv autora]. 43
Obrázek 33 Pozice úchytů motoru k rámu [Archiv autora]..... 44
Obrázek 34 Vyznačené rozměry pro výpočet torzní tuhosti ze 3D modelu [Archiv autora] 46
Obrázek 35 Použité materiály pro výpočetní model v Ansys Mechanical [Archiv autora] 48
Obrázek 36 Upravený model šasi monopostu FS07 pro pevnostní simulaci[Archiv autora] 49
Obrázek 37 Měřené body na rámu – přední pohled [44]..... 50
Obrázek 38 Měřené body na rámu – zadní pohled [44] 50
Obrázek 39 Měření torzní tuhosti monopostu FS07 [Archiv týmu CULS PFR]..... 51
Obrázek 40 Výsledek deformace měřených podvozkových bodů v ose Z [Archiv autora] 52
Obrázek 41 Výsledky torzní tuhosti pro měřené body [Archiv autora] 53
Obrázek 42 Procentuální porovnání výsledků torzní tuhosti měřených bodů [Archiv autora] 54
Obrázek 43 Výsledek celkové deformace v ose z [Archiv autora]..... 55

Seznam tabulek

Tabulka 1 Požadované rozměry primární struktury šasi [4]..... 25
Tabulka 2 Hmotnostní porovnání návrhu šasi pro monopost FS06 a FS07 [Archiv autora]. 44
Tabulka 3 Výsledky simulace primární struktury [Archiv autora]..... 46
Tabulka 4 Hodnoty torzní tuhosti pro měřené podvozkové body [Archiv autora]..... 53
Tabulka 5 Výsledky celkové torzní tuhosti [Archiv autora]..... 55

Seznam použitých zkratek

CAD – Computer Aided Design

MKP – Metoda konečných prvků

FEM –Finite element method

TIG – Tungsten inert gas (wolfram-inertní plyn)

MAG – Metal Active Gas (a svařováním v ochranné atmosféře aktivního plynu)

FIA – Fédération Internationale de l'Automobile (Mezinárodní automobilová federace)

CULS PFR – CULS Prague Formula Racing

FS06 – monopost Formule student 6. generace

FS07 – monopost Formule student 7. generace

Seznam použitých symbolů

Symbol	**Jednotka**	**Název**
ψ	°	Úhel vyjadřující pootočení ramena
T	Nm / °	Torzní tuhost

1 Úvod

Formule student je prestižní mezinárodní inženýrská soutěž, ve které soutěží více než 900 týmů. Studenti musí během soutěže prokázat své znalosti z oblasti konstruování vozidel, projektového vedení a marketingu. Soutěž je rozdělena na osm disciplín, které jsou rozděleny na tři statické a pět dynamických. Statické disciplíny jsou zaměřeny na schopnosti týmu prezentovat vývoj závodního vozidla a zároveň ekonomickou analýzu nákladů a byznys plán. Dynamické disciplíny mají za cíl otestovat výkonnost vozidla během závodů. V přehledu řešené problematiky byla zpracována rešerše o typech konstrukcí šasi závodních vozidel. Dále byly uvedeny výhody a nevýhody jednotlivých konstrukcí šasi.

V praktické části práce jsou uvedeny typy šasi, které splňují daná pravidla Formule student. Následně byla provedena multikriteriální analýza za cílem vhodného výběru typu šasi na monopost 7. generace týmu CULS Prague Formula Racing. Pro tento monopost byl zvolen typ kombinovaného šasi, kde primární strukturu tvoří prostorový trubkový rám a zadní pomocný rám je tvořen šroubovanými deskami z hliníkové slitiny. Dále byly zpracovány technické požadavky pravidel soutěže pro návrh trubkového rámu. Poté byl stanoven vývojový postup pro návrh rámu a následně byly zhodnoceny nedostatky rámu na předchozím monopostu 6. generace.

Cílem práce bylo vytvořit 3D model rámu, který byl zpracován v CAD programu Solidworks Premium 2021. Byl popsán detailní postup jednotlivých kroků, potřebných pro vytvoření tohoto 3D modelu. Dále byla pomocí programu Solidworks provedena hmotnostní analýza sestavy šasi pro starý a nový monopost. Dalším cílem bylo zjistit torzní tuhost návrhu rámu, jelikož tento faktor ovlivňuje stabilitu vozidla při jízdě. Toho bylo dosaženo pomocí pevnostní analýzy založené na metodě konečných prvků. Pevnostní simulace primární struktury šasi byla provedena pomocí programu Solidworks Simulation. K pevnostní analýze celé sestavy šasi byl použit program Ansys Mechanical 2023. Pro ověření této pevnostní analýzy bylo na zhotoveném monopostu 7. generace provedeno měření torzní tuhosti.

V závěru praktické části jsou porovnány výsledky torzní tuhosti z pevnostní analýzy a fyzického měření. Na základě těchto výsledků byla stanovena doporučení pro návrh rámu dalším generacím monopostu.

2 Cíl práce

Cílem práce je navrhnout rám pro monopost vozidla typu Formule student. Tento návrh byl zpracován do 3D modelu pomocí CAD programu Solidworks Premium 2021. Pro ověření návrhu byla vytvořena pevnostní simulace. Zde bylo cílem zjistit torzní tuhost návrhu primární struktury rámu a sestavy šasi.

Dalším cílem této práce je provedení fyzického měření torzní tuhosti na zhotoveném monopostu. Toto měření bylo určeno pro ověření výpočetního modelu sestavy šasi vytvořeného v programu Ansys Mechanical 2023. Následně byly vyhodnoceny výsledky z fyzického měření a pevnostní simulace. Ze zjištěných výsledků jsou popsána doporučení pro návrh nového monopostu.

3 Metodika

V úvodu je popsána problematika a definovány cíle této práce. Dále je zpracován přehled řešené problematiky, kde jsou uvedeny teoretická východiska týkající se návrhu šasi vozidel. V praktické části práce jsou nejprve popsány odůvodnění výběru kombinovaného typu šasi pro nový monopost. Následně jsou popsány konstrukční požadavky podle pravidel soutěže Formule student pro návrh primární struktury šasi. Pro návrh rámu jsou zohledněny konstrukční chyby předchozího monopostu. Nový návrh byl zpracován v CAD programu Solidworks. Poté byl popsán postup při tvorbě 3D modelu. Pro ověření návrhu byla zpracována pevnostní simulace v programu Ansys Mechanical 2023, která je založena na metodě konečných prvků. Z výsledků této simulace byla následně vypočítána torzní tuhost rámu. Pro ověření výpočetního modelu bylo zrealizováno fyzické měření torzní tuhosti rámu. Výsledky z tohoto měření a pevnostní simulace byly porovnány a na základě těchto výsledků byla sepsána doporučení pro nový návrh.

4 Přehled řešené problematiky

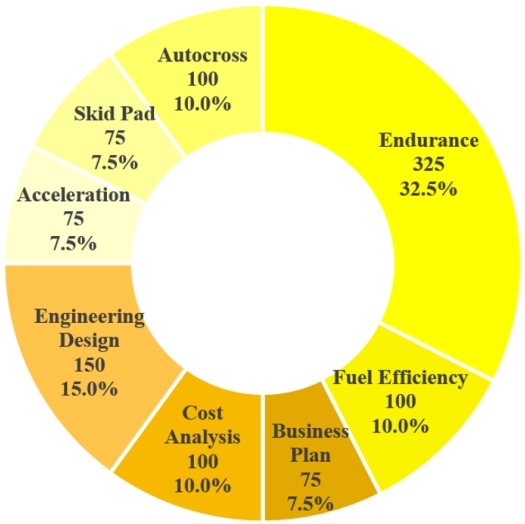
4.1 Formula student

Formula student je mezinárodní inženýrská soutěž, v níž studenti vysokých škol musí vymyslet, zkonstruovat a soutěžit s prototypy závodních vozidel ve stylu formule. První ročník se konal ve Spojených státech v roce 1981. Od roku 1998, kdy se konal první závod v Evropě, se soutěž rozšířila do většiny světa. V současné době soutěží více než 600 týmů se spalovací motorem a více než 300 týmů závodí s elektrickým pohonným ústrojím. [1]

Na základě těchto statistik je Formule student největší technickou soutěží na světě. Soutěž se skládá z osmi disciplín a týmy musí prokázat své znalosti v oblasti inženýrství, managementu, marketingu a v oblasti ekonomie. [2]

4.2 Disciplíny soutěže Formule student

Soutěž Formule student se skládá ze dvou typů disciplín. Ty se dělí na statické, které jsou zaměřeny na schopnosti týmu odprezentovat a popsat návrh a vývoj monopostu před odbornou komisí. Do těchto disciplín se řadí Engineering Design, Cost Analysis a Business Plan. Do druhé kategorie patří disciplíny dynamické, které se zaměřují na výkonnost vozu formule během závodů. Dynamické disciplíny se nazývají Acceleration, Skid Pad, Autocross, Endurance a Fuel Efficiency. Na obrázku č. 1 je zobrazen přehled jednotlivých disciplín s bodovým hodnocením. [3]



Obrázek 1 Bodové hodnocení disciplín soutěže Formule student [Archiv týmu CULS PFR]

4.2.1 Business Plan Presentation

Účelem této disciplíny je posoudit schopnost týmu vytvořit a realizovat kompletní obchodní model. Tento obchodní model musí odkazovat na závodní vozidlo týmu nebo jeho součást. Aby toho tým dosáhl, musí vozidlo nebo jeho součást nabízet jako výrobek nebo prodávat službu s ním spojenou před porotci, kteří jsou v roli potencionálních investorů. Následuje prezentace samotné formule jako investiční příležitosti. Hodnotí se především kvalita zpracování byznys plánu a úroveň přednesu během prezentace. [4]

4.2.2 Cost and Manufacturing

Cílem disciplíny Cost and Manufacturing je posoudit znalosti týmu o rozpočtu, nákladech a také technologických procesech spojených s výrobou závodního vozidla. To vyžaduje pochopení rovnováhy mezi kvalitou a náklady při rozhodování, zda komponenty vyrábět nebo nakupovat. Před zahájením soutěže musí týmy připravit tři dokumenty, a to naceněný kusovník všech dílů formule. Dále pak dokument, ve kterém je vysvětleno nacenění těchto dílů podle výrobních technologii, kterými tým disponuje a následně pomocný dokument, kde jsou zobrazeny všechny výkresy sestav a výrobní výkresy jednotlivých dílů monopostu.

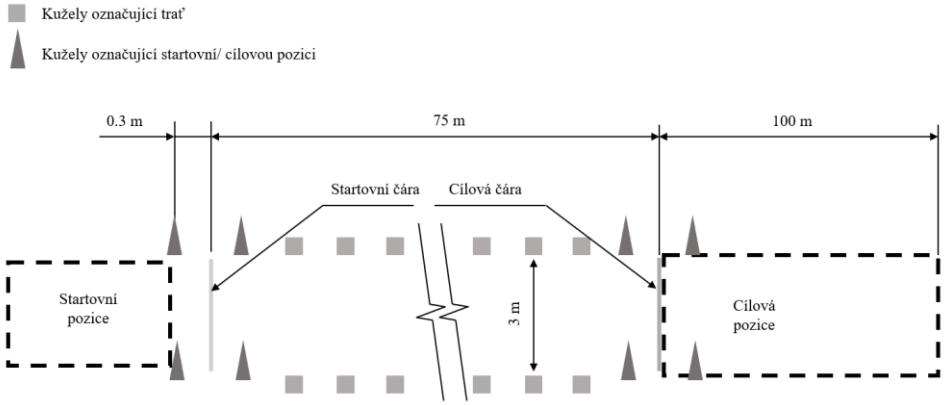
Během prezentace před porotci se hodnotí kvalita zpracování výše uvedených dokumentů. Dále je potřeba, aby se dokument, ve kterém je zpracován kusovník dílů, shodoval s komponenty zhotoveného závodního vozidla. Náklady, stanovené při naceňování jednotlivých komponent uvedené v kusovníku, musí odpovídat realitě. Dále se hodnotí výrobní proveditelnost vozidla. [4]

4.2.3 Engineering Design

Konceptem této statické disciplíny je zhodnotit inženýrský proces konstrukce závodního vozidla. Disciplínu vyhraje tým, který dokáže nejlépe popsat a odprezentovat návrh technických řešení, které jsou použity na monopostu formule. Tato technická řešení se hodnotí z hlediska výkonu vozidla a kvality přednesu před odbornou komisí. [4]

4.2.4 Acceleration

Disciplína Acceleration spočívá v jízdě na rovné trati o délce 75 m od startovní čáry k cílové čáře. Dráha je široká 3 m a kužely jsou umístěny podél dráhy v rozestupech 5 m. V tomto úseku trati se měří čas jízdy formule. Každý tým má maximálně čtyři pokusy pro absolvování této disciplíny. Schéma tratě je znázorněno na obrázku č. 2 [4]



Obrázek 2 Schéma trati disciplíny Acceleration [Archiv týmu CULS PFR]

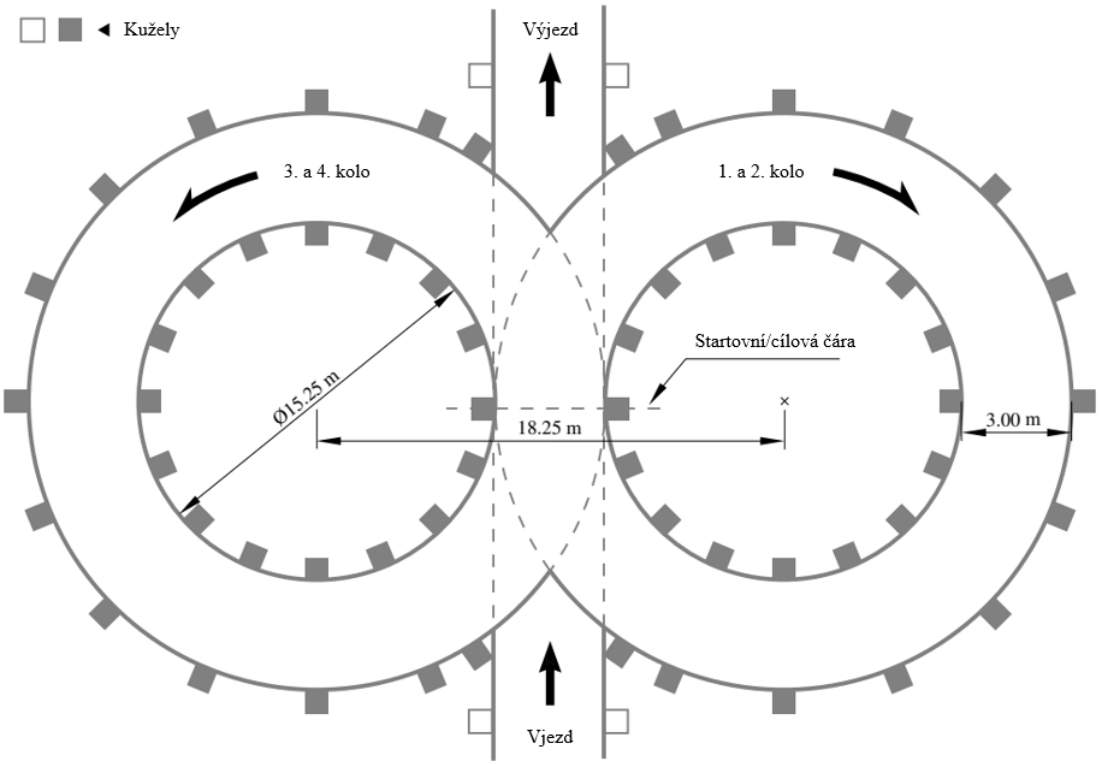
4.2.5 Skid Pad

Trať disciplíny Skid Pad se skládá ze dvou párů soustředných kruhů uspořádaných do tvaru osmičky. Středy těchto kruhů jsou od sebe vzdáleny 18,25 m. Vnější kruhy mají průměr 21,25 m, zatímco vnitřní kruhy mají průměr 15,25 m. Formule projíždí branami na 3 m širokém pruhu, který je kolmý na protínající se kruhy.

Startovní / cílová čára je definována úsečkou mezi středy kružnic. Měřené kolo se definuje jako jízda kolem jednoho z kruhů, která začíná a končí na startovní / cílové čáře. Každý tým má k dispozici čtyři pokusy, které může absolvovat ve dvou jízdách.

Po startu vozidlo vjede kolmo k osmičce a následně zatočí do pravé části tratě. Následně vjede znovu do pravé části trati, kdy už je měřen čas. Ve třetím kole vozidlo vjede do levé části trati a ve čtvrtém kole, které je ve stejné části dráhy, bude opět měřen čas. Následně vozidlo opustí závodní okruh.

Na obrázku č. 3 je znázorněno schéma trati Skid Pad. Výsledné bodové hodnocení je spočteno z průměru časů z pravého a levého měřeného kola. Do celkového času se případně započítávají penalizace za srážku kužele nebo vyjetí z tratě. [4]

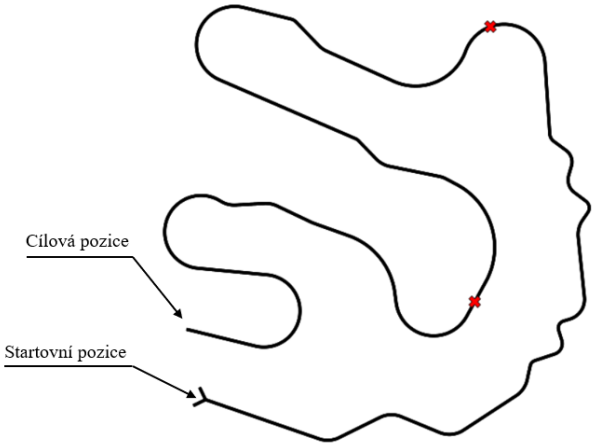


Obrázek 3 Schéma tratě disciplíny Skid Pad [4]

4.2.6 Autocross

Trať pro tuto disciplínu je tvořena zatáčkami a následnými slalomy mezi kužely. Rozměrovými limity tratě jsou rovinky o maximální délce 80 m, konstantní zatáčky o průměru do 50 m, prudké zatáčky s minimálním průměrem 9 m a minimální šířkou trati 3 m. Slalomy jsou tvořeny kužely v přímé linii s rozestupy 7,5 – 12 m.

Vozidlo absolvuje jedno kolo, u kterého se měří čas od startu do cíle. Výsledný čas naměřený v této disciplíně rozhoduje o pořadí pro vytrvalostní závod Endurance, kde je trať obvykle stejná nebo poměrně identická. [4] Na obrázku č. 4 je znázorněno schéma tratě disciplíny Autocross, které bylo zaznamenáno GPS modulem z jízdy na závodech v FS Alpe Adria v Chorvatsku.



Obrázek 4 Schéma tratě disciplíny Autocross [Archiv týmu CULS PFR]

4.2.7 Endurance

Jedná se o vytrvalostní závod o délce přibližně 22 km. Jedno kolo okruhu měří přibližně 1 km. Před zahájením závodu musí mít vozidla, které patří do spalovací kategorie, naplněnou nádrž až po rysku hladiny paliva. Pokud je nádrž naplněna po rysku, nesmí se při tankování s nádrží, benzínovým systémem ani s celým vozidlem třást ani naklánět.

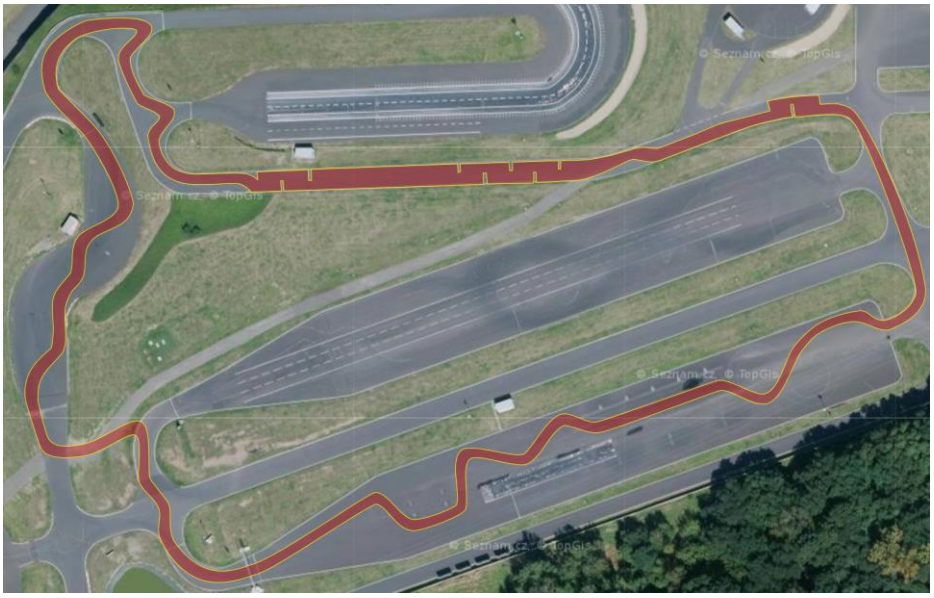
V tomto závodě má každý tým pouze jeden pokus. První jezdec ujede 11 km a poté dostane pokyn, aby zajel do prostoru pro výměnu řidičů. Výměna jezdců musí být uskutečněna do méně než 3 minut. Během výměny jezdců může tým upravit ergonomii vozidla pro druhého jezdce. Pokud se v průběhu vytrvalostního závodu změní podmínky a trať je mokrá mohou týmy přezout na mokré pneumatiky. Po této výměně druhý jezdec ujede zbývajících 11 km. Během vytrvalostního závodu mohou být na trati maximálně čtyři monoposty. Předjíždění je umožněno pouze ve speciálních zónách, ve kterých je vedoucímu pomalejšímu vozidlu ukázána modrá vlajka a musí tak vjet do zpomalovacího pruhu a zpomalit. Následující rychlejší vozidlo bude pokračovat v rychlém pruhu, aby předjelo pomalé vozidlo. [4]

Týmy, které úspěšně dokončí vytrvalostní závod, musí svůj monopost umístit do Parc Fermé, kam nemá po dobu 30 minut přístup žádný člen týmu. Poté organizátoři provedou technickou kontrolu vozidla, která je zaměřena na to, zda během jízdy nedošlo k úniku kapalin. [5]

Bodové hodnocení závodu Endurance se určuje pomocí součtu časů jednotlivých kol. Od celkového času se odečte doba potřebná k výměně řidičů. Následně se k němu přičtou

všechny penalizace. Ty jsou uděleny buď za sražení nebo posunutí kužele mimo vyznačené místo a za každý takovýto sražený kužel jsou přičteny 2 vteřiny Pokud by vozidlo mělo všechna čtyři kola mimo trať, časová penalizace by činila 20 vteřin. [6]

Za úspěšné dokončení disciplíny Endurace mohou týmy získat až třetinu z celkového počtu bodů, což je nejvíc bodů ze všech disciplín. Na obrázku č. 5 je zobrazen nákres profilu trati na leteckém snímku ze závodu FS Czech konaného na polygonu v Mostě.



Obrázek 5 Schéma tratě disciplíny Endurance [7]

4.2.8 Efficiency

Disciplína Efficency se zaměřuje na určení efektivity spotřeby paliva nebo spotřebovanou energií během vytrvalostního závodu. Po dokončení tohoto závodu se u spalovacích formulí spotřeba změří dotankováním po risku hladiny paliva. Pokud spotřeba paliva překročí 26 l na 100 km nebo celkový čas vytrvalostního závodu překročí 1,333násobek času nejrychlejšího vozidla, obdrží tým 0 bodů z této disciplíny. Výsledný počet bodů se vypočte ze vzorce, kde se maximální celkový počet 100 bodů vynásobí koeficientem efektivnosti, který je menší než 1.

Tento koeficient se získá z celkové spotřeby paliva po absolvování závodu a vynásobí se celkovým časem po dojetí vytrvalostního závodu. Čas se následně porovná s časy ostatních týmů, které úspěšně dokončily tento závod. [8]

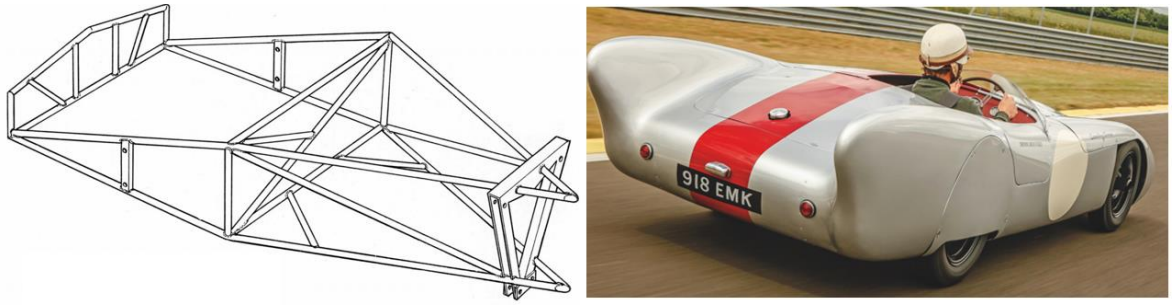
4.3 Konstrukce šasi závodních automobilů

Konstrukce šasi je jedním z nejdůležitějších prvků závodních automobilů. Správně navrhnuté šasi nejenže zajišťuje pevnou a tuhou konstrukci vozidla, ale zároveň má rozhodující vliv na jeho celkový výkon. Konstrukce šasi závodního vozu může významně také ovlivnit jeho ovladatelnost, stabilitu, rychlost a celkovou bezpečnost. Existuje několik typů provedení šasi používaných v závodních vozech, přičemž každé z nich má své jedinečné výhody a nevýhody. [9]

4.3.1 Prostorový trubkový rám

Šasi typu prostorového trubkového rámu je navrženo pomocí navzájem propojených trubek, které vytvářejí kostru vozidla obklopující řidiče a nesoucí pohonnou jednotku vozidla. Trubkový rám poskytuje díky triangulaci trubek poměrně vysokou torzní tuhost při nízkých pořizovacích nákladech na výrobu. Nevýhody této konstrukce jsou vyšší hmotnost, menší pevnost a tuhost oproti monokokům z uhlíkových vláken. [10]

Konstrukce prostorového rámu se využívala ve Formuli 1 v 50. a 60. letech 20. století, ale v 70. letech byl tento typ šasi nahrazen konstrukcí monokoku. [11] V závodech IndyCar se využíval prostorový trubkový rám do 90. let 20. století, ale poté byl také nahrazen monokokem s uhlíkových vláken. [12] Na obrázku č. 6 lze vidět prostorový trubkový rám, který byl použit v monopostu Lotus Mark 8 z roku 1954.



Obrázek 6 Základní konstrukce šasi Lotus Mark 8 [10] [13]

V současnosti se používají trubkové rámy jako výztuha ocelové karoserie pro vozidla soutěžících v rallye nebo GT závodech. [14] [15] Dále se prostorové trubkové rámy využívají v závodech studentských monopostů typu Formula SAE a Baja SAE, a to především kvůli jednoduššímu návrhu a nízkým nákladům na výrobu. [16]

4.3.2 Kompozitní monokok

Monokok je tvořen jedním celistvým kusem, který zahrnuje šasi a karoserii vozidla. Tento název vznikl z francouzského slova monocoque a v překladu znamená jediná skořepina. Konstrukce je tvořena z laminátového materiálu, což je směs více vrstev různých materiálů, jako jsou skelná vlákna, uhlíková vlákna a pryskyřice. Výroba kompozitního monokoku je finančně náročná a zahrnuje specializovaný technologický postup v oblasti kompozitních materiálů. [17]

Výsledná konstrukce je mnohem pevnější, lehčí a bezpečnější než šasi tvořené prostorovým trubkovým rámem, což umožnuje zvýšení výkonu a úsporu paliva. Monokoky současných závodních vozů Formule 1 jsou vyrobeny z kompozitního sendvičového materiálu z uhlíkových vláken a mohou mít torzní tuhost větší než 30 000 Nm / °. [18]

V motorsportu se šasi typu monokok začalo ve větší míře využívat od 60. let 20. století. Prvním vozem ve Formuli 1, který tuto konstrukci využil byl Lotus 25, který měl významnou váhovou výhodu oproti tradiční konstrukci s trubkovým rámem. Lotus 25 nakonec vyhrál mistrovství Formule 1 v roce 1963. [19] Prvním týmem, který představil šasi tvořené kompozitním monokokem z uhlíkových vláken, které lze vidět na obrázku č. 7, byl McLaren MP4/1 v sezóně 1981. Toto šasi bylo revolučním krokem v konstrukci závodních vozů a později se stalo standardem pro všechny týmy Formule 1. [20]

Obrázek 7 Kompozitní monokok monopostu McLaren MP4/1 [20]

5 Praktická část práce

Šasi je pravidly soutěže Formule student definováno jako sestava, která nese všechny funkční systémy vozidla. Těmito systémy jsou podvozkové nápravy, hnací ústrojí, elektronika, řízení, ergonomické prvky řidiče a aerodynamické prvky vozidla. Sestava šasi se dělí na primární strukturu a pomocný rám, který nese zadní nápravu vozidla. [4] Struktura šasi může být buď jedna svařovaná konstrukce nebo kombinace kompozitního skořepinového monokoku a svařovaného pomocného rámu. Týmy s vyšším rozpočtem používají kompozitní monokok, který tvoří primární strukturu i pomocný rám. Dalším typem kombinace šasi může být svařovaná primární konstrukce a pomocný rám, který je tvořen ze šroubovaných desek z hliníkové slitiny.

Pro konstrukci šasi vozidel je důležitým faktorem torzní tuhost, která ovlivňuje chování a stabilitu vozidla při jízdě. Torzní tuhost je schopnost vozidla odolávat deformacím vzniklých při působení kroutícího momentu. Během jízdy vozidla může tento kroutící moment nastat při přejezdu nerovností, které se nachází na vozovce. Torzní tuhost šasi se vypočítá jako poměr kroutícího momentu k úhlovému pootočení, které je měřeno mezi pravou a levou stranou podvozkových náprav. Pokud je torzní tuhost příliš nízká, vozidlo bude mít tendenci se více naklánět v zatáčkách nebo se bude chovat nestabilně na nerovné silnici. [21]

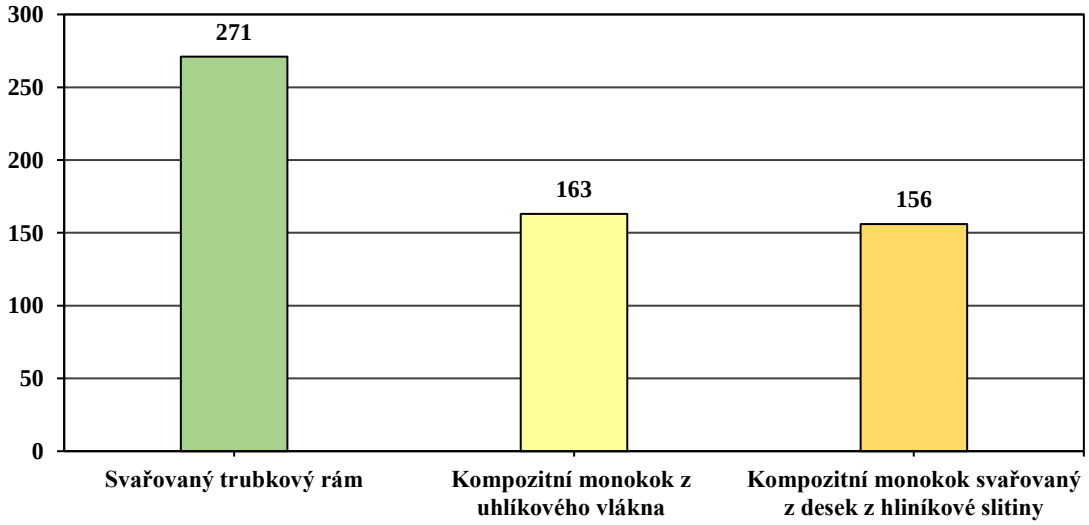
5.1 Volba šasi pro monopost FS07

Před samotným návrhem šasi pro monopost FS07, byla týmem CULS Prague Fomula Racing vypracována multikriteriální analýza, která slouží jako podklad pro obhájení jeho výběru. V prvním kroku byla provedena identifikace kritérií. Těmito kritérii jsou jednoduchost návrhu a výroby v týmových podmínkách. Dále nízká pořizovací cena na realizaci výroby, malá hmotnost a vysoká torzní tuhost samotného šasi formule. Ve druhém kroku bylo provedeno nastavení váhy pro každé kritérium.

Pro hodnocení váhy kritérií byl vybrán bodový systém, kde hodnota 1 je brána nejhorší a hodnota 10 jako nejlepší. Dále byly určeny alternativy pro výběr, kterými jsou svařovaný trubkový rám, kompozitní monokok z uhlíkového vlákna a kompozitní monokok svařovaný z desek z hliníkové slitiny. Pro tyto alternativy byl zvolen stejný bodový systém hodnocení jako pro váhy kritérií. Poté bylo vypočítáno skóre pro všechny alternativy,

kde se výsledné skóre rovná hodnotě váhy kritéria x hodnotě skóre kritérií pro jednotlivé alternativy. Detailnější přehled pro výběr šasi je uveden v příloze č. 2., ve které jsou uvedeny tři tabulky, ve kterých je bodové ohodnocení, výsledky a data pro vyhodnocení kritérií a alternativ.

Na základě skóre, které lze vidět na obrázku č. 8., je nejlepší variantou pro volbu šasi svařovaný trubkový rám. Hlavní výhodou oproti ostatním variantám je jednoduchost návrhu a výroby rámu. Ta vychází ze zkušeností předchozích generací týmu CULS Prague Formula Racing. Další výhodou je nízká pořizovací cena. Nevýhodou rámu oproti kompozitním monokokům je menší torzní tuhost a vyšší hmotnost. Zde je potřeba vzít v potaz, že pokud by tým přešel během jedné sezóny ze svařovaného rámu na kompozitní uhlíkový monokok, tak by kvůli malým zkušenostem s návrhem a výrobou toho typu šasi dosáhl podobné hmotnosti a torzní tuhosti jako u svařovaného rámu. Z těchto důvodů byl zvolen na monopostu FS07 svařovaný trubkový rám.



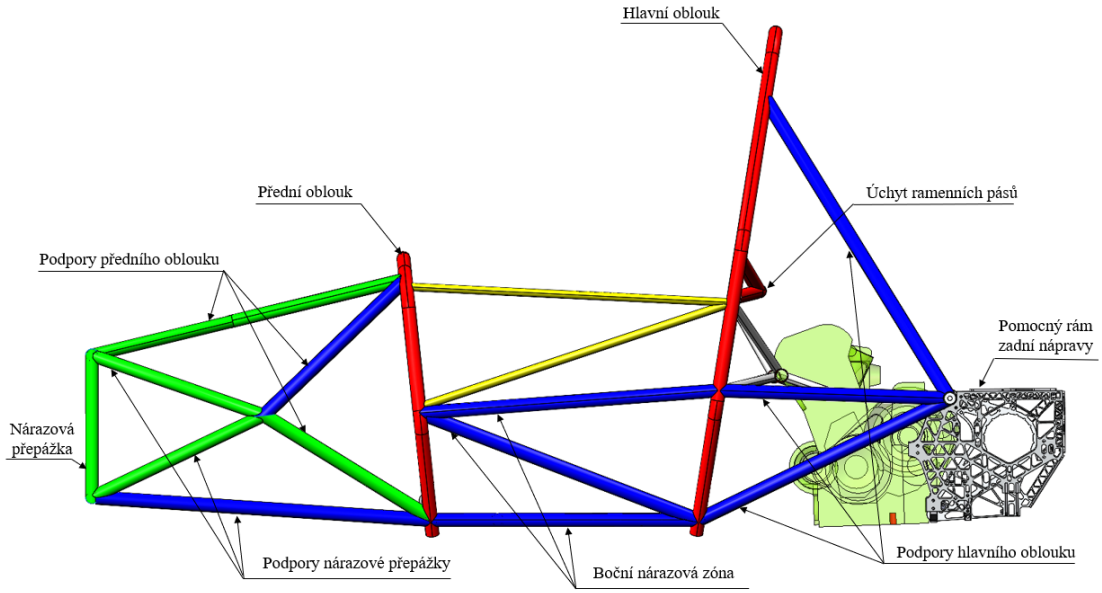
Obrázek 8 Výsledky skóre multikriteriálního výběru pro volbu šasi na monopost FS07 [Archiv týmu CULS PFR]

5.2 Technické požadavky pravidel soutěže pro návrh rámu

5.2.1 Primární struktura

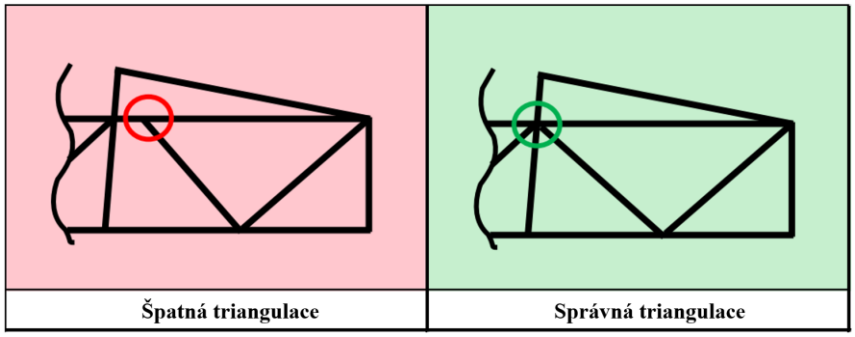
Cílem primární struktury u šasi monopostů Formule student, je zajistit bezpečnost pro pilota při jízdě vozidla. Musí ji proto tvořit hlavní oblouk, podpory hlavního oblouku, přední oblouk, podpory předního oblouku, přední nárazová přepážka, podpory přední nárazové přepážky, boční nárazová zóna a uchycení ramenních pásů. Tyto prvky jsou povinné jak pro

svařovaný trubkový rám, tak i kompozitní monokok. Na obrázku číslo č. 9 jsou znázorněny všechny tyto vyjmenované části pro šasi monopostu FS07.



Obrázek 9 Popis primární struktury rámu na monopostu FS07 [Archiv autora]

Dalším požadavkem na primární strukturu je uspořádání rámových trubek mezi sebou, které musí při kolmém bočním pohledu tvořit trojúhelník. Příklad správné a špatné triangulace lze vidět na obrázku č. 10.



Obrázek 10 Ukázka triangulace primární struktury [22]

V tabulce č. 1 jsou uvedeny minimální rozměry, které mohou být použity pro konstrukci jednotlivých částí primární struktury. Pro trubkové rámy platí, že pro ohýbané trubky hlavního, předního oblouku a trubky uchycení ramenních pásů, musí být minimální tloušťka 2 mm a plocha průřezu 175 mm^2. Při technické přejímce může být požadováno po týmech u těchto trubek v nekritickém místě vyvrtání kontrolního otvoru o průměru 4,5 mm. Zbylé trubky primární struktury musí mít minimální tloušťku 1,2 mm a minimální průřez

119 mm^2, vyjma trubek pro podporu nárazové přepážky, kde je povolený minimální průřez 91 mm^2. [4] Dále jsou v tabulce č. 1 uvedeny zvolené rozměry trubek pro rám monopostu FS07. Pro lepší přehlednost je barevné označení výplně buněk shodné s barevným označením trubek zobrazených na obrázku č. 9.

Části primární struktury	**Minimální tloušťka trubky [mm]**	**Minimální průřez trubky [mm²]**	**Zvolené rozměry trubek pro monopost FS07 (průměr x tloušťka stěny) [mm]**	**Zvolený průřez trubky [mm²]**
Hlavní oblouk	2.0 mm	175 mm²	30x2 mm	175.9 mm²
Přední oblouk				
Uchycení ramenních pásu				
Boční nárazová zóna	1.2 mm	119 mm²	30x1.5 mm	134.3 mm²
Podpory hlavního oblouku				
Středová podpora předního oblouku				
Horní podpora předního oblouku			28x1.5 mm	124.9 mm²
Dolní podpora předního oblouku				
Nárazová přepážka				
Podpory nárazové přepážky	1.2 mm	91 mm²	28x1.5 mm	124.9 mm²

Tabulka 1 Požadované rozměry primární struktury šasi [4]

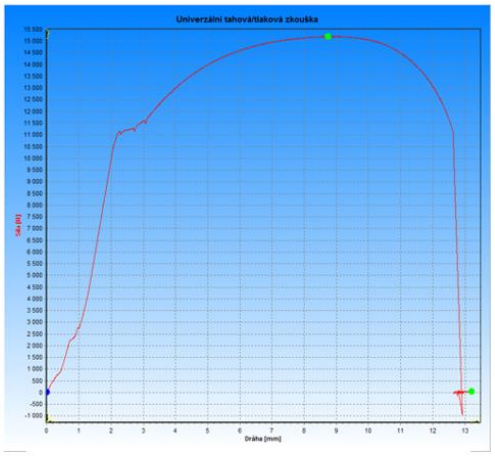
5.2.2 Materiálové požadavky na primární strukturu

Materiálovými požadavky pro prvky primární struktury trubkového rámu jsou ocelové trubky vyrobené z nelegované uhlíkové oceli s maximální obsahem uhlíku 0,3 %, manganu 1,7 % a 0,6 % ostatních prvků. [4] Těmto požadavkům odpovídá například ocel s označením S355JO (ČSN 11 523) [23]. Všechny ostatní druhy oceli jsou považovány za alternativní materiály a vyžadují provedení pevnostní zkoušky tahem, kde se na zkušebním vzorku kontroluje pevnost svarového spoje.

Zvoleným materiálem trubek na monopostu FS07 byla nízkolegovaná ušlechtilá chrom – molybdenová ocel s označením 25CrMo4 (ČSN 15 130). Tato ocel byla zvolena z důvodů větší pevnosti oproti oceli S355JO. Mez kluzu oceli 25CrMo4 je pro rozsah použitých průměrů trubek na rámu monopostu FS07 o 42,5 % vetší než pro ocel S355JO. [23] [24] Díky tomu lze z materiálu 25CrMo4 vyrobit tenčí průřezy trubek se stejnou pevností, což vede k lehčí konstrukci rámu než při použití materiálu S355JO. Dalšími výhody této chrom – molybdenové oceli je její dobrá svařitelnost, obrobitelnost a dostupnost. [24]

Protože je tato ocel nízkolegovaná, řadí se podle pravidel soutěže do alternativních materiálů. Z toho důvodů byla zhotovena zkouška tahem podle normy ČSN ISO 6892-1 (420310) pro zjištění pevnosti svarových spojů. [25] Na obrázku č. 11 lze vidět plochá zkušební tělesa o tloušťce 2 mm. Pro všechna testovaná tělesa nastala deformace na jiném místě než je svarový spoj. Z toho faktu lze usuzovat, že svarové spoje jsou dostatečně pevné.

Zkušební vzorky



Výsledek vzorku č. 4

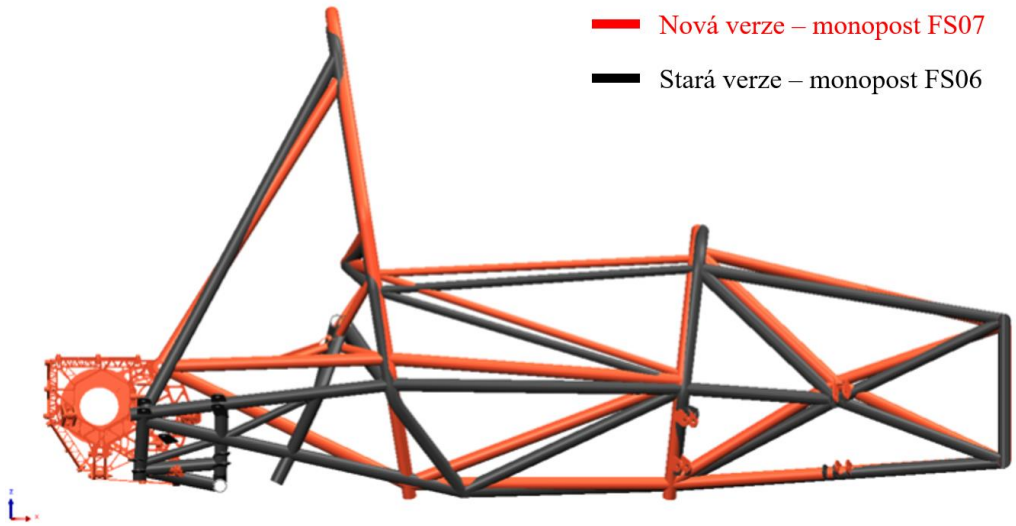
Obrázek 11 Zkouška tahem pro ocel 25CrMo4 FS07 [Archiv týmu CULS PFR]

5.2.3 Požadovaná dokumentace

Všechny týmy musí vytvořit tabulku strukturální ekvivalence a trojrozměrný CAD model šasi monopostu. Tyto dokumenty musí být nahrány v požadovaném datumu na webové stránky jednotlivých závodů. Vozidla musí být vyrobena v souladu s materiály a postupy popsanými v této dokumentaci. [4]

Tabulka strukturální ekvivalence je technický dokument, který slouží k zajištění toho, aby konstrukce šasi splňovala pravidla soutěže. V této tabulce musí být uvedeny materiály a rozměry jednotlivých trubek primární struktury. Pro každou část primární struktury musí být nahrán obrázek, kde je zobrazena správná triangulace trubek. Dále zde musí být ukázány obrázky, kde jsou znázorněny signifikantní změny. [26] Tyto změny jsou na konstrukci šasi definovány pravidly soutěže a každý tým je musí provést, pokud se chce účastnit stejného závodu jako v minulé sezóně. [4]

Na obrázku č. 12 je zobrazen boční pohled šasi monopostu FS06, který byl použit na monopostu v sezóně 2021 a monopostu FS07, který se zúčastnil sezóny 2022. Na obrázku č. 12 lze také vidět, že na novější verzi monopostu byla změněna pozice u všech trubek, a proto bylo dodrženo pravidlo o signifikantních změnách.



Obrázek 12 Porovnání rámů na monopostu FS06 a FS07 [Archiv autora]

5.2.4 Popis částí primární struktury

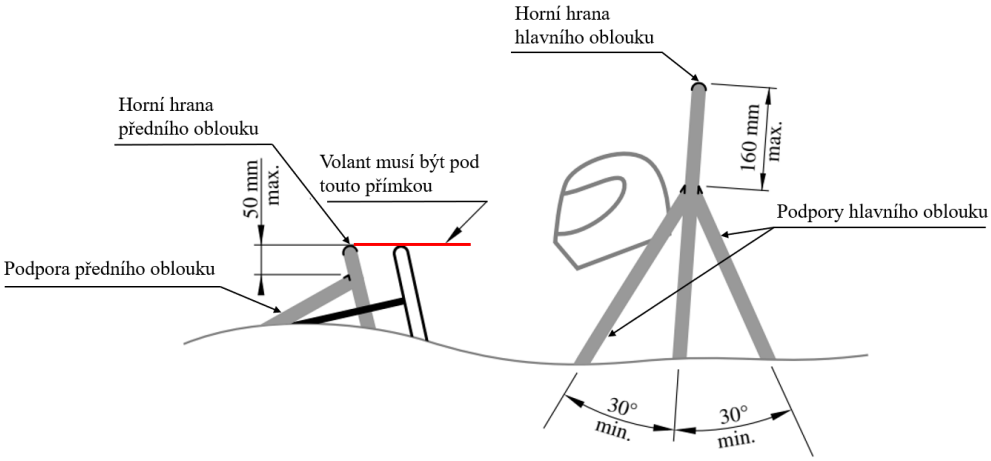
Hlavní oblouk se nachází za tělem řidiče a musí být pevně spojen s primární konstrukcí. Jedná se o ohýbanou ocelovou trubku, kde ohyby musí být hladké a plynulé bez známek deformace nebo porušení stěny. Minimální poloměr jakéhokoliv ohybu musí být nejméně trojnásobkem průměru trubky. Tento díl musí být vyroben z jednoho kusu nerozřezaného, souvislého a uzavřeného průřezu. Při bočním pohledu nesmí být hlavním oblouk skloněn od svislice o více než 10°. [4]

Přední oblouk může být buď z jednoho kusu ohýbané ocelové trubky, kde pro ohnuté části platí stejné požadavky jako u hlavního oblouku nebo může být svařovanou konstrukcí z hliníkových profilů. Druhou variantu využívají týmy s kompozitním monokokem. Z bočního pohledu nesmí být žádná část přední obruče skloněna od svislice o více než 20°. [4]

Podpory hlavního oblouku musí být před nebo za hlavním obloukem. Z bočního pohledu nesmí být tyto podpory natočené ve stejném směru jako je hlavní oblouk. To znamená, že pokud je hlavní oblouk natočený dozadu ve směru jízdy vozidla, tak podpory musí být natočeny dopředu ve směru jízdy. Úhel, který svírá hlavní oblouk a podpory hlavního oblouku musí být alespoň 30°. Podpory hlavního oblouku nesmí ležet níže než 160 mm od horní hrany hlavního oblouku. Tyto rozměry jsou znázorněny na obrázku č. 13. [4]

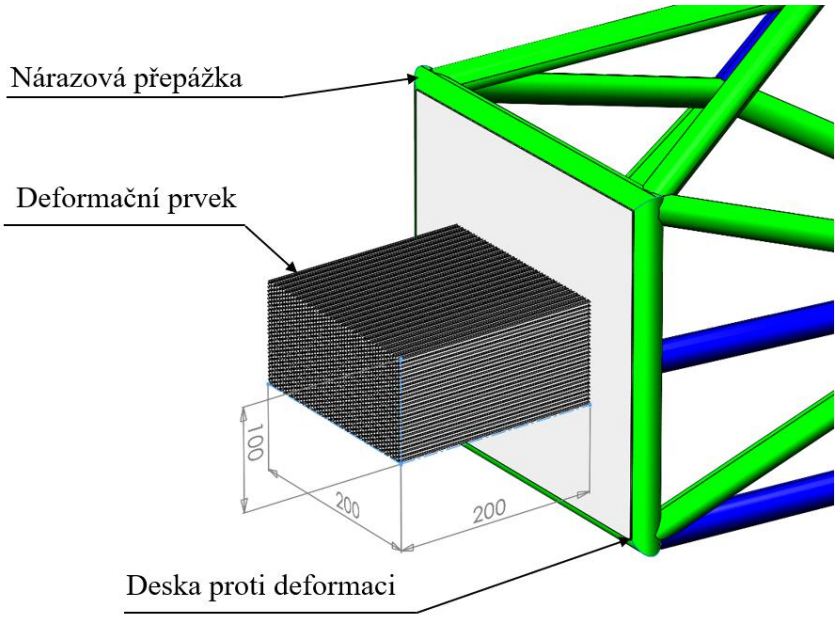
Podpory předního oblouku připevňují na obou stranách přední oblouk a konstrukci primární struktury před nohami řidiče. Pokud je přední oblouk nakloněn o více než 10°

dozadu ve směru jízdy, tak musí být podepřen z obou stran. Výšková pozice podpěr předního oblouku nesmí být níže než 50 mm od horní hrany předního oblouku. Tento rozměr je znázorněn na obrázku č. 13. [4]



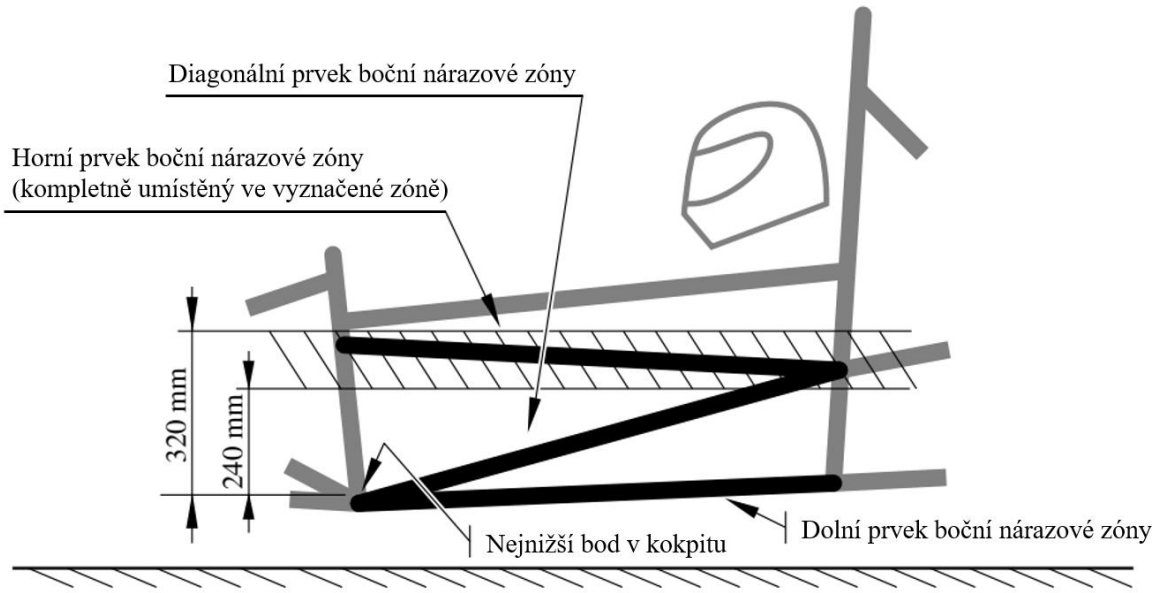
Obrázek 13 Požadované rozměry pro podpory předního a hlavního oblouku [4]

Nárazová přepážka u trubkového rámu musí být ve směru jízdy dozadu na každé straně podepřena minimálně třemi trubkami. Dále na nárazové přepážce musí být připevněna deska, která zabraňuje její deformaci. Pravidla soutěže umožnují tři způsoby. Prvním je deska z ocelové slitiny o minimální tloušťce 1,5 mm, kde je připevnění realizováno pomocí svařovaného spoje, který musí být po celém obvodu nárazové přepážky. Tento způsob byl použit na monopostu FS07. Druhým způsobem je deska z hliníkové slitiny o minimální tloušťce 4 mm, která je uchycena pomocí minimálně osmi šroubových spojů o průměru 8 mm. Třetím způsobem je kompozitní deska proti deformaci, která musí vydržet minimální statické zatížení 120 kN rozložené na plochu 200 x 100 mm. Tento způsob vyžaduje fyzickou zkoušku. Dále je požadováno, aby žádné komponenty nebyly umístěny za deskou proti deformaci ve vzdálenosti 25 mm. Posledním dílem v sestavě nárazové přepážky je deformační prvek. Ten slouží jako tlumič při předním nárazu formule. [6] Na monopostu FS07 byl použit voštinový deformační prvek z hliníkové slitiny se standardizovanými rozměry 200 x 200 x 100 mm. Uchycen byl k desce pomocí lepeného spoje. Na obrázku č. 14 lze vidět umístění těchto komponent v sestavě rámu.



Obrázek 14 Sestava nárazové přepážky na monopostu FS07 [Archiv autora]

Konstrukce boční nárazové oblasti musí mít po obou stranách minimálně tři ocelové trubky. Dolní prvek boční nárazové zóny musí spojovat spodní část předního a hlavního oblouku. Horní prvek musí spojovat hlavní a přední oblouk a musí být na pozici ve výšce mezi 240 mm a 320 mm nad nejnižším bodem kokpitu. Diagonální prvek musí být připevněn tak, aby mezi dolním a horním prvkem zaručil triangulaci. Všechny prvky boční nárazové konstrukce jsou znázorněny n obrázku č. 15.



Obrázek 15 Popis prvků boční nárazové zóny [4]

5.2.5 Kokpit

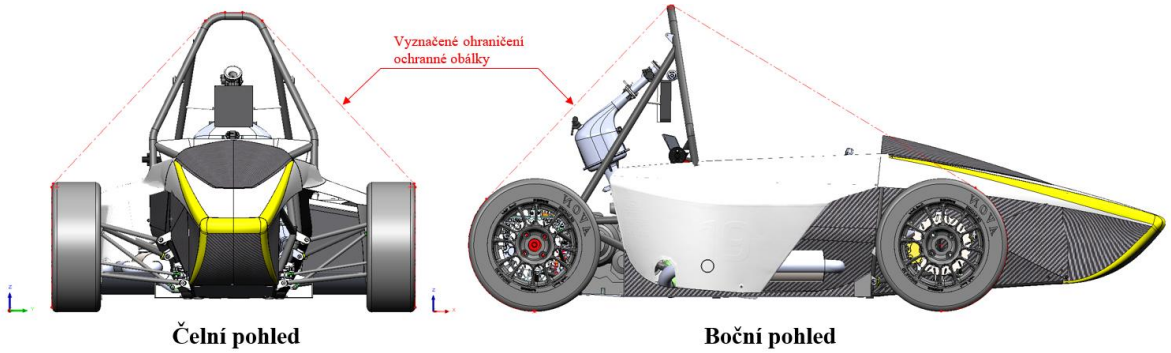
Kokpit je požadovaný prostor pro řidiče, který musí být navržen tak, aby při jakémkoliv defektu nebo havárii vozidla byla zaručena bezpečnost řidiče. Pro zaručení bezpečnosti podle pravidel soutěže, musí být řidič schopný opustit vozidlo do 5 vteřin. Při technické kontrole vozu musí být všichni řidiči, kteří se účastní dynamických disciplín soutěže, schopni do toho časovém intervalu vystoupit z vozidla.

Na obrázku č. 16 je vidět, jak probíhá zkouška výstupu řidiče. Řidič je při zkoušce oblečen do jezdecké výstroje, která musí splňovat homologaci předepsanou pravidly soutěže. Dále je plně usazen a připoután šesti bodovými pásy a na předloktí má nasazeny zábrany na ruce. Ty zajišťují, aby při případném převrácení vozidla ruce pilota zůstaly v kokpitu. Během měření času výstupu z vozidla musí řidič vypnout na palubové desce elektrický obvod, dále pomocí rychlospojky odepnout volant, odpoutat se a vystoupit z formule. [4]

Obrázek 16 Výstup řidiče z monopostu FS07 při technické kontrole [Archiv týmu CULS PFR]

Pro zajištění bezpečnosti řidiče při převrácení formule musí konstrukce primární struktury splňovat pravidlo o ochranné obálce. To je oblast, která je vyznačena na obrázku č. 17. V čelním pohledu je obálka definována spojnicí vnějších hran pneumatik a horní hrany hlavního oblouku. Pro boční pohled je geometrie ochranné obálky definována jako spojnice horního vrcholu hlavního oblouku s tečným napojením na kružnice pneumatik na přední a

zadní nápravě. Mimo tuto vyznačenou oblast nesmí být umístěny žádné komponenty vozidla kromě aerodynamických prvků a jejich úchytů.

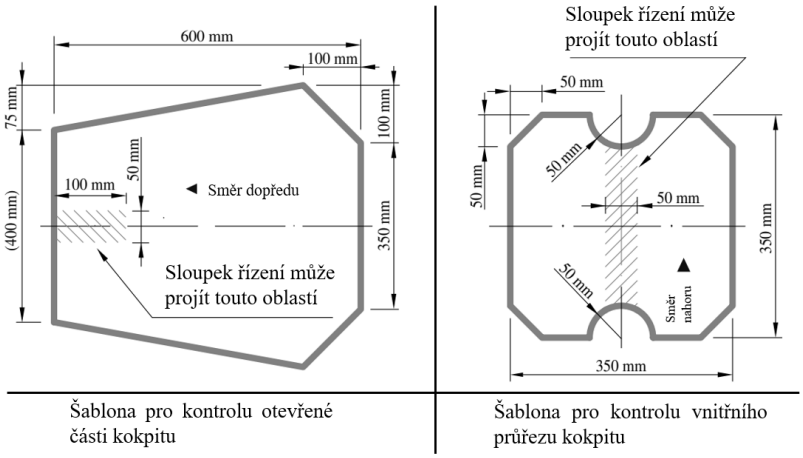


Obrázek 17 Ochranná obálka proti přetočení monopostu [Archiv autora]

Rozměry kokpitu vychází ze šablon, které jsou zobrazeny na obrázku č. 18. Volant a polstrování pro pilota, které lze odebrat bez použití nářadí, mohou být vyjmuty, aby se šablona pro kontrolu otevřené části vešla do kokpitu. Šablona na obrázku vlevo se vkládá do otevřené části kokpitu, který je mezi hlavním obloukem a předním obloukem a ze stran je vymezen boční nárazovou zónou.

Tato šablona musí projít do výšky 320 mm od nejnižšího místa v kokpitu. [4] Výškovou kótu a zobrazení nejnižšího bodu kokpitu lze vidět na předchozím obrázku č. 15.

Šablona, která je na obrázku č. 18. vpravo, slouží ke kontrole vnitřního průřezu kokpitu. Tato šablona musí projít pod předním obloukem až do vzdálenosti 100 mm před čelní plochu nejzadnějšího pedálu v neutrální poloze. Pokud je pozice pedálů nastavitelná, musí být při tomto měření pedály v nejpřednější poloze. Šířka sestavy sloupku řízení nesmí přesahovat 50 mm.

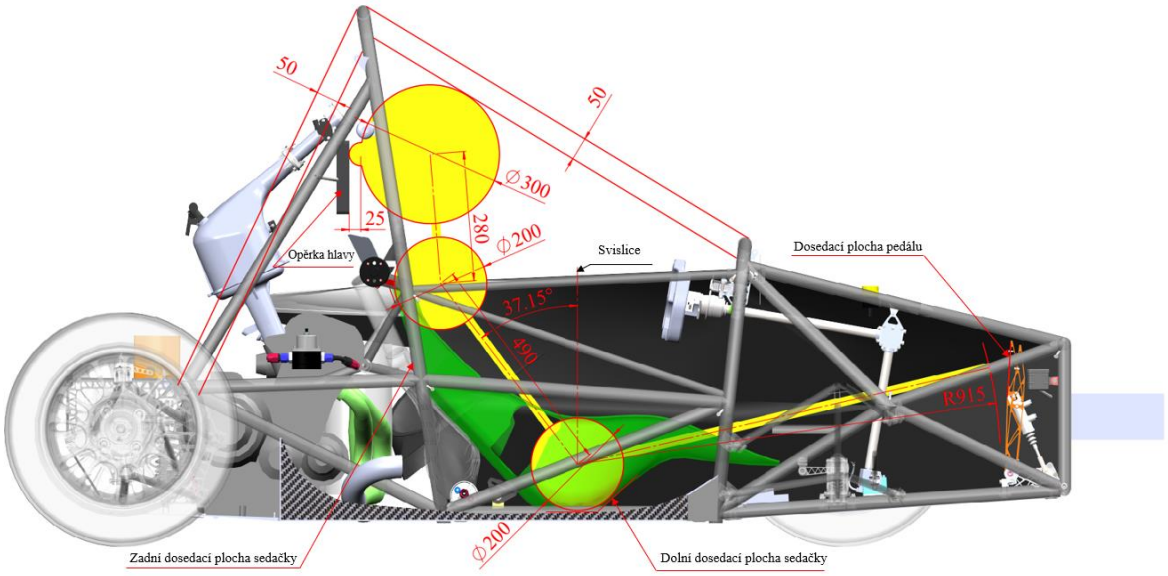


Obrázek 18 Šablony pro kontrolu rozměrů kokpitu [4]

Vozidlo typu Formule student musí být navrženo tak, aby se do jeho kokpitu vešla šablona, která reprezentuje velikost postavy řidiče od 5. percentilu ženy až po 95. percentilu muže. Při navrhování vozidla nemusí týmy mít stejné sedadlo pro všechny jezdce. Stačí, aby základní pozice sedačky vyhovovala pravidlům soutěže. [27]

Na obrázku č. 19 je znázorněna minimální vzdálenost 50 mm od přilby po přímku, která směřuje od horní hrany hlavního oblouku po horní hranu předního oblouku. Nad tento rozměr nesmí zasahovat horní část šablony 95. percentilu muže ani helma řidiče, který je plně usazený ve vozidle. [28]

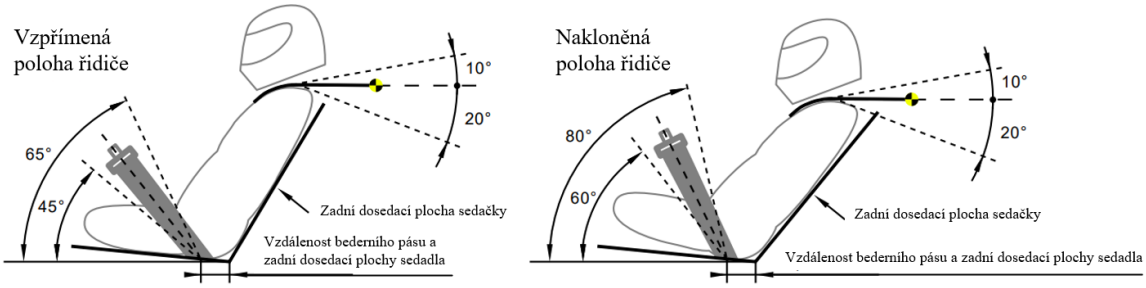
Šablona se skládá z kruhu o průměru 300 mm, který představuje hlavu řidiče. Tato část je umístěna do 25 mm od opěrky hlavy v místě, kde se normálně nacházela přilba řidiče během jízdy. Dále se skládá ze dvou kruhů o průměru 200 mm, které znázorňují oblast ramen, krční páteře, oblast boků a hýždí řidiče. Ty jsou umístěny na zadní a spodní dosedací ploše sedačky. Od dolního kruhu se měří vzdálenost o poloměru 915 mm po čelní plochu pedálu. [6]



Obrázek 19 Pozice šablony 95. percentilu v monopostu FS07 [Archiv autora]

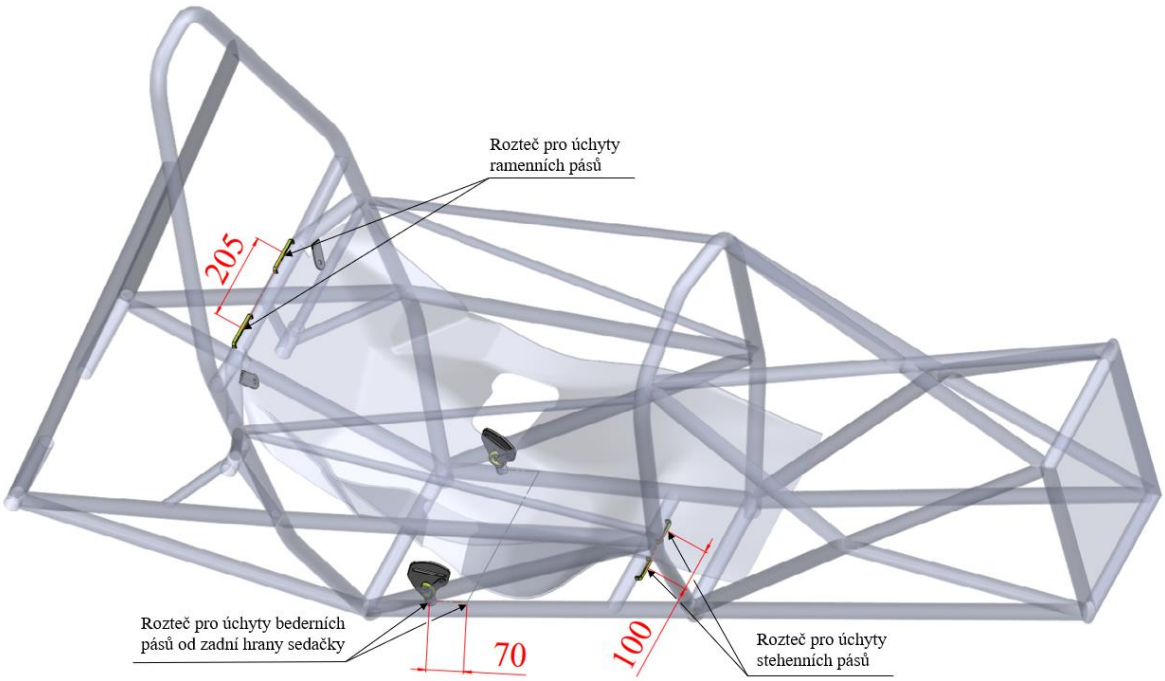
Z pozice šablony 95. percentilu muže vychází konstrukce zádržného systému pilota. Ta může být provedena dvěma způsoby, které jsou zobrazeny na obrázku č. 20. Zde lze vidět dvě polohy pro řidiče, které jsou definovány úhlem od svislice a spojnicí dvou 200 mm kruhů šablony 95. percentilu může. V případě, že je tento úhel menší než 30°, jedná se o vzpřímenou pozici řidiče.

Úhel větší než 30° určuje nakloněnou pozici. Na předchozím obrázku č. 19 je hodnota toho úhlu 37,15°. [4] Proto je pro monopost FS07 zvolena nakloněná poloha řidiče a úhel bederního pásu musí být v rozmezí 60° až 80° od vodorovné přímky.



Obrázek 20 Zádržný systém pro uchycení bederních a ramenních pásů [6]

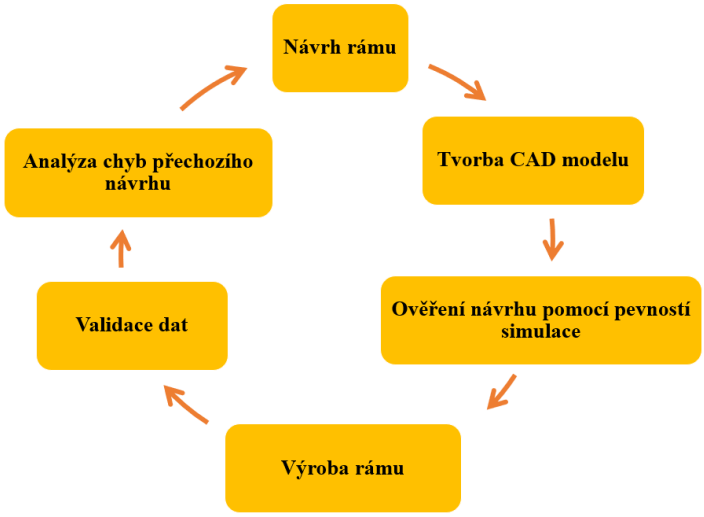
Pro monopost FS07 byly zvoleny šesti bodové pásy, které splňují homologaci FIA 8853 / 2016. [29] Na obrázku č. 21 jsou zobrazeny úchyty ramenních, bederních a stehenních pásů. Jejich pozice v rámu je určena podle pravidel soutěže. Ramenní a stehenní pásy jsou omotány okolo trubky. Bederní pásy jsou uchyceny pomocí karabiny do ocelového oka, které je zašroubované v pouzdru. Toto pouzdro je uchyceno pomocí svarového spoje s rámem.



Obrázek 21 Pozice úchytů pásu na monopostu FS07 [Archiv autora]

5.3 Konstrukce rámu pro monopost FS07

Vývojový proces rámu byl rozdělen do šesti kroků. Tyto jednotlivé kroky jsou znázorněny v diagramu na obrázku č. 22.



Obrázek 22 Vývojový proces rámu monopostu FS07 [Archiv autora]

Před samotným návrhem nového rámu bylo potřeba analyzovat chyby předchozího rámu. Následně proběhlo vyhodnocení nápadů pro úpravy rámu na monopost FS07. Poté se přikročilo k tvorbě CAD modelu, díky kterému lze predikovat kolize s ostatními komponenty vozidla. Další výhodou je zjištění hmotnosti návrhu při změně materiálu nebo změně tvaru geometrie modelu.

V další fázi je potřeba ověřit návrh pomocí pevnostní simulace, která v modelu zobrazí kritická místa s vysokou koncentrací napětí a deformacemi materiálu. Následně znovu probíhá práce na tvorbě CAD modelu, do kterého jsou zaneseny změny zjištěné na základě pevnostní simulace. Tento proces se opakuje tolikrát do doby, než je získána verze návrhu s nejlepší poměrem mezi koeficientem bezpečnosti a hmotností návrhu.

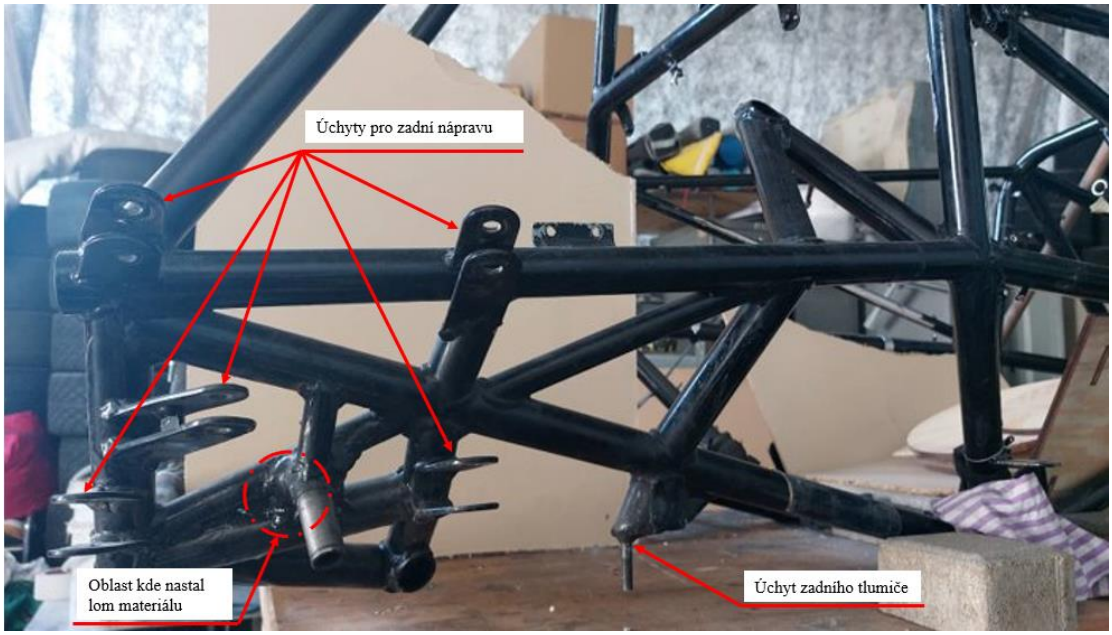
V dalším kroku byl návrh rámu optimalizován pro výrobu. Zde byla vytvořena v CAD programu sestava, do které byl vložen rám, úchyty podvozku, řízení, opěrky hlavy a motoru. Následně byl v této sestavě vymodelován svařovací přípravek. Tento přípravek byl zkonstruován z desek z truhlářské překližky, ve kterých byly laserem vyřezány elipsové profily trubek rámu. Pro složení přípravku byl zkonstruován zámkový systém mezi jednotlivými deskami. Poté byly do přípravku vloženy laserem vyřezané trubky rámu. Přesná pozice podvozkových úchytů byla zajištěna pomocí přípravků z 3D tisku.

Rám i všechny jeho úchyty byly svařeny pomocí metody TIG, u které lze dosáhnout nejvyšší kvality sváru a je vhodná pro tenkostěnné trubky. [30] Metodou TIG lze dosáhnout vyšší čistoty svárů. Proto tato metoda zvyšuje mechanické vlastnosti konstrukce rámu oproti svařovací metodě MAG, která byla použita u přechozích monopostů. [31] Rám byl po svaření pískován a nalakován.

Na zhotoveném rámu proběhla validace dat, a to pro ověření výrobní přesnosti pomocí technologie 3D skenování. [32] Pro ověření výpočetního modelu proběhla validace dat fyzickým měřením torzní tuhosti formule uvedené v podkapitole č. 5.6.

5.3.1 Analýza chyb na rámu předchozího monopostu FS06

Vývojový proces návrhu rámu započal analýzou všech problematických částí, které byly na předchozím rámu monopostu FS06. Nejvíce problematickou částí byl špatný návrh zadní části rámu, který uchycoval zadní nápravu. Na obrázku č. 23 jsou zobrazeny úchyty zadní nápravy. Jejich špatná konstrukce neumožnovala plný chod zadních podvozkových ramen. Tím vznikal problém při zatáčení formule, kdy se při průjezdu zatáčkou nadzvedávala zadní kola. To vedlo ke zhoršené ovladatelnosti vozu a navýšení celkového času v dynamických disciplínách. Na obrázku č. 24 lze vidět tento problém, který nastal při dynamické disciplíně Endurance na závodech FS ATA Italy v sezóně 2021.

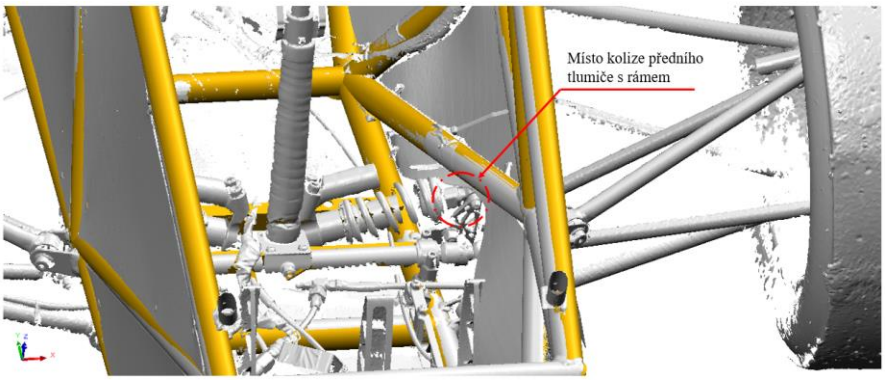


Obrázek 23 Zadní část rámu monopostu FS06 [Archiv autora]

Dalším problémem v zadní části rámu byly špatně navržené úchyty zadních tlumičů. Zde v oblasti vyznačené na předchozím obrázku č. 23, vznikl lom materiálu v místě otočeného bodu pro přepákování. Tento problém nastal před dynamickou disciplínou Autocross na závodech FS Czech. Opravu se nepodařilo zrealizovat v časovém intervalu vyhrazeném pro tuto disciplínu. To vedlo ke ztrátě bodů z této disciplíny. Dále byla nevhodně vyřešena triangulace trubek v této oblasti, což vedlo ke zvýšení hmotnosti rámu a k malému montážnímu prostoru.

Obrázek 24 Nadzvednuté zadní kolo monopostu FS06 [Archiv týmu CULS PFR]

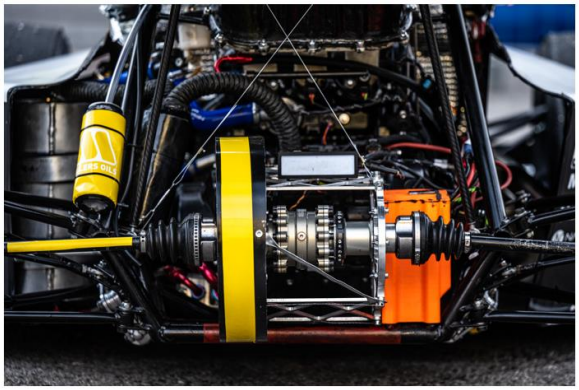
Na primární struktuře předchozího rámu nastala kolize mezi předním tlumičem a trubkou dolní podpory předního oblouku. Horní pozice této trubky byla umístěna příliš nízko v ose Z. Proto musel být přední tlumič více položen k podlaze rámu a přední přepákování muselo být zmenšeno. Tyto změny vedly k výraznému zhoršení jízdních vlastností vozidla. Zejména při brždění se přední část vozidla začala výrazně překlánět k vozovce, a to vedlo k poškození předního křídla. Na obrázku č. 25 je znázorněno místo kolize v sestavě rámu a 3D skenu monopostu FS06.



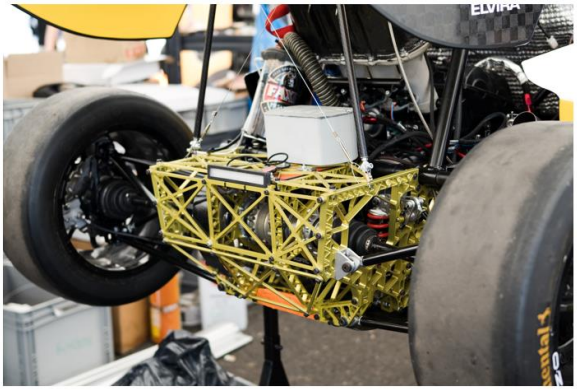
Obrázek 25 Kolize předního tlumiče s rámem monopostu FS06 [Archiv autora]

5.3.2 Změna konceptu šasi monopostu FS07

Všechny tyto nedostatky byly zohledněny při konstrukci rámu na monopostu FS07. Proto došlo ke změně konceptu šasi. Namísto jedné svařované konstrukce byla zvolena kombinace primární struktury z trubkové prostorového rámu a pomocného rámu ze šroubovaných desek z hliníkové slitiny EN AW – 7075 - T6. Na obrázku č. 26 lze vidět porovnání zadních náprav pro monopost FS06 a FS07.



Zadní náprava FS06



Zadní náprava FS07

Obrázek 26 Porovnání zadní nápravy na monopost FS06 a FS07[Archiv týmu CULS PFR]

Mezi hlavní výhody této šroubované konstrukce pomocného rámu oproti předchozímu monopostu patří integrace úchytů diferenciálu, což vede k úspoře hmotnosti. Dále došlo ke zlepšení prostoru pro návrh zadních podvozkových bodů a úchytů zadních tlumičů. Díky tomu byl umožněn plný chod zadních podvozkových ramen. Při průjezdu zatáčkou tak nenastal problém s nadzvedáváním zadního kola. Nevýhodami této konstrukce je časově náročný návrh, složitější výroba a montáž. Konstrukce pomocného zadního rámu byla zpracována mým týmovým kolegou. Tato práce je zaměřena na návrh a konstrukci prostorového trubkového rámu, který je primární strukturou šasi monopostu FS07.

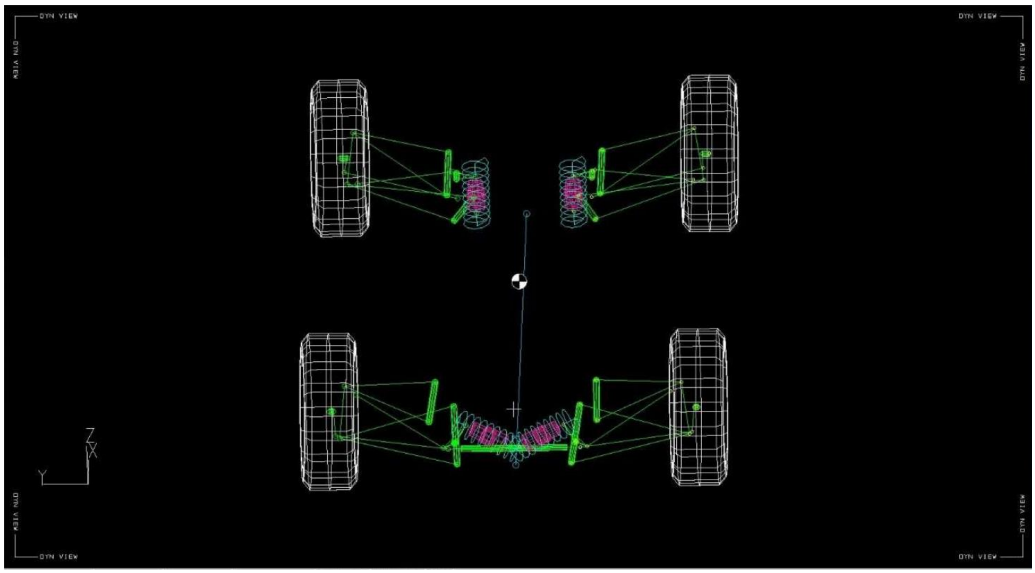
5.4 Tvorba 3D modelu rámu

Návrh rámu byl zpracován v programu Solidworks Premium 2021, který nabízí kompletní 3D softwarové nástroje pro tvoru parametrického modelování, simulací a výrobní dokumentace. [33] Při tvorbě 3D modelu rámu musí být splněna všechna pravidla soutěže, která jsou uvedena v přechozí podkapitole 5.2. Ta jsou primárně zaměřena na bezpečnost řidiče. Následně se musí zohlednit rozmístění podvozkových bodů, uchycení tlumičů, výběr pohonné jednotky, ergonomie řidiče a umístění aerodynamických prvků formule. Požadavky při návrhu rámu jsou jeho nízká hmotnost, vysoká torzní tuhost a co největší zorné pole řidiče pro dobrou ovladatelnost vozidla.

Dále je potřeba brát v potaz rozložení hmotnosti monopostu. Pozice těžiště ovlivňuje jízdní vlastnosti a velikosti působících sil na vozidlo během jízdy. Podélná pozice těžiště se určuje poměrem vzdálenosti mezi středy kol přední a zadní nápravy. Velikost tohoto poměru závisí na zvoleném konceptu monopostu formule. Například pokud se tým rozhodne použít aerodynamické prvky jako jsou přední a zadní křídlo. Zjednodušeně by se dalo říci, že v ideálním případě je tento poměr 50/50. Z pohledu na půdorys vozidla je potřeba, aby jeho těžiště leželo co nejblíže u středové osy a výšková pozice od vozovky byla co nejnižší. [9]

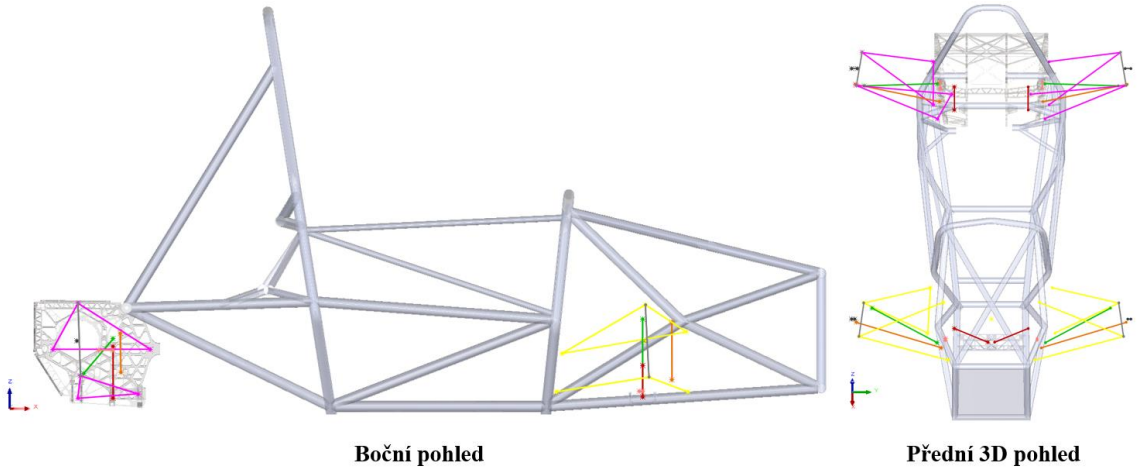
5.4.1 Převedení geometrie podvozkových bodů do CAD modelu

Prvním krokem při tvorbě 3D modelu rámu je potřeba určit pozici podvozkových bodů. Geometrie těchto bodů vychází z programu Lotus Suspension Analysis. Tento program umožňuje tvorbu kinematického modelu a následnou analýzu podvozkových parametrů. [34] Finální návrh geometrie podvozku na monopost FS07 je znázorněn na obrázku č. 27. Jedná se o typ lichoběžníkové zavěšení s použitím sbíhavých, rovnoramenných, dvojitých ramen. Na přední nápravě byl zvolen typ odpružení – pullroad. Zde je spojovací tyč umístěna mezi bodem na horním rameni a přepákováním, do kterého je přichycen přední tlumič. Při přejezdu nerovnosti dochází na spojovací tyči k namáhaní tahem. Na zadní nápravě bylo zvoleno odpružení typu – pushroad. Uchycení spojovací tyče je u toho typu naopak. Přepákování je umístěno výše než je bod uchycení spojovací tyče. Ten je umístěn na dolním rameni. Spojovací tyč na zadní nápravě je namáhána na tlak a na vzpěr.



Obrázek 27 Kinematický model podvozkových bodů pro monopost FS07 [35]

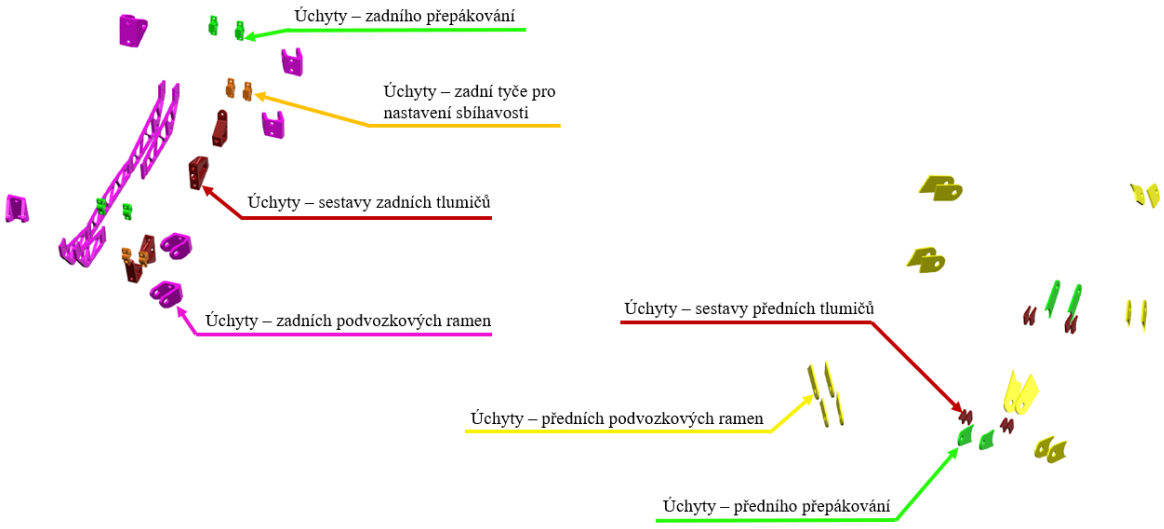
Proces pro vytvoření CAD modelu podvozkových bodů začíná v programu Lotus Suspension Analysis. Ten vygeneruje souřadnice X, Y, Z pro jednotlivé podvozkové body. Tyto souřadnice byly pomocí 3D skici vloženy do modelu v programu Solidworks. Pro lepší orientaci byly tyto 3D skici barevně rozděleny. Další fází bylo pozicování trubek na přední části rámu, které se musely přizpůsobit podvozkovým bodům a zároveň jejich pozice musí splňovat pravidla soutěže. Na obrázku č. 28 lze vidět sestavu, ve které jsou vloženy podvozkové body, rám a pomocný zadní rám. Pro získání finální pozice podvozkových bodů v sestavě s rámem se tento proces několikrát opakuje, protože je potřeba zamezit kolizím mezi jednotlivými díly.



Obrázek 28 Geometrie podvozkových bodů v modelu rámu [Archiv autora]

Na finální pozice podvozkových bodů se následně vymodelují úchyty podvozkových ramen, přepákování, tlumičů a tyče pro nastavení sbíhavosti kol. Tyto úchyty jsou znázorněny na obrázku č. 29 a jejich barevné označení je stejné jako pro 3D skici na přechozím obrázku č. 28. Úchyty na přední nápravě jsou z materiálu 25CrMo4 a jsou svařeny k rámu. Pro úchyty na zadní nápravě byla zvolena hliníková slitina EN AW – 7075-T6. Tyto úchyty jsou přišroubovány ke konstrukci zadního pomocného rámu. Hmotnost těchto 49 úchytů podvozku je 1230 g. Nové úchyty mají oproti úchytům podvozku na předchozím monopostu FS06 o 438 g menší hmotnost. Což je 35,6 % úspora hmotnosti na těchto dílech.

Pro tyto úchyty musí být dodržen poměr vzdálenosti hran 1,5 násobku “e / D“, kde „D“ se rovná průměru díry v úchytu a „e“ se rovná vzdálenosti od osy otvoru k nejbližší volné hraně úchytu. To znamená, že pokud mají díru o průměru 8 mm, musí být nejbližší volná hrana minimálně 12 mm od středu díry. [4]



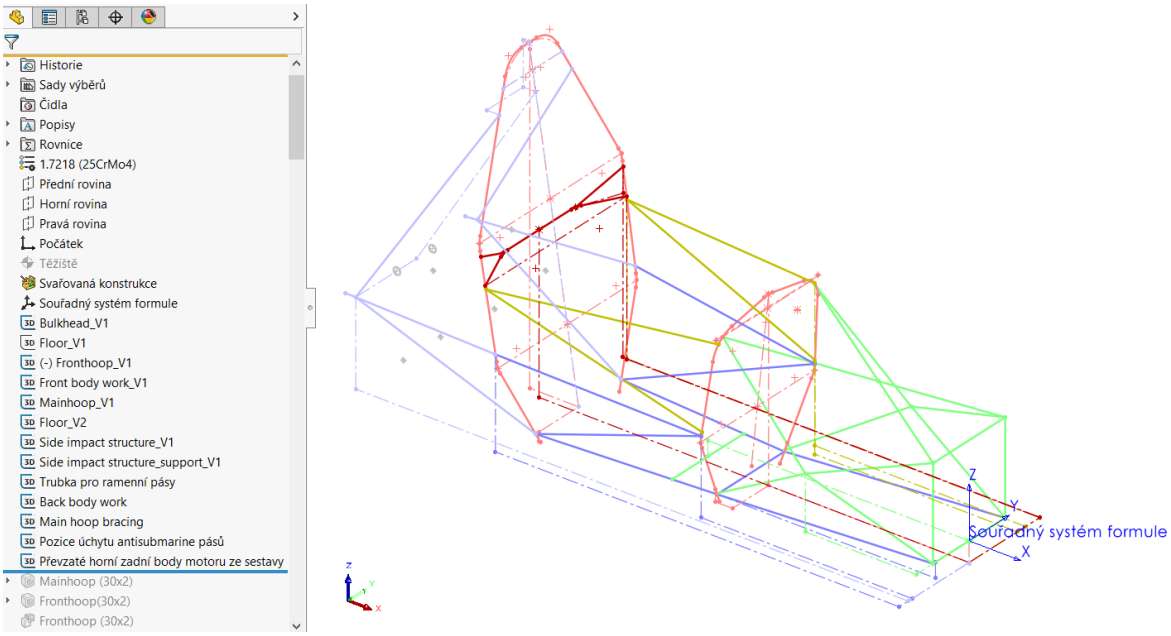
Obrázek 29 Úchyty podvozkových dílů na monopostu FS07 [Archiv autora]

5.4.2 Modelování primární struktury rámu

Nejprve byl po domluvě s ostatními členy týmu zvolen počátek souřadného systému rámu, který byl umístěn do středu dolní trubky v přední nárazové přepážce, tak aby osa X byla ve směru jízdy vozidla, osa Y ve směru zatáčení vozidla a osa Z směřovala kolmo na vozovku. Od toho bodu jsou zakótovány pomocí 3D skic všechny prvky primární struktury rámu. Nejdříve byla nakreslena pozice předního nárazového prvku, předního oblouku a hlavního oblouku. Dále byly nakresleny podpory těchto prvků a boční nárazové zóny.

Rozměry těchto prvků vychází z pravidel uvedených v předchozí podkapitole č. 5.2. Na obrázku č. 30 lze vidět počáteční konstrukci rámu. Prvky, které jsou znázorněny plnou čarou představují trasu pro průřezy trubek. Čerchované čáry slouží k zakótování rozměrů jednotlivých trubkových uzlů. Barvy 3D skic jsou shodné s barevným označením zvolených rozměrů (průřezů) trubek v tabulce č. 1.

Pro trubky nad boční nárazovou zónou byl zvolen průřez 18 x 1,5 mm. Jejich umístění v rámu je označeno žlutou barvou. Tyto trubky nejsou součástí primární struktury šasi, ale byly přidány ke zvýšení celkové pevnosti rámu. Další výhodou těchto trubek je, že usnadňují výstup řidiče z vozidla, jelikož jsou umístěny ve výšce ramen řidiče. Pokud by tyto trubky v rámu nebyly, musel by řidič více natáhnout ruce, aby se mohl zapřít při výstupu z vozidla. To by vedlo ke zvýšení celkového času při jeho výstupu z vozidla.

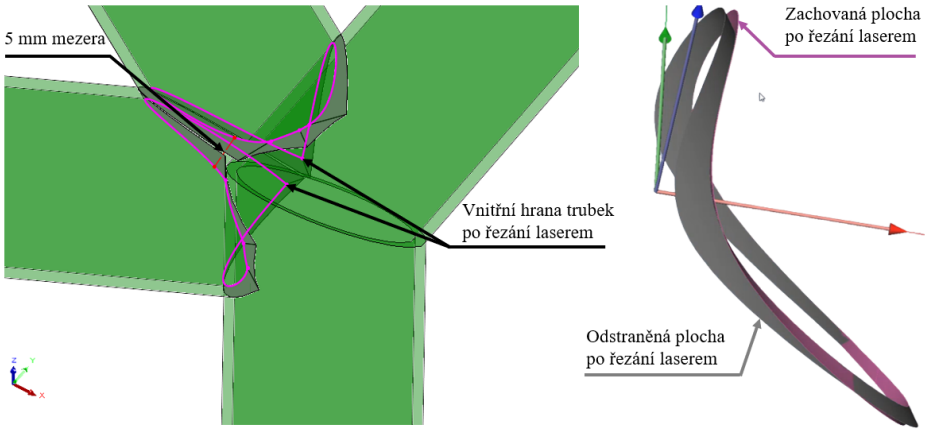


Obrázek 30 Konstrukce primární struktury rámu na monopost FS07 [Archiv autora]

V dalším kroku byly vloženy profily jednotlivých trubek. Následně byly v uzlech, ve kterých se stýkají dvě a více trubek, nastaveny ořezy na jejich koncích. Při nastavení těchto ořezů se musí brát v potaz zvolená technologie výroby. Řezání trubek na monopost FS07 bylo realizováno u sponzora, který disponuje laserem s 2D řezací hlavicí. Proto byla při tvorbě ořezů v programu Solidworks nastavena vnitřní hrana trubky tak, aby se dotýkala hrany sousední trubky. Na obrázku č. 31 je vlevo zobrazen detailní pohled na uzel přední nárazové přepážky a na trubky, které podpírají tuto přepážku. Růžovou barvou jsou vyznačeny vnitřní hrany těchto trubek. Plochy, které jsou vyznačeny šedou barvou budou po

řezáním laserem odstraněny. Při nastavení ořezu tohoto konkrétního uzlu byla vytvořena chyba, protože se vnitřní hrany nedotýkají po celém jejich obvodu. Tím vznikla v horní části 5 mm mezera, která zkomplikovala svařování rámu.

V pravé části obrázku č. 31 jsou zobrazeny koncové plochy trubky pro řezání laserem. Pro usnadnění výroby rámu byla na všechny trubky vygravírována čísla. Nastavení a úprava výrobních dat pro řezání laserem byla zrealizována v CAD/CAM programu Artube. [36]



Obrázek 31 Nastavení ořezů trubek rámu [Archiv autora]

5.4.3 Uchycení pohonné jednotky do rámu

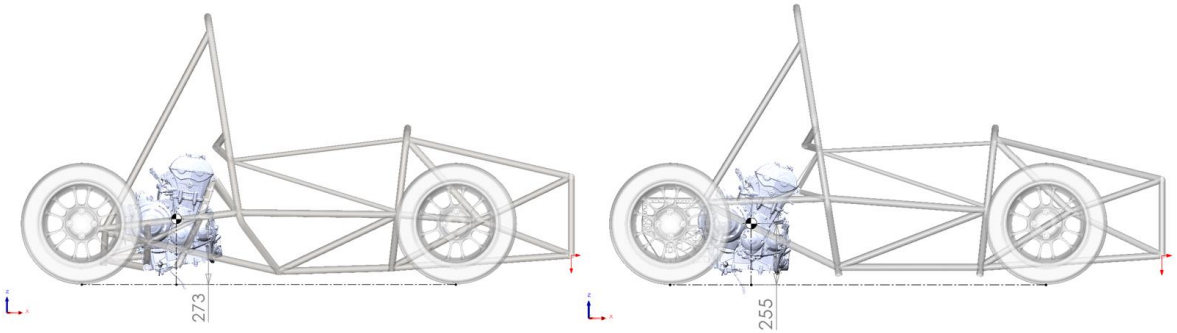
Monopost týmu CULS Prague Formula Racing je poháněn spalovacím motorem. Jedná se o čtyřdobý, tříválcový, sériově vyráběný motocyklový motor o objemu 675 cm^3 od výrobce Triumph Motorcycles. [37]

Členové týmu tento motor výrazně upravili, aby zvýšili jeho výkon, kroutící moment a snížili celkovou hmotnost, která se je nyní 50 kg. Oproti konkurenčním monopostům, které využívají jednoválcové motory, může být hmotnost samotného motoru až dvojnásobná. To však přináší našemu monopostu výhodu, jelikož blok motoru má robustní konstrukci. Proto je využíván jako nosný prvek a tím zvyšuje torzní tuhost šasi zejména v oblasti zadní nápravy.

Další úpravou tohoto motoru byla změna typu olejového hospodářství. Zde byla odebrána olejová vana, olejové čerpadlo a sací koš, který se v sériové verzi nachází ve spodní části motoru. Byl zhotoven systém suchého mazání, který přesunul olejovou nádobu a

čerpadlo na levou stranu vozidla. Tato změna umožnila snížit výškovou pozici horních úchytů motoru o 70 mm oproti předchozímu monopostu formule.

Pomocí programu Solidworks byla změřena výšková pozice těžiště motoru pro oba monoposty. Na obrázku č. 32 lze vidět, že se na monopostu FS07 snížila poloha těžiště motoru od vozovky o 18 mm. Procentuální rozdíl snížení polohy těžiště je o 6,6 %. Nižší pozice motoru v rámu velice zlepšila jízdní stabilitu monopostu FS07.



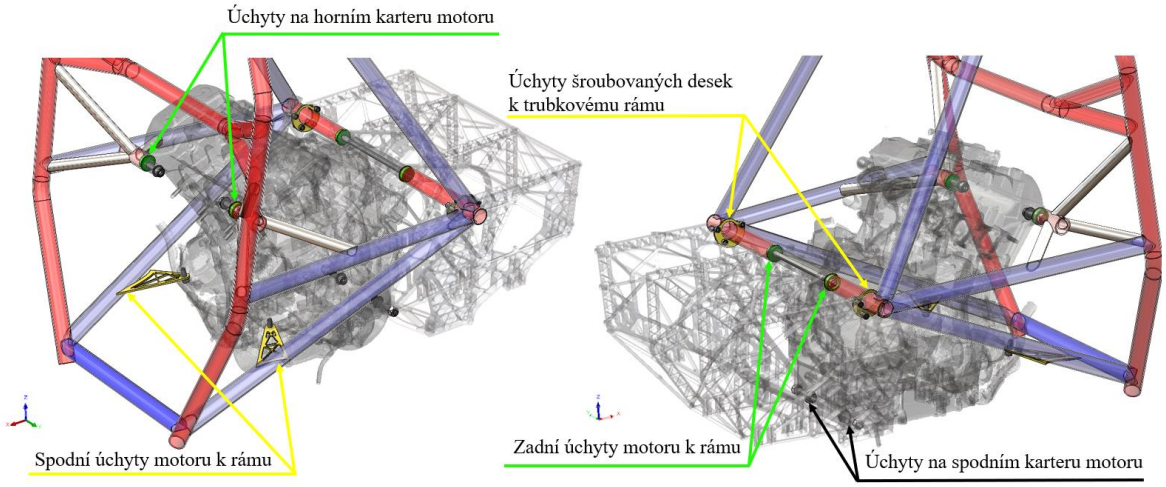
Obrázek 32 Porovnání polohy těžiště motoru na monopost FS06 a FS07 [Archiv autora]

Při tvorbě těchto úchytů byla vytvořena sestava šasi monopostu FS07, do které byl vložen 3D sken motoru. Následně byly vytvořeny úchyty motoru do rámu na osmi místech, které jsou zobrazeny na obrázku č. 33.

Úchyty na horním karteru motoru a zadní úchyty motoru k rámu jsou do něj připevněny přes pevnostní šrouby M10. Tyto šrouby jsou uchyceny do vysoustružených vložek, do kterých je svarovým spojem upevněna matice. Vložky jsou nalisovány a svařeny do trubek o průměru 30 mm a tloušťce stěny 2 mm. Úchyty horního karteru motoru jsou na každé straně vozidla propojeny do rámu přes 3 trubky o průměru 16 mm a tloušťce 1,5 mm. V místě spodního karteru je motor uchycen do desek pomocného rámu pomocí pevnostních šroubů a matic M10. Pro zvýšení pevnosti a torzní tuhosti rámu byly přidány spodní úchyty motoru k rámu. Tyto úchyty byly vyřezány z 3 mm plechu z materiálu 25CrMo4. Následně byly svařeny k trubkám dolních podpor hlavního oblouku. Poté byly přichyceny pomocí pevnostních šroubů M8 k motoru.

Na obrázku č. 33 jsou také zobrazeny úchyty pro přichycení šroubovaných desek k trubkovému rámu. Před montáží motoru do trubkového rámu a pomocného zadního rámu jsou vloženy tyto úchyty na osu trubek. Pak jsou na každé straně přišroubovány pomocí čtyř pevnostních šroubů M6 do vnějších desek pomocného rámu. Poté jsou bodovými sváry

připevněny k trubkám. Motor a pomocný rám se poté demontují, aby tyto úchyty mohly být svařeny po celém obvodu vnitřní hrany. Pro tyto úchyty šroubovaných desek a trubkového rámu byla zvolena stejná tloušťka a materiál jako u spodních úchytů motoru.



Obrázek 33 Pozice úchytů motoru k rámu [Archiv autora]

5.4.4 Hmotnost návrhu šasi na monopostu FS07

Hodnoty uvedené v tabulce č. 2 byly zjištěny pomocí CAD programu Solidworks, kde finální návrh sestavy šasi monopostu FS07 váží 35,68 kg. Sestava šasi je zde tvořena primární strukturou rámu, do kterého byly zahrnuty všechny svařované úchyty a zadní pomocný rám se spojovacím materiálem. Hmotnost primární struktury je 31,65 kg a hmotnost zadního pomocného rámu se spojovacím materiálem je 4,03 kg. Oproti předchozímu monopostu FS06 je hmotnost stejné sestavy šasi o 5,79 kg menší. Úspora hmotnosti je zde o 13,6 %.

Monopost	Hmotnost sestavy šasi z CAD modelu [kg]	Procentuální rozdíl [%]
FS06	41,47	13,6
FS07	35,68	

Tabulka 2 Hmotnostní porovnání návrhu šasi pro monopost FS06 a FS07 [Archiv autora]

5.5 Ověření návrhu pomocí pevnostní simulace

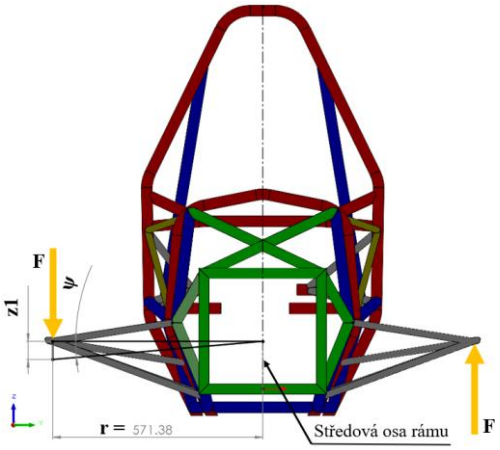
Návrh 3D modelu rámu byl následně ověřen pomocí pevnostní simulace založené na metodě konečných prvků. V podkapitole č. 5.5.1 byla ověřena primární struktura rámu v programu Solidworks Simulation 2021. Byly zde vytvořeny dvě varianty návrhu, které se zabývají porovnáním geometrie přední části rámu. Následně byla v podkapitole č. 5.5.2 zpracována pevnostní simulace pro zjištění celkové torzní tuhosti vozidla v programu Ansys Mechanical 2023. Pro validaci výsledků této simulace bylo provedeno experimentální měření monopostu FS07, které je popsáno v podkapitole č. 5.6.

Metoda konečných prvků je založena na diskretizaci spojitého fyzikálního problému na konečný počet elementů. Každý prvek je popsán pomocí matematického modelu, který je řešen numerickou metodou, aby bylo získáno řešení pro celý systém. [38] Použití této metody je vhodné pro analýzu napětí a deformace rámu celého šasi vozidla, jelikož tyto modely mají složitou geometrii, kterou lze rozdělit do síťového modelu s požadovaným počtem elementů. [39] Pro ověření návrhu rámu a šasi monopostu byly vypracovány výsledky o jeho deformaci pro zjištění hodnot torzní tuhosti.

5.5.1 Ověření primární struktury

Pro trubkový rám, který tvoří primární strukturu šasi, byly vytvořeny dvě varianty, které jsou zobrazeny v příloze č. 3. Variantou č. 1 jsou horní trubky, které podpírají přední oblouk a umístěny rovnoběžně. Pro variantu č. 2 jsou tyto trubky umístěny do kříže. Cílem této simulace bylo zjistit, která z variant má větší torzní tuhost rámu.

Pro pevnostní simulaci byl vytvořen model rámu se zjednodušenými podvozkovými rameny přední nápravy. Geometrie těchto ramen směřuje do bodu, který je na středu úsečky mezi horním a dolním bodem přední těhlice. Do toho bodu na každé straně rámu byla nastavena působící síla 175 N. Ta představuje při délce ramene „r “, znázorněné na obrázku č. 34, hodnotu kroutícího momentu 100 Nm. Pro body v místech horního a zadního úchytu motoru a dolního uzlu hlavního oblouku byla nastavena fixní vazba. Ta odebírá 3 stupně volnosti. Místa těchto bodů jsou znázorněna v příloze č. 3. Jelikož se jedná o pevnostní simulaci dílu, program Solidworks Simulation, automaticky nastavil vazby mezi jednotlivými těly rámu. Dále byla vytvořena síť, která danou geometrii rámu rozdělila na konečné elementy.



Obrázek 34 Vyznačené rozměry pro výpočet torzní tuhosti ze 3D modelu [Archiv autora]

Torzní tuhost rámu byla vypočtena jako poměr působícího momentu „Mx“ a úhlového posunutí. Velikost úhlu „Ψ“ je vyjádřena jako arkustangens zlomku, kde je v čitateli hodnota posunutí v ose Z a ve jmenovateli poloměr ramene „r“. [21] Hodnota posunutí „z1“ byla získána z výsledků pevnostní simulace zobrazené v příloze č. 3.

Výpočet úhlu pootočení:

$$\psi = \operatorname{atan}\left(\frac{z1}{r}\right) = [°] \tag{1}$$

Výpočet torzní tuhosti šasi formule:

$$T = \frac{Mx}{\psi} = [Nm/°] \tag{2}$$

V tabulce č. 3 jsou uvedeny výsledky torzní tuhosti pro obě varianty. Hodnoty torzní tuhosti slouží pouze k porovnání a nevyjadřují skutečnou torzní tuhost rámu. Pro návrh rámu byla použita varianta č. 2, protože je hodnota torzní tuhosti o 133,84 Nm / ° větší než varianta č.1.

Varianta	Délka ramene [mm]	Maximální změřené posunutí v ose Z [mm]	Úhel pootočení [°]	Kroutící moment [Nm]	Torzní tuhost [Nm / °]	Procentuální rozdíl [%]
č. 1	571,38	1,183	0,119	100	842,98	13,7
č. 2	571,38	1,021	0,102	100	976,73	

Tabulka 3 Výsledky simulace primární struktury [Archiv autora]

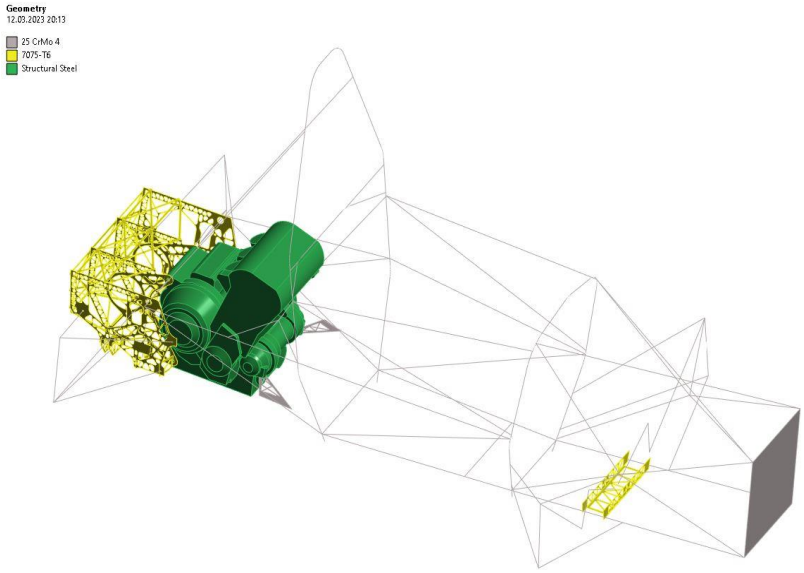
5.5.2 Ověření návrhu sestavy šasi monopostu FS07

Pro zjištění celkové torzní tuhosti šasi vozidla byl vytvořen výpočetní model v programu Ansys Mechanical 2023. Tento program byl zvolen, protože je špičkou na trhu v oblasti řešení MKP. [40] a umí řešit složitě tvarovanou geometrii, která se nachází na zadním pomocném rámu.

Prvním krokem při zpracování simulace byl import 3D modelu sestavy šasi a podvozkových dílu z programu Solidworks do programu SpaceClaim. V tomto programu byl vytvořen zjednodušený model sestavy šasi. Nejdříve byl upraven rám, ze kterého byly odebrány všechny jeho úchyty. Dále byly zjednodušeny podvozkové díly. Těhlice byly nahrazeny trubkou s profilem 30 x 2 mm. Na koncových bodech podvozkových ramen byla odebrány sférická ložiska a geometrie ramen byla protažena až do osy trubek rámu. Stejný postup byl aplikován i na posuvné tyče a přepákování, kde byl zvolen profil trubky 16 x 1,5 mm. Tlumiče nahradila trubka o profilu 20 x 1,5 mm. Následovalo překreslení zjednodušeného modelu motoru ze 3D skenu.

Desky zadního pomocného rámu, úchyty předních tlumičů, dolní úchyty motoru a deska proti deformaci byly zjednodušeny pomocí funkce Midsurface. Tato funkce je vhodná pro zjednodušení tenkostěnných dílů, protože automaticky vypočítá střední povrh z dané tloušťky komponenty. Tento střední povrch představuje zjednodušenou 2D reprezentaci původního 3D objektu pro výpočet pevnostní simulace. [41]

Na obrázku č. 35 je znázorněn zjednodušený model sestavy šasi. Ten byl následně upraven pomocí programu Ansys Mechanical, kde byly nastaveny materiály pro jednotlivé součásti. Deskám zadního rámu a úchytu předních tlumičů, které jsou označeny žlutou barvou, byl vybrán materiál EN AW – 7075 - T6. Pro trubky rámu, součásti podvozku, dolní úchyty motoru a desce proti deformaci byl nastaven materiál 25CrMo4. Pro model motoru byla nastavena strukturální ocel, kde mechanické vlastnosti tohoto materiálu odpovídají slitině oceli S355JO.



Obrázek 35 Použité materiály pro výpočetní model v Ansys Mechanical [Archiv autora]

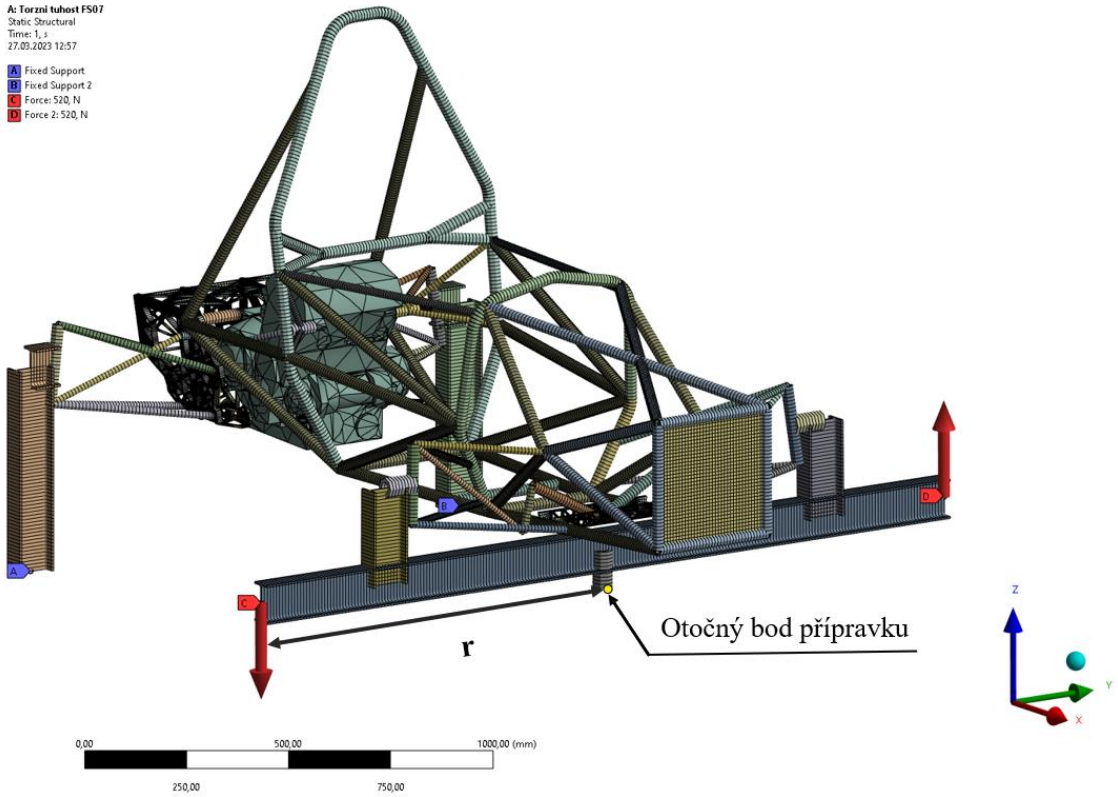
V další fázi pevnostní simulace byly vytvořeny vazby, které se používají pro spojení mezi jednotlivými díly. Tyto vazby jsou rozděleny na dva typy. Kinematické vazby, které definují pohyb mezi součástmi a spojovací vazby, které se využívají pro spojení dílů, kterým je zamezen pohyb. [42]

Na koncových bodech podvozkových dílů byly nastaveny sférické vazby. V místech úchytů motoru byly nastaveny fixní vazby. Mezi koncové body tlumičů a jejich úchyty rámu byly nastaveny také fixní vazby. Pro zpřesnění výsledků výpočtového modelu byl přidán zjednodušený model přípravku pro měření torzní tuhosti a přichycen přes fixní vazby na zadní nápravě. Přední náprava byla přes zjednodušený model předních nábojů uchycena fixně do přípravku. V přední části přípravku byla pro zjednodušený otočný bod nastavena vazba, která umožňuje pouze rotaci v ose X. Materiálem pro model přípravku byla zvolena strukturální ocel.

Další krok spočíval ve vygenerování sítě modelu, kde bylo po prvním nastavení sítě zjištěno, že 95 % vygenerovaných elementů tvoří model motoru. Proto byla pro model motoru použita funkce Body sizing, která umožňuje zredukovat hustotu sítě na požadovanou velikost elementů. [43] Tímto nastavením se výrazně snížil celkový čas pro výpočet simulace.

Na obrázku č. 36 lze vidět upravený model šasi a přípravku pro pevnostní simulaci. Působící kroutící moment okolo osy X, která prochází otočným bodem přípravku, byl v simulaci nahrazen silovou dvojicí. Tyto síly jsou stejně velké a opačně orientované.

Hodnota působících sil byla nastavena 520 N. Velikost ramene přípravku je 1010 mm. Velikost působících sil odpovídá maximálnímu kroutícímu momentu 1050 Nm, dosaženého při fyzickém měření torzní tuhosti. Výsledky torzní tuhosti šasi vozidla a podvozkových bodů z pevnostní simulace lze vidět v kapitole č. 6.

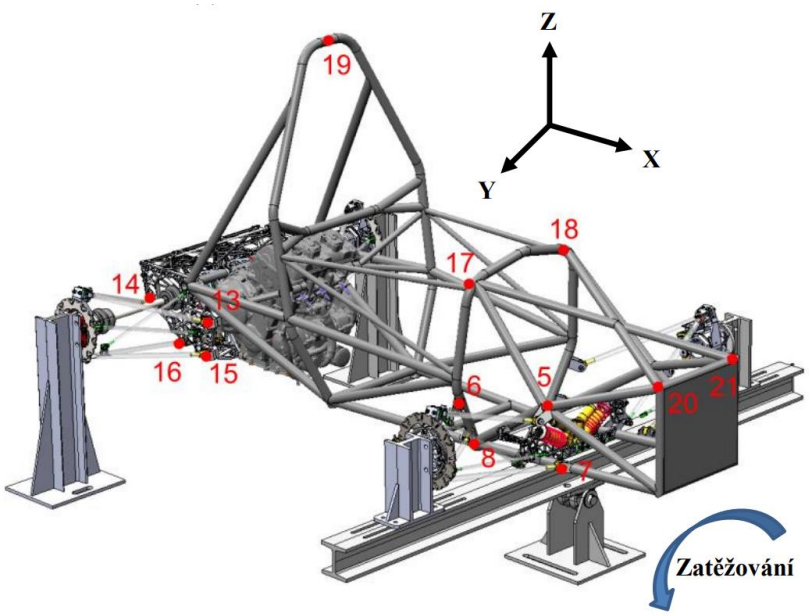


Obrázek 36 Upravený model šasi monopostu FS07 pro pevnostní simulaci [Archiv autora]

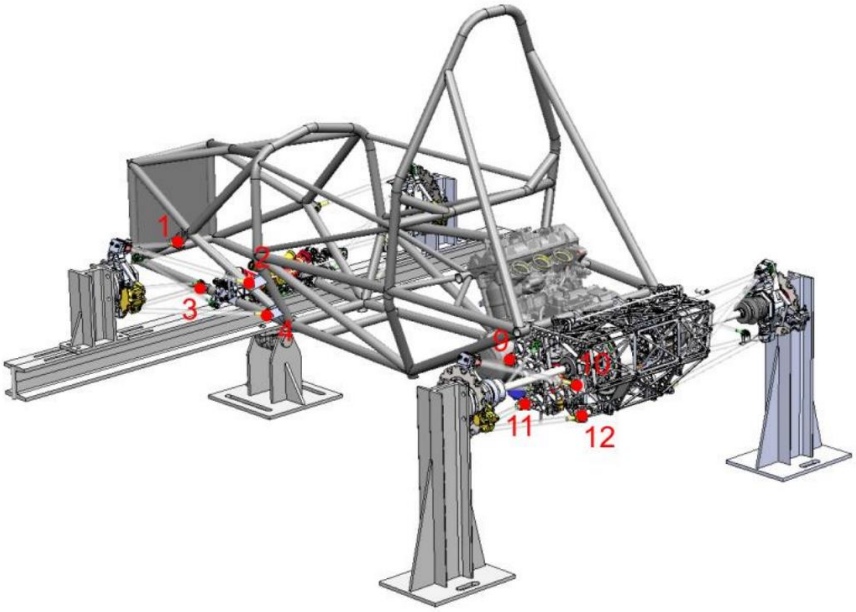
5.6 Měření torzní tuhosti monopostu FS07

Pro ověření výsledků torzní tuhosti z pevnostní simulace popsané v podkapitole č. 5.5.2 bylo realizováno fyzické měření na monopostu FS07 ve spolupráci s Výzkumným ústavem v Liberci.

Cílem měření bylo zjistit vzdálenosti posunutí měřených bodů zobrazených na obrázcích č. 37 a č. 38 při zatěžování působící síly a následně z těchto posunutí určit torzní tuhost šasi formule. Výsledky z měření jsou uvedeny v příloze č. 1. Zde jsou graficky znázorněny průběhy posunutí měřených bodů při působícím momentu. Pro ověření pevnostní simulace sestavy šasi byly z těchto výsledků vyčteny maximální hodnoty posunutí podvozkových bodů v ose Z. V kapitole č. 6 došlo k porovnání těchto výsledků s pevnostní simulací uvedenou v podkapitole č. 5.5.2.



Obrázek 37 Měřené body na rámu – přední pohled [44]

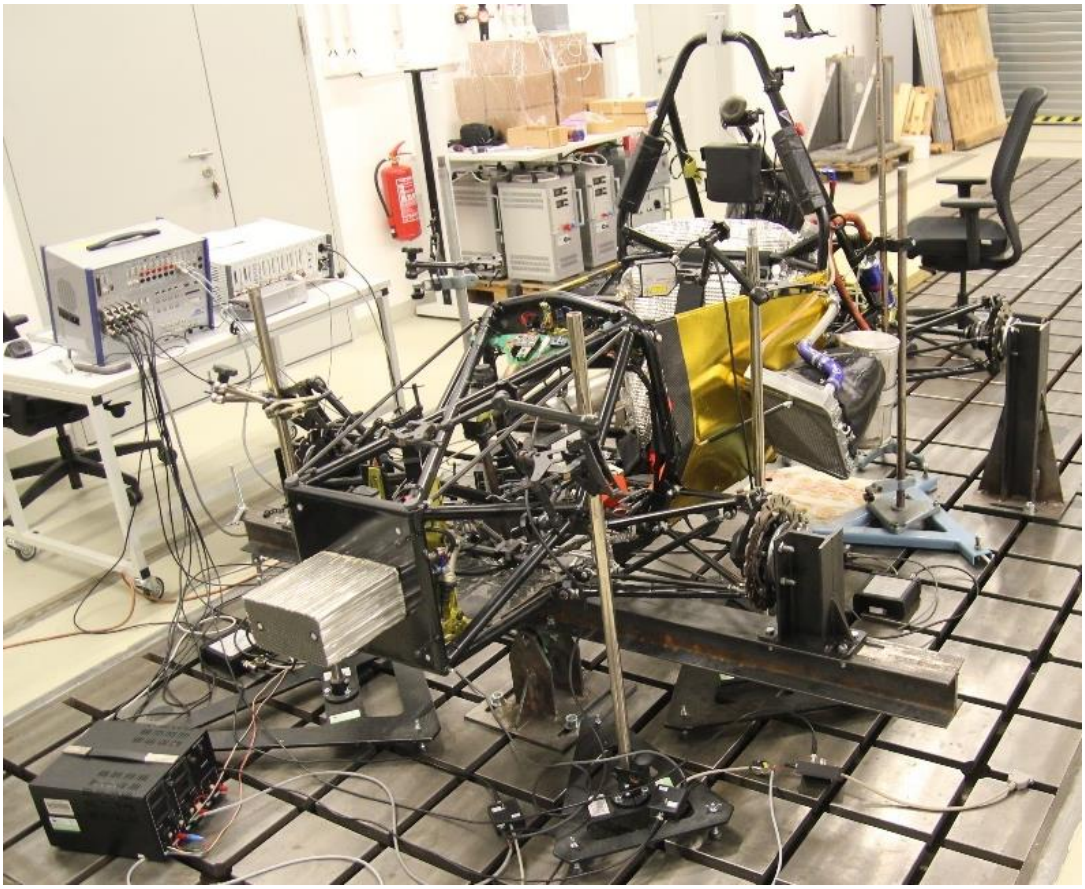


Obrázek 38 Měřené body na rámu – zadní pohled [44]

Byl měřen kompletní monopost FS07 bez aerodynamických komponent. V rámu byla namontována pohonná jednotka, která má významný vliv na tuhost rámu. Tlumiče nahradila tuhá vzpěra. Rám byl následně upevněn k drážkovému roštu pomocí přípravků ve formě tuhých svařenců. Přípravky byly navrženy tak, aby jejich tuhost byla řádově vyšší

oproti rámu formule. Byly upevněny k rámu pomocí čtyř matic přímo na náboje kol.

Zadní náprava byla k podlaze fixována napřímo a přední náboje propojeny tuhým nosníkem, ve svém středu otočně upevněným na základně pomocí dvojice ložisek a na jednom konci zatěžován silou. Uchycení monopostu v přípravku je zobrazeno na obrázku č. 39. [44]



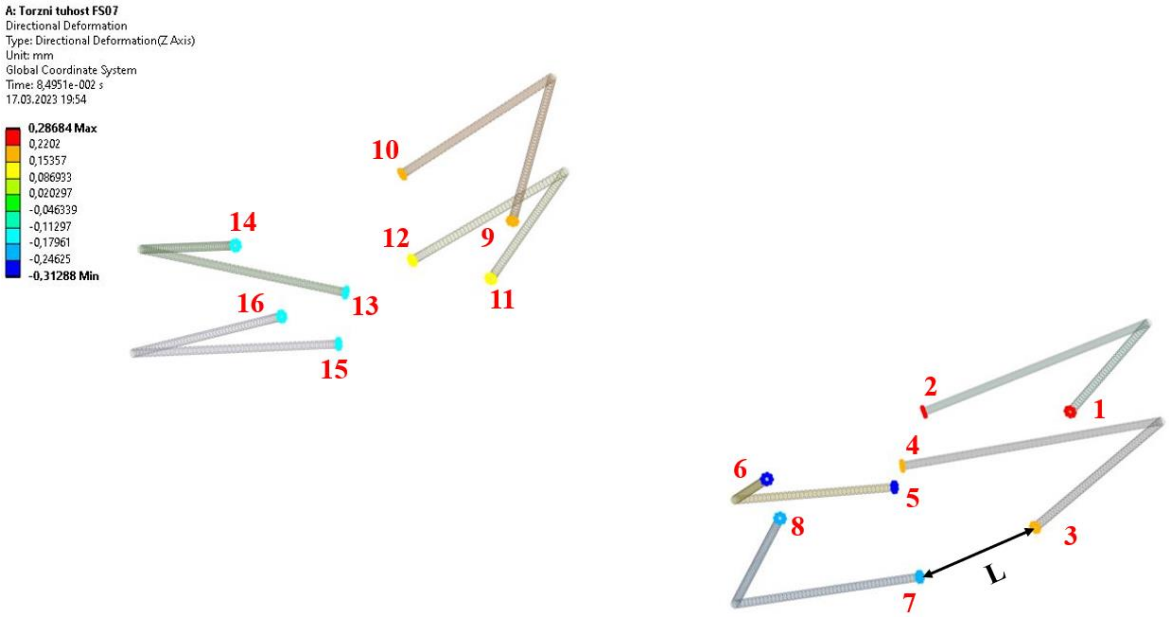
Obrázek 39 Měření torzní tuhosti monopostu FS07 [Archiv týmu CULS PFR]

Měření vzdálenosti posunu bodů bylo realizováno pomocí bezkontaktních laserových snímačů zdvihu a kontaktních indukčních snímačů. Snímače byly na samostatných stojanech rozmístěny k jednotlivým měřicím bodům rámu. [44]

Zatěžování probíhalo ručně pomocí utahování matice na závitové tyči připojené přes snímač síly. Synchronně byly zaznamenávány časové průběhy zatěžovací síly a posunu jednotlivých bodů se vzorkovací frekvencí 1 kHz. Zatěžování silou probíhalo na rameni délky 1010 mm a ve vyhodnocení bylo přepočteno na kroutící moment. Vyhodnocovány byly závislosti deformace rámu v jednotlivých bodech na zatěžovacím momentu rámu. [44]

6 Výsledky a diskuse

V této kapitole jsou uvedeny výsledky z pevnostní simulace sestavy šasi a fyzického měření. Výsledky torzní tuhosti byly zpracovány pro podvozkové body a celkovou torzní tuhost sestavy šasi. Hodnoty těchto výsledků jsou důležité pro predikci stability vozidla při jízdě.



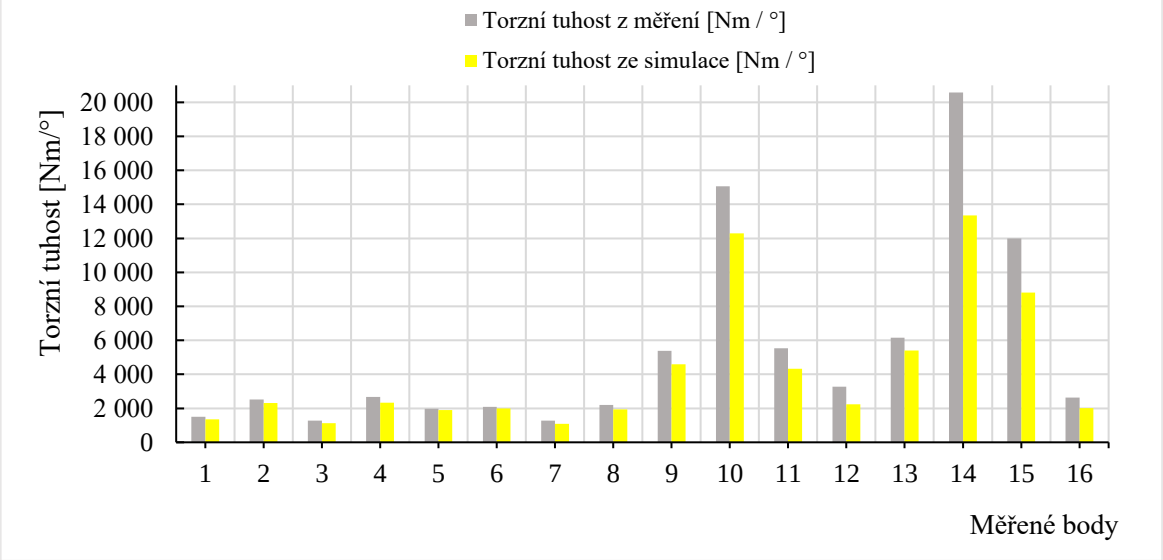
Obrázek 40 Výsledek deformace měřených podvozkových bodů v ose Z [Archiv autora]

Z tabulky č. 4 lze vyčíst hodnoty torzní tuhosti pro měřené podvozkové body. Výsledky torzní tuhosti byly vypočítány pomocí rovnic č. 1 a č. 2 uvedené v předchozí podkapitole č. 5.5.1. Pro výpočet úhlového posunutí a torzní tuhosti byla zvolena délka ramene, která představuje poloviční vzdálenost rozměru úsečky „L“ mezi body č. 3 a č. 7., znázorněnými na obrázku č. 40. Dílčí výpočty pro jednotlivé body jsou uvedeny v příloze č. 4.

Pozice v sestavě formule	Pozice v podsestavě formule	Pozice na dílu	Č. bodu při měření	Torzní tuhost z měření [Nm / °]	Torzní tuhost ze simulace [Nm / °]	Procentuální rozdíly [%]
Přední náprava	Levé horní rameno	Přední bod	1	1497,86	1348,01	10,00
Přední náprava	Levé horní rameno	Zadní bod	2	2518,59	2305,85	8,45
Přední náprava	Levé dolní rameno	Přední bod	3	1282,83	1121,53	12,57
Přední náprava	Levé dolní rameno	Zadní bod	4	2672,44	2332,44	12,72
Přední náprava	Pravé horní rameno	Přední bod	5	1977,77	1904,19	3,72
Přední náprava	Pravé horní rameno	Zadní bod	6	2081,27	1996,54	4,07
Přední náprava	Pravé dolní rameno	Přední bod	7	1268,88	1086,49	14,37
Přední náprava	Pravé dolní rameno	Zadní bod	8	2198,95	1928,53	12,30
Zadní náprava	Levé horní rameno	Přední bod	9	5379,10	4588,70	14,69
Zadní náprava	Levé horní rameno	Zadní bod	10	15064,56	12297,69	18,37
Zadní náprava	Levé dolní rameno	Přední bod	11	5537,97	4320,65	21,98
Zadní náprava	Levé dolní rameno	Zadní bod	12	3268,99	2237,67	31,55
Zadní náprava	Pravé horní rameno	Přední bod	13	6158,36	5409,07	12,17
Zadní náprava	Pravé horní rameno	Zadní bod	14	20588,24	13351,78	35,15
Zadní náprava	Pravé dolní rameno	Přední bod	15	12000	8817,60	26,52
Zadní náprava	Pravé dolní rameno	Zadní bod	16	2625,66	2002,17	23,75

Tabulka 4 Hodnoty torzní tuhosti pro měřené podvozkové body [Archiv autora]

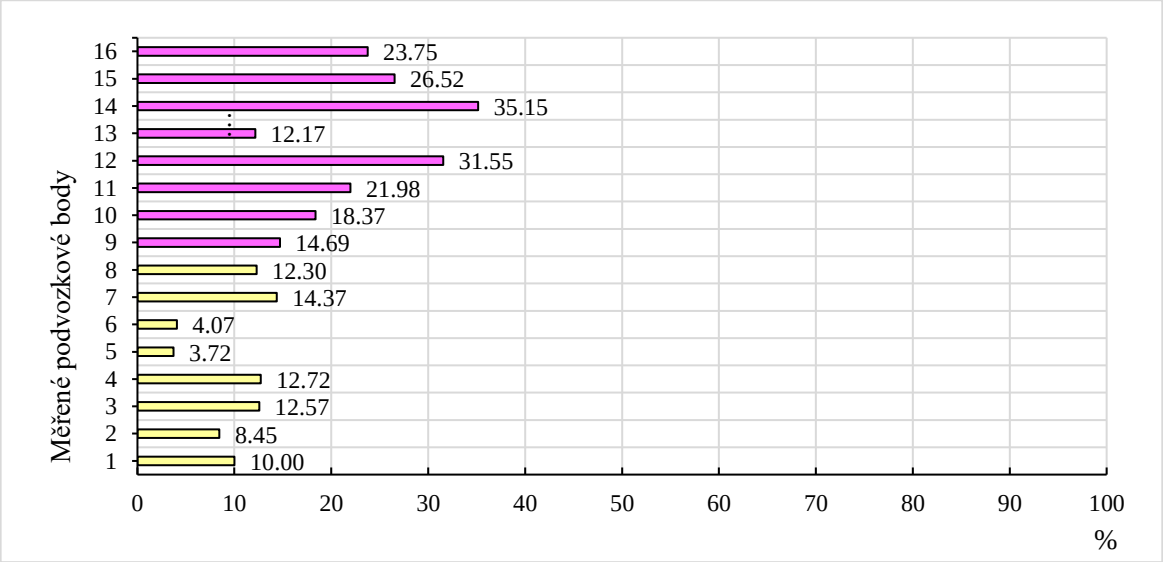
Z tabulky č. 4 byl následně vytvořen graf, který je zobrazen na obrázku č. 41. Na ose Y jsou znázorněny velikosti torzní tuhosti měřených podvozkových bodů, které jsou zobrazeny na ose X. Pro porovnání tuhosti předních a zadních podvozkových bodů byl ze součtu hodnot torzní tuhosti z fyzického měření a torzní tuhosti z pevnostní simulace vytvořen aritmetický průměr. Průměrná hodnota torzní tuhosti předních podvozkových bodů (1 až 8) je přibližně 2100 Nm / °. Pro body (9 až 16) na zadní nápravě se průměrná hodnota torzní tuhosti pohybuje okolo 8100 Nm / °. Z toho vyplývá, že tuhost zadních bodů oproti předním bodům je skoro čtyřnásobná. Zde lze dobře vidět, že zvolená pohonná jednotka výrazně zvyšuje tuhost podvozkových bodů na zadní nápravě.



Obrázek 41 Výsledky torzní tuhosti pro měřené body [Archiv autora]

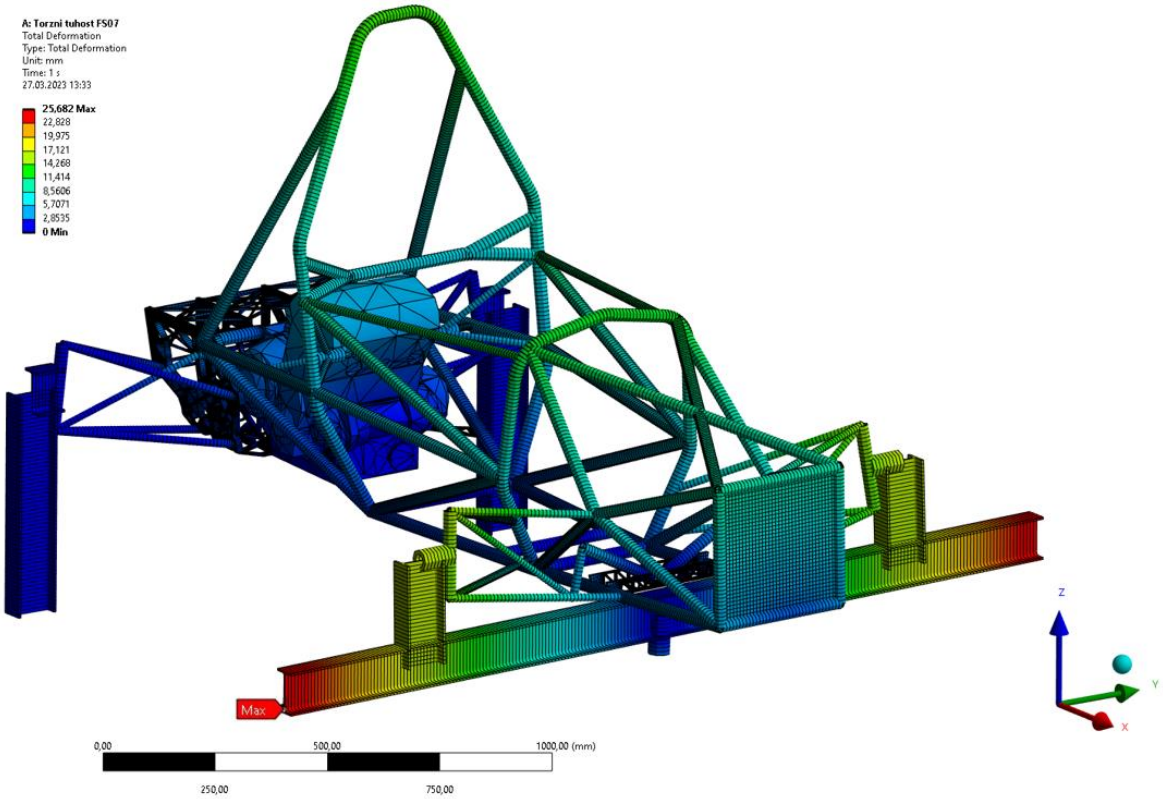
Nejmenší torzní tuhost mají body 3 a 7, které jsou umístěny na spodním podvozkovém rameni přední nápravy. Jedná se o body, které jsou nejblíže předním tlumičům. Proto je potřeba, aby při návrhu rámu pro monopost další generace, byla věnována pozornost pro zvýšení torzní tuhosti v oblasti přední části rámu. Konkrétně v místě uchycení předních tlumičů.

Na obrázku č. 42 je zobrazen graf, ve kterém jsou procentuálně porovnány výsledky torzní tuhosti měřených bodů s výsledky pevnostní simulace a fyzického měření. Z výsledků je zřejmé, že pro zpracovanou pevnostní simulaci jsou ve všech měřených bodech menší hodnoty torzní tuhosti než z fyzického měření. Průměrný rozdíl výsledků předních podvozkových bodů (1 až 8) je 9,78 %. Pro zadní podvozkové body (9 až 16) je průměrný rozdíl 23,02 %. Důvodem menších hodnot torzní tuhosti pevnostní simulace oproti fyzickému měření může být příliš velké zjednodušení jednotlivých součástí výpočetního modelu. Dalším rozdílem ve výsledcích může být nastavení hustoty sítě, a to zejména pro zadní desky pomocného rámu. Při práci s výsledky získanými z pevnostní simulace je potřeba počítat s určitou rezervou. Proto je důležité, aby data získaná z pevnostní simulace byla zkontrolována pomocí reálného měření.



Obrázek 42 Procentuální porovnání výsledků torzní tuhosti měřených bodů [Archiv autora]

Na obrázku č. 43 je zobrazen výsledek celkové deformace sestavy šasi monopostu FS07. Tabulce č. 5 obsahuje zpracované výsledky celkové torzní tuhosti. Ty byly vypočteny pomocí rovnic č. 1 a č. 2. uvedené v podkapitole č. 5.5.1.



Obrázek 43 Výsledek celkové deformace v ose z [Archiv autora]

Výsledek celkové torzní tuhosti sestavy šasi z pevnostní simulace je menší o 75,3 Nm / ° oproti fyzickému měření, což je rozdíl 9,5 %. Skutečná celková torzní tuhost šasi monopostu FS07 je 796,23 Nm / °.

Varianta	Délka ramene [mm]	Maximální změřené posunutí v ose Z [mm]	Úhel pootočení [°]	Kroutící moment [Nm]	Torzní tuhost [Nm / °]	Procentuální rozdíl [%]
Pevnostní simulace	1010	25,68	1,4565	1050	720,91	9,5
Fyzické měření	1010	23,25	1,3187	1050	796,23	

Tabulka 5 Výsledky celkové torzní tuhosti [Archiv autora]

7 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá návrhem rámu pro monopost 7. generace týmu CULS Prague Formula Racing. V přehledu řešené problematiky byla představena soutěž Formule student a její statické a dynamické disciplíny. Následně byl poskytnut základní přehled typů konstrukcí šasi vozidel.

V praktické části práce byla zdůvodněna volba prostorového trubkového rámu pro monopost FS07. Tento typ šasi je oproti ostatním konstrukcím povoleným dle pravidel soutěže nejjednodušší na návrh a proveditelnost výroby v týmových podmínkách. Další výhodou je nízká pořizovací cena, která je v porovnání s ostatními typy šasi čtvrtinová. Následně byly detailně popsány technické požadavky pravidel soutěže, které musí být dodržen při návrhu rámu. Dále byl charakterizován vývojový proces nového rámu. Pro monopost FS07 došlo ke změně konceptu šasi, kde primární strukturu tvoří prostorový trubkový rám a zadní část pomocného rámu je tvořena šroubovanou konstrukcí desek z hliníkové slitiny. Tento jedinečný koncept šasi využívá v současnosti tým CULS Prague Formula Racing jako jediný na světě.

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření 3D modelu rámu, které bylo zrealizováno v programu Solidworks. Dále byla provedena pevnostní analýza založená na metodě MKP pro model rámu a sestavy šasi v programu Ansys Mechanical. Výsledný návrh sestavy šasi byl proveden s úsporou hmotnosti 5,79 kg oproti předchozímu monopostu FS06. Pro ověření výpočetního modelu bylo provedeno fyzické měření torzní tuhosti ve Výzkumném ústavu v Liberci. Torzní tuhost na zhotoveném monopostu FS07 byla změřena na 796,23 Nm / °. Následně byly výsledky měření porovnány s výpočetním modelem sestavy šasi. Po analýze výsledků lze říct, že pro návrh rámu další generace monopostu je potřeba udělat změnu v oblasti přední podvozkové nápravy. Je potřeba se v této části šasi zaměřit na zvýšení torzní tuhosti. Všechny požadované cíle této diplomové práce byly splněny.

8 Seznam použitých zdroj

[1] *History of Formula Student [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://www.imeche.org/events/formula-student/about-formula-student/history-of-formula-student*

[2] *AMZ Racing: Formula Student About [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://www.amzracing.ch/en/formula-student*

[3] *Formula Student Germany Disciplines [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/about/disciplines/*

[4] *Formula Student Rules 2022. Formula Student Germany [online]. 2022 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fsg/rules/v*

[5] *EVENT HANDBOOK. Formula Student Czech Republic [online]. 2022 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: https://www.fsczech.cz/2023/2023-documents*

[6] *Formula SAE Rules 2022 [online]. 2022 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: https://fsaeonline.com/cdsweb/gen/DownloadDocument.aspx?DocumentID=25e8885c-7397-4b2d-93b3-fc404960bab1*

[7] *Endurance track.* 2019

[8] *COMPETITION HANDBOOK. Formula Student Alpe Adria [online]. 2023 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: https://fs-alpeadria.com/fs-alpe-adria-2023/rules-docs*

[9] MILLIKEN, William F. a Douglas L. MILLIKEN. Race car vehicle dynamics. Warrendale: SAE International, c1995. ISBN 15-609-1526-9.

[10] *PHIPPS, David a Michael COSTIN. RACING AND SPORTS CAR CHASSIS DESIGN. 2. London: B. T. BATSFORD, 1962. ISBN 9780713404586.*

[11] *Technical F1 Dictionary: Chassis explained [online]. [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://www.formula1-dictionary.net/chassis.html*

[12] BENNETT, Nigel. Inspired to Design: F1 cars, Indycars & Racing Tyres. England: Veloce Publishing Limited, 2013. ISBN 9781845845360.

[13] *LOTUS MARK 8 [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://media.lotuscars.com/en/heritage-road-cars/lotus-mark-8.html*

[14] *I20 N WRC Rally1 [online]. 2022 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://www.hyundai.com/eu/about-hyundai/sponsoring-and-events/motorsport/wrc/i20-n-wrc-rally1.html*

[15] *GT RACING: PANTERA CHASSIS [online]. East Devon, Uk., 2020 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://gtracingonline.co.uk/GT-racing-pantera-chassis-GT40-specialist-gt-racing-vehicle-parts-kit-car-builds.html*

[16] *SAE Students events [online]. 2023 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://www.sae.org/attend/student-events*

[17] TRZESNIOWSKI, Michael. Rennwagentechnik Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme. Vieweg+Teubner, 2008. ISBN 9783834804846.

[18] CROLLA, David A. Automotive Engineering. Elsevier, 2009. ISBN 9781856175777.

[19] *LOTUS TYPE 25 [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://media.lotuscars.com/en/heritage-race-cars/lotus-type-25.html*

[20] *The McLaren that changed Formula 1 history [online]. 2021 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://www.motorsport.com/f1/news/the-car-that-changed-formula-1-history/4779400/*

[21] SEWARD, Derek. Race car design. London: Palgrave/Macmillan, 2014. ISBN 978-1-137--03014-6.

[22] *Formula SAE Rules 2020*. 2020

[23] PŘIBIL, Erich. *Přehled vlastností oceli S355JO*. 2010

[24] PŘIBIL, Erich. *Přehled vlastností oceli 25CrMo4*. 2010

[25] *ČSN EN ISO 6892-1 (420310) Kovové materiály – Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. 2021

[26] *Formula SAE Rules. Formula SAE [online]. 2020 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: https://fsaeonline.com/cdsweb/gen/DownloadDocument.aspx?DocumentID=1b6bda52-48d0-4286-931d-c9418165fd3e*

[27] RILEY a BILL. FORMULA SAE ANTHROPOMETRIC REFERENCE DATA [online]. FSAEOnline [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://www.fsaeonline.com/content/FSAE%20Rules95th_2016.pdf

[28] *Formula Student Czech republic: INSPECTION SHEET [online]. 2022 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/portal.fsczech.cz.public/template/FSCZ2022_Scrutsheet_CV.pdf*

[29] COSTA, NUNO. FIA STANDARD 8853-2016 [online]. 2015 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: https://www.fia.com/sites/default/files/8853-2016_safety_harnesses.pdf

[30] *Svařování metodou wolfram-inertní plyn [online]. 2020 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://blog.perfectwelding.fronius.com/cs/co-je-svarovani-tig/*

[31] *Material & Design: Laser, tungsten inert gas, and metal active gas welding of DP780 steel: Comparison of hardness, tensile properties and fatigue resistance [online]. 2014. 2014 [cit. 2023-03-29]. ISSN 0261-3069. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914005974*

[32] *Skenování formule student [online]. Praha, 2022 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://www.3d-skenovani.cz/skenovani-formule-student/*

[33] *Solidworks: Popis produktu [online]. [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: https://www.solidworks.cz/*

[34] *LOTUS SUSPENSION ANALYSIS [online]. [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: https://www.lotusengineering.com/content/media/Shark_insert.pdf*

[35] TYPLT, Luboš. Návrh odpružení vozu Formula Student. Praha, 2022. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Jindra, Ph.D.

[36] *BLM Group – Programming with Artube [online]. [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: https://www.blmgroup.com/lasertube/lt7/programming*

[37] *Triumph Street Triple engine description [online]. 2013 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: https://www.motorcyclespecs.co.za/model/triu/triumph_street_triple_r%2013.htm*

[38] ZIENKIEWICZ a TAYLOR. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics [online]. 7. vydání. Butterworth-Heinemann, 2013 [cit. 2023-03-26]. ISBN 9780080951362. Dostupné z: https://www.elsevier.com/books/the-finite-element-method-for-solid-and-structural-mechanics/zienkiewicz/978-1-85617-634-7

[39] HUGHES, Thomas JR. The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis. USA: Courier Corporation, 2012. ISBN 978 0486411811.

[40] *Ansys Mechanical Finite Element Analysis (FEA) [online]. 2023 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical*

[41] *SpaceClaim - Midsurface feature [online]. 2023 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: https://help.spaceclaim.com/2015.0.0/en/Content/MidsurfaceTutorial_Step1.htm*

[42] *Ansys Mechanical Basics [online]. 2023 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: https://www.ansys.com/training-center/course-catalog/structures/ansys-mechanical-getting-started-basics#tab1-5*

[43] *Ansys Mechanical Sizing and Mesh [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: https://courses.ansys.com/index.php/courses/transonic-flow-over-a-wing-3d/lessons/meshing-lesson-4/topic/sizing-the-mesh/*

[44] BĚLÍK, Jan. Protokol o zkoušce: Měření torzní tuhosti rámu. VÚTS, a.s., 2022, 12.

9 Přílohy

Příloha č. 1 – Protokol o měření torzní tuhosti rámu monopostu FS07

Příloha č. 2 – Multikriteriální analýza pro výběr šasi

Příloha č. 3 – Výsledky pevnostní simulace primární struktury

Příloha č. 4 – Hodnoty pro výpočty torzní tuhosti podvozkových bodů