

## Formula Student Yarış Aracı Şasi Tasarımı ve Analizi

Yiğit Alp Oymak<sup>1</sup>, Erol Feyzullahoğlu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

### Makale Tarihiçesi

Gönderim: 28.09.2020

Kabul: 18.04.2021

Yayın: 30.06.2021

### Araştırma Makalesi

**Öz** – SAE (The Society of Automotive Engineers) tarafından düzenlenen resmi bir proje yarışması olan Formula Student, dünya çapında birçok üniversite öğrencilerinin kendi bilgi birikimlerini kullanarak belirlenen kurallara uygun bir şekilde Formula tipi bir yarış arabası tasarlamasını amaçlayarak, öğrencilerin otomotiv sahasındaki bilgilerini geliştirmelerine imkan tanımaktadır. Bu çalışmada SolidWorks 2018 programı ile Formula Student yarış aracının şasi sistemi tasarım kriterleri dikkate alınarak yeniden tasarlanmıştır. ANSYS 16.0 ve SolidWorks Simulation programları kullanarak şasi sisteminin mekanik zorlanmalara karşı olan dayanımlarını belirlemek için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Şasi tasarımı yapıldıktan sonra şasinin ön darbe analizi, arka darbe analizi, yan darbe analizi, ön torsiyonel rijitlik analizi ve arka torsiyonel rijitlik analizi yapılmıştır. Bu çalışmada Formula Student yarış aracında kullanılmak için tasarlanan şasinin, gerçekleştirilen analizler doğrultusunda, hedeflenen tasarım kriterleri ve rijitlik derecesine fazlasıyla sahip olduğu belirlenmiştir. Yapılan analizler neticesinde yarışma kuralları doğrultusunda, hedeflenen tasarım kriterleri daraltılarak daha hafif ve rijit tasarımlar elde edilmiştir. Bu çalışmada yeniden tasarlanan araç şasisi muadillerine göre bir nebze (%30) ağır olsa da, rijitlik ve ergonomik olması bakımından oldukça üstündür.

**Anahtar Kelimeler** – Analiz, formula student, yarış aracı, rijitlik, şasi, tasarım

## Formula Student Race Car Chassis Design and Analysis

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kocaeli University, Kocaeli, Turkey

### Article History

Received: 28.09.2020

Accepted: 18.04.2021


Published: 30.06.2021

### Research Article

**Abstract** – Formula Student, an official project competition organized by the SAE (Association of Automotive Engineers), allows university Students around the world to develop their knowledge in the automotive field by aiming to design a Formula-type race car using their own knowledge. In this study, the chassis system of Formula Student race car was redesigned with SolidWorks 2018 program, taking into account the design criteria. The optimization studies were carried out to determine the strength of the chassis system against to mechanical stress using ANSYS 16.0 and SolidWorks Simulation programs. After the chassis design, front impact analysis, rear impact analysis, side impact analysis, front torsional stiffness analysis and rear torsional stiffness analysis were performed. In this study, it was determined that the chassis designed to be used in Formula Student race car has more than enough design criteria and rigidity as a result of the analysis. As a result of the analysis, lighter and more rigid designs were obtained by narrowing the target design criteria, taking into account the competition rules. Although the redesigned vehicle chassis in this study is 30% heavy compared to its equivalents, it is quite superior in terms of rigidity and ergonomics.

**Keywords** – Analysis, chassis, design, formula student race car, rigidity

<sup>1</sup>  yigitalpoymak@gmail.com

<sup>2</sup>  feyzullahoglu@yahoo.com

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author

## 1. Giriş

Formula Student yarışması, ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri'nin Michigan eyaletinde Otomotiv Mühendisleri Birliği (Society of Automotive Engineers) tarafından düzenlenen bir yarışmadır. 1990 yılından itibaren Avrupa'da da düzenlenmeye başlamış olup, hali hazırda 14 farklı ülkede (ABD, Almanya, İngiltere, İtalya, Avusturya, İspanya, Macaristan, Çek Cumhuriyeti, Rusya, Çin, Japonya, Avustralya, Brezilya, Hindistan) düzenlenmektedir. Yarışmanın genel amacı ise otomotiv endüstrisine yenilikçi, tecrübeli ve takım çalışmasına uygun hareket edebilen mühendis yetiştirmektir.

Formula Student yarış aracı şasi tasarımında odaklanılan en önemli nokta kurallara uymanın yanında araç şasilerinin en temel sıkıntısı olan genişliğin dikkate alınmasıdır. Formula Student yarış aracı için tasarlanan şasi oldukça kompaktır. Fakat bu kompaktlık sonucunda bir takım ergonomi temelli sorunlara yol açmaktadır. Özellikle motor kısmında veya burnun en ucunda bulunan pedal kısmı ile ilgili bir değişim veya düzenleme yapmak oldukça zordur. Formula Student yarış aracı şasi tasarımında odaklanılan en temel nokta sürücünün kokpite oturduğunda kendine ferah bir alan bulması ve aynı zamanda kendini güvende hissetmesidir (Aird, 1998).

Formula Student yarış aracının bitmiş haliyle ağırlığı toplamda sürücü ile beraber 400 kg civarındadır. Bu değer Formula Student aracı için istenilen değer biraz üzerindedir. Yeni tasarlanan araçta şasi ve fren sistemi dahil olmak üzere aracın tüm bileşenlerinde çok önemli bir miktarda ağırlığın azaltılması hedeflenmektedir.

Sürücünün araçtaki sürüş pozisyonu ergonomi açısından çok önemlidir. Araçta dar yerleşimden dolayı sürücüler direksiyon hakimiyeti konusunda ciddi sorunlar yaşamaktadırlar. Yarışmanın zorlu şartlarında sürücünün rahat olabilmesi önemlidir.

Şasi tasarımında en önemli husus, yarışma koşullarında belirtildiği üzere "tüm sürücülerin aracı terk etme süresi 5 saniyeden fazla olamaz" kuralı gereğince genişlik konusunda üst sınır teşkil etmektedir (SAE, 2020). Tüm bu genişlik odaklı tasarımın yanında şasi sisteminin zorlu koşullarda gerekli dayanımı göstermesi en temel gayedir.

Şasi tasarımını kısıtlayan bir diğer bir unsur ise üretim safhasıdır. Her ne kadar temel hedef rijitlik olsa da, üretim açısından bu istek kısmen ikinci plana alınmıştır. Eldeki malzemelerin kurallara uygun olması, yüksek mukavemeti ve ataleti sağlaması önemli iken diğer yandan kaynak edilebilirliği, bükme ve kesme gibi işlemlere de elverişli olması ve gerekli esnekliği göstermesi önemlidir (Adams, 1993).

Günümüzde otomotiv endüstrisinde kullanım amacına göre tasarlanan farklı şasi tipleri bulunmaktadır. Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte gelişen imalat teknikleri, geçmişte üretimi zor olan ürünleri artık üretilebilir kılmaktadır. Gelişen imalat teknolojileri sayesinde araç şasileri geçmişten günümüze daha güvenilir, daha hafif, dayanımı ve rijitliği yüksek bir hal almaktadır (Milliken ve Milliken, 1995).

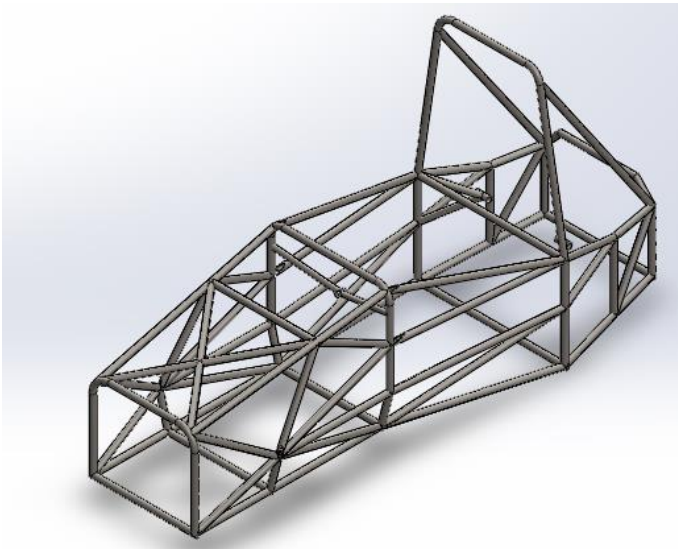
Günümüzde çok farklı tiplerde şasi tasarımları mevcuttur. Merdiven tipi şasiler, tasarımı ve üretimi kolay olup maliyeti düşük en eski tip şasilerdir. Bu tip şasiler bütün yükleri taşıyabilirler. Eğilme momentine karşı dirençli ve rijittirler fakat torsiyonel momente karşı aynı rijitliği gösteremezler. Günümüzde halen pickup tipi araçlarda merdiven tipi şasiler kullanılmaktadır (Szcześniak vd., 2014).

Yekpare tip şasi tasarımında kutu kesit, bölmeler ve tüpler kullanılarak araçların daha dayanıklı olması sağlanır. Yekpare tip tasarımda araç gövdesi önemli ölçüde hafifleterek daha geniş ve daha kompakt bir tasarım sağlanır. Bunların yanında yekpare tip şasi daha güvenlidir. Fakat bu tasarımda bütünlüğü sağlamak için sac parçalar kullanılmakta ve bunların bir araya getirilmesinde genellikle punta kaynağı yönteminin kullanılması bu tip şasilerde yapılabilecek bütünlük tasarımını sınırlamaktadır (EAA, 2020). Ancak bu durumda sınırlı sayıda da olsa lazer kaynak yöntemi uygulanarak ya da tasarıma eklenecek tüpler, kapalı kesitler vb. mukavemeti artırıcı elemanlar eklenerek bütünlük sağlanabilmektedir.

Monokok tip şasi tasarımı, dış gövdeyi gelen etkilere karşı desteklemek için yapılan bir tasarım yöntemidir. Şasinin bütün olması, bütün mekanik elamanların bağlı olduğu ana yapı elamanı gibi görev yapmasını sağlar. Bunun yanında yarı monokok tasarımlar da bulunmaktadır. Monokok tip şasi tasarımı, hafif ağırlıklı ve sac panellerden yapılan ayrı konsept şasi tasarımı olarak da açıklanabilir (EAA, 2020). Monokok yapı, aracın bütün hatlarının üzerinde bulunduğu tek parça bir gövdedir. Tek parça gövdeler genellikle kaynak veya birçok sacın birbirine preslenmesi ile üretilirler. Monokok gövde yapısı, yapı üzerinde konumlandırılmış çukur şeklindeki bölümler sayesinde iyi bir kaza koruması sağlar. Bu tasarım seri olarak üretilen araçlar için idealdir.

Monokok şasinin rijitlik-ağırlık oranı oldukça düşüktür. Kullanılan paneller, tüpler ve kapalı kesitler kadar mukavemetli değildir. Sonuç olarak son dönemdeki modern araç gövdeleri gerçek monokok tasarımlar olmamakta; bunun yerine birleşik yapıda olan yekpare tip şasiyi kullanmaktadırlar (EAA, 2020).

Uzay kafes tipi şasi tasarımında kafes şasiler onlarca tüpün veya boruların bir araya getirilmesi ile herhangi bir yerden gelen kuvvetlere karşı mekanik dayanıklılığı arttırmak için farklı yönlerde konumlandırılarak tasarlanırlar. Sonuç olarak oldukça kompleks kaynaklanmış bir yapı ortaya çıkmaktadır (Riley ve George, 2002). 60'lı yılların ortasında, birçok güçlü spor araçlar rijitlik/ağırlık oranını geliştirmek için bu tasarımı benimsemişlerdir. Ancak bunlardan birçoğu, ekonomik sebeplerden dolayı uzay kafesleri sadece monokok kabinin ön ve arka kısmında kullanmışlardır (EAA, 2020). Formula Student yarış araçlarında en yaygın olarak bu tip şasi tasarımları kullanılmakta olup, tasarım kolaylığı, malzeme temini konusundaki rahatlık ve üretim maliyetinin düşük olması nedeniyle tercih edilmektedirler. Şekil 1'de Formula Student yarış aracının uzay kafes tipi şasi konsept tasarımı görülmektedir.



Şekil 1. Formula Student yarış aracının uzay kafes tipi şasi konsept tasarımı

Bu çalışmada SAE (The Society of Automotive Engineers) tarafından düzenlenen yarışmada sunulmak üzere Formula Student yarış aracı şasi tasarımının SolidWorks 2018 programı ile yarışmada belirlenen kurallara uygun olarak yapılması ve ANSYS 16.0 ve SolidWorks Simulation programları kullanarak şasi sisteminin mekanik zorlanmalara karşı olan dayanımları için optimizasyon çalışmalarının yapılması hedeflenmiştir.

## 2. Şasi Tasarımı ve Analizi

Formula Student yarış aracının şasisi aşağıdaki bölümlerden oluşmaktadır (SAE, 2020);

- Kafes Elemanı*: Tek parça olup kesilmemiş boru kullanılarak şekillendirilir.
- Main Hoop (Ana takla barı)*: Sürücünün yanında veya arkasında bulunan yapıyı ifade etmektedir.
- Front Hoop (Ön takla barı)*: Direksiyonun bağlandığı, bacakların üzerini saran ve koruyan yapıyı ifade etmektedir.
- Roll Hoop (Takla barı)*: Ön ve arka takla barı genel olarak bu isimle adlandırılır.
- Roll Hoop Bracing Supports (Takla barı destek braketleri)*: Takla barı desteklerinin en alt kısmını takla barlarına bağlayan parçaları tanımlamaktadır.
- Front Bulkhead (Ön burun)*: Sürücünün ayaklarını koruyan şasinin en ön kısmını tanımlamaktadır.
- Impact Attenuator (Darbe sönümleyici)*: Ön burnun dış kısmına koyulan, olası darbeleri sönümleyen parçadır.
- Primary Structure (Ana yapı)*: Yarış aracının ana gövdesini ifade etmektedir.

## 2.1. Şasi Tasarımının Temel Kuralları ve Malzeme Seçimi

Şasinin ana elemanlarının tasarımında, üçgenel bir alan oluşturacak şekilde konumlandırılmanın yapılması ve kaynak düğüm noktalarının boşta kalmamasının sağlanması istenmektedir (SAE, 2020). Şasinin her bir bölgesi için farklı minimum boru çapları, boru kesit alanı, kesit ataleti ve şaside kullanılacak malzemenin sahip olması gereken kurallar SAE tarafından belirlenmiştir (SAE, 2020).

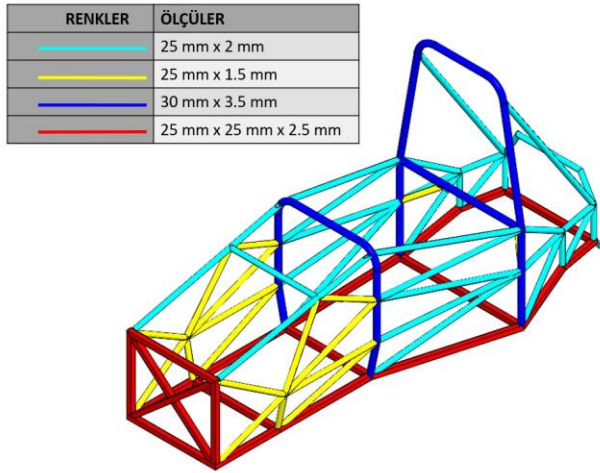
Yarış aracı şasisinde kullanılacak olan boruların sahip olması gereken minimum mekanik özellikler Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1

Formula Student yarış aracı şasisinde kullanılacak olan boruların mekanik özellikleri

Borular	Özellik
Young Modülü (E)	200 GPa
Akma Sınırı ( $\sigma_{Ak}$ )	305 MPa
Kopma Sınırı ( $\sigma_k$ )	365 MPa

Şekil 2’de bu çalışmada tasarlanmakta olan Formula Student yarış aracı şasisinde kullanılan boruların boyutları görülmektedir. Buradan da görülebileceği gibi şasi tasarımında farklı çaplara ve et kalınlıklarına sahip borular kullanılmıştır.



Şekil 2. Formula Student yarış aracı şasisinde kullanılan boruların çapları ve et kalınlıkları

Şasi imalatında kullanılan çelik, diğer alternatif malzemelere göre daha ağır olmasına rağmen olan Formula Student araçlarının tasarımında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunun en önemli nedenleri, kolay temin edilmesi, düşük maliyeti ve üretim kolaylığıdır. Şasi imalatında SAE4130 ve yumuşak çelik tercih edilmektedir. SAE4130 tercih edilmesinin sebebi mukavemetinin oldukça yüksek olmasıdır. Fakat fiyatı diğer çeliklere kıyasla daha yüksek olup ve üretim sürecinde kaynak edilebilmesi ve bükülmesi vb. işlemleri zordur. Bunun yanında yumuşak çeliklerin tam tersi özelliklere sahiptir. Yani üretimi kolay, ucuz, tamir edilebilmesi kolay fakat mukavemet değerleri nispeten düşüktür (Waterman, 2011). Sonuç olarak çelik her ne kadar klasik bir malzeme olsa da çok fazla farklı tiplerinin olması, düşük maliyeti, işlenmesinin kolay olması, çok zorlayıcı bir üretim sürecinin olmaması, esnek tasarım olanağı sunması ve güvenilir olması çeliği kullanımda en üst sıraya koymaktadır. Bu yüzden Formula Student yarış aracın şasi tasarımında çelik kullanılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2

Formula Student yarış aracı şasi tasarımında kullanılacak olan çelik malzemelerin mekanik özellikleri (Kale, 2016)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Akma mukavemeti (Mpa)	Çekme mukavemeti (Mpa)	Elastiklik modülü (Gpa)
SAE 1040 (soğuk çekilmiş)	7.8	530	630	210
SAE 4130 (temperlenmiş)	7.8	979	1040	210
1.4307 (Paslanmaz çelik)	7.9	310	620	200

## 2.2. Şasi Tasarımı

Şasi tasarımında öncelikle süspansiyon bağlantı noktalarının konumu, aracın aks aralığı ve aks açıklığı verileri dikkate alınmıştır. İlk olarak şasinin ana takla barı ve ön takla barı tasarlanacak ve takla barlarının tasarımının ardından aralarındaki uzaklıklar belirlenecektir. Bu çalışmalarda yarışma kuralları dikkate alınmaktadır. Şasi tasarımında kurallara uygunluğunun yanı sıra, ana şasinin kendisine herhangi bir yönden gelen kuvvetleri olabildiğince sönmemesi beklenmektedir. Dışardan gelen darbe kuvvetlerinin sonucu oluşacak gerilmelerin şasinin belli bir bölgesinde birikmesi yerine, bütün gövde üzerinde homojen yayılım göstermesi beklenmektedir. Dış kuvvetler genellikle yoldan tekerlere, süspansiyona ve şasiye gelmektedir. Spor araçlarda ve yarış araçlarında şasinin olabildiğince rijit olması istenmektedir.

Şasi için ölçülebilir rijitlik düzeyi, torsiyonel rijitliktir. Araç viraja girdiğinde virajın dış kısmındaki süspansiyon yükü yatay eksen boyunca süspansiyon kollarına ve dikey olarak itme çubuklarına aktarılmaktadır (Alexander, 2008). Şasi tasarımı yapılırken alt tabanda ve aracın ön burnunda kare profil, geriye kalan yerlerde ise dairesel profil kullanılmıştır. Alt tabanda kare profil tercih edilmesinin sebebi, düzlemsel yüzeylere sahip olması ve takla barlarının kaynak noktalarına konumlandırma hatasını minimize etmesidir. Ön burun tasarımında kare profil kullanılarak atalet momentinde ve mukavemette artış sağlanmıştır. Kare kesitli boruların atalet momenti, dairesel kesitli borulardan 1.7 kat daha yüksektir. Kare kesitli profiller testere ile kolayca kesilebilmekte ve kolay kaynak işçiliği nedeniyle tercih edilmektedir. Böylece elde edilen atalet momenti sayesinde, özellikle aracın ön kısmında meydana gelecek gerilmelere karşı önemli ölçüde emniyet sağlanacaktır.

Sithananun vd. (2011), Chulalongkorn Üniversitesinde yarışma için geliştirilen Formula Student yarış aracının şasi tasarımını ve imalatını yapmışlardır. Catia yazılımı ile yapılan şasi tasarımları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizlere tabi tutulmuştur. Şasinin torsiyonel rijitliği ve ağırlığı başlangıçta belirlenen hedefler doğrultusunda elde edilmiş ve bu veriler kullanılarak şasi imalatı gerçekleştirilmiştir.

Milojević vd. (2015), Kragujevac Üniversitesi'nde geliştirilen Formula Student yarış aracının şasi tasarımı ve analizlerini yapmışlardır. Şasi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yükün yapısal analizinin yapıldığı "CATIA" yazılımında tasarlanmıştır. Yapılan analizler ile şasinin optimum tasarımı hedeflenmiştir. Şasinin ağırlığı 35kg'a kadar düşürülmüş ve torsiyonel rijitliği ise 1500Nm/° değerinin üzerine çıkarılmıştır.

Sirsikar vd. (2020), son yıllarda yarış aracı şasisindeki gelişmeleri incelemişlerdir. Farklı tasarım ve analiz prosedürleri değerlendirilmiştir. Şasi rijitliğinin araç sürüşünü önemli derecede etkilediği ve şasinin rijitliğinin artırılması için tasarımların geliştirilmesinin ve süspansiyon noktalarının tasarımlarının önemli olduğu ifade edilmiştir.

Allen (2009), Formula SAE yarış aracının şasi ve süspansiyon sisteminin tasarım optimizasyonu üzerinde her bir parçanın tasarım doğrulamasını yaparak analizleri, rijitlikleri, mukavemetleri ve ağırlıkları üzerinde çalışmıştır. Tasarım optimizasyonu sonrası aracın üretimi gerçekleştirilerek test düzeneği üzerinde torsiyonel testler yapılmıştır.

## 2.3. Şasi Analizleri

Tasarım aşamaları tamamlandıktan sonra şasinin statik analizleri yapılır. Şasi analizlerinde dikkate alınan esas konu torsiyonel rijitliktir. Torsiyonel rijitlik, şasinin gelen momentlere karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır (Bhande vd., 2018). Formula Student yarış aracının en önemli özelliği torsiyonel rijitliğe sahip olmasıdır. Bu sayede yarış aracı virajlarda enine eksen boyunca burulmaya karşı direnç gösterir. Eğer şasi yeterince rijit değilse süspansiyon görevini tam olarak yerine getiremeyecektir. Bu da aracın performansına ciddi derecede etki etmektedir. Yarış aracının şasinin diğer şasiler ile kıyaslanması, rijitliğinin ağırlığına oranlanması ile yapılmaktadır. Fakat bu durumda birtakım sıkıntılar ortaya çıkmaktadır. Örneğin bir şasi çok rijit ve çok ağır ise bahsedilen oran çok küçük olacaktır. Fakat gerçekte araç çok ağır olacağı için aracın performansında düşüş olacaktır. Bu yüzden rijitliğin fazla olmasından ziyade, ağırlık-rijitlik dengesinin sağlanması daha önemlidir (Krzikalla vd., 2019).

Şasi analizleri yapılırken öncelikle şasi gövdesinde ağ oluşturma (meshleme) işlemi yapılır. Ağ oluşturma işlemi, şasi gövdesini küçük parçalara bölerek ve bölünen her bir parçanın analizini tek tek yaparak bir araya getirme işlemi olarak ifade edilebilir. Meshleme işleminin ardından kuvvetlerin uygulanması ve şasinin uygun yerlerden sabitlenmesi gerekmektedir. Şasi analizinde sabitlenme noktaları süspansiyon bağlantı noktalarıdır.

Kuvvet noktaları ise torsiyonel rijitliği ölçmek için yapılan analizlerde yine süspansiyon bağlantı noktalarıdır. Bütün bu işlemlerin ardından analiz uygulanmıştır.

**Patil ve Chikkali (2020)**, Formula Student yarış aracının şasisinin sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analizlerini yapmışlardır. Sonlu elemanlar analizi şasi imalatından önce yapılarak tasarımın güvenliği değerlendirilmiştir. Yarış aracının şasisi için tercih edilen malzeme yüksek mukavemete ve düşük ağırlığa sahip olan AISI4130 krom ve Molibden alaşımlı çeliktir. Mümkün olan maksimum dayanıklılığı ve minimum ağırlığı elde etmek için standart sonuçlar üzerinde Ansys yazılımı kullanılarak analiz yapılmıştır.

**Das (2013)**, çelik boru şasi yapısına sahip bir Formula Student yarış aracının tasarımını SolidWorks programı kullanarak yapmıştır. Ön ve arka süspansiyonu rijit olarak bağlayacak olan boru şeklinde uzay kafes sistemine sahip bir şasi geliştirilmiştir. Üretim maliyeti, hasarların kolayca tamir edilebilmesi ve basitliği nedeniyle uzay kafes sistemi tercih edilmiştir.

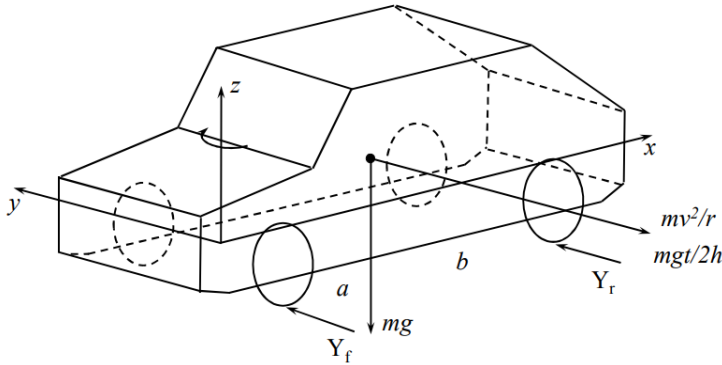
**Marzuki vd. (2015)**, çalışmalarında uzay kafes şasi yapısına sahip bir yarış aracının ANSYS ile analizleri yapılarak şasi yapısının doğal frekanslarını tasarım aşamasında dikkate almışlardır. Yapılan analizlerde şasi yapısından gelen doğal frekanslar belirlenerek şasi yapısının dinamik koşullar altındaki davranışları incelenmiştir.

### 2.3.1. Şasinin Maruz Kaldığı Yükleme Tipleri

Formula Student yarış aracı şasisinin analizine başlamadan önce şasinin hangi yükleme tiplerine maruz kaldığını bilmek önemlidir. Şasinin maruz kaldığı yükleme tipleri dört adettir:

#### a) Yanal eğilme

Yanal eğilme, araç viraja yüksek hızla girdiğinde, aracın atalet kuvvetinin meydana getirdiği yükleme tipidir. Bu kuvvetlerin büyüklükleri aracın hızına ve virajın yarıçapına bağlıdır. Yanal eğilme, şasinin süspansiyon ile bağlandığı kısımlarda görülmektedir (Şekil 3). Şasinin bu kısımlardaki parçaları süspansiyonlar desteklediği için, bu bölgelerdeki gerilmeler şasinin geriye kalan kısmının uğrayacağı gerilmelerden daha yüksektir (Hui, 2012).



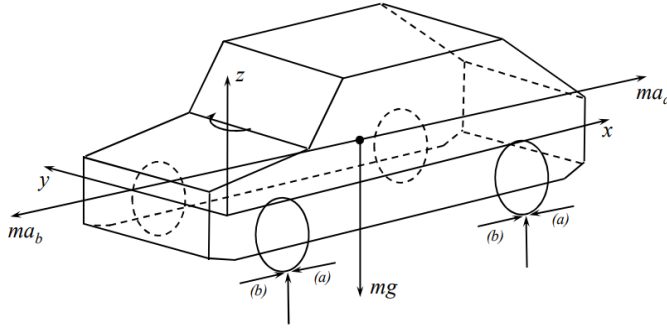
Şekil 3. Araç üzerinde yanal eğilme yükleme tipinin 3D gösterimi (Banthia, 2020)

#### b) Yatay yükleme

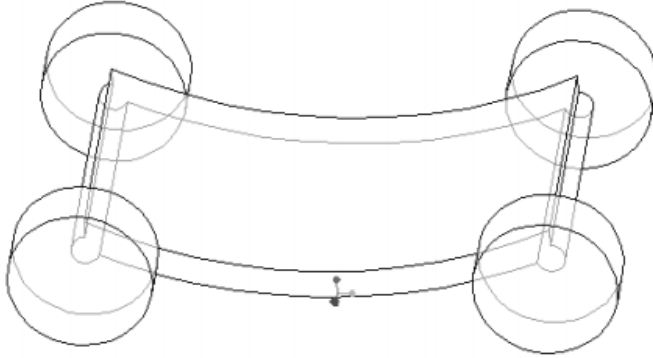
Yatay yükleme, araç hızlanırken veya yavaşlarken meydana gelmektedir. Bu kuvvet aracın bulunduğu yola, frenleme kuvvetine ve hızına bağlıdır. Yatay yükleme tipi de yanal eğilme gibi en çok aracın süspansiyonun bağlandığı kısımlarında görülmektedir (Hui, 2012). Şekil 4'de gösterilen üç boyutlu gösterimde aracın hızlanma veya yavaşlama durumunda etki eden kuvvetlerin basit hali şematik olarak sunulmuştur.

#### c) Dikey eğilme

Dikey eğilme, şasinin taşıdığı bütün parçaların ve sürücünün ağırlıklarından dolayı şaside meydana gelen eğilme tipi yüklemelerdir (Şekil 5). Dikey eğilme şasinin her an bu etki altında olmasından dolayı diğer yükleme tiplerine göre nispeten daha önemlidir. Araç statik halde iken sadece yer çekimi etkisiyle şaside dikey eğilme ortaya çıksa da, çoğu zaman araç dinamik yükleme etkisinde olacağı için statik haldeki durumdan birkaç kat daha yüksek seviyede dikey eğilme var olmaktadır (Hui, 2012).



Şekil 4. Araç üzerinde yatay yükleme tipinin 3D gösterimi (Banthia, 2020)



Şekil 5. Araç üzerinde dikey eğilme yüklemesinin 3D gösterimi (Hui, 2012)

### 2.3.2. Şasi Analizi Uygulamaları

Araç şasinin statik analizinde temel hedef, şasinin olabildiğince rijitliğinin sağlanması ve gelen kuvvetin şasi üzerinde homojen bir şekilde dağılarak bir bölgede birikmesinin önlemesidir. Araç şasinin maruz kaldığı yüklere karşı olabildiğince az deformasyon (sehim) göstermesi istenmektedir. Yarış aracı şasisinin analizi Solidworks Analysis, Ansys ve Hypermesh gibi analiz programları kullanılarak yapılmaktadır.

Formula Student yarış aracının şasi analizleri, beş ana başlıkta yapılmaktadır (Subramanyam vd., 2016);

- Ön darbe analizi
- Arka darbe analizi
- Yan darbe analizi
- Ön torsiyonel rijitlik analizi
- Arka torsiyonel rijitlik analizi

### 2.3.3. Şasi Analizinde Uygulanacak Kuvvetlerin Belirlenmesi

Formula Student yarış aracı şasi analizinde uygulanacak kuvvetlerin belirlenmesinde birkaç basit kabul yapılmaktadır (Subramanyam vd., 2016). Bu kabuller aşağıda sunulmuştur:

- |  |            |
|--|------------|
| • Aracın başlangıç hızı  | : 0 km/h   |
| • Sürücü ile birlikte aracın kütlesi                               | : 350 kg   |
| • Aracın çıkabileceği maksimum hız                                 | : 100 km/h |
| • Çarpışma analizleri yapılırken aracın darbeye maruz kalma süresi | : 0.4 sn   |

Araç şasisinin ön, arka ve yan darbe analizlerinde kullanılmak üzere kaza anında aracın ivmesi, darbe kuvveti ve G kuvvetine ihtiyaç bulunmaktadır. Yukarıda yapılan kabuller temel fiziksel bağıntılarda kullanılarak araca ait kaza anındaki bilgiler aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

Aracın ivmesi :  $a=69.5 \text{ m/s}^2$   
 Kuvvet :  $F=24325 \text{ N}$   
 G kuvveti : 7

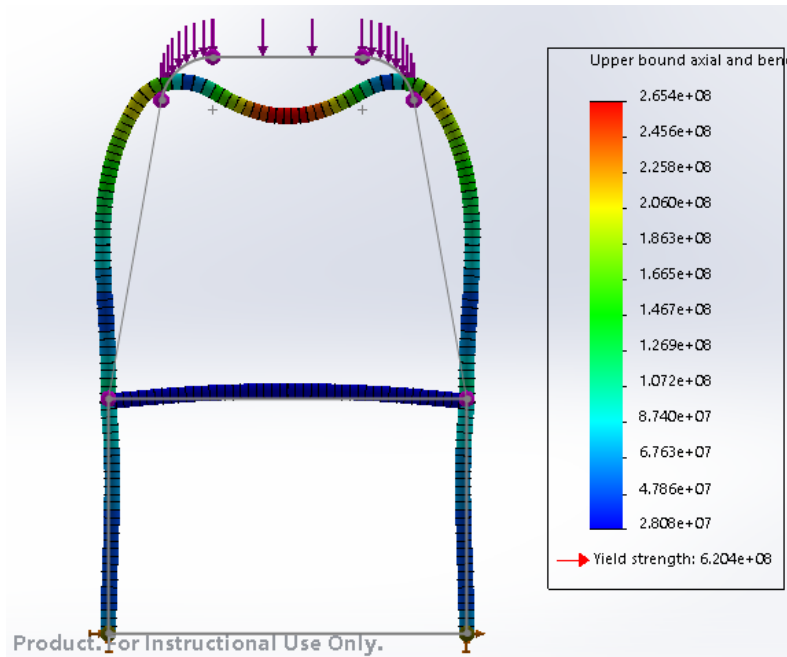
Ön ve arka torsiyonel rijitlik analizlerini yapmak için süspansiyon bağlantı noktalarından şasiye uygulanacak kuvvetlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için de süspansiyon analizlerinin yapılması gerekmektedir. Yapılan analizlerin sonucunda, üst salıncak bağlantı noktalarının her birine 440 N, alt salıncak bağlantı noktalarının her birine 538 N olacak şekilde verilere ulaşılmıştır. Bu kuvvetler şasinin torsiyonel rijitliğinin belirlenmesinde kullanılacaktır.

### 2.3.4. Ana Takla Barı (Main Hoop) Tasarımı ve Analizi

Şasi parçalarının analizlerde hızlı optimizasyonun sağlanması için Solidworks programının analiz paketi kullanılmıştır. Burada ana ve ön takla barı alt iki kaynak noktasından tutturularak takla atma durumunun analizi yapılmıştır. Tasarımlar yapılırken kokpit açıklığı, sürücünün etrafını görebilmesi ve ergonomisi durumları dikkate alınmıştır. Analizler en kötü senaryo olan yarış aracının takla atma durumuna göre yapılmıştır. Normal koşullarda bir Formula Student yarış aracı yaklaşık olarak 1.5-2 G kuvvetlerine maruz kalsa da kazada takla atma durumunda 3G' lik bir kuvvet dikkate alınarak analizi çalışmaları yapılmıştır. Takla barları sürücünün güvenliği açısından büyük önem taşıdığı için, kaza anında oluşacak olan sehimin olabildiğince az (1-2 mm) olması hedeflenmiştir. Bunların yanısıra güvenlik katsayısı ise minimum 2 olacak şekilde dikkate alınmıştır.

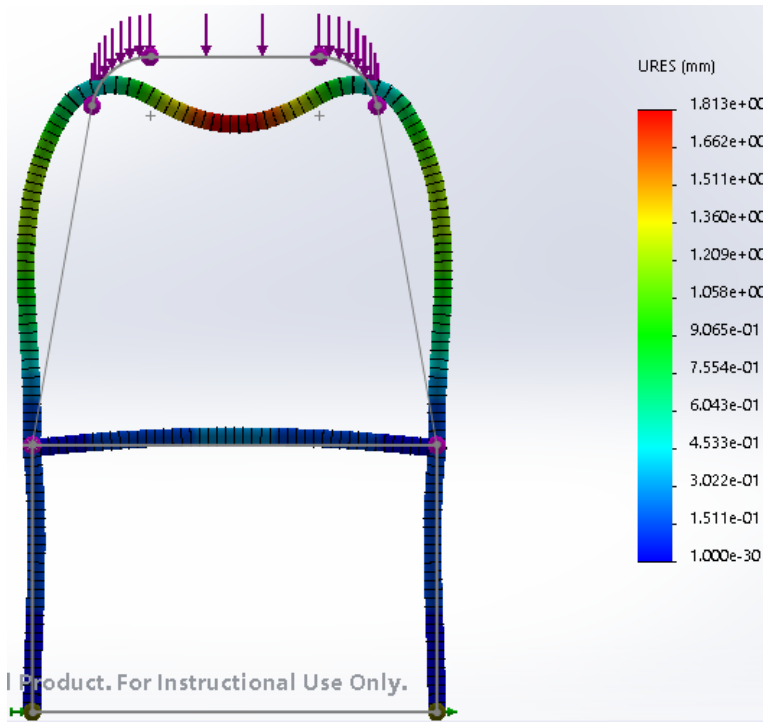
Ana takla barı tasarımı yapılırken barın genişliği için kokpit açıklığı dikkate alınmıştır. Aynı zamanda egzoz borularının kokpite çok yakın olması ve yalıtım ihtiyacı nedeniyle sürücü ergonomisi açısından kokpit, olması gerekenden biraz daha geniş tasarlanmıştır. Ana takla barının yarışma kuralları dikkate alınarak 30mm çapında ve 3mm et kalınlığında olması ve DP600 çeliğinden imal edilmesi planlanmıştır. Ana takla barı tasarımında çeşitli alternatifler dikkate alınmış ve en iyi sonuçlar aşağıda verilen tasarımda elde edilmiştir. Bu yeni tasarımda diğer tasarımlara göre bariz bir şekilde mukavemet artışı sağlanmıştır.

Şekil 6-8'de tasarımı yapılan ana takla barının gerilme, sehim ve güvenlik katsayısı analizlerinin sonuçları sunulmuştur. İlk tasarımlarda ana takla barının üst kısımdaki çıkıntı olması planlanmıştır. Fakat yapılan analizlerde bu çıkıntının ana takla barında fazla sehime sebebiyet verdiği tespit edilmiş olup, üretimde kolaylığı da düşünülerek, üst kısımdaki çıkıntı iptal edilmiş ve sade (düz) bir tasarım yapılmıştır. Ana takla barının yüksekliği sürücü kuralını karşılayacak şekilde artırılmıştır. Yine yarışma kurallarında belirtildiği üzere ana takla barı üzerindeki radiuslar, malzemenin dış çapının minimum 1.5 katı olacak şekilde yapılmış ve ön kısımdan bakıldığında ana takla barının sağ alt ve üst kısmını birleştiren eğimli boruların eğimi  $10^\circ$  olacak şekilde tasarlanmıştır.

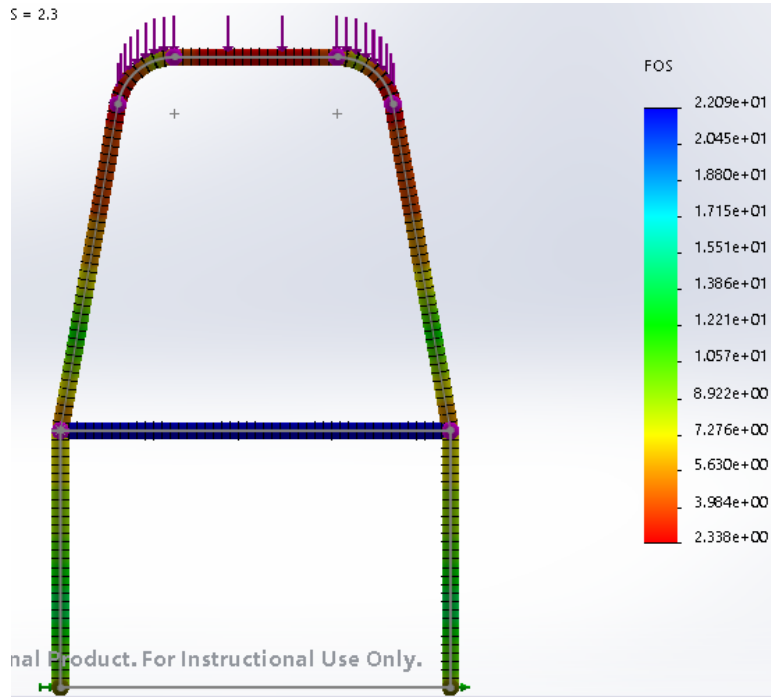


Şekil 6. Ana takla barı tasarımına ait gerilme analizi (N/m<sup>2</sup>)





Şekil 7. Ana takla barı tasarıma ait deformasyon (sehim) analizi (mm)

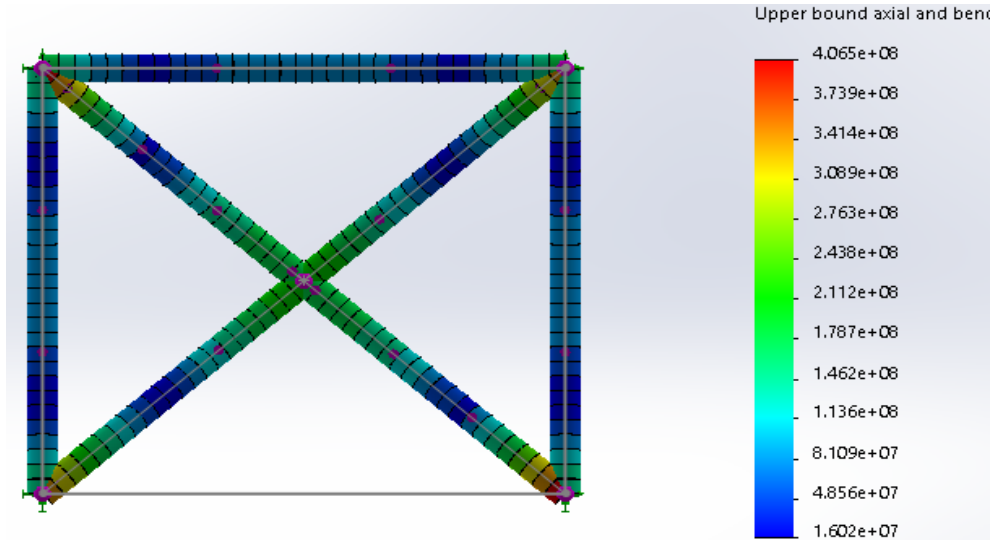


Şekil 8. Ana takla barı tasarımına ait güvenlik katsayısı analizi

### 2.3.5. Ön Burun (Front Bulkhead) Tasarımı ve Analizi

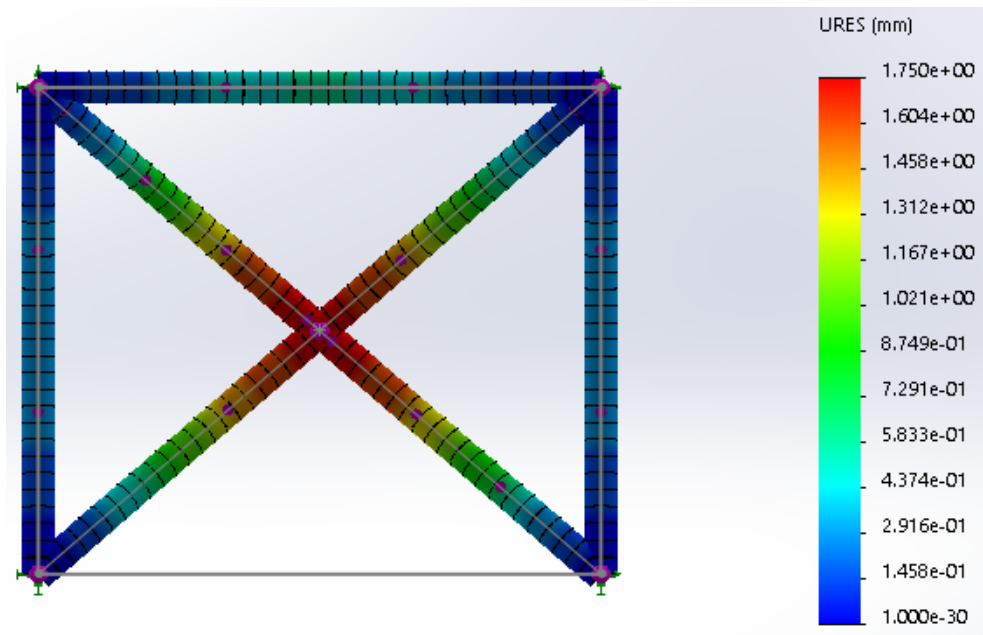
Ön burun, yarış aracında pedal kutusunun arkasında, sürücünün ayak tabanının baktığı ve kaza anında darbe sönümleyicinin bağlandığı yerdir. Ön burun, olası kaza durumunda yarış aracının ön kısmından gelecek olan darbelerin sürücüye hasar vermesini önleyecek şasinin dört temel bölümünden biridir. Ön burun kaza anında araç şasisinde darbenin etkileyeceği ilk bölge olacağı için bu kısmın tasarımında minimum güvenlik katsayısı 3 ve oluşacak sehim ise 1mm olarak dikkate alınmıştır.

Ön burun tasarımında öncelikle dairesel kesitli profil kullanılması düşünülmüştür. Aynı zamanda yarışma kuralları doğrultusunda burun kısmının sahip olduğu iç alan fazla olduğundan dolayı rijitliği sağlamak adına çapraz profil konumlandırılması yapılmıştır. Analizde aracın ön kısmından yaklaşık 30 kN kuvvet geldiği düşünülmüştür. Dairesel kesitli profil kullanılması durumunda analiz sonuçları hedeflenen sehim değerlerinin çok üzerinde olup güvenlik katsayısı açısından da isteneni sağlayamamıştır.

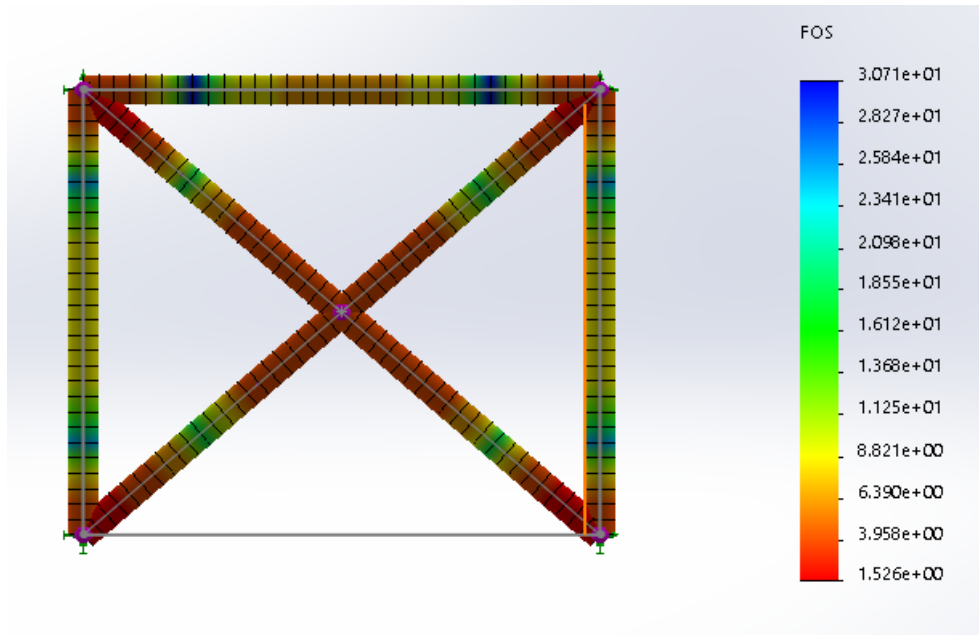


Şekil 9. Ön burun tasarımına ait gerilme analizi (N/m<sup>2</sup>)

Ön burun tasarımı ve analizi sonunda istenilen mukavemet değerlerini sağlamak için, atalet momentinin daha büyük olduğu ve üretimde kolaylığı sağlamak için tasarımda kare profil tercih edilmiştir. Bu durumda üretimde büküm işçiliğinden de tasarruf sağlanmıştır. Kare profil, aynı çapa sahip dairesel profile göre daha fazla atalet momentine sahiptir. Bu da kesitin maruz kaldığı eğilmeye karşı parçaya ekstra mukavemet kazandırmaktadır. Analiz sonuçları da bu teoriyi destekler nitelikte sonuçlar vermiştir ve tasarım kriterlerini fazlasıyla karşılanmıştır. Şekil 9-11'de tasarımı yapılan ön burnun gerilme, sehim ve güvenlik katsayısı analizlerinin sonuçları sunulmuştur.



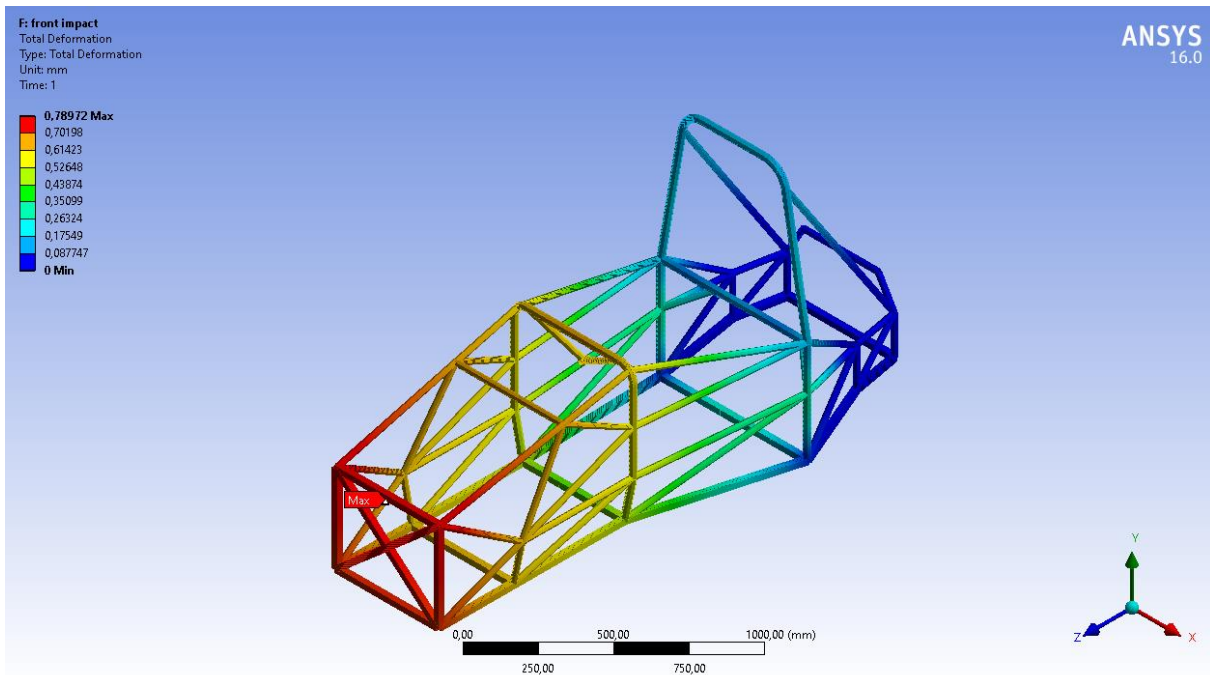
Şekil 10. Ön burun tasarıma ait deformasyon (sehimi) analizi (mm)



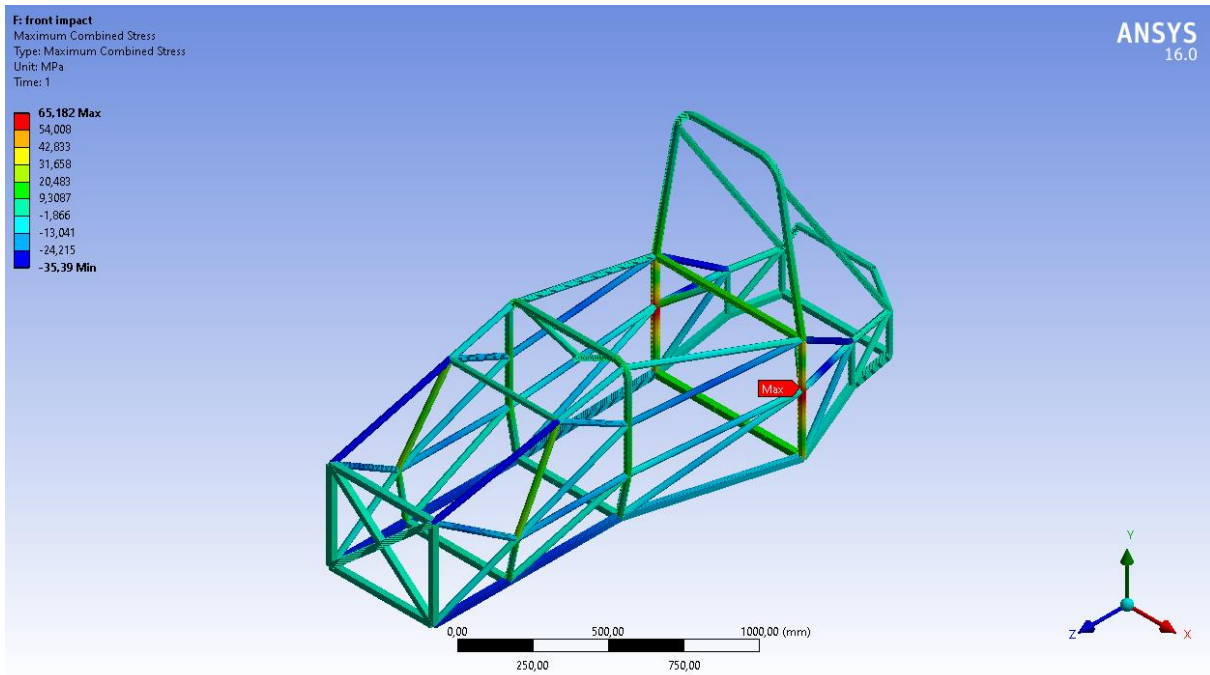
Şekil 11. Ön burun tasarımına ait güvenlik katsayısı analizi

### 2.3.6. Şasinin Ön Darbe Analizi

Şasinin ön darbe analizinde ön kısımdan 24325 N kuvvet uygulanmıştır. Analizde şasi arka kısmında 8 adet salıncak bağlantı noktasından sabitlenmiştir. Analiz sonucunda şaside 0.8mm sehim oluşmuş ve  $65 \text{ N/mm}^2$  değerinde bir gerilme meydana gelmiştir (Şekil 12-13). 0.8 mm'lik sehim şasi tasarımında hedeflenen aralıktadır. Aynı zamanda analiz sonuçlarına bakıldığında gerilmenin şasinin belirli bir bölgesinde birikmediği, aksine şasinin bütününe neredeyse homojen bir şekilde yayıldığı gözlemlenmiştir. Şasi imalatında kullanılan DP600 malzemesinin akma mukavemetinin  $400 \text{ N/mm}^2$  olduğu dikkate alındığında, şasinin sahip olduğu en düşük güvenlik katsayısı 6 olarak ortaya çıkmaktadır.



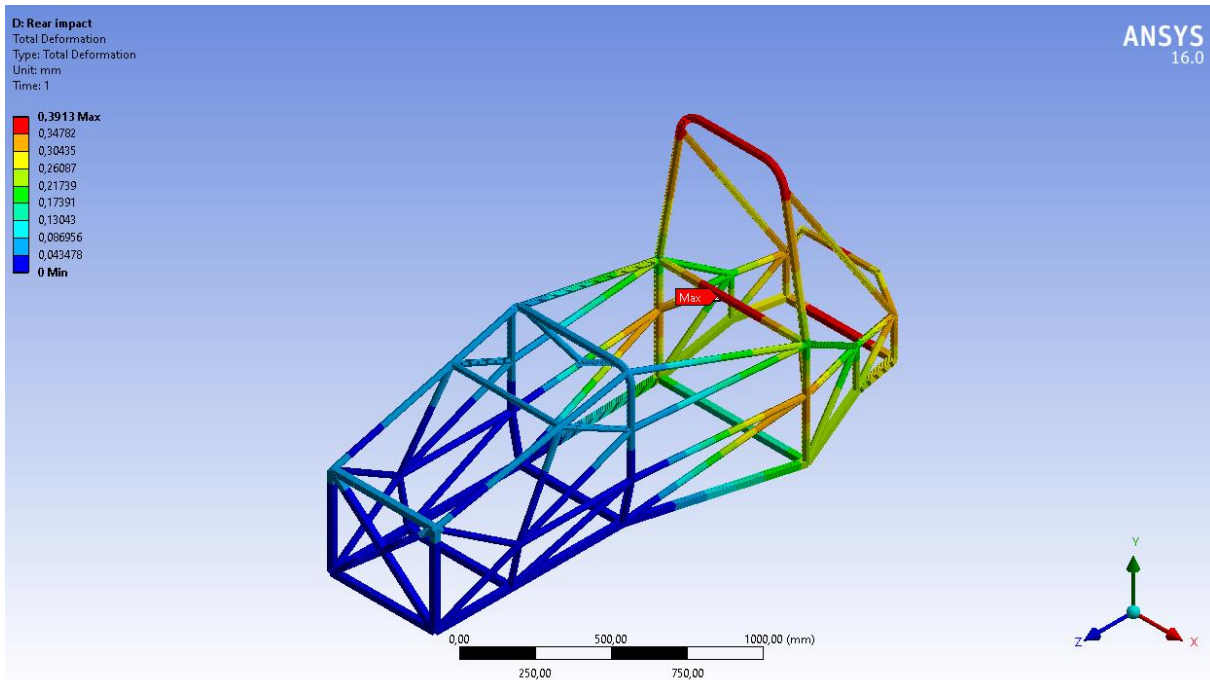
Şekil 12. Şasinin ön darbe analizi (sehim-mm)



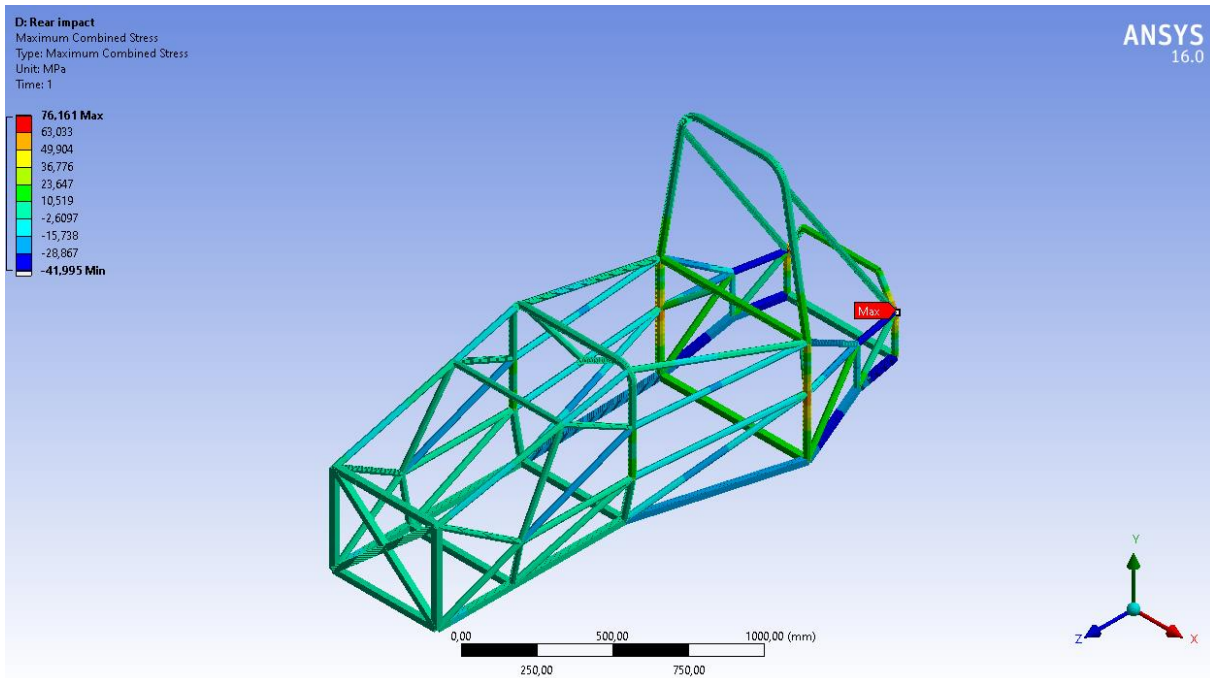
Şekil 13. Şasinin ön darbe analizi (gerilme- $N/mm^2$ )

### 2.3.7. Şasinin Arka Darbe Analizi

Şasinin arka darbe analizinde, arka havuz bölgesinden 24325 N kuvvet uygulanmıştır. Yapılan darbe analizinde şasi ön bölgesinde sağ ve sol kısımda toplamda 8 salıncak bağlantı noktasından sabitlenmiştir. Analiz sonucunda şaside 0.4 mm'lik sehim ve 76  $N/mm^2$  değerinde bir gerilme meydana gelmiştir (Şekil 14-15). 0.4 mm'lik sehim değeri şasi tasarımında hedeflenen aralıkta yer almaktadır. Arka darbe analizinde şasinin sahip olduğu en düşük güvenlik katsayısı 5 olarak ortaya çıkmaktadır. Şasinin arka darbe analizinde sehimin az olmasının başlıca sebepleri, arka kısımda kullanılan boru boylarının, ön kısımda kullanılan boru boyuna göre daha kısa ve sık kullanılmış olması ve ana takla barı desteklerinin varlığıdır.



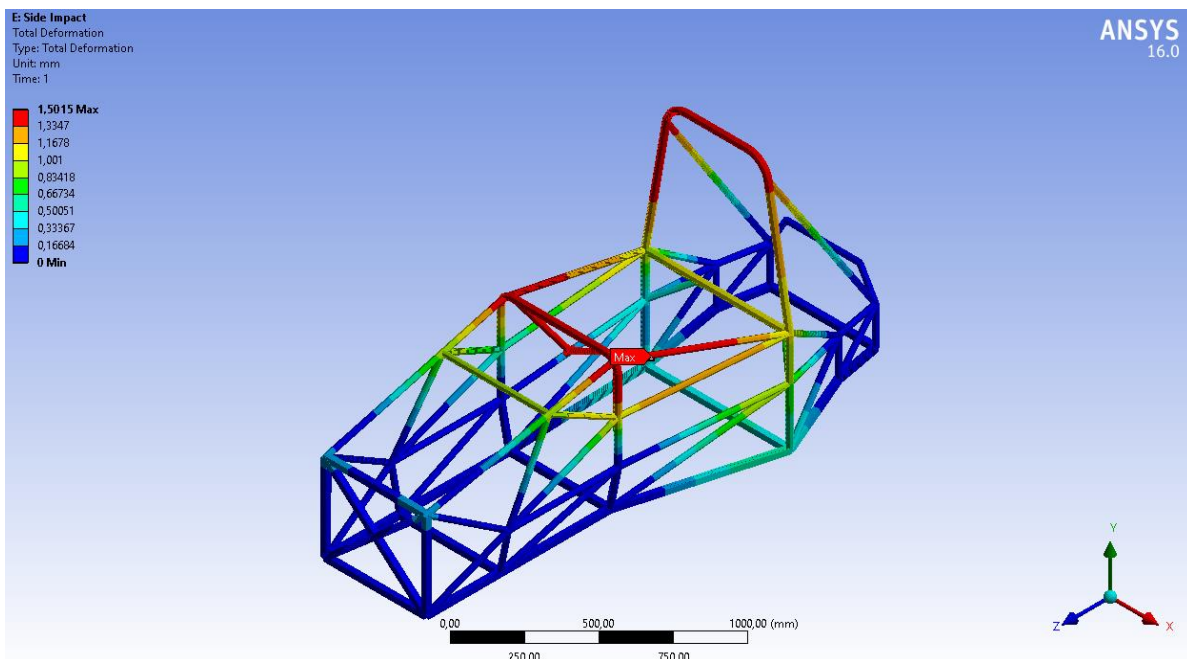
Şekil 14. Şasinin arka darbe analizi (sehim-mm)



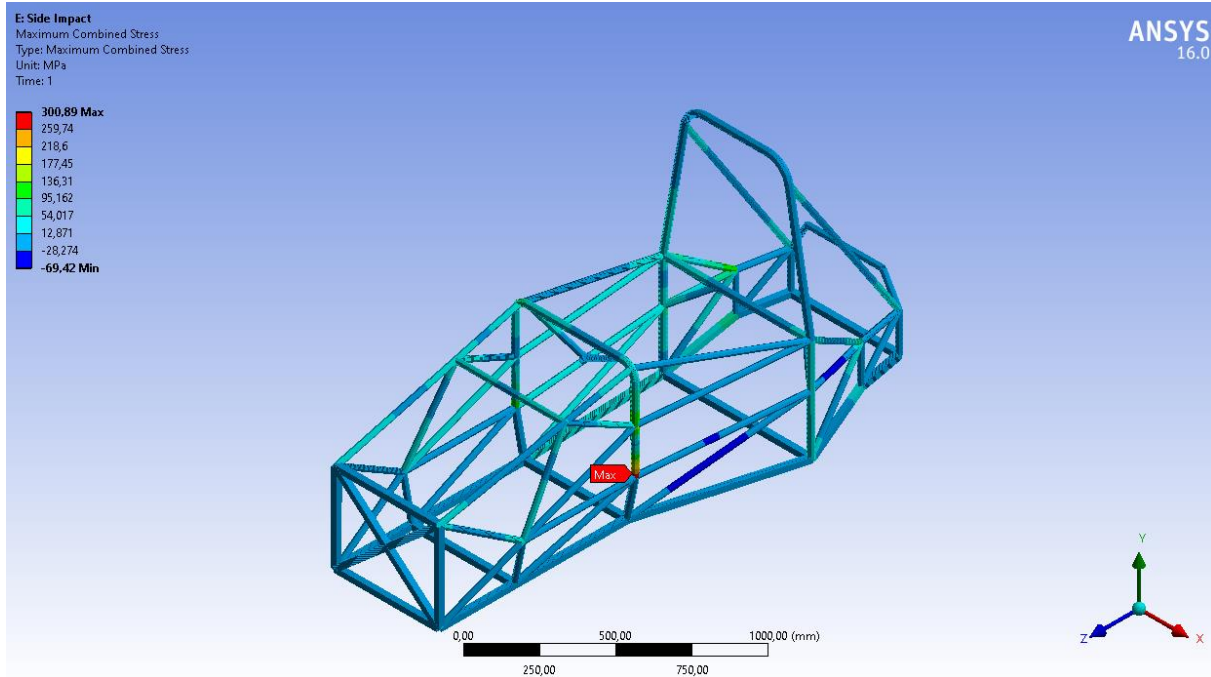
Şekil 15. Şasinin arka darbe analizi (gerilme-N/mm<sup>2</sup>)

### 2.3.8. Şasinin Yan Darbe Analizi

Şasinin yan darbe analizinde, kokpitin yan kısmından 24325 N kuvvet uygulanmıştır. Bu analizde şasi ön ve arka bölgede sağ ve sol olmak üzere toplam 16 salıncak bağlantı noktasından şasi sabitlenmiştir. Analiz sonucunda şaside yaklaşık 1.5 mm'lik sehim ve 301 N/mm<sup>2</sup> değerinde bir gerilme belirlenmiştir (Şekil 16-17). Bu analiz koşullarında şasinin güvenlik katsayısı 1.34 olarak ortaya çıkmaktadır. Bu analizdeki sehim ve gerilme değerlerinin diğer analizlere göre oldukça yüksek olduğu aşikardır. Bu farkın sebebi ise önden ve arkadan uygulanan kuvvetler doğrultusundaki destek borularının varlığıdır. Fakat kokpit kısmında yan kısımdan gelen kuvveti engelleyecek ekstra bir destek borusu kullanılamayacağı için, sürücü güvenliğini artırmak ve aynı zamanda sürücünün aracı hızlıca terk etmesini sağlamak amacıyla yan kısma ekstra çapraz bir boru konumlandırılmıştır.

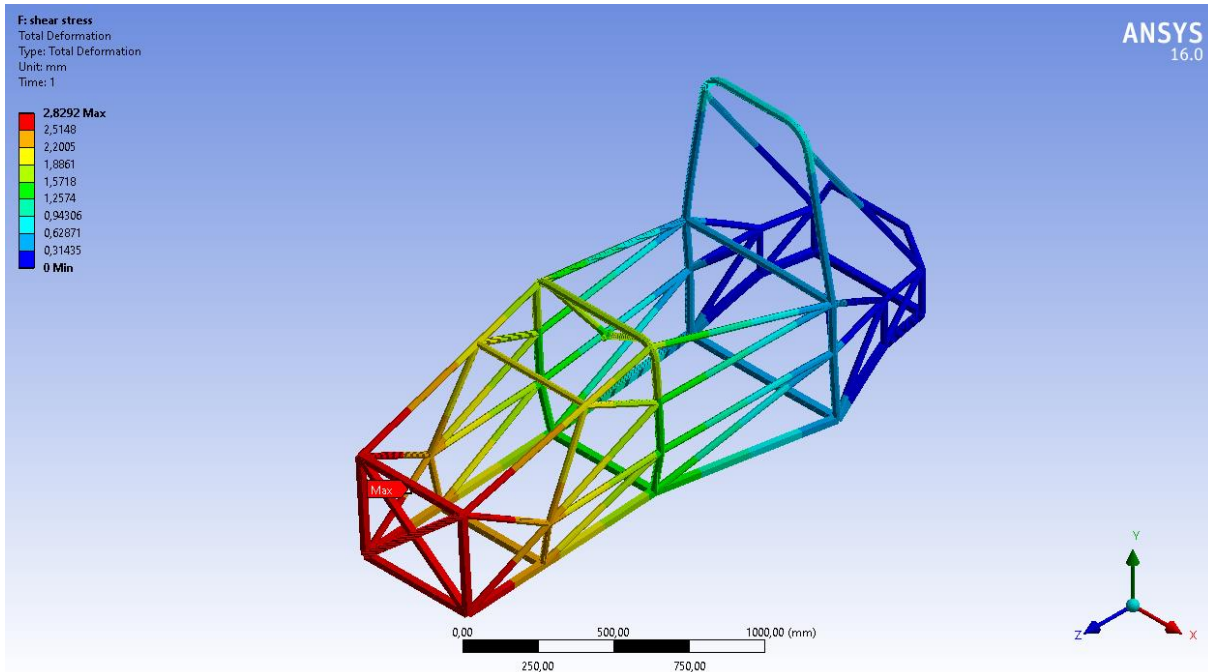


Şekil 16. Şasinin yan darbe analizi (sehim-mm)

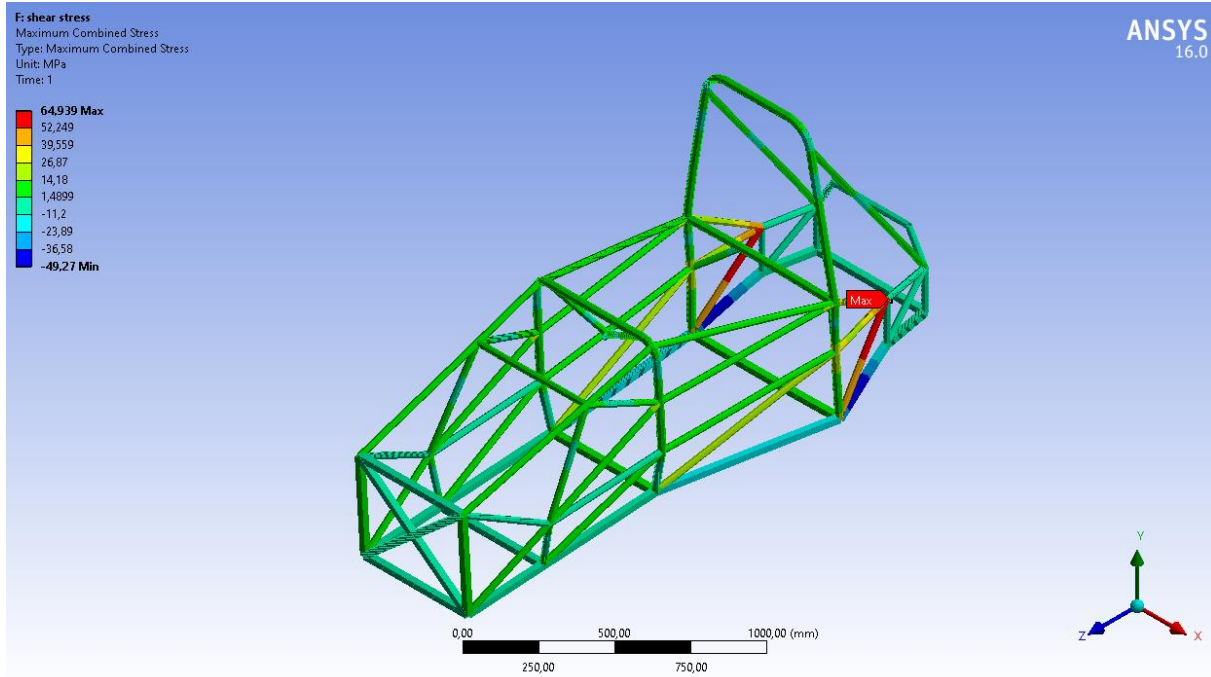
Şekil 17. Şasinin yan darbe analizi (gerilme- $N/mm^2$ )

### 2.3.9. Şasinin Kayma Gerilmesi Analizi

Şasiye yükleme tiplerinden birisi olan kayma gerilmesi analizi uygulanmıştır. Bu analiz yapılırken şasi arka kısmından sabitlenmiş ve sanki tek mesnetli bir kiriş gibi ele alınmıştır (Singh, 2010). Şasinin sürücü dahil olmak üzere aracın toplam ağırlığı ön ve arka kısma eşit dağılmış gibi düşünülerek şasinin burun kısmından aracın toplam ağırlığının yarısı uygulanmıştır. Bu durumda aracın toplam kütlesi 350 kg olup, ön kısımdan 175 kg yük uygulanmıştır. Kayma gerilmesi analizinde 2.83 mm'lik sehim ve 65  $N/mm^2$  bir gerilme değeri elde edilmiştir (Şekil 18-19). Sehim sonucu, hedeflenen değer aralığından bir miktar uzak olsa da, gerçek koşullarda aracın ön kısmına ağırlığın yarısı kadar yük binmeyeceğinden dolayı bulunan sehim değeri hesaplanandan çok daha düşük olacaktır.



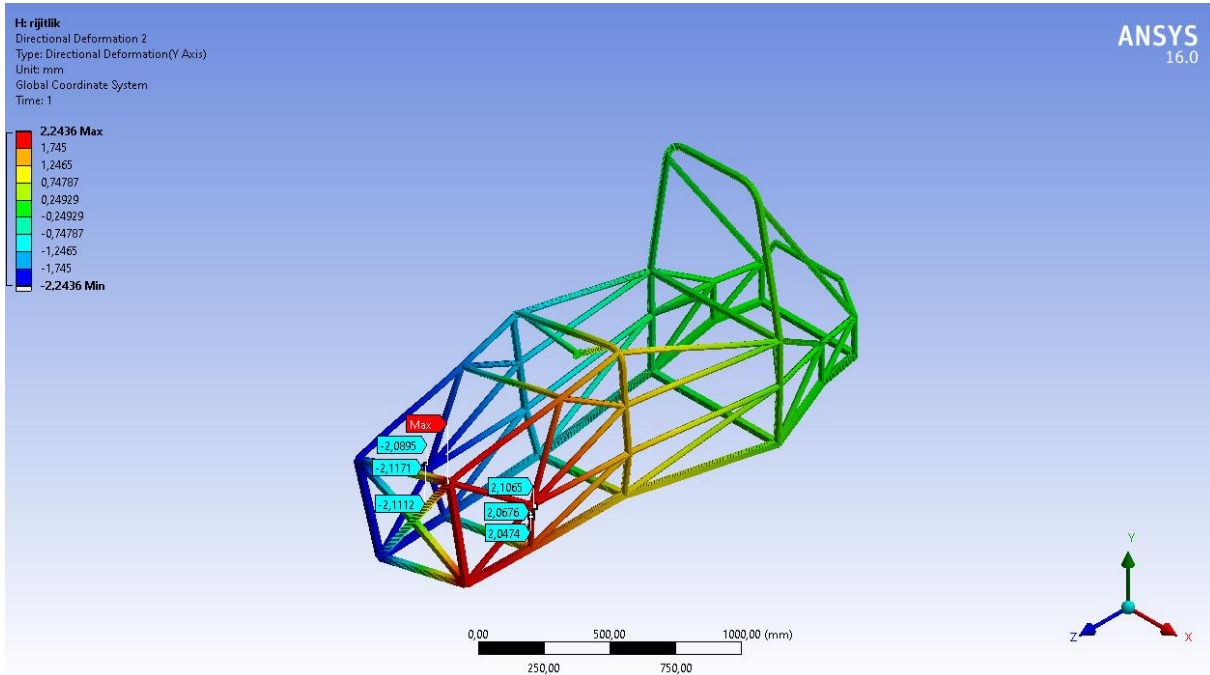
Şekil 18. Şasinin kayma gerilmesi analizi (sehim-mm)



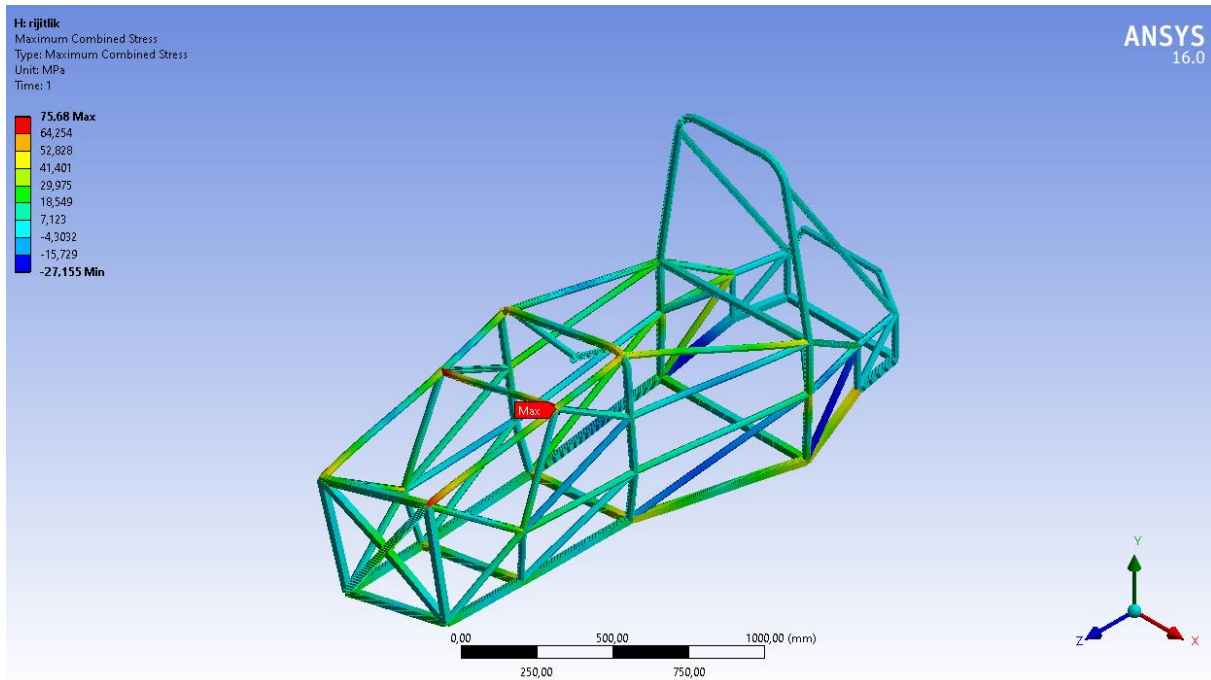
Şekil 19. Şasinin kayma gerilmesi analizi (gerilme-N/mm<sup>2</sup>)

### 2.3.10. Şasinin Torsiyonel Rijitlik (Burulma Direnci) Analizi

Şasi tasarımının hedefleri içinde en önemli yere sahip olan, şasinin burulmaya karşı göstereceği direnç (torsiyonel rijitlik) aracın süspansiyon tasarımı için de oldukça önemlidir. Süspansiyon hesaplarında şasi rijit kabul edilir. Bu yüzden şasi olabildiğince hafif ve aynı zamanda da rijit olmalıdır. Şasi rijitliği, aracın viraj kabiliyetini, kontrolünü ve hissiyatını doğrudan etkilemektedir. Torsiyonel rijitlik analizinde, şasi arka salıncak bağlantı noktalarından sabitlenerek ön salıncak bağlantı noktalarından kuvvetler etki ettirilmiştir. Bu durumda ön kısım üst salıncak bağlantı noktalarının her birinden 440 N, alt salıncak bağlantı noktalarının her birinden 538 N kuvvet uygulanmıştır. Analiz sonucunda şaside yaklaşık 3mm'lik sehim ve yaklaşık 76 N/mm<sup>2</sup> değerinde bir gerilme meydana gelmiştir (Şekil 20-21).



Şekil 20. Şasinin torsiyonel rijitlik analizi (sehim-mm)



Şekil 21. Şasinin torsiyonel rijitlik analizi (gerilme- $N/mm^2$ )

Şasinin torsiyonel rijitliğini hesaplamak için öncelikle şasiyi burmaya çalışan kuvvet çiftinin birbiri arasındaki mesafenin saptanması gerekir (Singh, 2010). Bu mesafe salıncak bağlantı noktaları arasındaki mesafedir.

Torsiyonel rijitlik

$$K = \frac{R}{\theta} \quad (2.1)$$

Döndürme momenti

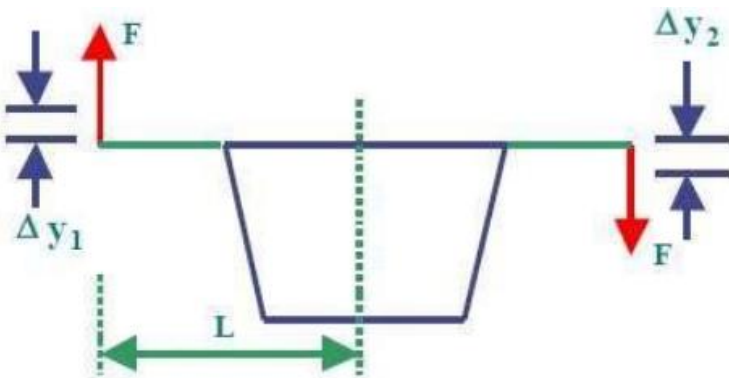
$$R = F \cdot L \quad (N \cdot m) \quad (2.2)$$

Burulma açısı

$$\theta = \arctg \left[ \frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{2 \cdot L} \right] \quad (2.3)$$

Torsiyonel rijitlik

$$K = \frac{F \cdot L}{\arctg \left[ \frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{2 \cdot L} \right]} \quad (2.4)$$



Şekil 22. Şasinin torsiyonel rijitlik hesabı için şematik gösterimi (Singh, 2010)



Şaside burulmayı sağlayacak olan kuvvet çifti	: F= 1956 N
Kuvvet çifti arasındaki mesafe	: L= 277.5 mm = 0.2775 m
Salıncak bağlantı noktalarındaki sehim	: $\Delta y_1 = \Delta y_2 = 2.1 \text{ mm} = 0.0021 \text{ m}$
Döndürme momenti	: R= 542.79N m
Burulma açısı	: $\Theta = 0.433^\circ$
Torsiyonel rijitlik	: K= 1251.876 Nm/°

Süspansiyon yuvarlanma rijitliği (roll stiffness) 500-1000 Nm/° olan bir Formula Student yarış aracı için şasinin sahip olması gereken torsiyonel rijitlik değerinin 300-1000 Nm/° arasında olması yeterlidir (Singh, 2010). Bu çalışmada da elde edilen sonuçlar istenen değerlerin daha üstünde olup araç şasisi için daha iyi seviyelerde torsiyonel rijitlik değerleri elde edilmiştir.

Şasi için yapılan bütün analizlerin tamamı ayrıca bir tablo halinde sunulmuştur (Tablo 3). Bu tabloda yapılan analizler çalışmanın sonuçlarının daha iyi anlaşılabilmesi için topluca ifade edilmiştir.

Tablo 3  
Formula Student yarış aracı şasi analizi sonuçları

Analiz tipi	Yük	Gerilme (Mpa)	Sehim (mm)	Minimum güvenlik katsayısı
Ana takla barı analizi	3G	265	1.8	2.3
Ön burun analizi	30 kN	406,5	1.75	1.5
Şasi ön darbe analizi	24325 N	65	0.8	6
Şasi arka darbe analizi	24325 N	76	0.4	5
Şasi yan darbe analizi	24325 N	301	1.5	1.34
Şasi kayma gerilmesi analizi	175 kg	65	2.83	6
Şasi torsiyonel rijitlik analizi	3912 N	76	3	5

### 3. Sonuçlar

Araçların şasi tasarımında en önemli husus şasinin dayanıklılığı ve rijitliğidir. Bu çalışmada Formula Student yarış aracında kullanılmak için tasarlanan şasinin, gerçekleştirilen analizler doğrultusunda, hedeflenen tasarım kriterleri ve rijitlik derecesine fazlasıyla sahip olduğu belirlenmiştir. Yapılan analizler neticesinde yarışma kuralları doğrultusunda, hedeflenen tasarım kriterleri daraltılarak daha hafif ve rijit tasarımlar elde edilmesi mümkün olmaktadır. Ancak gelinen noktada yeniden tasarlanan araç şasisi muadillerine göre bir nebze (%30) ağır olsa da, rijitlik ve ergonomik olması bakımından oldukça üstündür. Yarış aracı şasisinde daha rijit ve hafif bir yapı elde etmek için, uzay kafes şasiye göre daha maliyetli ve üretimi zor olan monokok şasi tasarımı da tercih edilebilir. Şasi imalatında kullanılan boruların uzunlukları daha kısa tutularak yüklenme durumunda oluşan sehimler azaltılabilir.

#### Yazar Katkıları

Yiğit Alp Oymak: Analizleri planlamış, tasarlamış ve yapmıştır.

Erol Feyzullahoğlu: Analizlerin yorumlanmasına ve makalenin yazımına katkı sağlamıştır

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

#### Kaynaklar

- Adams, H. (1993). *Chassis Engineering*, Penguin Group, New York.
- Aird, F. (1998). *The Race Car Chassis*, Penguin Group, New York.
- Allen, R.F. (2009). *Design and Optimization of a Formula SAE Racecar Chassis and Suspension*, The Degree of Bachelor, Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA.

- Alexander, M. (2008). *Design, Manufacturing and Verification of a Steel Tube Space frame Chassis for Formula SAE*, The Degree of Bachelor, Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA.
- Banthia, V.K. (12 Mayıs 2020). Erişim adresi: [http://164.100.133.129:81/econtent/Uploads/03\\_Session5%20and%206\\_Loads,%20Design%20and%20Structures.pdf](http://164.100.133.129:81/econtent/Uploads/03_Session5%20and%206_Loads,%20Design%20and%20Structures.pdf).
- Bhande A.S., Bhagat R.V., Anwer D., Anand A. ve Nitnaware P.T. (2018). Design and Analysis of Space Frame Chassis for Formula Student Race Car, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 7 (6), 1-5, DOI: IJERTV7IS060002.
- Das, A. (2013). Design of Student Formula Race Car Chassis, *International Journal of Science and Research*, 4 (4), 2571-2575, [https://www.ijsr.net/search\\_index\\_results\\_paperid.php?id=SUB153824](https://www.ijsr.net/search_index_results_paperid.php?id=SUB153824).
- European Aluminum Association, Brussels. (25 Mart 2020). Erişim adresi: [https://www.european-aluminium.eu/media/1543/1\\_aam\\_body-structures.pdf](https://www.european-aluminium.eu/media/1543/1_aam_body-structures.pdf).
- Hui, Z.L. (2012). *Design, Analysis And Experimental Verification of Tubular Space frame Chassis for Fsaе Application*, The Degree of Master of Engineering, National University of Singapore, Singapore.
- Kale, A. (2016). *Design of Formula Student Race Car Chassis*, Undergraduate Research Project Report, Hacettepe University, Ankara, Turkey.
- Krzikalla, D., Mesicek, J., Petru, J., Sliva, A. ve Smiraus, J. (2019). Analysis of Torsional Stiffness of the Frame of a Formula Student Vehicle, *Journal of Applied Mechanical Engineering*, 8 (1:315), 1-5, <http://dx.doi.org/10.35248/2168-9873.19.8.315>.
- Marzuki, M.A.B, Bakar, M.A.A. ve Azmi, M.F.M. (2015). Designing Space Frame Race Car Chassis Structure Using Natural Frequencies Data from Ansys Mode Shape Analysis, *International Journal of Information Systems and Engineering*, 3 (1), 54-62, DOI: [10.24924/ijise/2015.11/v3.iss1/54.63](https://doi.org/10.24924/ijise/2015.11/v3.iss1/54.63)
- Milliken, W.F. ve Milliken, D.L. (1995). *Race Car Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers Inc., USA.
- Milojević M., Ivanović L. ve Dimitrijević B. (2015). *Design and Analysis of Formula Student Frame*, 9 th International Quality Conference, Kragujevac, Serbia.
- Patil, R. ve Chikkali, V. (2020). FEA Analysis of FSAE Chassis, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9 (7), 290-295. <http://dx.doi.org/0.17577/IJERTV9IS070148>
- Riley, W.B. ve George, A.R. (2002). *Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis*, Proceeding of the 2002 SAE Motorsport Engineering Conference and Exhibition, 2002-01-3300, USA.
- SAE International, Michigan. (21 Mart 2020). Erişim adresi: <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>.
- Singh, R.P. (2010). Structural Performance Analysis of Formula SAE Car, *Jurnal Mekanikal*, 31, 46-61, <https://jurnalmekanikal.utm.my/index.php/jurnalmekanikal/article/view/102>.
- Sirsikar, S., Bhosale, A., Kurkute, A., Ghawalkar, S. ve Sahane, K. (2020). Review on Design, Analysis and Fabrication of Race Car Chassis, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7 (3), 4098-4101.
- Sithananun, C., Leelaphongprasut, C., Baitiang, C. ve Rungpipatphol, N. (2011). *SAE Student Formula Space Frame Design and Fabrication*, The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering, 19-21 October, Krabi, Tayland.
- Subramanyam, B., Vishal, Kollati, M. ve Kumar, K.P. (2016). Analysis of Formula Student Race Car, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 5 (10).
- Szczeńniak, G., Nogowczyk, P. ve Burdzik, R. (2014). Some Basic Tips in Vehicle Chassis and Frame Design, *Journal of Measurements in Engineering*, 2 (4), 208-2014, <https://www.jvejournals.com/article/15775>.
- Waterman, B.J. (2011). *Design and Construction of a Space-frame Chassis*, Final Year Project Thesis, University of Western Australia, Perth, Australia.