

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ MAKİNA FAKÜLTESİ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**



**BENZİNLİ HAFİF TAŞITLAR İÇİN  
KOMPOZİT MONOKOK GÖVDE TASARIMI**

**BİTİRME TASARIM PROJESİ**

**Hazırlayanlar**

**030130121 Mehmet ÇAKMAK**

**030150100 Fazıl Enes NAYİR**

**030150168 Erdem ÇALIŞKAN**

**Danışmanlar: Dr. Öğr Üyesi Atakan ALTINKAYNAK  
Öğr. Görevlisi Dr. Ali İmre AYDENİZ**

**OCAK 2020**



**Hazırlayanlar**

**030130121 Mehmet ÇAKMAK**

**030150100 Fazıl Enes NAYİR**

**030150168 Erdem ÇALIŞKAN**



*Ailelerimize ve takım arkadaşlarımıza,*



## ÖNSÖZ

Yaptığımız çalışmada sadece üç kişinin ismi geçse de, bu tez; danışmanlarımızın, mezunlarımızın, takım arkadaşlarımızın, projelerimize teknik konularda destek olan hocalarımızın ve takımımıza destek sağlayan organizasyonların desteği olmadan ortaya çıkamazdı.

Üniversitemizi ve ülkemizi yurt dışında sekiz yıldır gururla temsil eden İTÜ Facilis Otomobil Takımının kuruluşuna ve bugünlere kadar gelebilmesine olanak sağlayan değerli mezunlarımıza bize bu çalışmada önyak oldukları için minnettarız.

Danışmanlarımız Dr. Öğr. Üyesi Atakan Altınkaynak ve Öğr. Gör. Dr. Ali İmre Aydeniz'e, takımımıza sağladıkları liderliklerinden ve fedakârlıklarından ötürü teşekkür ederiz.

Çalışmamızın çeşitli kısımlarında bize destek sağlayan Doç. Dr. Mesut Kırca, Dr. Öğr. Üyesi Derya Ahmet Kocabaş ve Ar. Gör. Vehbi Öztekin hocalarımıza teşekkürü borç biliriz.

Takımımız, kuruluşundan itibaren maddi açıdan en büyük desteği sağlayan Elginkan Vakfı sayesinde tüm Avrupa ülkelerinden ekipler ile rekabet edebilmektedir. Sağladıkları destekler sayesinde her yıl yirmiden fazla öğrenci eğitim hayatı sırasında çok değerli tecrübeler edinmektedir. Vakfın bize verdiği destekler için tüm Elginkan Vakfı Yönetim Kurulu üyelerine, Vakıf Müdürü Sayın Ali Erköse'ye ve Vakıf Planlama Şefi Sayın Filiz Okumuş'a takımımız adına teşekkür ederiz.

Bugünlere kadar bizim yanımızdan eksik olmayan ve hakkını asla ödeyemeyeceğimiz değerli ailelerimize sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

Ocak 2020

Mehmet Çakmak

Fazıl Enes Nayir

Erdem Çalışkan





# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET .....	xix
SUMMARY .....	xxi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KOMPOZİT MONOKOK GÖVDE TASARIMI.....</b>	<b>5</b>
2.1 Ürün Tasarım Süreci .....	5
2.1.1 Sistematik konstrüksiyon .....	5
2.1.2 Konstrüksiyon sistematığının uygulanması .....	6
2.1.3 Faz 0.....	7
2.1.4 Faz I .....	10
2.1.5 Faz II .....	12
2.2 Araçta Kullanılacak Kompozit Bağlantı Elemanları.....	26
<b>3. KİNEMATİK MODEL OLUŞTURULMASI, YAPISAL VE AERODİNAMİK ANALİZ.....</b>	<b>33</b>
3.1 Araç Kinematik Modeli Oluşturulması .....	33
3.1.1 Direksiyon sistemi bağlantılarının tanımlanması.....	33
3.1.2 Aktarma sistemi bağlantılarının tanımlanması .....	35
3.1.3 Şasi ve motor plakasının bağlantılarının tanımlanması .....	36
3.2 Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışları.....	38
3.2.1 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	38
3.2.2 Anizotropik malzemelerin mekaniği.....	40
3.3 Malzeme Özelliklerinin Deneysel Olarak Bulunması.....	41
3.3.1 Karbon fiber - PVC köpük sandviç yapı çekme testi.....	42
3.4 Kompozit Malzemelerde Hasar Kriterleri.....	53
3.4.1 Maksimum gerilme teorisi .....	53
3.4.2 Maksimum birim uzama teorisi .....	53
3.4.3 Tsai-Hill hasar teorisi.....	54
3.4.4 Hoffman hasar teorisi.....	55
3.4.5 Tsai-wu hasar teorisi .....	56
3.5 Kompozit Gövde Analizi .....	56
3.5.1 Sonlu elemanlar yöntemi .....	57
3.5.2 Çözüm ağı .....	58
3.5.3 Kompozit modellenmesi .....	61
3.5.4 Statik analiz.....	63
3.5.5 Modal analiz.....	69
3.6 Aerodinamik Analiz .....	72
<b>4. MALZEME SEÇİMİ VE ÜRETİM.....</b>	<b>77</b>
4.1 Literatür araştırması .....	77
4.1.1 Kompozit malzemeler .....	77
4.1.2 Kompozit üretim yöntemleri.....	85
4.2 Macaw 2 Gövde Üretim Aşamaları.....	86
4.3 Macaw 3 Aracı için Üretim Yöntemi Belirlenmesi .....	93

4.3.1 Vakum infüzyon yöntemi.....	93
4.3.2 Prepreg kompozit yapılar .....	94
<b>5. MOTOR TESTİ VE OPTİMİZASYONU .....</b>	<b>97</b>
5.1 Literatür Araştırması.....	97
5.1.1 Dinamometre .....	97
5.2 Tasarım Kriterleri .....	99
5.3 Histerezis Fren Testi.....	100
5.3.1 Test düzeneği konstrüksiyonu .....	100
5.3.2 Test düzeneğinin elektrik sistemi .....	101
5.3.3 Test aşaması .....	102
5.4 Sabit Hızda Motor Testi .....	107
5.4.1 Kavram kanıtlama çalışması .....	108
5.5 Motor İçin Optimum Manifold Çapları ve Uzunlukların Optimizasyonu.....	113
5.5.1 Emme ve egzoz manifold çap ve uzunluk optimizasyonları .....	115
<b>6. MALİYET ANALİZİ.....</b>	<b>119</b>
<b>7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME .....</b>	<b>121</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>123</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>125</b>
EKA1. Shell Eco-marathon 2020 Yarışma Kuralları	
EKB1. Malzeme Polarları	
EKC1. Macaw 2 Akış Analizi Sonuçları	
EKC2. Macaw 3 Akış Analizi Sonuçları	
EKD1. Egzoz Borusu Çapı Optimizasyonu	
EKD2. Egzoz Borusu Uzunluğu Optimizasyonu	
EKD3. Emme Manifoldu Giriş Çapı Optimizasyonu	
EKD4. Emme Manifoldu Çıkış Çapı Optimizasyonu	
EKD5. Emme Manifoldu Giriş Uzunluğu Optimizasyonu	
EKD6. Emme Manifoldu Çıkış Uzunluğu Optimizasyonu	
EKE1. Teknik Resim Çizimleri	
EKF1. Parça Listesi (BoM)	
EKG1. Çekme Testi Grafiklerinin Çıkarılması MATLAB Kodu	
EKG2. Young Modülü Hesaplanması MATLAB Kodu	
EKG3. Fren Haritası Çıkarılması MATLAB Kodu	

## **KISALTMALAR**

<b>İTÜ</b>	: İstanbul Teknik Üniversitesi
<b>HAD</b>	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
<b>FEM</b>	: Finite Element Method
<b>SIMPLE</b>	: Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
<b>BSFC</b>	: Brake Specific Fuel Consumption
<b>PLM</b>	: Product Lifecycle Management
<b>CAD</b>	: Computer Aided Design
<b>BOM</b>	: Bill of Materials
<b>BTDC</b>	: Before Top Dead Center
<b>ABDC</b>	: After Bottom Dead Center
<b>BBDC</b>	: Before Bottom Dead Center
<b>ATDC</b>	: After Top Dead Center
<b>PVC</b>	: Polyvinylchloride
<b>PAN</b>	: Polyacrylonitrile



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Roth tarafından önerilen konstrüktif geliştirme sistemi strüktürü.....	7
Çizelge 2.2 : Shell Eco-marathon tarafından belirtilen kesin istekler. ....	9
Çizelge 2.3 : Facilis Otomobil Takımı tarafından belirlenen istekler .....	10
Çizelge 3.1 : Malzemelerin lineer bölgeleri için polinom katsayıları. ....	52
Çizelge 3.2 : Test sonuçları. ....	52
Çizelge 3.3 : Eleman kalitesi ölçütleri.....	60
Çizelge 3.4 : Kompozit lamine yapısı.....	62
Çizelge 3.5 : Laminelerin mekanik özellikleri. ....	62
Çizelge 3.6 : Farklı çekirdek malzemeler için emniyet katsayıları. ....	65
Çizelge 3.7 : Gövdenin ilk 20 doğal frekansı. ....	69
Çizelge 4.1 : Çekme Mukavemeti Karşılaştırması .....	81
Çizelge 4.2 : Yoğunluk ve Mukavemet Ağırlık Oranı Karşılaştırması .....	81
Çizelge 4.3 : Elastisite Modülü Karşılaştırması .....	82
Çizelge 5.1 : Ölçüm sırasındaki değişkenler. ....	103
Çizelge 5.2 : Histerezis fren testi ölçüm sonuçları. ....	103
Çizelge 5.3 : Honda GX35 fabrika çıkışı özellikleri. ....	107
Çizelge 5.4 : Honda GX35 boyutsal özellikleri.....	113
Çizelge 5.5 : Emme ve egzoz valfi için akış sabitleri.....	114
Çizelge 5.6 : Motor hızı ve yanma süresi. ....	114
Çizelge 5.7 : Sürtünme değerleri. ....	115



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Shell Eco-marathon Avrupa 2019 takım fotoğrafı.....	2
Şekil 2.1 : Montaj dosyası içerisinde direksiyon sistemi yerleşimi.....	16
Şekil 2.2 : Aktarma, direksiyon sistemleri ile sürücüyü içeren sistem yerleşimi görüntüsü.....	17
Şekil 2.3 : Ackerman geometrisi .....	18
Şekil 2.4 : Ön tekerlerin dönme durumundaki maksimum konumları .....	19
Şekil 2.5 : Aşamalı kabuk tasarımı.....	20
Şekil 2.6 : Kapak fotoğrafı olarak kullanılan Macaw 2 aracı.....	21
Şekil 2.7 : Kabuk yüzey tasarımının son durumu.....	22
Şekil 2.8 : Macaw 3 ve Macaw 2 araçlarının görüş alanları analizi.....	22
Şekil 2.9 : Tasarımın nihai görünüşü.....	23
Şekil 2.10 : Üst model tasarımı .....	24
Şekil 2.11 : Alt model tasarımı.....	24
Şekil 2.12 : Üst kalıp tasarımı .....	25
Şekil 2.13 : Alt kalıp tasarımı.....	26
Şekil 2.14 : Adım, kenar mesafesi ve kalınlık (Gay,2015).....	28
Şekil 2.15 : Bağlantıdaki normal ve kayma yükleri (Gay, 2015).....	29
Şekil 2.16 : Yapıştırıcı içindeki gerilmeler (Gay,2015) .....	31
Şekil 3.1 : Araç mekanik sistemlerinin görünümü. ....	33
Şekil 3.2 : Akson tutucunun karbon fiber kutuya bağlantısı. ....	34
Şekil 3.3 : Akson tutucu, akson ve göbek bağlantıları. ....	34
Şekil 3.4 : Direksiyon sistemi.....	35
Şekil 3.5 : Arka tekerlek yatakları ve bağlantılar. ....	36
Şekil 3.6 : Şasi ve motor plakası bağlantıları. ....	36
Şekil 3.7 : Aktarma sistemi. ....	37
Şekil 3.8 : Adams View'da atanan zincir bağlantısı.....	37
Şekil 3.9 : Araç modelinin son görünümü. ....	38
Şekil 3.10 : Üç simetri düzlemine sahip malzeme .....	39
Şekil 3.11 : Çekme testi numunelerinin ölçüleri [5]. ....	42
Şekil 3.12 : Çekme testi numuneleri.....	43
Şekil 3.13 : Numunenin çenelere bağlanması. ....	44
Şekil 3.14 : 0° açı ile kesilen numuneler. ....	44
Şekil 3.15 : 45° açı ile kesilen numuneler. ....	45
Şekil 3.16 : Hasar gözlemlenen 45° numune.....	45
Şekil 3.17 : 0° numunelerde gözlemlenen kayma izleri. ....	46
Şekil 3.18 : Sandviç yapılar için gerilme dağılımı (EASIE, 2011). ....	47
Şekil 3.19 : 0° numuneler için test sonuçları. ....	48
Şekil 3.20 : 45° numuneler için test sonuçları. ....	49
Şekil 3.21 : 0° açılı 3. numune için eğri uydurma. ....	51
Şekil 3.22 : 45° açılı 1. numune için eğri uydurma. ....	51

Şekil 3.23 : 45° açılı 4. numune için eğri uydurma. ....	51
Şekil 3.24 : Gerilme doğrultuları .....	54
Şekil 3.25 : Maksimum gerilme, maksimum birim uzama ve Tsai-Hill teorilerinin karşılaştırılması (Mallick, 2008). ....	55
Şekil 3.26 : Analiz şeması.....	57
Şekil 3.27 : Çözüm ağı (izometrik).....	58
Şekil 3.28 : Çözüm ağı (üstten).....	58
Şekil 3.29 : Bağlantı bölgeleri. ....	60
Şekil 3.30 : Aktarma sistemi çözüm ağı. ....	61
Şekil 3.31 : Direksiyon sistemi çözüm ağı.....	61
Şekil 3.32 : Gövde laminasyonu. ....	63
Şekil 3.33 : Sınır koşulları. ....	63
Şekil 3.34 : Toplam şekil değiştirme. ....	64
Şekil 3.35 : Kompozit yüzeyler için emniyet katsayısı (çekirdek hasarı).....	64
Şekil 3.36 : Çekirdek hasarı görülen bölge (5 mm PVC köpük). ....	65
Şekil 3.37 : Kompozit yüzeyler için emniyet katsayısı (kuadratik hasar kriteri).....	65
Şekil 3.38 : Kuadratik hasar kriteri en düşük olan bölge. ....	66
Şekil 3.39 : En yüksek gerilme oluşan parça (akson). ....	67
Şekil 3.40 : Aktarma sistemi için von-Mises gerilmesi. ....	68
Şekil 3.41 : Eşdeğer gerilmenin en yüksek olduğu bölge için birim uzama enerjisi hatası.....	68
Şekil 3.42 : Aktarma sistemi için birim uzama enerjisi hatası.....	69
Şekil 3.43 : Araç gövdesinin rezonans tepkileri. ....	71
Şekil 3.44 : HAD çözüm ağı. ....	72
Şekil 3.45 : Çözüm ağının sıklaştığı sınır tabaka bölgesi. ....	72
Şekil 3.46 : Macaw 2 için akış çizgileri(xy düzlemi). ....	73
Şekil 3.47 : Macaw 3 için akış çizgileri (xy düzlemi). ....	73
Şekil 3.48 : Macaw 2 için akış çizgileri(xz düzlemi).....	74
Şekil 3.49 : Macaw 3 için akış çizgileri(xz düzlemi).....	74
Şekil 4.1 : Strafor köpükten model. ....	88
Şekil 4.2 : Yapıştırıcı uygulaması. ....	88
Şekil 4.3 : Çelik macun. ....	89
Şekil 4.4 : Kalıp ayırma yerinin işaretlenmesi.....	89
Şekil 4.5 : Jelkot ve cam elyafı. ....	90
Şekil 4.6 : Ayrılan kalıplar.....	90
Şekil 4.7 : Karbon fiber kumaş. ....	91
Şekil 4.8 : Nomex honeycomb.....	91
Şekil 4.9 : Vakum elemanları.....	92
Şekil 4.10 : Macaw 2 .....	92
Şekil 5.1 : Histerezis fren test düzeneği .....	100
Şekil 5.2 : Deneyde kullanılan asenkron motorun plaka değerleri. ....	101
Şekil 5.3 : Motora giden akım ve voltajın ölçümü için kurulan devre. ....	102
Şekil 5.4 : Motor hızının değiştirilebilmesi için kullanılan AC motor sürücü.....	102
Şekil 5.5 : Histerezis fren güç devir grafiği .....	104
Şekil 5.6 : Tork sensöründen elde edilen fren testi verileri. ....	105
Şekil 5.7 : Histerezis fren tork devir grafiği. ....	106
Şekil 5.8 : Histerezis fren haritası. ....	106
Şekil 5.9 : Honda GX35 performans grafikleri.....	107
Şekil 5.10 : Histerezis fren ve motor torku grafiği. ....	108
Şekil 5.11 : Histerezis fren ve motor güç grafiği. ....	109



<b>Şekil 5.12</b> : SEMCON firması tarafından yapılan Honda GX35 testi sonuçları [3]. .....	111
<b>Şekil 5.13</b> : Honda GX35 test sonuçları ( $i=2.813$ ). .....	111
<b>Şekil 5.14</b> : Honda GX35 test sonuçları ( $i=4.063$ ). .....	112
<b>Şekil 5.15</b> : Egzoz borusu çapı için BSFC grafiği. ....	115
<b>Şekil 5.16</b> : Egzoz borusu uzunluğu için BSFC grafiği. ....	116
<b>Şekil 5.17</b> : Emme manifoldu giriş çapı için BSFC grafiği. ....	117
<b>Şekil 5.18</b> : BSFC'in emme manifoldu çıkış çapına göre değişimi. ....	117
<b>Şekil 5.19</b> : BSFC'in emme manifoldu giriş uzunluğuna göre değişimi. ....	117
<b>Şekil 5.20</b> : BSFC'in emme manifoldu çıkış uzunluğuna göre değişimi. ....	118



# **BENZİNLİ HAFİF TAŞITLAR İÇİN KOMPOZİT MONOKOK GÖVDE TASARIMI**

## **ÖZET**

İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi bünyesinde Dr. Öğr. Üyesi Atakan Altınkaynak öncülüğünde 2011 yılında kurulan Facilis Otomobil Takımı 2012 yılından beri katıldıkları Shell Eco-marathon yarışmasında ülkemizi ve üniversitemizi gururla temsil etmektedir. Takımın bu yıl tasarlamakta olduğu prototip aracı olan Macaw 3 bu bitirme tasarım projesine konu olmuştur.

Takım üyelerinin yoğun özverisi ve danışman hocamızın öncülüğünde 2018 yılında takım atölyesinde üretilen Macaw 2 üç kez yarışmada yer almıştır. Araç üzerinde yarışma öncesinde sayısız testler yapılmıştır. Testler ve yarışma sırasında elde edilen tecrübelerle, mühendislik yaklaşımları kullanılarak sürekli geliştirmeler yapılmıştır. Ortaya çıkan ürün halen geliştirilmeye devam edilmektedir. 2020 yılında Shell Eco-marathon yarışmasında bu araç ile Türkiye ve İTÜ temsil edilecektir.

Takımımız; her yıl yirmi ila otuz öğrencinin kendisinden önce yapılanların üstüne geliştirme yapmak için göstermekte olduğu gayret sayesinde hedeflerine ulaşmaktadır. Takımımıza yeni katılacak olan üyelere edinilen tecrübelerin aktarılması takımın devamlılığı açısından çok kritiktir. Buradan edinilen tecrübeler ile mezun olan mühendislerimiz ülkemizin çeşitli sektörlerinde; kendi kurdukları firmalarıyla, çalıştıkları sektöründe öncü firmalarda veya akademide ülkemizin geleceğine yön vermektedir.

Yapılan bu çalışmanın hazırlanması sırasında; takımın yıllar içerisinde kazanmış olduğu profesyonel yaklaşımın üniversiteye yeni adımını atmış bireylere aktarılması akılda tutulmuştur.

Proje kapsamında, bu bitirme tezinde yer aldığı kadarıyla, tüm sistem için bütünsel bir yaklaşım uygulanarak, benzinli hafif taşıt için monokok gövde tasarlanmış ve tasarımı yapılan gövdenin önceki araçlar ile kıyaslanarak analizleri yapılmıştır. Gövde analizlerinin doğruluğunun arttırılması için kullanılan malzemenin mekanik özellikleri deneysel olarak bulunmuştur. Araçta kullanılan içten yanmalı motorun sistemle ilişkili olarak verim artışı sağlanması için modellenmesi ve testleri yapılmıştır. Önceki yıllarda tamamlanmış olan araç kabuğu üzerindeki eksikler ve hatalar tespit edilmiş olup, bu sorunlara yönelik yenilikçi ve güvenilir çözümler geliştirilmiştir.



# **MONOCOQUE COMPOSITE BODY DESIGN FOR LIGHTWEIGHT GASOLINE VEHICLES**

## **SUMMARY**

Facilis Vehicle Team founded in 2011 at Istanbul Technical University with the guidance of Asst. Prof. Atakan Altınkaynak. Facilis has been representing our university and nation with pride in Shell Eco-marathon competition since 2012. Macaw 3, the prototype vehicle, is the subject of this senior design project.

Macaw 2 took part in the competition for three times since it's production under the leadership of our consultant with devoted efforts of the team members at team workshop in 2018. Numerous tests are conducted on the vehicle before the competition. With the experience during the tests and competition, continuous improvements have been made using various engineering approaches. The vehicle is still under development. Turkey and ITU is going to be represented with this vehicle at the Shell Eco-marathon 2020 competition.

Our team achieve its purpose with student's great efforts to improve the studies conducted before them. Transferring the know-how to new members of the team is crucial for the continuity of the team. Our alumni, with the know-hows gained here, leads to the future of our country in various sectors; with the companies they established, top companies that they work at or in the academy.

During this study, it has always been kept in mind to transfer the professional approach team has experienced in years, to individuals who have taken their new steps into university.

Monocoque composite body for light-weighted gasoline vehicles has been designed with a holistic approach for the whole system within the scope of the project. Analysis of designed body has been accomplished by comparing with previous vehicles. In order to increase the precision of the body analysis, the mechanical properties of materials are experimentally examined. The internal combustion engine used in the vehicle is modeled and tested in order to improve the efficiency in relation to the system. Deficiencies on the older vehicle's shell are identified. Novel and reliable solutions for these problems are proposed.



## 1. GİRİŞ

İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesine bağlı Facilis Otomobil Takımı 2011 yılında Öğretim Üyesi Dr. Atakan Altınkaynak danışmanlığında kurulmuştur. Takımın kuruluş amacı, artan araç kullanımı neticesinde ortaya çıkan çevre kirliliğini azaltıcı teknolojiler geliştirmek ve insanların hayatını kolaylaştıracak ve şehir yaşantısına uygun verimli otomobillerin geliştirilmesine önayak olacak çalışmalar yapmaktır. Kolaylaştırmak, ulaşılabilir hale getirmek kelimelerinin evrensel dil kabul edilen Latincedeki karşılığı olan ‘Facilis’ takıma adını vermiştir. Takım, bu amaç ile doğrudan örtüşen amaca sahip diğer araçların da katıldığı Shell Eco-marathon yarışmasına katılmaktadır.

Temelleri Shell mühendisleri tarafından 1939 yılında Fransa’da atılan Shell Eco-marathon yarışması dünyanın en uzun soluklu öğrenci yarışmasıdır. Sadece Avrupa’da iki yüzün üzerinde takımın üç binin üzerinde yarışmacının katıldığı Shell Eco-marathon, dünyanın en saygın üniversite etkinliklerinden biridir. Yarışmada başarı kriteri olarak yakıt verimliliği alınmaktadır. Ülkemizden bu yarışmaya katılan ilk üniversite takımlarından biri olan İTÜ Facilis Otomobil Takımı, ilklerin üniversitesi olan İstanbul Teknik Üniversitesini 2012 yılından beri hem Avrupa’da hem de geçtiğimiz yıllarda düzenlenmeye başlanan Türkiye yarışmalarında temsil etmektedir. Takımımız, ülkemizdeki birçok üniversitede yarışma için takımlar kurulmasına önayak olmuştur ve hem üniversiteler tarafından hem de yarışmayı düzenleyen Shell tarafından Türkiye’de en saygın takımlardan biri olarak görülmektedir. Takımımızın önayak olduğu diğer üniversite takımları neticesinde Türkiye, yarışmaya en çok takım gönderen ikinci ülke olmuştur ve 2016 yılında Fransa’dan sonra Türkiye’de de ‘Challenger Event’ olarak adlandırılan yerel yarışma düzenlenmeye başlanmıştır.



**Şekil 1.1 :** Shell Eco-marathon Avrupa 2019 takım fotoğrafı.

Yarışmada yer alması doğrultusunda Macaw adlı prototip benzinli aracın yerine geçmesi planlanan Macaw 2, 2018 yılında takım üyelerinin göstermiş olduğu yoğun emek sayesinde takımın faaliyet gösterdiği İTÜ Makina Fakültesi Eski Motorlar Laboratuvarında üretilmiştir. 2018 ve 2019 yılı Shell Eco-marathon Avrupa yarışmalarına bu araç ile katılım gerçekleştirilmiştir. 2019 yılında 310 km/l yakıt tüketimi değeri elde edilmiştir. Elde edilen skor, takımın zaman içerisinde kazandığı bilgi birikiminin ulaştığı noktayı göstermektedir.

Macaw 2 adlı aracın üretimi ve geliştirilmesi sırasında takımda aktif rol alan lisans öğrencileri, karşılaşılan sorunlara mühendis bakış açısı ile yaklaşmaktadır. Çalışılan proje genel olarak; tek kişilik prototip benzinli hafif bir taşıt için güvenilir, sağlam, modüler ve verimli bir aktarma sistemi, gövde, elektronik sistemler ve içten yanmalı motor tasarlanmasını konu almaktadır. Kapsadığı konuların fazlalığı ve sistemin karmaşıklığı nedeniyle süreç sırasında karşılaşılan sorunların çözülebilmesi için bütünsel bir yaklaşım gerekmektedir. Problemlerin çözümü sırasında her aşamada aktif rol alan lisans öğrencileri mühendislik problemlerine karşı geniş bir perspektif kazanmaktadır.



2020 yılında yapılacak olan yarışmaya hazırlık sürecinde, danışmanlarımız Dr. Öğr. Üyesi Atakan Altınkaynak'ın ve Öğr. Gör. Dr. Ali İmre Aydeniz'in destekleri ve teşvikleri sayesinde tamamlanan çalışmalar bu tezin konusunu oluşturmaktadır.

Tez kapsamında incelenen ilk husus, ürün tasarımı ve geliştirilmesi sırasında sistematik çalışma standartlarının takıma kazandırılmasıdır. Gelecek yıllarda üretilmesi amacıyla Macaw 2'nin yerine geçebilecek Macaw 3 adlı aracın projelendirilmesi sırasında sistematik konstrüksiyon örneklendirilmiştir. Takımda mekanik sistemlerin tasarlanması, analizi ve üretimi ile ilgili ekipte çalışan kişi sayısının artması, tasarlanan sistemlerin karmaşık sistemler olması gibi sebeplerden dolayı araç içerisindeki sistemlerin tasarlandığı ortam üzerine çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde lisans öğrencilerinin çalışmakta olduğu bu proje için uygulanabilecek seviyede bir ürün yaşam döngüsü sistematigi geliştirilmiştir. Ayrıca Macaw 3'ün tasarım süreci ve tasarım sırasında alınan kararlar detaylı olarak açıklanmıştır. Aracın gövdesine yapılacak olan bağlantılar için kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır.

Üçüncü kısımda tasarımı yapılan kompozit monokok gövdenin kinematik modelinin oluşturulması, malzemelerin mekanik özellikleri hakkında literatür araştırmaları, deneysel olarak mekanik özelliklerin bulunması, sonlu elemanlar analizi ile gövdenin yapısal analizi, hesaplamalı akışkanlar mekaniği yöntemleri ile gövdenin akış analizi yapılmıştır.

Dördüncü kısımda kompozit yapıların üretim yöntemleri araştırılmıştır. Ayrıca Macaw 2'nin üretimi sırasında kullanılan yöntemin avantajlarına ve karşılaşılan sorunlara yer verilmiştir. Bu kısmın sonunda Macaw 3'ün üretimi için uygun yöntem belirlenmiştir.

Beşinci kısımda ise araçta bulunan içten yanmalı motorun test edilmesi için sabit tork uygulayabilen frenler incelenmiştir. Motora karşı yük üretmesi için temin edilen histeresis frenin karakteristik grafiklerinin çıkartılması ve bahsedilen fren kullanılarak yapılan motor testleri detaylı olarak açıklanmıştır. Ek olarak; manifold çap ve uzunluklarına yapılan optimizasyon çalışması gösterilmiştir.



## **2. KOMPOZİT MONOKOK GÖVDE TASARIMI**

### **2.1 Ürün Tasarım Süreci**

Ürün tasarım sürecinde, istenilen özelliklerin tam olarak sağlanabilmesi ve sonraki süreçte devam eden geliştirmelerin düzenli bir şekilde gerçekleştirilmesi için bir sistematik adımlar süreci olması gerekliliği görülmüştür. Konstrüksiyon sürecinde bu sistematik adımlar izlenmesi gerekliliği tarih içerisinde birçok tasarımcının da dikkatini çekmiş ve bu alanda birçok çalışma yapılmasına olanak sağlamıştır. Yapılan bu çalışmalar “Sistematik Konstrüksiyon” başlığı altında literatüre geçmiştir.

#### **2.1.1 Sistematik konstrüksiyon**

Sistematik konstrüksiyonun tarihi ve literatürdeki yeri incelendiğinde 19. Yüzyıl başlarına dayanmakla birlikte 1920’lerde Erkens’in çalışmaları modern sistematik konstrüksiyonun ön çalışmaları olarak kabul görmektedir. Erkens çalışmalarında, tasarımdan beklentilerin detaylandırılmasını, çelişen isteklerin değerlendirilmesini ve çözüme adım adım ulaşılması gerektiğini belirtmiştir. Bu adımların fikir, tasarım ve ürünün oluşumu aşamalarına kadar sürdürülmesini savunmuştur.

Sistematik konstrüksiyon konusunda Wögerbauer daha kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiş, problem çözümüne ulaşma sürecindeki görevlerin alt görevlere ayrılarak adım adım gerçekleştirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Wögerbauer’in çalışmaları sistematik konstrüksiyonun başlangıç noktası olarak kabul edilmektedir.

1960 yıllarında 2. Dünya Savaşı’nın etkisiyle işgücündeki azalma, sistematik konstrüksiyon konusuna olan ilgiyi artırmıştır. Bu dönemde Niemann, Mataousek, Kesselring, Tschochner ve Leyer sistematik konstrüksiyonun günümüzdeki haline ulaşmasına büyük katkılarda bulunmuşlardır.

Gerhard Pahl ve Wolfgang Beitz tarafından yapılan Mühendislik Tasarımı - Sistematik Yaklaşım (Konstruktionslehre Grundlagen Erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung) isimli çalışma ise günümüz sistematik konstrüksiyon felsefesinin temellerini oluşturmaktadır.

### 2.1.2 Konstrüksiyon sistematığının uygulanması

Konstrüksiyon Sistematığının uygulanmasına dair birçok farklı görüş bulunmakla birlikte, bu alanda verilen öneriler birçok ortak yön içermektedir. Roth, Koller, Pahl-Beitz ve yine bu araştırmacılara katılarak Alman mühendisler birliğince (VDI) benimsenen konstrüktif geliştirme strüktürleri incelenmiştir ve bu strüktürlerden çıkarılan ortak öneriler aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

Konstrüksiyona başlamadan önce mutlaka ödev tarifi yapılmalıdır. Ödev tarifine siparişin kesinleşmesinden sonra bir kez daha konstrüktör ile istek sahibi arasındaki diyalog sonucunda ulaşılmalıdır.

1. Ödev tarifi kesin maddesel çözümler içermemelidir
2. Ödev tarifi yapıldıktan sonra tüm istekler sıralanarak istekler listesi oluşturulmalıdır.
3. İstekler listesinde istekler, önem sıralamasına göre gruplandırılmalıdır.
4. İstekler listesi oluşturulduktan sonra strüktürel olarak farklı çözüm önerilerinde bulunulmalıdır.
5. Çözüm önerilerinin geliştirilmesinde çözüm önerileri arasında tercih yapılmamalı değerlendirme sırasında tarafsız bir değerlendirme yapılmaya özen gösterilmelidir.
6. Çözüm önerileri kapsamlı bir şekilde değerlendirildikten sonra şekillendirme fazı olarak belirtilen parçaların geometrilerinin oluşturulmasına ve son şekillerinin verilmesine geçilmelidir.
7. Şekillendirme fazında ve sonrasında yapılan değerlendirmeler sonucunda geometrik olarak değişikliğe gidilmesi muhtemeldir. Bu olasılık daima göz önünde bulundurulmalıdır.
8. Değişime gidilme olasılığına hazırlık olarak fonksiyonel sentez ve şekillendirme fazlarındaki her adım doğru şekilde arşivlenmeli ve esnek tasarım ortamları oluşturulmalıdır.

Konstrüktif geliştirme sistemi strüktürlerinin incelenmesi sonucunda proje boyunca Roth tarafından Ödevin Analizi ve Kesinlik Kazanması (FAZ0), Fonksiyonel Sentez veya Tasarım (FAZ I), Niceliksel Konstrüksiyon (FAZ II) şeklinde bölümlendirilen konstrüktif geliştirme adımlarının (Çizelge 2.1) izlenmesi kararlaştırılmıştır.

FAZ 0	FAZ I	FAZ II
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ödevin Tariflenmesi</li> <li>- İstekler Listesinin Hazırlanması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Genel Fonksiyon Strüktürü</li> <li>- Fiziksel Fonksiyon Strüktürü</li> <li>- Referans Gerçek Fonksiyon Karşılaştırılması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geometrik, Maddesel Şekillendirme</li> <li>- Teknik ve Ekonomik Değerlendirme</li> </ul>

**Çizelge 2.1** : Roth tarafından önerilen konstrüktif geliştirme sistemi strüktürü.

### 2.1.3 Faz 0

Ödevin tanımlanması tüm tasarım sürecini etkileyecek tasarım sürecinin en önemli adımlarındandır. Ödevin tanımında kullanılacak her terim tasarım geliştirme sürecinde rehber olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle tanımlamada olabildiğince genel yaklaşımlarda bulunmak çözümlerin araştırılması sırasında konstrüktöre yardımcı olmaktadır. Kesin ve çözüm odaklı terimler kullanıldığında konstrüktif geliştirme süreci ilk adımda sınırlanmakta ve konstrüktörün çözüm yollarını çok dar bir alanda aramak zorunda kalmasına sebep olmaktadır.

Giriş bölümünde belirtildiği üzere Facilis Otomobil Takımı 2011 yılında Shell Eco-marathon Avrupa yarışlarına katılmak üzere İTÜ Makina Fakültesi bünyesinde kurulmuş bir öğrenci proje takımıdır. 2012 yılından beri her yıl Avrupa yarışlarına katılan takım, 2015 yılından beri düzenlenen Shell Eco-marathon Türkiye yarışlarına ara vermeden katılmaktadır. Kuruluşundan 2014 yılına kadar şehir konseptinde üç adet elektrikli otomobili başarıyla tasarlayıp imal edip bu otomobillerle Hollanda'daki Avrupa yarışlarında yarışan takım 2015 yılından beri benzinli prototip kategorisinde çalışmalarına devam etmektedir. 2015 yılında üretilen Macaw isimli araç ile yer alınan üç Avrupa ve üç Türkiye yarışından ve 1 litreyle 300 km'lik bir Türkiye rekoru derecesi elde edilmiştir. Ardından, 2018 yılının Avrupa yarışı için Macaw 2 isimli araç geliştirilmiş ve 2019 yılında Londra yarışında 310 km'lik derece ile Macaw aracı kendi rekorunu kırmıştır.

2019 yılında kazanılan tecrübeler ve sürekliliğin sağlanması amacı ile 2019 Londra yarışı sonrası yeni araç tasarımına başlanmış ve bu araç Macaw serisinin devamı nite-

liğinde Macaw 3 olarak adlandırılmıştır. Tez çalışmamızın konusu Macaw 3 adlı aracın geliştirme sürecinde olan direksiyon ve aktarma sistemlerinin tamamlanması ve Macaw 3 aracının gövde tasarımının yapılması olarak belirlenmiştir. Fakat konstrüktif geliştirme sisteminin uygulanması sırasında direksiyon ve aktarma sistemlerinin tamamlanması konusunun karışıklığa sebep olacağı düşünülerek ödev tarifinin Macaw 3 aracının gövde tasarımı konusu üzerine oluşturulması kararlaştırılmıştır.

### **2.1.3.1 Ödevin tariflenmesi**

Konstrüktif geliştirme sürecinin tüm aşamalarındaki başarı, ödev tarifinin içeriğinin başarısıyla doğru orantılı olarak görülmektedir. Ödevin tarifinin yapılması amacı ile aşağıdaki kriterlerden yola çıkılmıştır. Aracın temel maksadı, Shell Eco-marathon tarafından düzenlenen verimlilik yarışmasında prototip benzinli kategoride yarışmaktır. Aracın direksiyon sistemi ve aktarma sistemlerinin tasarımı büyük oranda tamamlanmıştır. Tasarlanan gövde bu sistemleri en uygun seviyede bir araya getirmelidir. Bunun yanında aracın tasarımı ile ilgili diğer kriterler tasarım sürecine kısıt getirmemesi amacıyla ödev tarifinde bahsedilmemiştir ve ödevin tarifi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

“ Shell Eco-marathon yarışmasında prototip benzinli kategoride yarışacak araç için gövde tasarımı ”

### 2.1.3.2 İstekler listesinin hazırlanması

İstekler listesinde istekler gruplandırılmıştır ve kesin istekler (K) , arzu tipi istekler (A) harfleri ile temsil edilmiştir.

İstek Türü	İstekler
K	Sürücü ile aracın ön bölmesi arasında en az 100 mm mesafe bulunmalıdır.
K	Gövdenin dış yüzeyindeki keskin köşeler 50 mm yarıçapından büyük olmalıdır.
K	Aerodinamik verimliliği artıracak hareketli yüzeyler bulunmamalıdır.
K	Araç içerisinde sürücüye zarar verebilecek keskin yüzeyler bulunmamalıdır.
K	Roll bar sürücü kaskının en az 50 mm üzerine uzanmalıdır.
K	Roll bar 3 eksenden uygulanacak 700 N kuvvete dirençli olmalıdır.
K	Sürücü araç içerisinden 10 saniye içerisinde çıkabilmelidir.
K	Araç yüksekliği 1000 mm'den az olmalıdır.
K	Araç iz genişliği en az 500 mm olmalıdır.
K	Yükseklik/İz genişliği 1.25 değerinden az olmalıdır.
K	Aks mesafesi 1000 mm üzerinde olmalıdır.
K	Araç genişliği 1300 mm'den az olmalıdır.
K	Araç uzunluğu 3500 mm'den az olmalıdır.
K	Araç ağırlığı maksimum 140 kg olmalıdır.

**Çizelge 2.2** : Shell Eco-marathon tarafından belirtilen kesin istekler.

İstek Türü	İstekler
K	Gövdenin toplam ağırlığı 16 kg'dan hafif olmalıdır.
K	Gövde tasarımı 160 cm boy ve 53 kg ağırlığında bir sürücü için uygun olmalıdır.
A	Maksimum 168 cm boy ve 50 kg ağırlığında bir sürücü için uygun olmalıdır.
A	Gövde tasarımı monokok veya yarı monokok gövde durumuna uygun olmalıdır.
A	Gövdenin toplam uzunluğu 3000 mm'den uzun olmamalıdır.
K	Gövde hacmi tekerlekler dâhil olmak üzere tüm alt sistemleri kapsamalıdır.
K	Gövde tasarımı 20 inç teker çapına ve uygun olmalıdır.
A	Gövde tasarımı 1.35 inç ve 1.75 inç arasındaki teker genişliklerine uygun olmalıdır.
A	Gövde alt kabuk ve üst kabuk olarak iki parçadan oluşmalıdır.
K	Sürücü görüşü Macaw 2 aracından iyi olmalıdır.

**Çizelge 2.3 :** Facilis Otomobil Takımı tarafından belirlenen istekler

#### 2.1.4 Faz I

Bu adım Fonksiyonel Sentez başlığıyla sistematik konstrüksiyonun ikinci ve en önemli adımıdır. Bu fazda etkili bir sistematik yaklaşım için aşağıda gösterilen adımların takip edilmesi tavsiye edilmiştir.

1. Temel prensip veya fonksiyonun tanımlanması
2. Genel anlamda fonksiyon strüktürünün teşkili
3. Ayrıntılı fonksiyon strüktürünün teşkili

Geliştirilmeye başlanılan yeni bir sistemin tasarımında ödevin özünü temsil eden temel fonksiyon istekler listesinin içerisinde saklıdır ve temel fonksiyona ulaşmak yeni geliştirilen bir konstrüksiyon için son derece önemlidir. Böyle bir sistemde, sistem için



birinci derecede önem taşıyan temel büyüklüğe ait fonksiyonel ilişkiler düzene bakılmaksızın alt alta yazılır. Daha sonra fonksiyonel ilişkiler bir akış şeması oluşturacak şekilde sıralanır. Fakat geliştirme konstrüksiyonlarında öncelikle mevcut sistem ve bunun alt sistemleri analize tabi tutulmalı ve yeni sistemin bu fonksiyonları ile karşılaştırma yapılarak devam edilmelidir. Macaw 3 aracının Macaw serisinin devamı niteliğinde bir araç olduğu düşünüldüğünde Macaw 3 aracı için gövde tasarımı çalışmasının da bir geliştirme konstrüksiyonu olduğu görülmüştür.

Macaw 2 aracı ve Macaw 3 aracı ile ilgili analiz çalışmalarında Bölüm 3’de ayrıntılı olarak bahsedilecektir. Fakat analize tabi tutmak amacı ile Macaw 2 aracının tasarım çalışmaları incelendiğinde yeterli CAD dosyalarına ulaşılamamıştır. Tasarım çalışmalarında CAD dosyalarının arşivlenmesi konusunda takım içerisinde koordinasyon eksikliği gözlenmiştir ve devam eden ve bundan sonra süre gelmesi planlanan tasarım süreçlerinde bu problemle karşılaşmamak amacı ile “CAD dosyalarının oluşturulması ve arşivlenmesi” hakkında bir sistematik oluşturulmuştur.

Bu sistematik üzerine Macaw 2 aracının CAD dosyaları yeniden düzenlenmiştir ve parçalara ait tasarımcı, malzeme bilgisi, üretim yöntemi “BOM (Bill of Materials)” adlı Microsoft Excel programı üzerinde oluşturulan dosya içerisinde kayıt altına alınmıştır. CAD dosyaları ise yeniden isimlendirilerek daha önce takım adına oluşturulmuş Onedrive üzerinde çalışan bulut ortamına aktarılmıştır.

## **2.1.5 Faz II**

Konstrüksiyon Sistematiğinde ikinci faz niceliksel konstrüksiyon fazıdır. Bu faz iki adımdan oluşmaktadır. Fazın birinci adımını geometrik şekillendirme başlığı altında sistemin ve alt sistemlerin geometrik olarak boyutlandırılması, kullanılacak malzeme türlerinin seçilmesi, imalat şartlarının düşünülmesi konuları oluşturmaktadır. Teknik ve ekonomik değerlendirme başlıklı ikinci adımda ise geliştirilen sistemin önceki durumu ve benzerleri ile ilgili karşılaştırma yapılacak ve yapılan geliştirilmeler ekonomik olarak değerlendirmeye tabi tutulacaktır.

### **2.1.5.1 Ürün yaşam döngüsü (PLM) çalışması**

Product Lifecycle Management (PLM) Türkçe çevirisi ile Ürün yaşam döngüsü özetle üzerinde çalışılan ürünün tüm mühendislik, üretim, servis, kalite, kontrol, dokümantasyon aşamalarının internet ortamında saklı tutulması ile ürün üzerinde çalışma gösteren tüm çalışanların ürünün geçirdiği aşamalara eş zamanlı ulaşımının sağlanmasıdır. Bu sayede ürün üzerinde çalışma gösteren departmanların aynı fiziksel ortamı paylaşması zorunluluğu ortadan kaldırılmış olur.

İTÜ Facilis Otomobil takımı, 2012 yılından itibaren araç üretmektedir. Yapısı itibarıyla bir öğrenci takımı olmasına rağmen geçmiş tecrübeler değerlendirildiğinde bir Ürün Yaşam Döngüsü Sistematiği uygulanması gerektiği kararlaştırılmıştır. Bu sistematiğin gerçekleştirilmesi adına tez çalışması boyunca uygulanmış ve daha sonraki projeler adına uygulanması tavsiye edilen adımlar aşağıdaki gibidir.

#### **CAD dosyalarının arşivlenmesi**

CAD dosyaları takım için açılmış olan bulut ortamında Sistem Yerleşimi adlı klasörün içerisinde saklanmaktadır. Üzerinde çalıştığımız Macaw 3 adlı aracın çalışması yapıldığı montaj dosyası “mcw3\_sy” şeklinde adlandırılmıştır. Macaw 3 aracının alt montajları olan aktarma sistemi, direksiyon sistemi, elektronik sistem montajları ise yine başlıklarının baş harfleri ile kodlanmıştır. Gövdeye ait olan karbon fiber parçalar ise kapsayıcı olması adına mcw3\_sy adlı büyük montaj dosyasının içerisinde saklanmıştır. Dosyaların geriye yönelik arşiv kaydının oluşması adına iki haftada bir olmak üzere yedekleme yapılmış ve adının sonuna yedeklendiği tarihi yıl\_ay\_gün olacak şekilde not alınmıştır.

Sistemin güncel tüm parçaları ve parçaların konumları “mcw3\_sy\_güncel” klasörü içerisinde saklanmıştır. Parçalar ile ilgili tasarımcı, parça tanımı, kütlesi, üretim yöntemi, malzeme bilgisi, alt ve üst montaj bilgileri ise “Bill of Materials (BOM)” olarak adlandırılan dosya içerisinde listelenmiştir. Tasarımcılardan sorumlu oldukları parçaların sistem yerleşimi klasörü içerisinde CAD dosyalarını ve “BOM” dosyası içerisinde parça bilgilerini güncel tutmaları istenmektedir.

### **Sistem yerleşimine yeni parça eklenmesi**

Sistem Yerleşimine yeni parça eklenmesi sırasında izlenmesi gereken adımlar aşağıdaki gibidir.

1. “mcw3\_sy\_güncel” dosyası indirilir.
2. “mcw3\_sy\_güncel” dosyası içerisinde “mcw3\_sy.prt” dosyası Siemens NX programı ile açılır.
3. Assemblies / Create New seçeneği seçildikten sonra tasarıma başlanmalıdır.
4. Tasarımın, bulunduğu sistem montajı içerisine çizilmesine dikkat edilmelidir.
5. Tasarım tamamlandıktan sonra “remove parameters” komutu kullanılarak tasarım tek body haline getirildikten sonra diğer tüm bileşenleri silindikten sonra kaydedilmelidir.
6. Daha sonra yeni eklenen dosya ve üst montaj dosyaları ortak bulut klasörüne yüklenmelidir.
7. Tasarımcılara “remove parameters” komutunu kullanmadan önce kendi tasarımlarının tasarım adımlarını içeren dosyayı farklı kaydet komutu ile kaydetmeleri önerilir.

### **Sistem yerleşiminde var olan parçanın düzenlenmesi**

Sistem Yerleşiminde var olan parçanın düzenlenmesi sırasında izlenmesi gereken adımlar aşağıdaki gibidir.

1. “mcw3\_sy\_güncel” dosyası indirilir.
2. “mcw3\_sy\_güncel” dosyası içerisinde “mcw3\_sy.prt” dosyası Siemens NX programı ile açılır.
3. Düzenlemek istenilen parça ürün ağacı bölümünde çift tıklandıktan sonra gerekli yapısal değişiklikler uygulanabilir.

4. Tasarım tamamlandıktan sonra “remove parameters” komutu kullanılarak tasarım tek body haline getirilmeli, diğer tüm bileşenleri silindikten sonra kaydedilmelidir.

#### **Sistem yerleşimine parça gönderimi ile ilgili dikkat edilmesi gereken diğer hususlar**

1. Parçalar arasında montaj ilişkisi vermek amacı ile “Assembly Constraints” komutu kullanılmamalıdır.
2. Parçaların konumu değiştirilmek istediğinde “Move Object (Ctrl+T)” komutu kullanılmalıdır. “Move Component” komutu kullanılmamalıdır.
3. Sistem yerleşiminin görünümü açısından parçaların renklendirilmesi önemlidir. Renklendirme için “Assign Feature Color” komutu kullanılmalıdır. Keskin renkler ve gri renk tonları kullanılmamalıdır.
4. Orijinal parça numaralarının son hanesinde çift rakamlar kullanılmıştır. Tek rakam ile biten parça numaraları, o parçanın orijinal bir parçanın simetrigi olduğu anlamına gelmektedir.

#### **2.1.5.2 Sürücü yerleşimi**

Shell Eco-marathon tarafından belirlenen en az sürücü ağırlığı tüm teçhizatlarıyla birlikte 50 kg’dır. Sürücü ağırlığı 50 kg altında kaldığında araca ağırlık eklenmektedir. Üzerine çıktığında ise toplam ağırlığa ekleneceği için Macaw 3 istekler listesinde belirtildiği gibi sürücü ağırlığı 50 kg olarak alınmıştır. Yine istekler listesinde belirtildiği üzere maksimum sürücü boyu 168 cm olarak alınmıştır. Siemens NX programında Menu/Tools/Human Modelling/Human adımları takip edildikten sonra montaj dosyasına insan modeli eklenebilmekte ve istenilen özellikler verilebilmektedir. Sürücü eklendikten sonra şekilde görüldüğü gibi eklenen insan modeli sürüş pozisyonuna getirilmiştir.

#### **2.1.5.3 Direksiyon sistemi yerleşimi**

Macaw 3 montaj dosyası oluşturulurken ana koordinat takımı direksiyon sistemi baz alınarak belirlenmiştir. Teker dönme eksenini “y” eksenini, araç yönünün tersi “x” eksenini, yer çekimi ivmesinin ters yönü ise “z” eksenini olarak belirlenmiştir. Bu sayede araç boyutlandırması ile ilgili temel bilgilerin (aks aralığı, iz genişliği, araç toplam boyu, yüksekliği) rahatlıkla bulunması amaçlanmıştır.

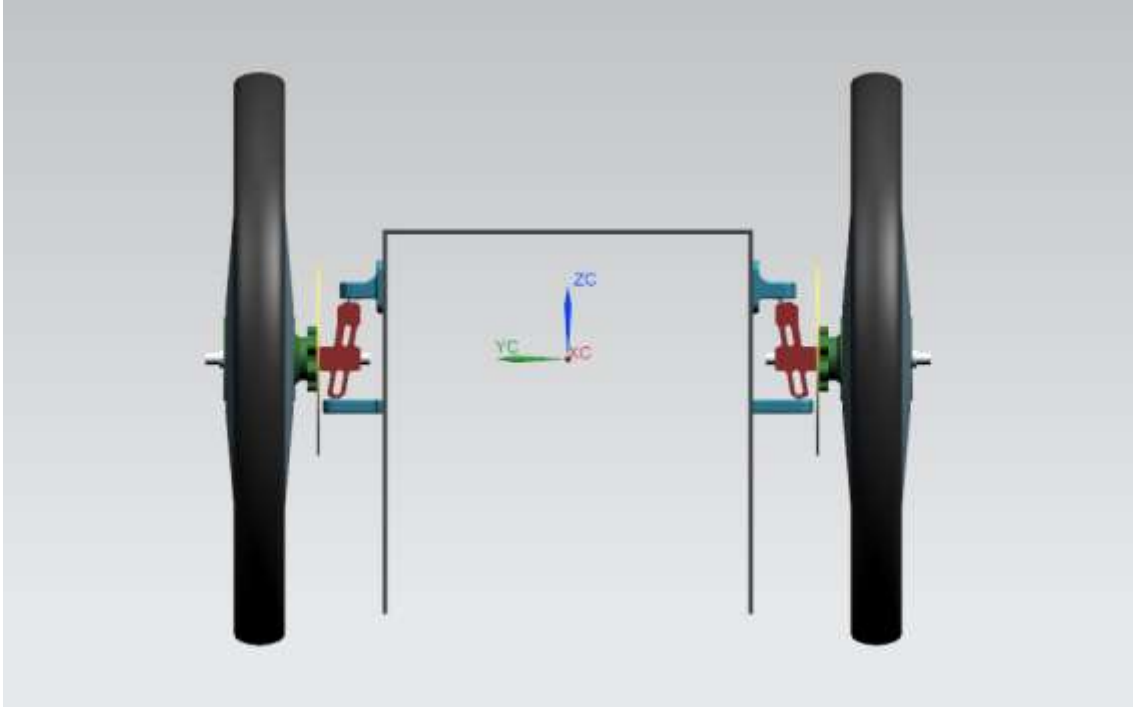
Macaw serisinin tasarımında aracın sağ sol olarak yönlendirilmesi önde bulunan iki tekerlek aracılığıyla sağlanmaktadır. Direksiyon sistemi tasarım tercihleri verimlilik temel amaç alınarak belirlenmiştir ve aşağıdaki gibidir.

1. Teker ekseninin arkasında olan üç çubuk mekanizması tercih edilmiştir.
2. Ackerman geometrisi kullanılmış ve aracın tahrik kolu açısı  $76,25^\circ$  olarak hesaplanmıştır.
3. King-pin açısı 10 derece ve kaçıklık ofseti 28 mm olarak belirlenmiştir.
4. Direksiyon sisteminin tasarımında Kaster, kamber ve toe açıları kullanılmamıştır.

Direksiyon sisteminin tasarım tercihleri ve mühendislik hesaplamaları 2018 yılında hazırlanan “Benzinli Hafif Taşıtların Dinamik Modelinin Oluşturulması ve Yol Simülasyonu” adlı çalışmada detaylı olarak işlenmiştir.

Direksiyon sisteminin gövde ile bağlantısının sağlanabilmesi için kutu adı verilen “ters U” kesitli ve alt kısımlarından gövdeye bağlantısı sağlanan parçanın tasarımı yapılmıştır. Bu parçanın sandviç yapılı karbon fiber malzemeden imal edilmesi tasarlanmıştır. Gövdeye yapıştırma bağlantısı ile bağlanan kutu parçasının fonksiyonları aşağıdaki gibidir.

1. Akson tutucuların bağlanması için elverişli bir yüzey oluşturmaktadır.
2. Direksiyon mili yataklarının bağlantısı için elverişli bir yüzey oluşturmaktadır.
3. Gövdeye bağlandığında oluşan kare profil yapısı sayesinde ön tekerlerden gelen kuvvetleri kendi yapısı içerisinde karşılamaktadır. Böylece gövdenin rijitliğine katkı sağlamaktadır.



**Şekil 2.1** : Montaj dosyası içerisinde direksiyon sistemi yerleşimi

#### **2.1.5.4 Aktarma sistemi yerleşimi**

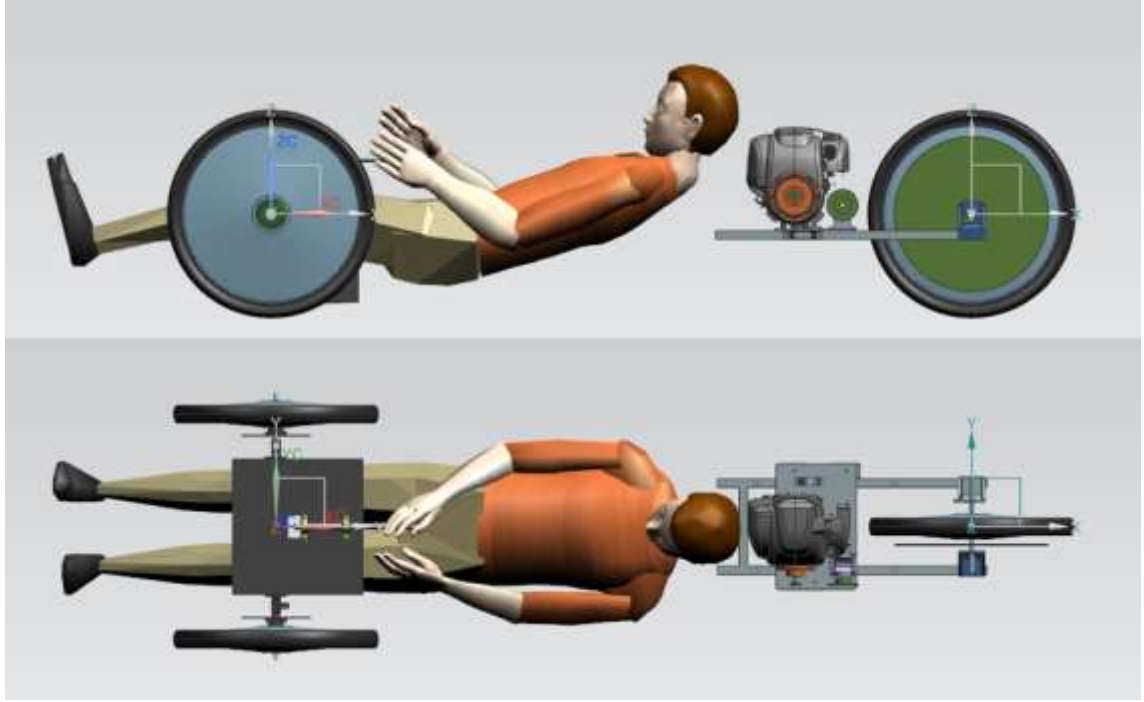
Aktarma sistemi yerleşiminde arka teker ekseni ana koordinat takımından 1600 mm uzağa yerleştirilmiştir. Böylece araç aks mesafesinin 1600 mm olarak tercih edildiği görülmektedir. Aks mesafesi belirlenirken olabilecek en az aks mesafesi tercih edilmiştir. Bu yerleşimin sebebi kompakt bir araç tasarlamaktır. Shell Eco-marathon yarışları bir verimlilik yarışması olduğundan hafiflik son derece önemlidir. Bu sebeple sistemleri birbirlerine olabildiğince yakın konumlandırmak sistemler arasında oluşan momentleri azaltacağından daha hafif sistemler tasarlamak mümkün olacaktır. Ayrıca gövde yapısının küçük olması hava sürtünme direncini düşüreceğinden verimlilik artışı sağlanacaktır.

Macaw serisinin aktarma sisteminin tasarımında hafiflik amaçlandığından tahriğin tek tekerden verilmesi kararlaştırılmıştır. Verimlilik esas alınarak belirlenen aktarma sistemi tasarım tercihleri aşağıdaki gibidir.

1. Zincirli aktarma sistemi tercih edilmiştir.
2. İki kademeli aktarma sistemi kullanılmıştır.
3. Birinci aktarma oranı 2 ikinci aktarma oranı 6 olmak üzere toplam aktarma oranı 12 olarak belirlenmiştir.

4. Tüm aktarma organlarının, kare kesitli alüminyum malzemeden imal edilmiş şasi üzerine montajı yapılmıştır.

Aktarma sisteminin tasarım tercihleri ve mühendislik hesaplamaları 2019 yılında hazırlanan “Benzinli Hafif Taşıtlar için Aktarma Sistemi Tasarımı, Güzergâh Simülasyonu ve Optimizasyonu” adlı çalışmada detaylı olarak işlenmiştir.

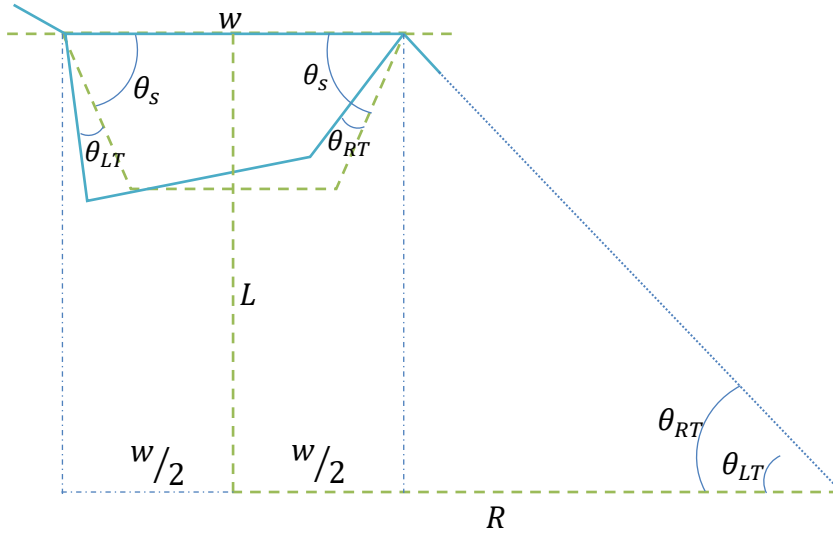


**Şekil 2.2** : Aktarma, direksiyon sistemleri ile sürücüyü içeren sistem yerleşimi görüntüsü

#### **2.1.5.5 Hareketli parçaların taradığı hacmin belirlenmesi**

Gövde tasarımının diğer tüm sistemleri kapsamı istenmektedir ve diğer tüm sistemlerin montajı gövde üzerine yapılacaktır. Gövde üretimi oldukça pahalı olduğundan ve uzun bir süreci içerdiğinden gövde tasarımında yapılacak bir hata proje için geri dönüşü olmayan sonuçlar doğurabilmektedir. Bu sebeple tasarıma başlamadan önce tüm çalışma şartları düşünülmelidir. Bu şartlardan biri de parçaların hareketli olmalarıdır. Aktarma sistemi incelendiğinde tüm hareketli parçaların kendi eksenleri etrafında döndüğü bu sayede kendi hacminden farklı hacimleri taramadığı görülmüştür. Fakat direksiyon sisteminde bu durum farklıdır. Aracın dönme durumunda akson ekseninden olmak üzere birçok parça hareket etmekte ve belirli bir hacmi taramaktadır. Bu hacmin bulunabilmesi için hareketli parçaların aracın sağa ve sola dönüşlerde maksimum bulunduğu konum 3 boyutlu model sayesinde simüle edilmiştir. Dönme açılarının bulu-

nabilmesi için Şekil 2.3'te gösterilen Ackerman geometrisi kullanılmıştır. Aks mesafesi 1600 mm, iz genişliği 516 mm, dönme yarıçapı 6500 mm alındığında dönme açıları  $13.32^\circ$  ve  $14.38^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Parçaların maksimum konumları Şekil 2.4'te gösterildiği gibi 3 boyutlu model üzerinde sabitlenmiştir ve gövde tasarımında bu konumlar da dikkate alınacaktır.

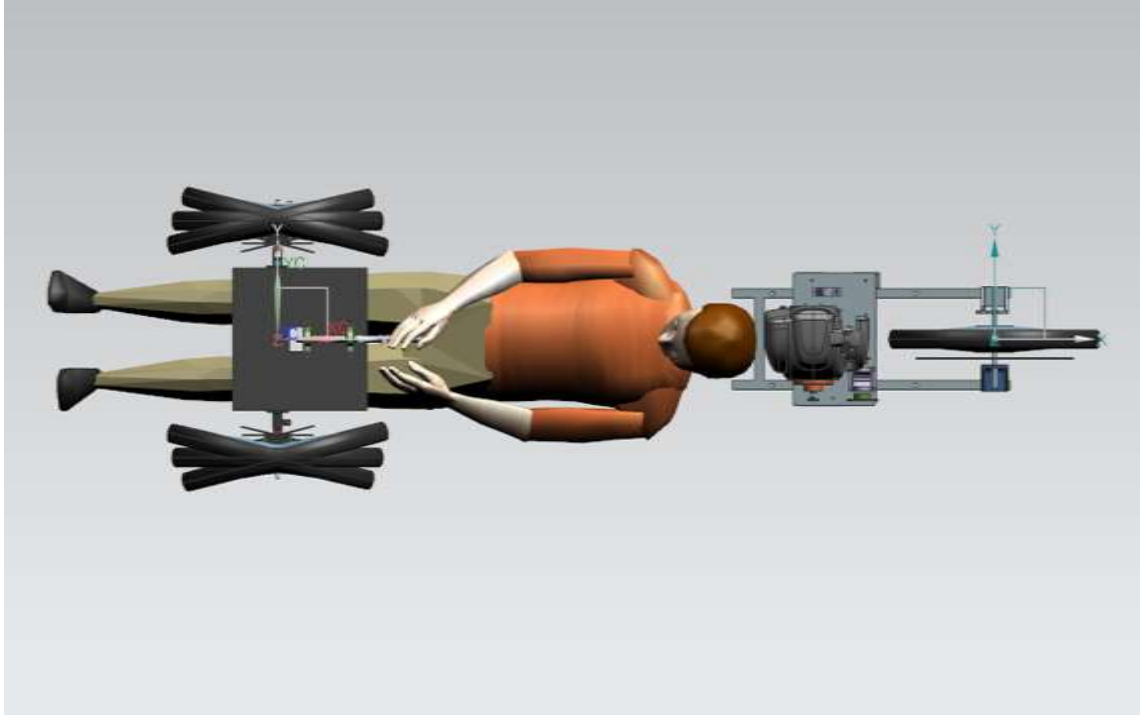


Şekil 2.3 : Ackerman geometrisi

$$\theta_{LT} = \tan^{-1} \frac{L}{R + \frac{w}{2}} \quad (2.1)$$

$$\theta_{RT} = \tan^{-1} \frac{L}{R - \frac{w}{2}} \quad (2.2)$$



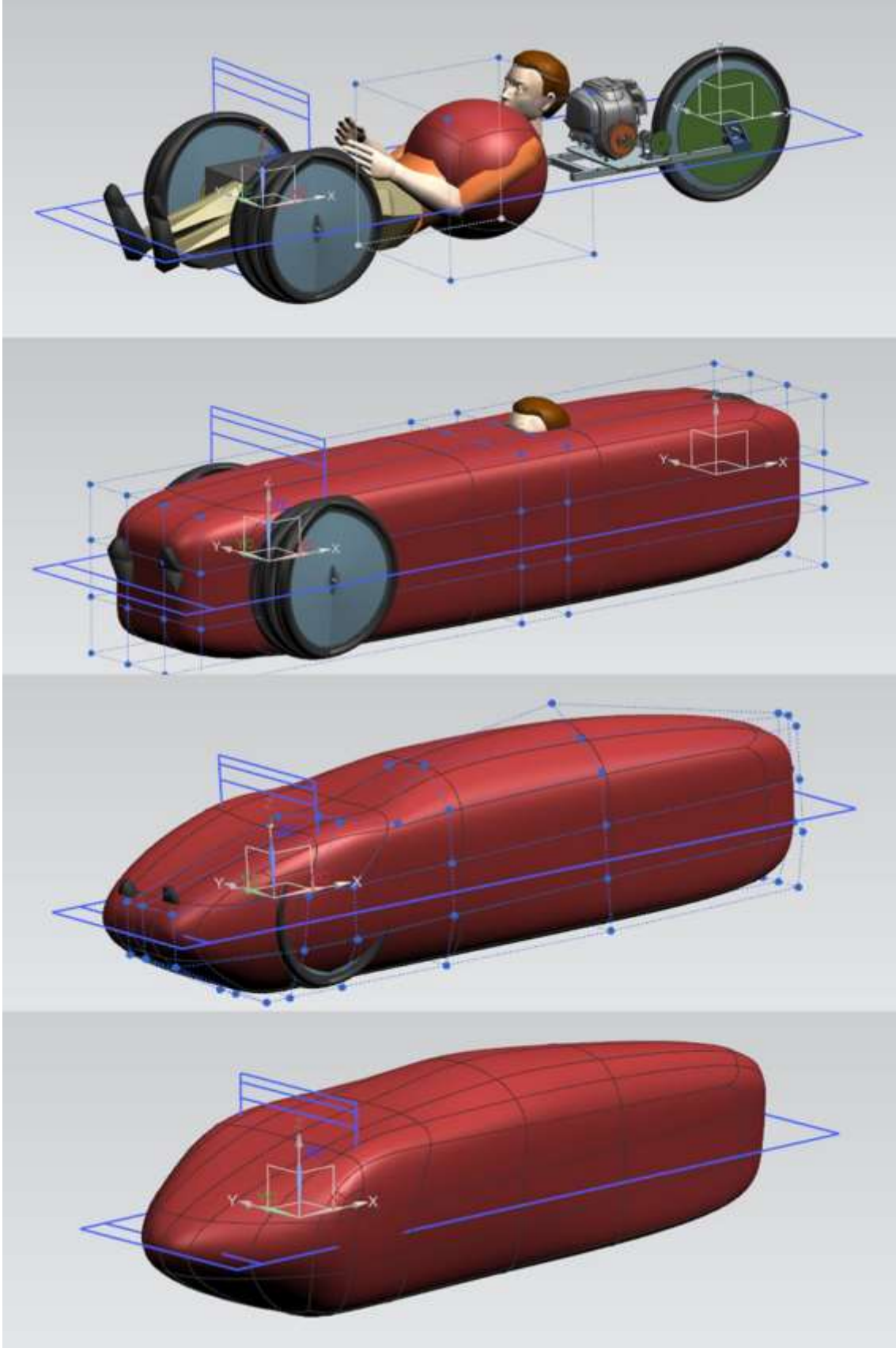


**Şekil 2.4 :** Ön tekerlerin dönme durumundaki maksimum konumları

#### **2.1.5.6 Kabuk tasarımı**

Tüm ilgili sistemler 3 boyutlu modele eklendikten sonra istekler listesi tekrardan gözden geçirilmiştir ve gerekli sınırlandırmalar modele işlenmiştir. Alt sistemlerin montajı ve sürücü, gövdenin iç hacmini belirlerken istekler listesinde verilen boyut sınırlandırmaları gövdenin dış hacminde belirleyici olmaktadır.

Kabuk tasarımı Siemens NX programında Shape Studio modülü ile yapılmıştır. Şekil 2.5’de sınırlandırmalardan yola çıkılarak ve istekler listesine uyumlu ilk modelin oluşturulması aşamalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Aşamalı kabuk tasarımı

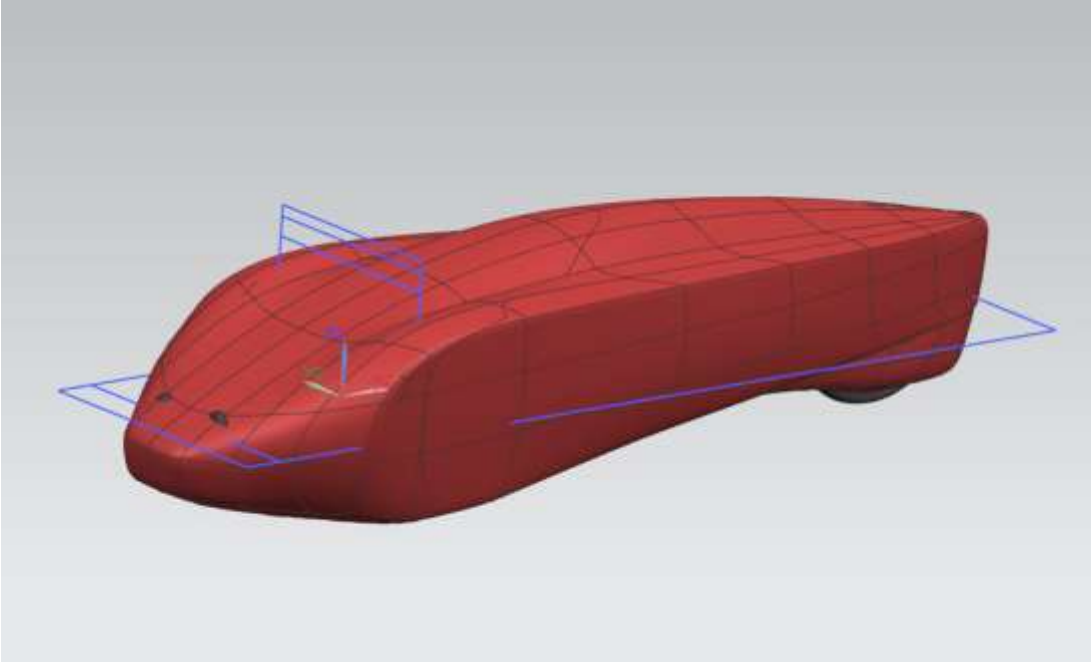
### 2.1.5.7 İşlevsel tasarım

Kabuk tasarımında son gelinen aşama istekler listesine uygundur fakat aracın tüm görünüşünü belirleyen kabuğun tasarımında estetik özelliklere de önem verilmektedir. Bu aracın Macaw serisine ait bir araç olduğu da düşünüldüğünde belirli karakteristik özellikleri taşıması gerekmektedir. Facilis Otomobil Takımı Macaw serisi ile Shell Eco-marathon yarışlarında özgün bir tasarım serisi oluşturmuştur. Nitekim 2019 Londra yarışına katılan Macaw 2 aracı etkinlik içerisinde oldukça beğeni kazanmıştır ve aracımızın fotoğrafı 2020 Londra’da düzenlenecek yarışma için gönderilen tüm mallerde kapak fotoğrafı olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.6).



**Şekil 2.6 :** Kapak fotoğrafı olarak kullanılan Macaw 2 aracı

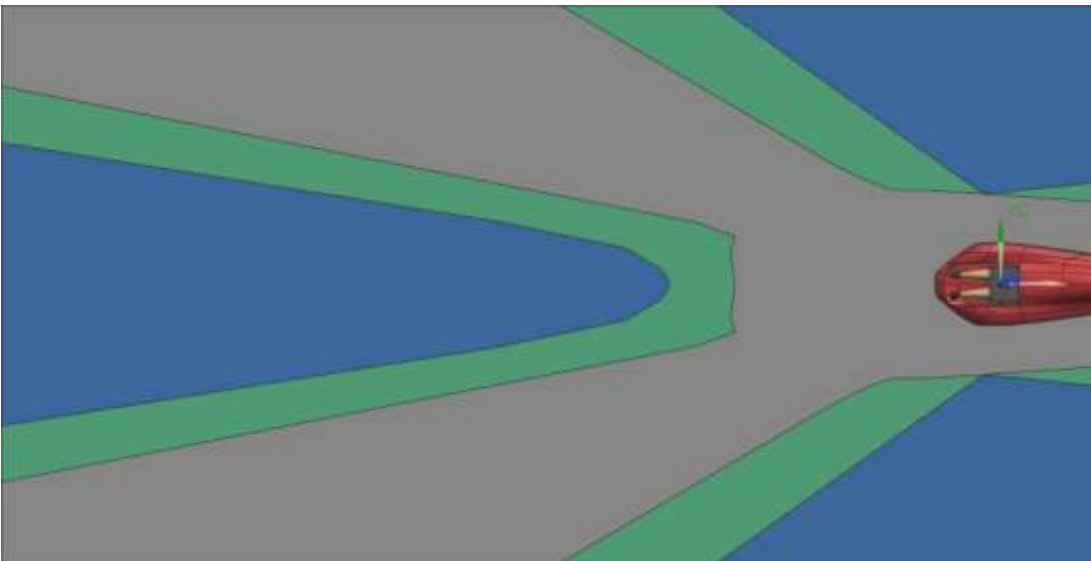
Macaw serisinin karakteristik özellikleri burun ve omuz bölgeleri ile arka tekerin ve aktarma sisteminin mesnetlenmesi amacı ile oluşturulmuş olan arka alt bölgedir. Macaw serisinin karakteristik özelliklerinin korunması amacı ile kabuk tasarımına devam edilmiştir. Kabuk tasarımı ile ilgili gelinen son aşama Şekil 2.7’de görüldüğü gibidir.



**Şekil 2.7 :** Kabuk yüzey tasarımının son durumu

#### **2.1.5.8 Görüş analizi**

2019 Londra yarışında Macaw 2 aracının görüş açıklıklarının yeterli olmadığı görülmüştür. Sürücü yol güzergâhını ve çevresindeki araçları görmekte zorlanmıştır. Yarış esnasında geçici bir çözüm olarak araç üzerine kamera yerleştirilmiş ve yol görüntüsü sürücüye ekran aracılığı ile yansıtılmıştır. Macaw 3 aracının görüş açıklıkları belirlenirken görüşün yeterli olması istendiğinden 3 boyutlu model üzerinde her iki aracın da görüş analizi yapılmıştır.



**Şekil 2.8 :** Macaw 3 ve Macaw 2 araçlarının görüş alanları analizi

Görüş analizinde 5 metre pist genişliği ve karşılaştırma yapılabilmesi amacı ile sürücünün göz hizasından itibaren öne doğru 10 metrelik alan incelemeye alınmıştır. Şekil 2.9'da görülen fotoğrafta mavi alan Macaw 2 aracının alanlarını, yeşil alan Macaw 3 ile birlikte gelen ilave alanları göstermektedir.

Öncelikle Macaw 2 aracının analizi yapılmıştır, ön görüş alanı  $9.5183 m^2$  yan görüş alanları toplam  $7.4652 m^2$  olarak hesaplanmıştır. Macaw 3 aracının görüş açıklıkları bu analiz sonucunda belirlenmiştir ve analiz sonucunda ön görüş alanı  $15.1094 m^2$  yan görüş alanları toplam  $11.5296 m^2$  olarak hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarına göre  $50 m^2$ 'lik alan içerisinde Macaw 3 aracı  $26.639 m^2$  görüş alanı ile Macaw 2 aracından %56,85 fazla görüş alanına sahiptir.

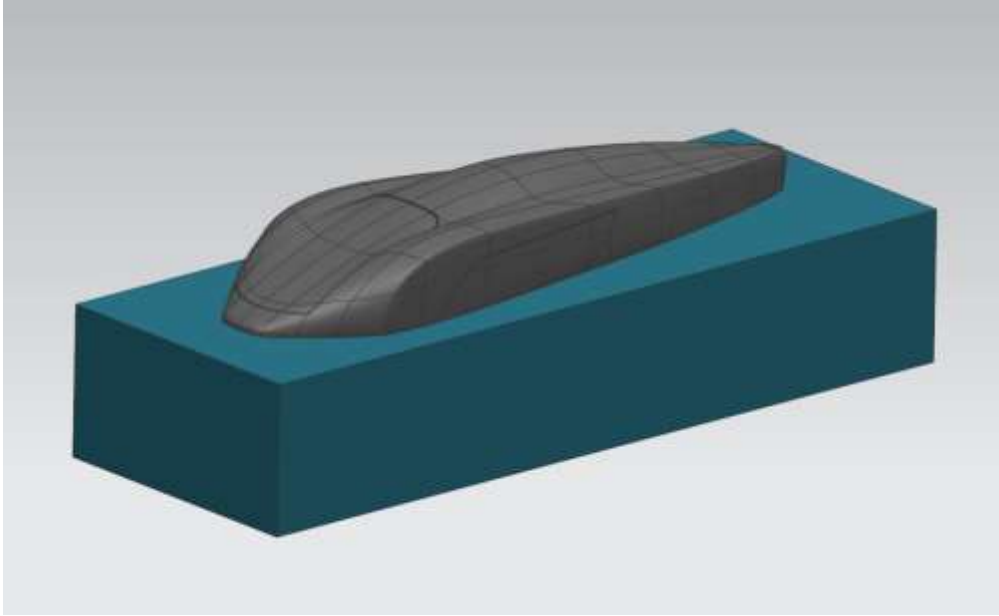


**Şekil 2.9 :** Tasarımın nihai görünüşü.

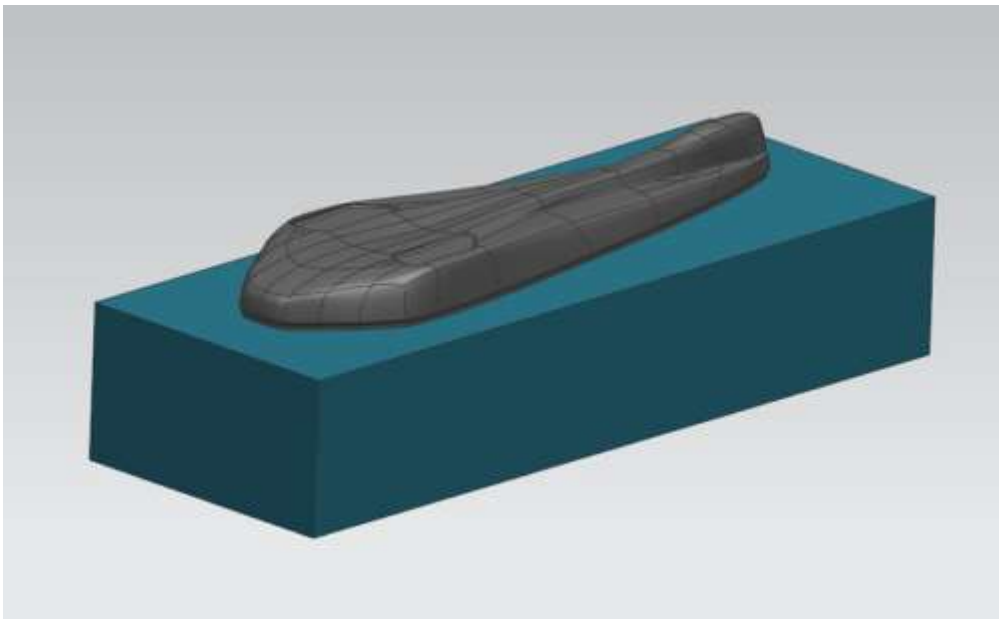
#### **2.1.5.9 Model tasarımı**

Aracın gövdesi alt ve üst olmak üzere iki parçadan ve karbon fiber malzemeden üretilmesi planlanmaktadır. Facilis Otomobil Takımı kendi atölyesinde karbon fiber parça imalatı yapabilmektedir. Bu sebeple aracın gövdesinin üretimi için model ve kalıp tasarımları da yapılmıştır. Model strafordan talaşlı imalat yöntemi ile üretilecektir. Bu yüzden iç köşelerde keskin yüzeyler bulunmamalıdır. Strafor deforme olmaya oldukça müsait bir malzeme olduğundan dolayı imalat sırasında zarar görmemesi için dış köşelerde de yumuşak geçişler kullanılmıştır. Model tasarımından önce montaj sırasında

kullanılmak üzere kutu parçasının bağlandığı yüzeylerde referans oyuntuları oluşturulmuştur. Model tasarımı alt ve üst olmak üzere iki parça olarak tasarlanmıştır. Üst model şekilde görüldüğü gibi camların konumlarının belirlenmesi ve montajının yapılabilmesi için cam oyuntularına sahiptir. Üst kabuk parçası alt kabuk parçasının üzerine gelecek ve bir kapak olarak kullanılacaktır. Bu sebeple alt kabuk modeli oluşturulurken üst kabuğun geleceği yüzeye özel kesitli bir oyuntu verilmiştir. Bu sayede hem kapak olarak kullanılan üst kabuk rahatlıkla çıkarılıp takılabilecek hem de bu eğimli kesit imalattan kaynaklı boyutlandırma hatalarını tolere edecektir.



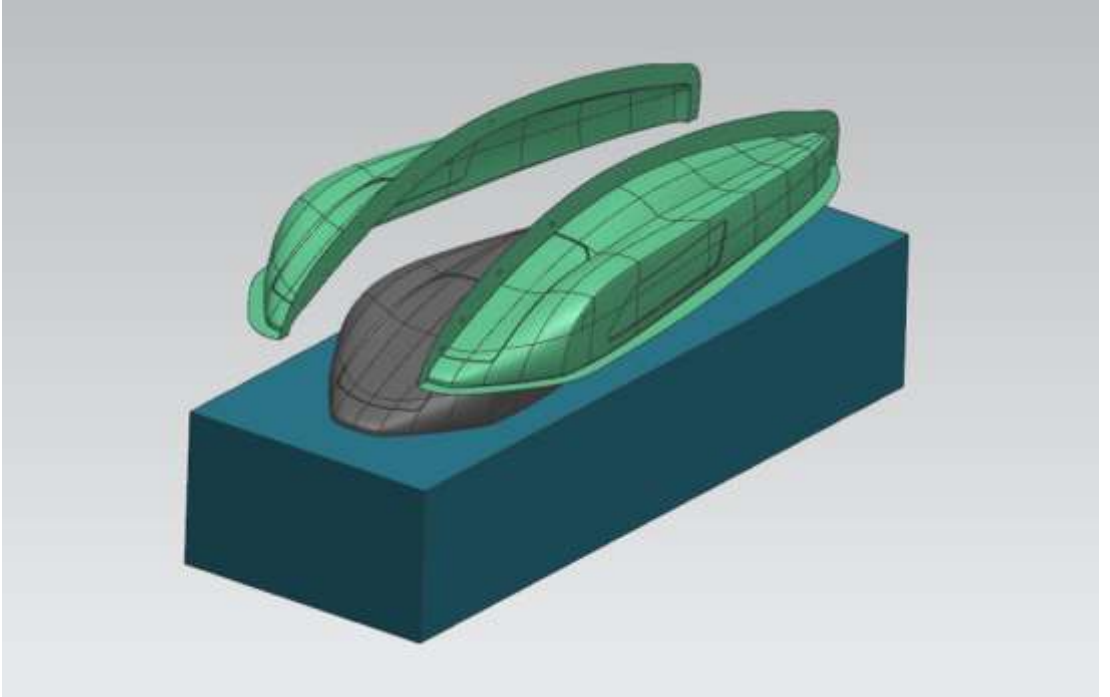
**Şekil 2.10** : Üst model tasarımı



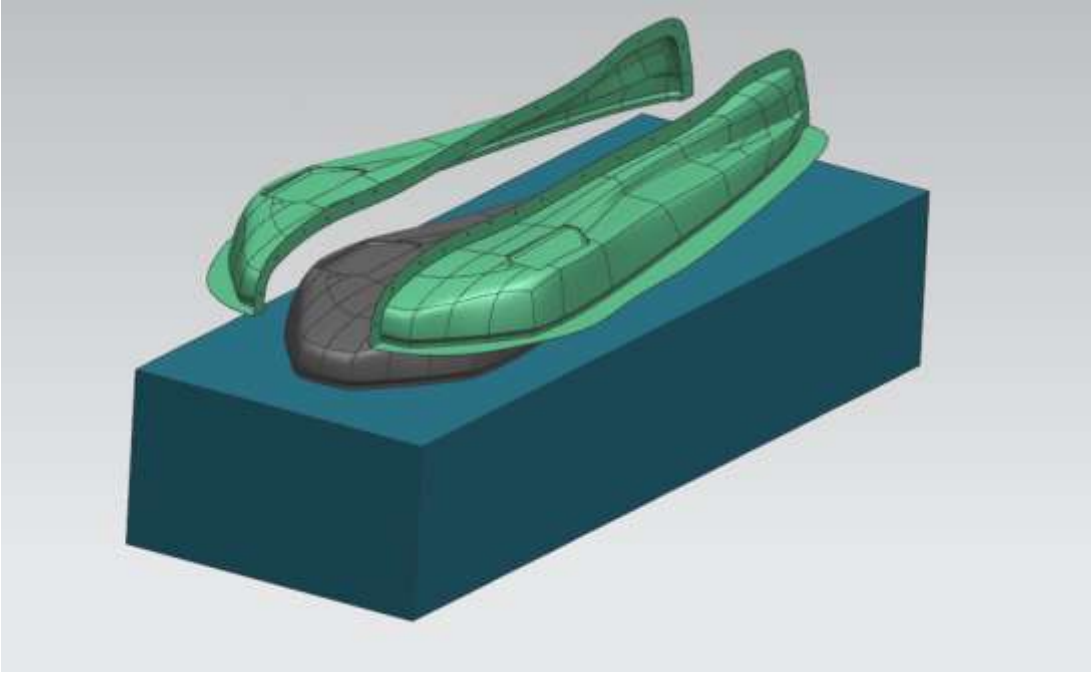
**Şekil 2.11** : Alt model tasarımı

### 2.1.5.10 Kalıp tasarımı

Strafordan oluşturulan model yüzeyini sağlamlaştırmak amacıyla ince bir katman olarak model macunıyla kaplanarak yüzeyi zımparalanacaktır. Daha sonra model üzerinde elle yatırma yöntemi ile cam yünü malzemeden kalıp üretilecektir. Kalıbın model yüzeyinden ayrılması doğru teknikler kullanılmadığında oldukça zor olmaktadır. Kalıbın model yüzeyinden sorunsuz çıkarılabilmesi adına yüzeyler arasında yüzey ayrıştırıcı kimyasallar kullanılmaktadır. Her ne kadar yüzey ayrıştırıcılar etkili olsa da kalıbın hem model yüzeyinden hem de daha sonra üretimden sonra üretilen parçanın çıkarılabilmesi adına kalıp tasarımı önem taşımaktadır. Kalıp tasarımında en önemli husus kalıbın ayrılması yönü düşünüldüğünde ayrılma eksenini yüzeylere dik olmalıdır. Model ile kalıp arasındaki ilişki yapıştırma bağlantısı şeklinde davranmaktadır. Bilindiği üzere yapıştırma bağlantıları kayma gerilmelerine karşı son derece mukavimdir bu nedenle kalıbın ayrılabilmesi için kalıp tasarımında kayma gerilmelerinin oluşması engellenmelidir.



Şekil 2.12 : Üst kalıp tasarımı



**Şekil 2.13 :** Alt kalıp tasarımı

#### **2.1.5.11 Islak alanların bulunması**

Akış analizi için ıslak alanların bulunması gerekmektedir. Alanlar 3 boyutlu model üzerinden Macaw 3 ve Macaw 2 araçları için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Araç damla modelinde aerodinamik (streamlined) gövdeye sahip olduğundan ıslak alan tüm gövde olmaktadır. Yapılan analizler neticesinde araç üzerinde akış ayrılması olmadığı görülmüştür. Macaw 3 aracı  $4,1932 \text{ m}^2$  ıslak alana sahip iken Macaw 2 aracının  $4,3813 \text{ m}^2$  ıslak alana sahip olduğu görülmüştür.

## **2.2 Araçta Kullanılacak Kompozit Bağlantı Elemanları**

Araçta kullanılacak olan tüm yapısal ve elektronik elemanlar ve güç aktarım organları kompozit gövdeye bağlanacaktır. Bu bağlantıların detaylı olarak incelenmesi tasarım aşamasında büyük önem arz etmektedir.

### **2.2.1 Kompozit konstrüksiyonlarında bağlama**

Kompozit malzeme içeren konstrüksiyonlarda parçalar arasındaki bağlantı ve birleştirmeler dikkat gerektiren hususlardır. Bağlantının hangi malzemeler arasında olduğu başka bir deyişle kompozit parçalar arasında olması veya kompozit parça ile metal



parça arasında olması önem arz etmektedir ve farklı iki durum olarak değerlendirilmiştir. Kompozit konstrüksiyonlarında perçin ve cıvata ile bağlama ve yapıştırma oldukça fazla kullanılan montaj türleridir.

### 2.2.1.1 Perçin ve cıvata ile bağlama

#### Yerel mukavemet kaybı

Mekanik birleştirmeli bağlantılarda malzemeler arasında düzgün bir kuvvet aktarımı hedeflenmektedir. Cıvata ve perçin ile yapılan bağlantılarda bu malzemeler birinci malzemedan gelen yüke maruz kaldığında üzerine gelen yükü delik yüzeyine aktarır ve ardından yük ikinci malzemeye iletilir. Bu durumlarda delik etrafında birbirinden farklı gerilme değerleri görülebilir ve kayıplar açığa çıkabilir. Bağlantının tasarımına bağlı olarak kayma, çekme ve yataklama hasarları meydana gelebilmektedir.

#### Kayıp faktörü

Malzemelerde bulunan delikler gerilme yığılma faktörüne sebebiyet vermektedir. Özellikle kompozit malzemelerde bulunan delikler, deliksiz hale göre mukavemette yerel azalmalara neden olur. Kayıp faktörü çekmede %40 ila %60, basmada %15 ila %50 arasındadır (Gay,2015). Basma durumunda bu değerler deliğin açık veya bir pim ile kapalı olmasına göre farklılık gösterir.

#### Delik bozulmasının nedenleri

**Gerilme yığılma faktörleri:** Metal malzemelere kıyasla kompozit laminelerde gerilme yığılmasında artma gözlenir. Laminede görülen maksimum gerilme şiddeti aşağıdaki gibi bulunur;

$$\sigma'_M = \sigma' x \left[ 1 + \sqrt{2 \left( \sqrt{\frac{E_x}{E_y}} - v_{xy} \right) + \frac{E_x}{G_{xy}}} \right] \quad (2.3)$$

$E_x$ : 0° doğrultusundaki elastiklik modülü

$E_y$ : 90° doğrultusundaki elastiklik modülü

$G_{xy}$ : kayma modülü

$v_{xy}$ : Poisson oranı

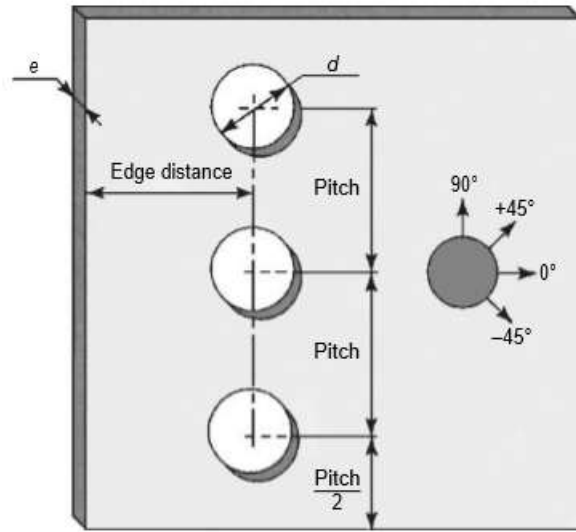
**Elyafın kopması veya hatalı hizalanması:** Delik açma işlemi esnasında elyaflarda bozulmalar ve kopmalar meydana gelmektedir. Ayrıca delik polimerizasyon işleminden önce açılırsa, elyafların hizalanmasında hatalar oluşabilir.

### 2.2.1.2 Cıvata bağlantılarında temel hasar tipleri

Cıvata bağlantılarında kompozitteki hatalardan ve aşırı yüklemekten kaynaklı hasarlar görülebilmektedir. Eğer kompozit malzemede yetersiz sayıda  $0^\circ$  katman varsa çekme kırılması görülür. Kayma kırılması ise genellikle  $\pm 45^\circ$  katmanlarının eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca kompozit parçanın kalınlığının yetersiz olduğu durumda taşıma hasarı görülebilmektedir. Yükleme tipine bağlı olarak da cıvata kırılması görülebilmektedir.

#### Bağlantının boyutlandırılması

Adım, kenar mesafesi ve kalınlık değerleri deliğin çapına bağlı olarak boyutlandırılması gereken parametrelerdir. Adım, delik çapının 4 katı ile 6 katı arasında değerler almalıdır. Delik merkezi ile parça kenarı arasındaki uzaklık olan kenar mesafesi en az delik çapının 6 katı kadar olmalıdır. Parça kalınlığı ise delik yarıçapından büyük olmalıdır.



Şekil 2.14 : Adım, kenar mesafesi ve kalınlık (Gay,2015)

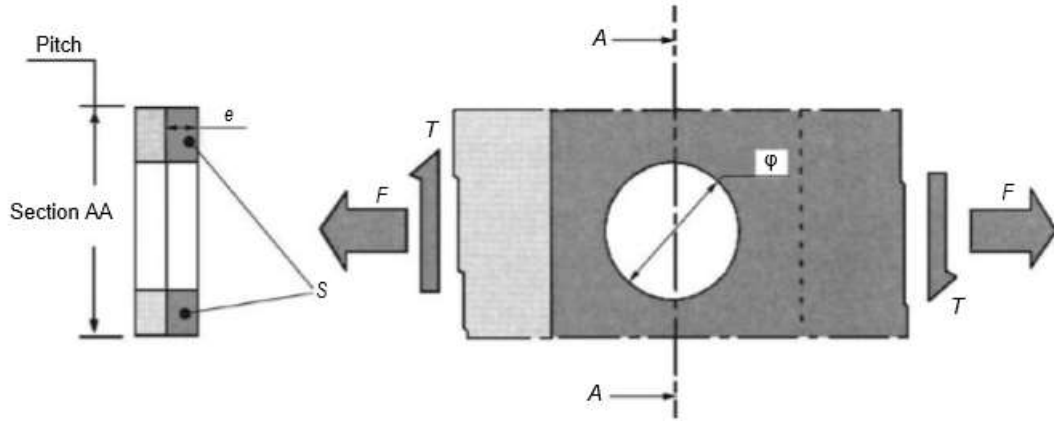
#### Artık gerilme değerinin hesaplanması

Artık gerilmeler bir deliğin mevcudiyetinden veya bir deliğin cidarındaki temas veya taşıma basıncı nedeniyle oluşabilmektedir. Bu gerilmenin hesapları aşağıdaki denklemlerle verilmiştir.

$$\sigma_{artık} = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{F}{S} + 0.2 \frac{F}{\phi x e} \right) \quad (2.4)$$

$$\tau_{artık} = \frac{1}{0.7} \times \frac{T}{S} \quad (2.5)$$

Çekme durumunda  $\alpha=0.6$ , basma durumunda ise  $\alpha=0.8$  alınır. Denklemler kullanılarak bulunan değerlerin hasara yol açıp açmadığı hasarsızlık doğrulama yöntemleri kullanılarak kontrol edilebilir.



Şekil 2.15 : Bağlantıdaki normal ve kayma yükleri (Gay, 2015)

### 2.2.1.3 Perçin bağlantısı

Perçin kullanılarak yapılacak olan kompozit bağlantılarında perçin ile kompozit laminenin galvanik uyumu önemlidir. Bağlantı boyunca perçin kullanmak mekanik dirençte kazanç sağlamaktadır ancak çözülemez bir bağlantı elde edilmiş olunur ve ağırlıkta artış gözlenir. Perçinle bağlantı yapılırken laminelerin darbe dirençleri düşük olduğundan perçin üzerine fazla darbe vurulmamasına dikkat edilmelidir ayrıca lamine kalınlıkları düşük olduğundan perçin basma altında yer alan laminenin kopma olasılığı da önem arz etmektedir.

### 2.2.1.4 Cıvata bağlantısı

Cıvata bağlantıları özellikle sandviç panellerin bağlantılarında kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda cıvatalar yeteri kadar sıkıştırılmazsa cıvata bağlantı üzerinde hareket edebilir ve sandviç kabuklarını ayıracak etkide kuvvetler doğabilmektedir. Bu nedenle cıvatanın doğru tork değeriyle sıkıştırılması önemli bir husustur. Lamineler kırılğan olduğundan cıvata kafası ve somun altında yüksek basınçları taşıyamazlar. Bu nedenle

araya metal parçalar yerleştirilmektedir ve bu şekilde temas basıncı daha geniş alana yayılmaktadır. Cıvata bağlantısını sağlamlaştırmak için yapıştırma ile birlikte kullanılabilir ancak bu durum bağlantının açılmamasına ve fazladan ağırlığa neden olur.

### 2.2.1.5 Yapıştırma

Yapıştırma kompozit içeren konstrüksiyonlarında fazlaca başvuru olan bir yöntemdir. Sızdırmazlık, yalıtım, hafiflik ve gerilmelerin büyük yüzeyler boyunca dağılımı yapıştırma yönteminin avantajlarından biridir. Genellikle epoksiler, polyesterler ve poliüretanlar yapıştırıcı olarak kullanılmaktadır ve bu yapıştırıcılar yüksek sıcaklık, rutubet ve birçok kimyasala karşı dirençlidir. Yapıştırıcı uygulanacak yüzeyleri hazırlamak için yağ giderme ve asitle temizleme işlemleri uygulanır. Birbirine yapıştırılacak parçaların malzemeleri önem arz etmektedir, farklı malzemelere sahip parçaların birleştirilmesi halinde malzemelerin ısıl genişleme farkları ve gerilme altındaki deformasyonları dikkate alınmalıdır. Birleştirilen yüzeyler üzerine gelen yükler dikkate alınması gereken bir başka husustur. Yapıştırıcı tabakada çekme gerilmesi oluşumundan kaçınmak gerekir ve yapıştırıcı tabaka kendi düzlemi içinde kaymaya maruz kalacak şekilde yüklenmelidir.

#### Yapıştırıcı mukavemeti

Yapıştırıcı kullanılan konstrüksiyonlarda yapıştırıcının kopma mukavemeti önem arz eder ve kopma mukavemeti yapıştırmanın sıcak ve soğuk olmasına göre değişir. Epoksi yapıştırıcılar için değerler aşağıdaki gibidir.

Soğuk yapıştırma için (yapıştırıcı kalınlığı 0.2 mm);

$$\tau_{kopma} = 10 \text{ MPa}; 20^{\circ}\text{C}$$

$$\tau_{kopma} = 3 \text{ MPa}; 80^{\circ}\text{C}$$

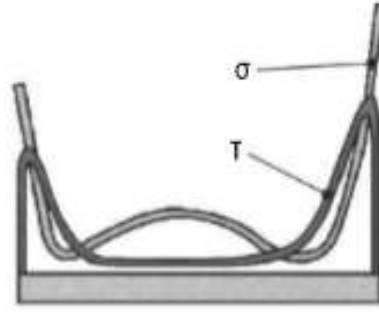
Sıcak yapıştırma için;

$$\tau_{kopma} = 15 \text{ ila } 30 \text{ MPa}; 20^{\circ}\text{C ila } 100^{\circ}\text{C}$$

Yapıştırıcı tabakanın kalınlığı aşağıdaki değerler arasında olmalıdır.

$$0.1 \text{ mm} \leq e_c \leq 0.3 \text{ mm}$$

Yapıştırıcı içinde kayma gerilmesi ve kabuk gerilmesi adı verilen normal gerilme mevcuttur.



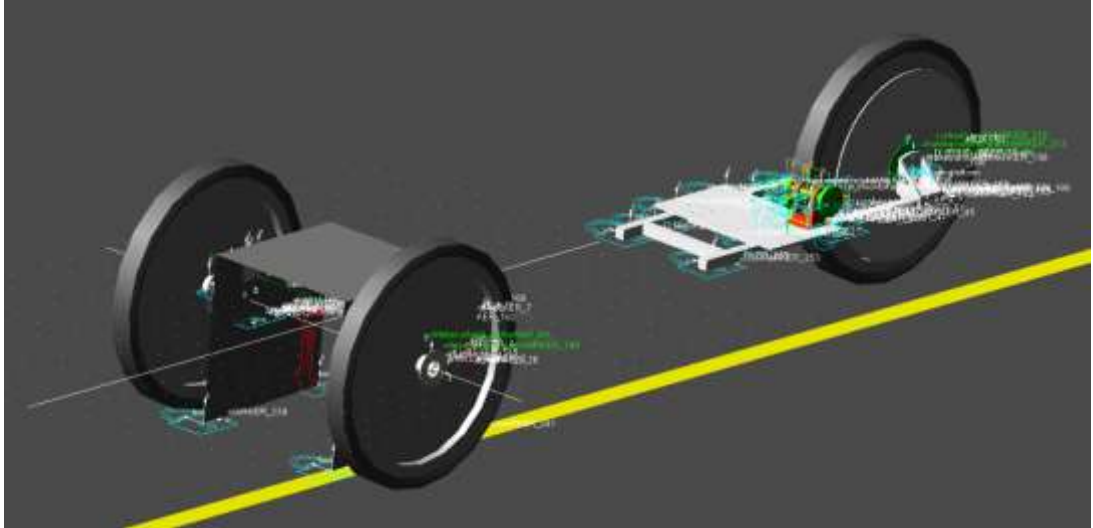
**Şekil 2.16 :** Yapıştırıcı içindeki gerilmeler (Gay,2015)



### 3. KİNEMATİK MODEL OLUŞTURULMASI, YAPISAL VE AERODİNAMİK ANALİZ

#### 3.1 Araç Kinematik Modeli Oluşturulması

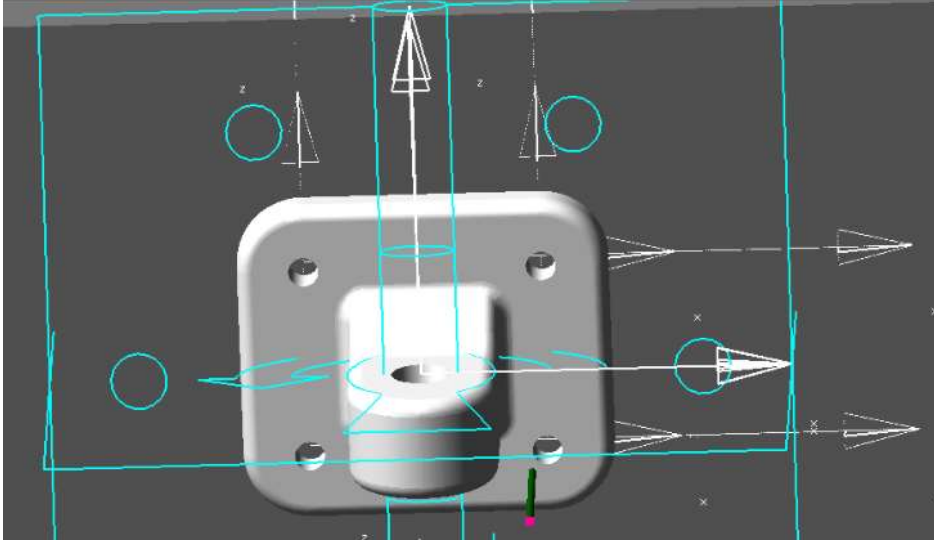
Siemens NX programında çizimi yapılan aracın bağlantılarının tanımlanması ve modelinin oluşturulması için Adams View programı kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında aracın kinematik modeli oluşturulmuştur. Araca yol üzerinden etkiyen kuvvetlerin bulunması gelecek çalışmalar için konu oluşturabilir.



Şekil 3.1 : Araç mekanik sistemlerinin görünümü.

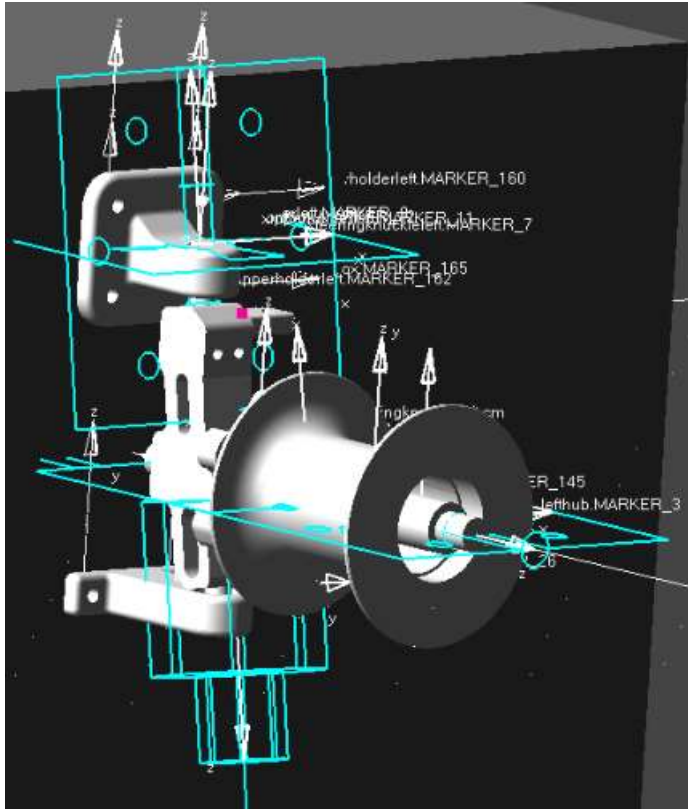
#### 3.1.1 Direksiyon sistemi bağlantılarının tanımlanması

Aracın ön sistemi aksonlar, akson tutucular, tekerlek göbekleri ve milleri, tekerlekler ve karbon kutudan oluşmaktadır. Akson tutucu karbon kutuya dört noktadan mesnetlenmiştir ve bu bağlantı yapılırken kuvvetlerin deliklere geleceği öngörülmüştür.



**Şekil 3.2** : Akson tutucunun karbon fiber kutuya bağlantısı.

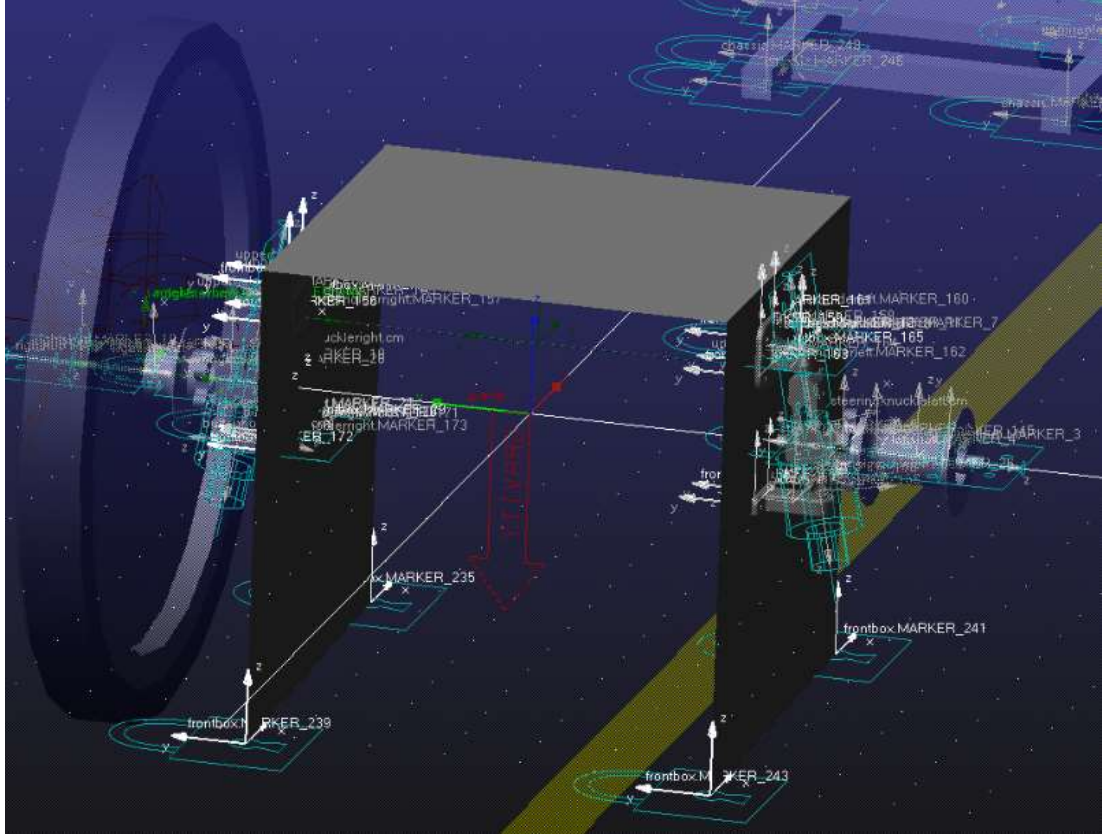
Akson, üst tutucuya ve alt tutucuya silindirik mafsallarla bağlanmıştır. Aynı zamanda tekerlek miline sabitlenmiştir. Tekerlek göbeği, mil silindirik mafsallarla tekerleğe ankastr mesnet ile bağlanmıştır. Ayrıca aynı anda hareket etmeleri için iç yüzeyi diğer göbeğe sabitlenmiştir.



**Şekil 3.3** : Akson tutucu, akson ve göbek bağlantıları.



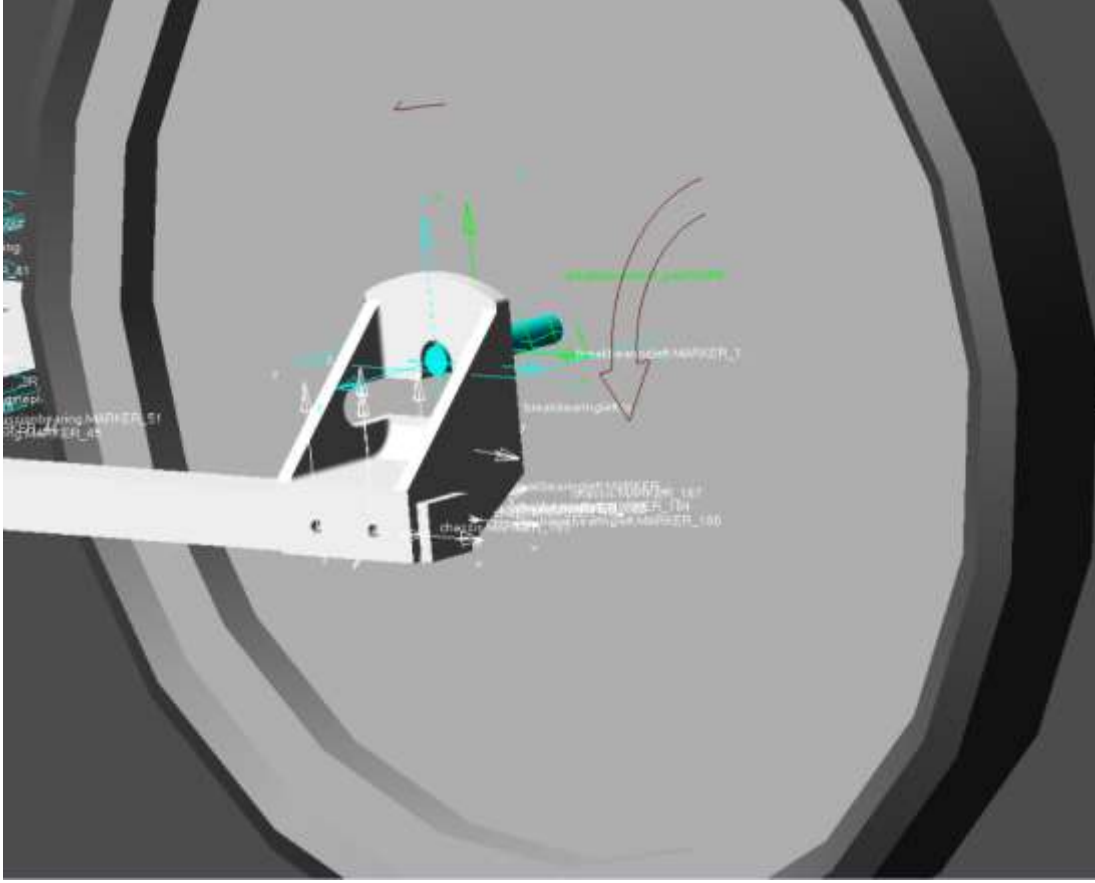
Tekerleklerin çizimi daha önce kullanılan çizim programından yapılmayıp, Adams View programından atanmıştır ve tekerlek göbeğe sabitlenmiştir. Alt tutucu, karbon kutuya iki adet delikten sabitlenmiştir. Karbon kutu aynı zamanda alt kabuğa dört noktadan sabitlenmiştir. Ön sistemde sol taraf için yapılan bağlantı tanımlamaları sağ taraf için de gerçekleştirilmiştir ve ön sistem modelinin görüntüsü Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Direksiyon sistemi.

### 3.1.2 Aktarma sistemi bağlantılarının tanımlanması

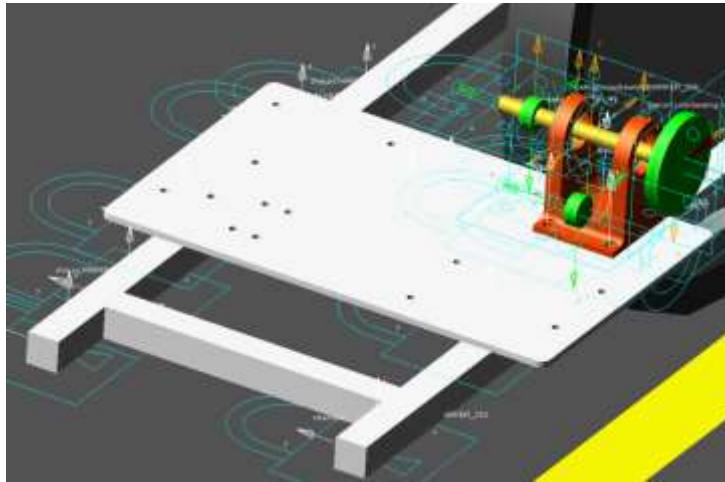
Aracın arka sistemi arka teker, teker mili ve fren tutuculardan oluşmaktadır. Arka fren yatağı araç şasisine dört noktadan sabitlenmiştir ve mil ile silindirik mafsalsal bağlantısı tanımlanmıştır. Aynı işlemler simetrik olan yatak için de tekrarlanmıştır. Tekerlek mili ise fren yataklarına silindirik mafsalsal ile tekere ise ankastre mesnet ile bağlanmıştır. Teker ve göbeğin ankastre mesnetlenmesinin sebebi ise iki parçanın aynı anda hareket etmesini sağlamaktır.



Şekil 3.5 : Arka tekerlek yatakları ve bağlantılar.

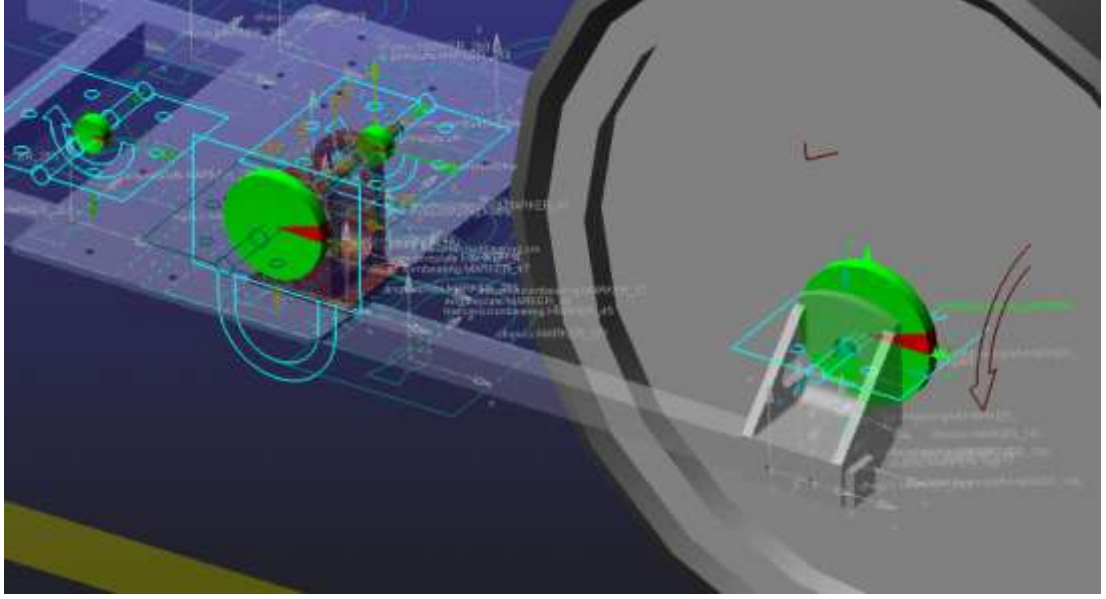
### 3.1.3 Şasi ve motor plakasının bağlantılarının tanımlanması

Araç şasisi alt kabuğa altı noktadan sabitlenmiştir. Motor plakası sabitlenen şasi üzerine dört farklı noktadan ankastre mesnetlenmiştir. Plaka üzerine yerleştirilen aktarma sisteminin yatağı dört delikten plakaya mesnetlenmiştir.



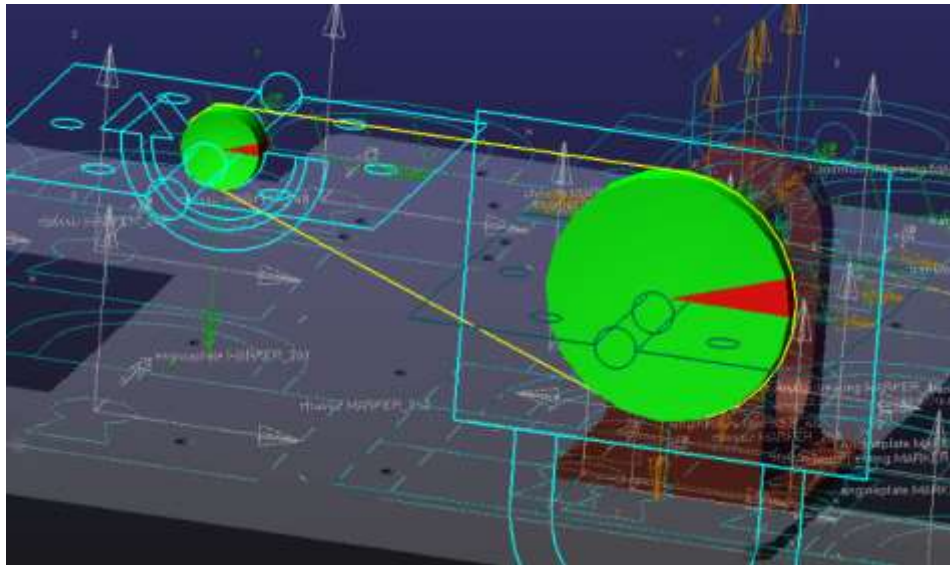
Şekil 3.6 : Şasi ve motor plakası bağlantıları.

Aktarma sisteminde bulunan dişliler ve zincirleri program üzerinden atanmıştır. Motorun çıkış dişlisi ile çıkış mili arasında aynı anda hareket etmeleri için ankastre mesnet tanımlanmıştır. Aktarma sisteminin mili ikinci kadememin küçük dişlisine ankastre mesnet ile bağlanmıştır. Aktarma mili, aktarma sistemi yatağına silindirik mafsalsal ile bağlanmıştır ve bu mil program üzerinden atanmıştır. Arka teker yatağına silindirik mafsalsal ile arka tekere ise ankastre mesnet ile bağlanmıştır.



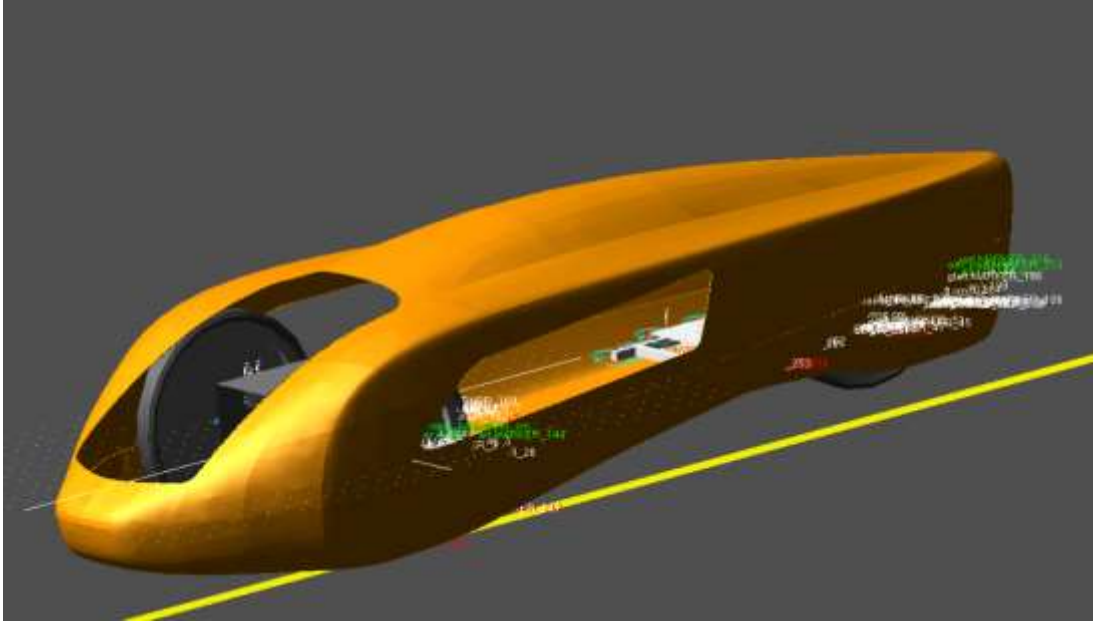
Şekil 3.7 : Aktarma sistemi.

Bağlantılar tanımlandıktan sonra bu dişliler arasındaki zincir Adams View üzerinden atanmıştır ve gerekli parametreler girilmiştir.



Şekil 3.8 : Adams View'da atanan zincir bağlantısı.

Ardından üst kabuk, alt kabuğa merkez koordinat sistemi üzerinden ankastre mesnetlenmiştir. Tüm bağlantıların tanımlanmasının ardından sistem üzerindeki tüm elemanların malzeme atamaları yapılmıştır. Ancak malzeme atama işlemi Adams View üzerinden alınan parçalar üzerinde yapılamamaktadır. Üst kabuk, alt kabuk ve karbon kutunun malzemesi karbon fiber olarak atanmıştır. Miller ve tekerlek göbeği malzemeleri çelik olarak atanmıştır. Diğer elemanlar ise alüminyum olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.9 : Araç modelinin son görünümü.

## 3.2 Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışları

Kompozit malzemeler sahip oldukları sınıfa göre farklı davranışlar gösteren malzemelerdir. Bir kompozit malzeme üzerinde çalışma yapmadan önce, çalışılacak kompozitin hangi çeşit olduğu iyi araştırılmalı ve çalışılacak koşullar altındaki davranışı belirlenmelidir. Kompozit malzemelerin sınıflarına göre gerilme-şekil değiştirme bağıntıları farklılık göstermektedir.

### 3.2.1 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

#### 3.2.1.1 İzotropik malzemeler

Bir malzemenin mekanik özellikleri farklı yönlerde değişmiyorsa bir başka deyişle yönden bağımsız ise bu tür malzemelere izotropik malzemeler denir. İzotropik bir plakaya bir doğrultuda uygulanacak yüklemeye altında, malzeme o doğrultuda uzama

gösterirken, yükleme uygulanan doğrultuya dik doğrultuda ise daralma gösterir. İzotropik malzemelerde 4 adet elastiklik sabiti bulunmaktadır, 2 tanesi bilindiği takdirde diğer 2 sabit bulunabilir.

### 3.2.1.2 Anizotropik malzemeler

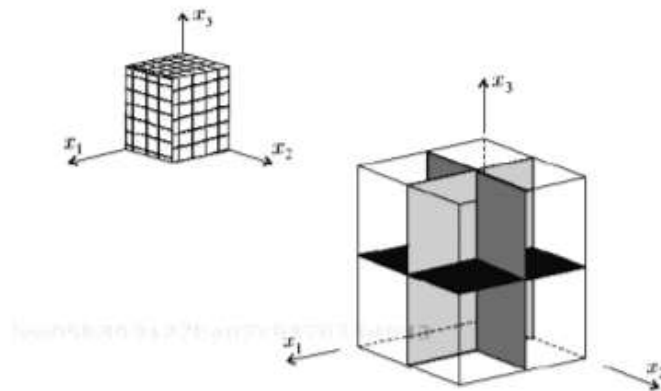
Anizotropik malzemelerde, mekanik özellikler malzeme içindeki farklı yönlere göre değişir. Anizotropik plakaya yapılacak bir yükleme durumunda, yükleme doğrultusunda uzama ve ona dik doğrultuda daralmanın haricinde ilave olarak açısal bir bozulma da gözlenir. Anizotropik malzemeler 21 adet bağımsız elastik sabite sahiptir ve malzeme homojen değilse bu sabitler noktadan noktaya değişiklik gösterebilir. Bu sabitlerin analitik veya deneysel olarak bulunması gerekir.

### 3.2.1.3 Monoklinik malzemeler

Çalışılan malzeme, bir malzeme simetrisine sahipse, yani bir malzeme ile o malzemenin bir düzleme göre ayna simetrisi tamamen aynı özelliklere sahipse monoklinik malzeme olarak adlandırılır. Simetri eksenine dik olan doğrultu asal doğrultu olarak adlandırılır ve bu tip malzemelerde 13 adet bağımsız elastik sabit vardır. Tek yönde fiberlere sahip elyaflar bu tip malzemelere örnektir.

### 3.2.1.4 Ortotropik malzemeler

Kompozit malzeme, fiber yönelmeleri göz önüne alındığında, birbirine dik 3 malzeme simetri düzlemine sahipse ortotropik malzeme olarak adlandırılır (Kollar vd., 2009) Birbirine dik 3 simetri düzlemi Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Ortotropik malzemelerde 9 adet bağımsız elastik sabit vardır.



Şekil 3.10 : Üç simetri düzlemine sahip malzeme

### **3.2.1.5 Enine/transvers izotropik malzeme**

Enine izotropik malzemelerde de ortotropik malzemelerde olduğu gibi üç adet simetri düzlemi mevcuttur. Ancak bu simetri düzlemlerinden bir tanesinde malzeme, izotropik malzeme gibi davranıyorsa enine izotropik malzeme olarak adlandırılır. Enine izotropik malzemelerde 5 adet bağımsız elastik sabit mevcuttur.

### **3.2.2 Anizotropik malzemelerin mekaniği**

Kompozit malzemeler, geleneksel homojen izotropik malzemelerden farklıdır. Bu tarz malzemeler, genellikle tek doğrultuda yüksek dayanıma sahip elyafların çeşitli düzenlerde matris içerisine yerleştirilmesi ile oluşturulur. İzotropik olmayan yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi için bir takım tanımlamalar yapılmalıdır.

Malzemeler temel olarak simetri özelliklerine göre sınıflandırılabilirler. Geleneksel olarak kullanılan çoğu metal homojendir ve her düzlemde simetrik davranış gösterirler. Lakin kompozitler için bu durum söz konusu değildir. Fiber yerleşimlerine göre bir ila üç simetri düzlemleri bulunabilir. Bu durumun incelenmesi için ilk olarak gerilme ve şekil değiştirme kavramlarının tanımlanması gerekmektedir.

#### **3.2.2.1 Gerilme ve şekil değiştirme kavramları**

Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesinde sürekli ortamlar mekaniği yaklaşımı kullanılmaktadır. Dış yüklere maruz kalan yapısal bir sistem içerisinde iç kuvvetler oluşur. Bu yaklaşımda iç kuvvetler katı cisim içerisindeki bütün noktalarda sürekliliği sağlayacak bir biçimde dağılım halindedir. Yer çekimi, atalet kuvvetleri gibi kuvvetler hacimsel kuvvet olarak adlandırılır ve cismin kütlesi ile orantılıdır. Katı cismin iç veya dış yüzeylerine etki eden yüzey kuvvetleri başka bir cisim ile temastan kaynaklanır. Bileşke yüzey kuvveti, yüzey kuvvet yoğunluğu fonksiyonunun bütün yüzey üzerindeki integrali ile bulunabilir.

Gerilme, dış kuvvetlerin malzeme üzerindeki etkisinin incelenmesinde kullanılan iç kuvvetlerin lokal olarak yoğunluğunu gösteren bir tariftir. İkinci dereceden tensörel bir büyüklüktür. Tensörlerin tanımlanabilmesi için büyüklük, doğrultu ve etki eden düzlemin referansının bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca tensörler sayesinde iki vektör arasında lineer dönüşüm yapılabilir. İç kuvvetlerin etkilerini niceliksel olarak belirlemek için rastgele bir yüklemeye maruz sürekli bir katı cisim içerisinde bir kesit alınır ve bu kesit üzerindeki sonlu bir alan üzerindeki kuvvet ile gerilme vektörü tanımlanır.

Normal gerilme, gerilme vektörünün alan normali üzerindeki iz düşümüdür. Kayma gerilmesi ise gerilme vektörünün alan üzerindeki iz düşümüdür.

$\sigma^{\rightarrow}$  : gerilme vektörü,  $\tilde{\sigma}$  : gerilme tensörü,  $n^{\rightarrow}$  : gerilme vektörünün tanımlandığı alanın normali olmak üzere;

$$\sigma^{\rightarrow} = \tilde{\sigma} \cdot n^{\rightarrow} \quad (3.1)$$

### 3.3 Malzeme Özelliklerinin Deneysel Olarak Bulunması

Önceki bölümlerde belirtildiği üzere aracın her bölgesi farklı yüklemelere maruz kalmaktadır. Örnek olarak; aracın üst gövdesine sadece aerodinamik yükler etki ederken, alt gövde sürücünün ağırlığını taşımaktadır. Bu durumda; kompozit malzemelerin kullanıldığı gövdede optimizasyon yapılması gerekmektedir.

Macaw 2'nin üretimi sırasında bu durum göz önünde bulundurularak üst gövdede sadece iki kat karbon fiber kullanılırken, buna karşın alt gövdede, yük akışı olan bölgelerde sandviç yapılar ile birlikte dört kat karbon fiber kullanılmıştır.

Bölüm 2'de detaylı olarak açıklanan Macaw 3 adlı aracın boyutlandırılmasında ve laminasyonun belirlenmesinde benzer bir yol izlenerek optimizasyon yapılacaktır. Güçlendirme olması gereken bölgeler; hem önceki tecrübelerle dayanarak hem de yapılacak olan sonlu elemanlar analizleri vasıtasıyla belirlenecektir.

Direksiyon sisteminin temel taşıyıcısı olan kutu parçası ve motor ile sürücü bölmeleri arasında bulunan, kapalı kesit oluşturarak kayma gerilmelerini üzerinde taşıyan, "bulkhead" ve roll bar işlevi gören seperatör isimli parça güçlendirilme yapılması gereken parçalardandır. Bu kararın verilmesindeki en büyük etken geçmiş tecrübelerdir.

Macaw isimli araçta bu iki parça sadece iki kat karbon fiber kullanılarak üretilmiştir. Yarışma sırasında iki parçada da gözle görülür sehim oluşmuştur, bu durum direksiyon sistemi yataklarında fazladan zorlanmaların oluşmasına ve dolayısıyla yüksek verim kaybına sebep olmuştur. Macaw 2 adlı aracın üretiminde ise alan eylemsizliğinin artırılması amacıyla iki kat karbon fiber arasına 8 mm kalınlığında PVC köpük yerleştirilmiştir. Yarışma ve testler sırasında yapılan gözlemlerde sehimin büyük oranda azaldığı, aracın süzülmesinin ve skorunun kayda değer bir biçimde arttığı gözlemlenmiştir. Ancak yeni üretilen araçta kutu ve seperatör kalınlığı optimizasyonunun yapılması ağırlık azalımı için kritik olmaktadır. Ayrıca kutu kalınlığının azaltılması tekerlekler

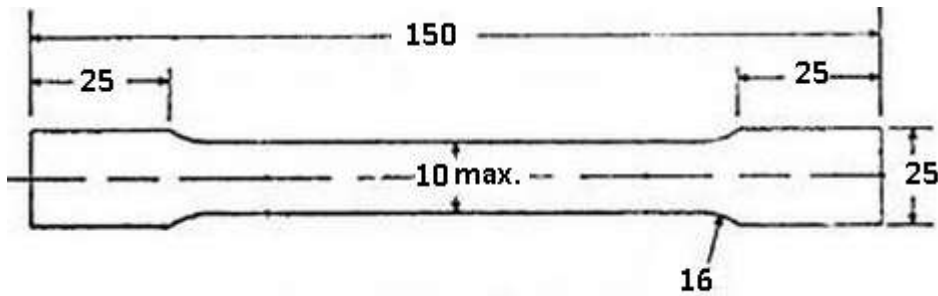
için daha fazla hareket alanı ve pilot için daha fazla görüş alanı ve geniş yaşam alanı ile sonuçlanacaktır.

Önceki araçta kullanılan sandviç yapı çekirdek malzemesi olan PVC köpük el yatırması yöntemi ile üretime uygundur. Prepreg ile kullanılabilen sandviç çekirdek malzemeleri literatürde ve piyasada bulunsa da maliyetleri takımın bütçesini zorlayacaktır. Bu sebepten ötürü kutu ve seperatörün üretimleri için el yatırması veya vakum torbalama yöntemleri planlanmaktadır. Ancak bu durumda prepreg ile üretim yapılmasının getirmiş olduğu homojen ve standarta çok yakın malzeme özelliklerinden feragat edilecektir.

Araçta kullanılacak malzemelerin planlanması sırasında ön çalışma olarak kutu ve seperatörde kullanıma uygun; sandviç çekirdeği olarak PVC köpük, sandviç kabuğu olarak karbon fiber kullanılarak numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelere çekme testi uygulanarak malzemenin iki eksenindeki Young modülünün bulunması ve bulunan özellikler ile sonlu elemanlar analizi yapılması planlanmıştır.

### 3.3.1 Karbon fiber - PVC köpük sandviç yapı çekme testi

Çekme testinin yapılabilmesi için  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  derece örgüsü olan CW660 birbirine dik elyaflardan oluşan dokuma (woven) karbon fiber kabuğa, 5 mm kalınlığında  $60 \text{ gr/m}^3$  yoğunluğunda PVC köpük çekirdeğe sahip levha üretilmiştir. Levhanın altında ve üstünde aynı açıda birer kat karbon fiber bulunmaktadır. Bu levha kullanılarak su jetinde kesim işlemi ile “dog bone” şekline sahip numuneler kestirilmiştir (Şekil 3.11).  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  yönelimlerle beşer adet numune kesilmiştir.



Şekil 3.11 : Çekme testi numunelerinin ölçüleri [5].



Üretilen numuneler iki tarafta 0,66 mm karbon fiber, ortada 5 mm köpük olmak üzere toplam 6,32 mm kalınlığa sahiptir. Şekil 3.13’de kullanılan numune için boyutlar verilmiştir. Ayrıca levhadan kesilen numunenin üstten ve yandan görünüşleri Şekil 3.12’de görülebilir.

Kullanılan çekme testi makinası; 50 kN maksimum kuvvet uygulayabilme özelliğine sahip bir çekme makinasıdır. Deney sırasında 50 kN yük hücresi kullanılmıştır. Yer değiştirme ölçümü parçanın bağlandığı çenelerden yapılmıştır.

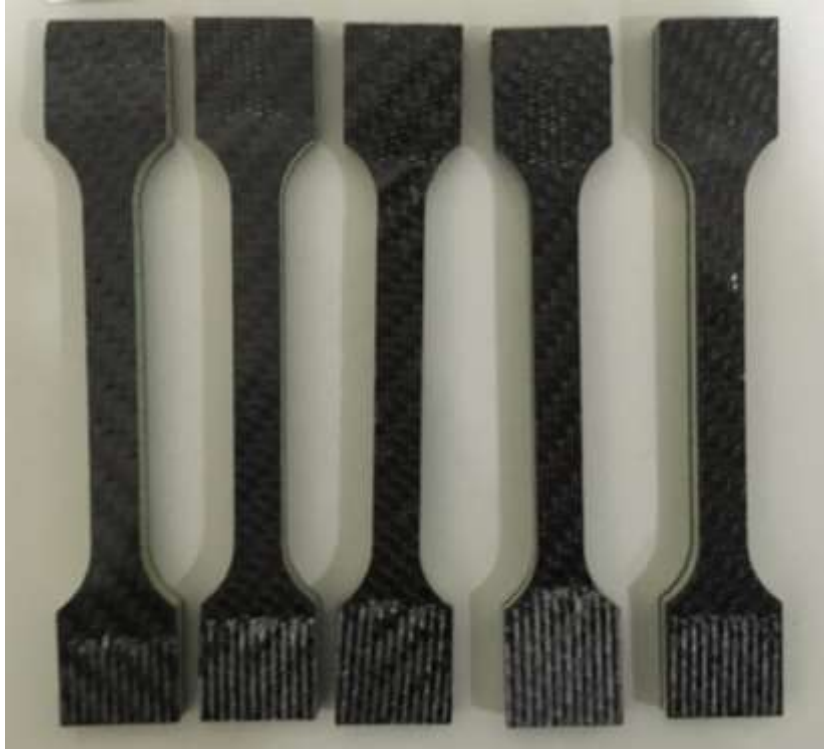


**Şekil 3.12 : Çekme testi numuneleri.**



**Şekil 3.13** : Numunenin çenelere bağlanması.

Numuneler 3 mm/dk çekme hızı ile çekilmiştir. Sadece ilk numune 5 mm/dk çekme hızı ile çekilmiştir. Şekil 3.13’de çenelere bağlanmış numune verilmiştir.

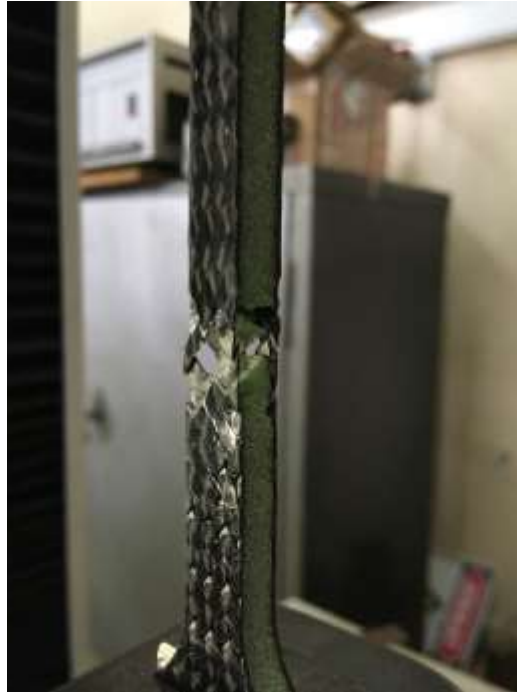


**Şekil 3.14** : 0° açılı kesilen numuneler.



**Şekil 3.15 :** 45° açı ile kesilen numuneler.

0° açı ile kesilen numuneler Şekil 3.14 ve Şekil 3.17'de görülebileceği gibi çene kısımlarından kaymıştır. Ancak Şekil 3.15'de görülen 45° açığa sahip numunelerde kayma olmadan hasar gözlemlenmiştir (Şekil 3.16).



**Şekil 3.16 :** Hasar gözlemlenen 45° numune.



**Şekil 3.17** : 0° numunelerde gözlemlenen kayma izleri.

Numunelerin kırılmamış olması Young modülü hesaplanmasına engel oluşturmaktadır. Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de gösterilen numuneler sağ taraftan sırasıyla 1’den başlayarak artan numaralar ile numaralandırılmıştır. Aşağıda verilen sonuçlar bu sırayı takip etmektedir.

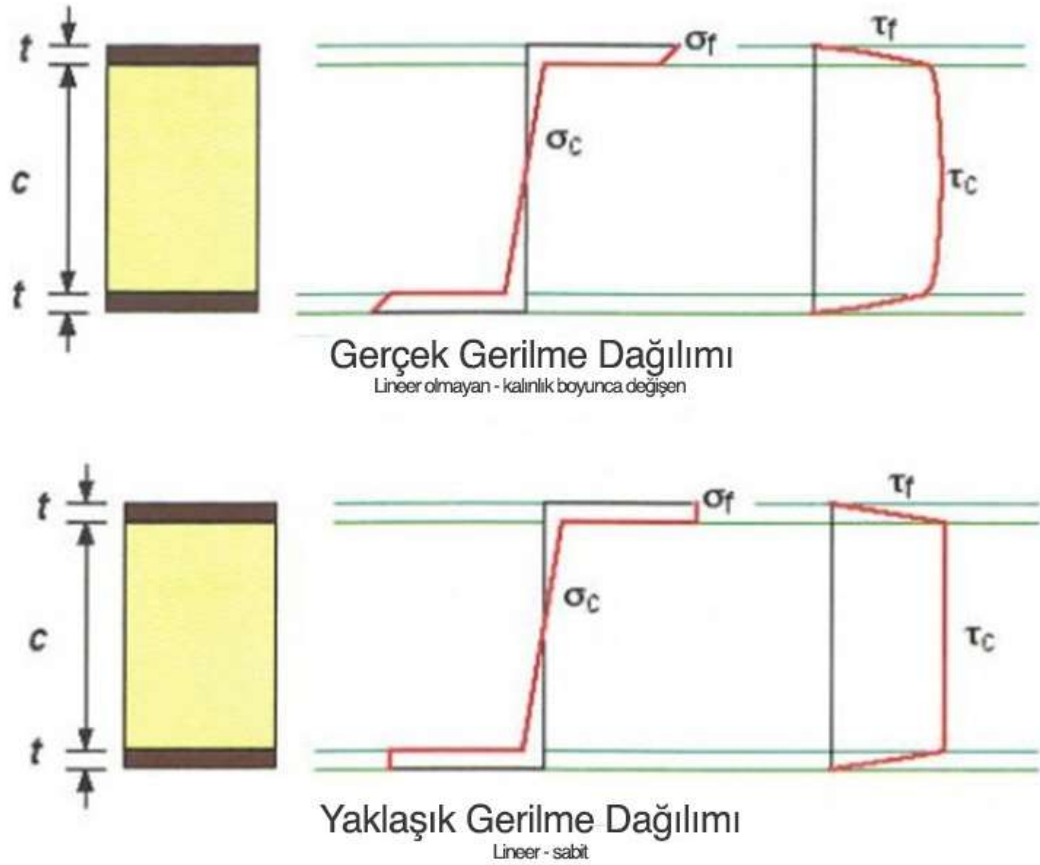
Şekil 3.19’da 0° açılı numunelerin test sonuçları verilmiştir. Çekme testi ölçümlerinden alınan veriler MATLAB programında işlenmiştir. Programda kullanılan kodlar EK. G kısmında verilmiştir.

Sonuçlarda görülebileceği üzere numunelerin kuvvet-yer değiştirme eğrileri arasında büyük oranda farklılıklar bulunmaktadır. İlk olarak 1 numaralı numune incelenecek olursa; bu test sırasında kaymanın yavaş olduğu görülmektedir. En fazla kuvvet değeri ise 2200 N olmaktadır. Numune 2, 3200 N ile en fazla kuvvete çıkılan numune olmuştur. Ancak bu numunede çok sayıda ani kayma oluşmuştur, kuvvette oluşan ani düşüşler kayma olduğunu ifade etmektedir. Oluşan kaymalardan dolayı veri, Young modülü hesaplamasında kullanılmayacaktır. 3 numaralı numune en sağlıklı sonuç alınan numune olmuştur. Tepe noktasına geldiğinde yavaşça kaymaya başlayan bu numunenin tepe değerinden sonrası hesaplamaya katılmadan Young modülü hesaplanacaktır. 4 ve 5 numaralı numunelerde, bağlantı yerleri farklılıklarından dolayı sağlıklı sonuç alınmamıştır. 5 numaralı numunenin verisinde yaklaşık 4 mm yer değişimine denk gelen kısımdaki kuvvetteki ani yükseliş, testin yarıda durdurup çenelerin sıkıştırılmasından

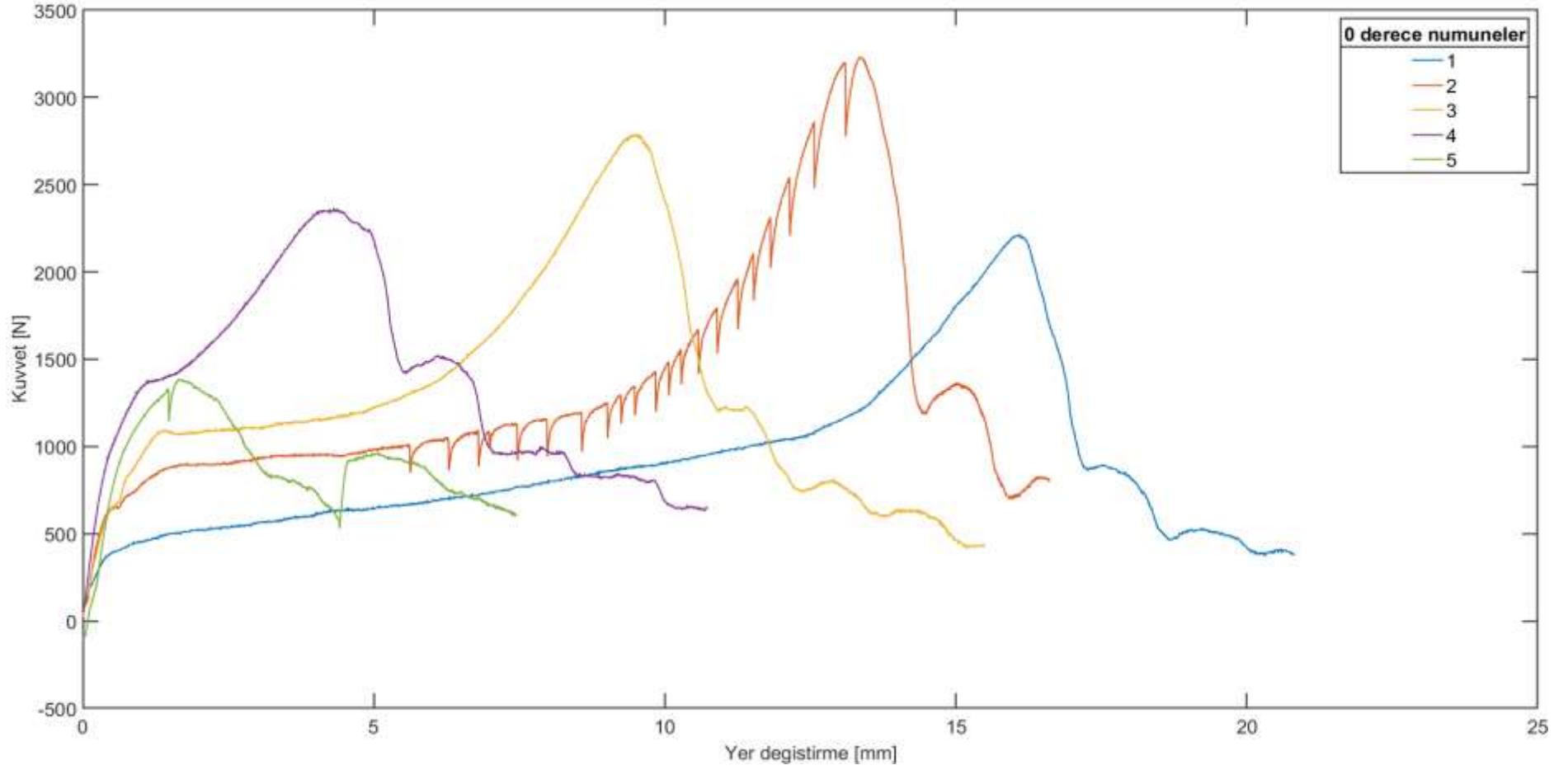
dolayıdır. Ayrıca 5 numaralı numunenin çekme hızı diğerlerinden farklı olarak 3 mm/dk yerine 5 mm/dk yapılmıştır.

Şekil 3.20’de 45° açılı numuneler için olan test verisi verilmiştir. Bu numunelerin testinde boyun verme, plastik şekil değişimi gibi noktalar net bir şekilde gözlemlenmiştir. Tüm numunelerde hasar gerçekleşene kadar test devam ettirilmiştir. Ancak diğer açıda örneklerde görüldüğü gibi, 2, 3 ve 5 numaralı numunelerin testi sırasında çene bölgesinden kayma gözlemlenmiştir. Bu nedenle hesaplamalar için 1 ve 4 numaralı numuneler kullanılacaktır.

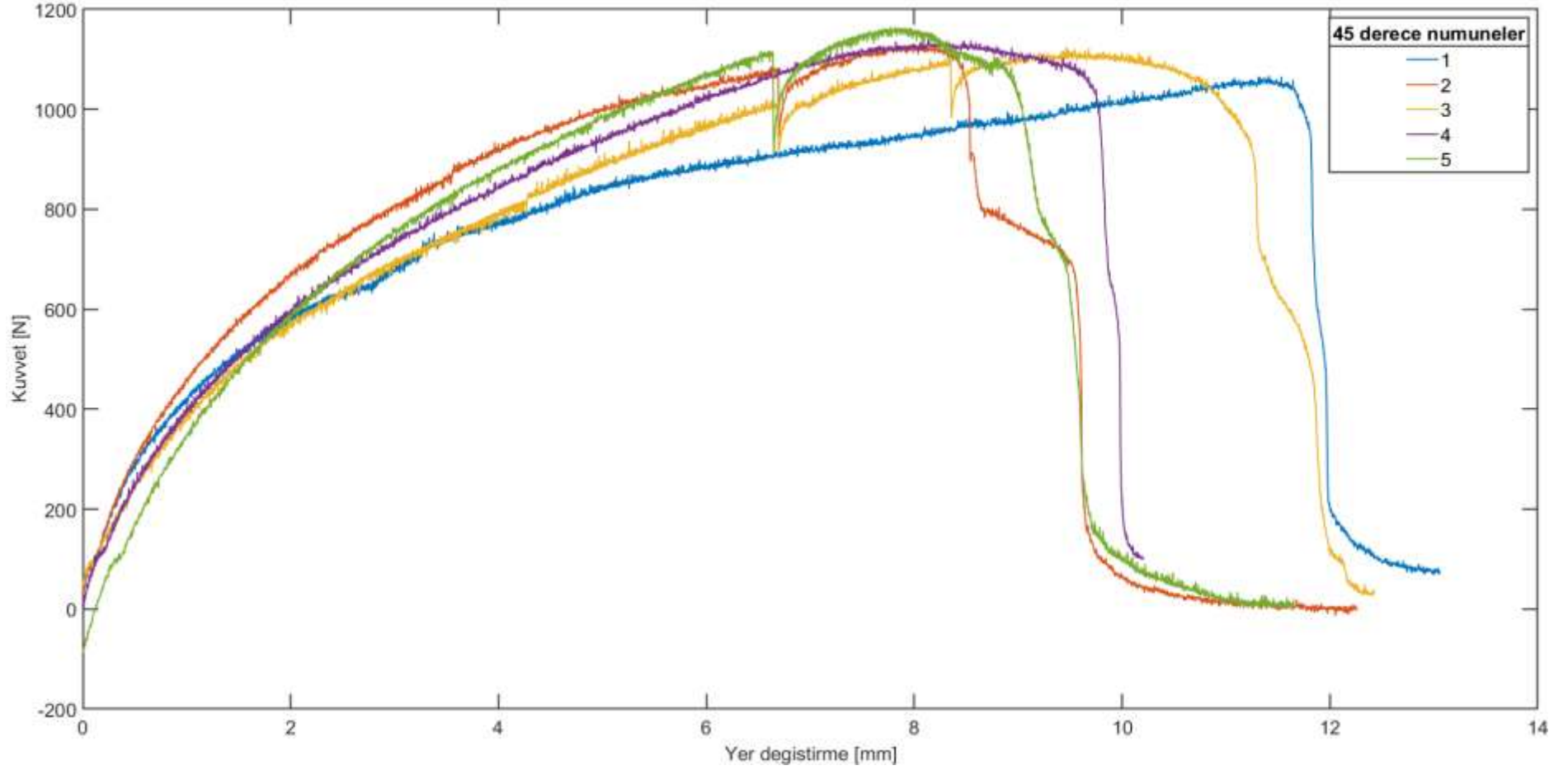
Numuneler için gerilme hesaplanmasında kullanılan alan karbon fiber katmanların kesit alanıdır. Bu tarz yapılarda PVC köpük neredeyse yük taşımamaktadır (EASIE, 2011).



Şekil 3.18 : Sandviç yapılar için gerilme dağılımı (EASIE, 2011).



Şekil 3.19 : 0° numuneler için test sonuçları.



Şekil 3.20 : 45° numuneler için test sonuçları.

Test sonuçlarında, bahsedilen numuneler için lineer olan bölgeler alınarak eğri uydurma yapılmıştır. Katı cisim içerisinde deformasyona yol açan dış yüklerin yaptığı iş, katı içerisinde birim şekil değiştirme enerjisi formunda depolanır. Bulunan eğrilerin, elastik potansiyel enerji teoremi kullanılması amacıyla, lineer elastik bölgede birim şekil değiştirmeye göre integrali alınmıştır. Bu integralin sonucu malzemede depolanan elastik potansiyel enerjiyi vermektedir. Daha sonra, bulunan elastik potansiyel enerji Hooke Yasası kullanılarak Young modülü ve birim uzama biçiminden ifade edilir. Birim uzama miktarı bilindiğinden Young modülü hesaplanabilir (Hibbeler, 2011).

Denklem 3.2’de  $U_e$  elastik potansiyel enerji olmak üzere lineer bölgede birim uzama-  
nın ( $x$ ) yay sabiti ( $k$ ) ile çarpımının integralidir. Denkem 3.3’de  $\epsilon$ , mühendislik şekil  
değişiminin ilk boy ve ilk boydaki değişim cinsinden ifade edilmiş hali gösterilmiştir.  
Denklem 3.4’de gerekli dönüşümler yapılarak hacim başına birim şekil değiştirme  
enerjisi ( $u_e$ ), gerilme cinsinden ifade edilmiştir. Bu sayede enerji Hooke Yasası kulla-  
nılarak birim şekil değiştirme ve Young Modülü cinsinden ifade edilebilir (Denklem  
3.5). Denklem 3.6’da Young modülünün hacim başına birim şekil değiştirme enerjisi  
ve birim şekil değiştirme cinsinden ifadesi verilmiştir.

$$U_e = \int kx dx = \frac{1}{2} kx^2 \quad (3.2)$$

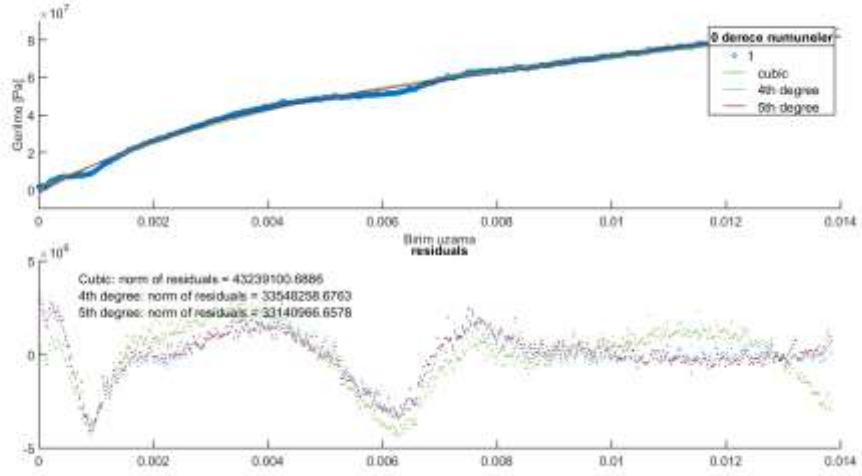
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.3)$$

$$u_e = \int_0^{x_1} \frac{P}{A \cdot L} dx = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_x d\epsilon \quad (3.4)$$

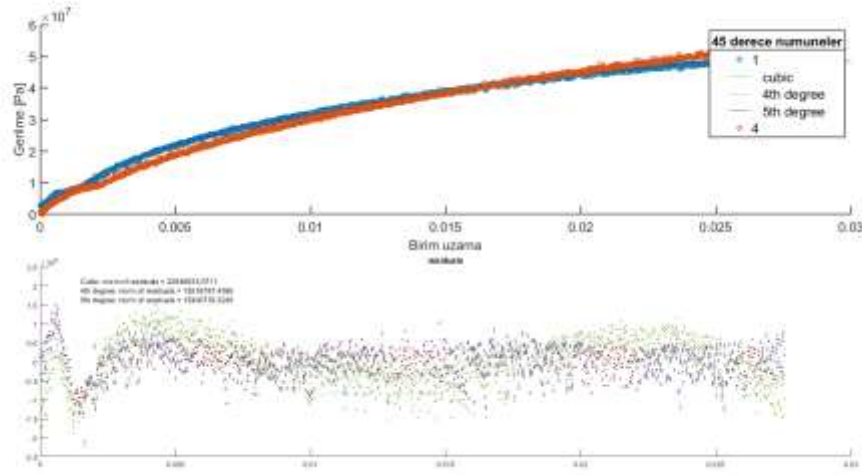
$$u_e = \int E \epsilon d\epsilon = \frac{1}{2} E \epsilon^2 \quad (3.5)$$

$$E = \frac{2u_e}{\epsilon^2} \quad (3.6)$$

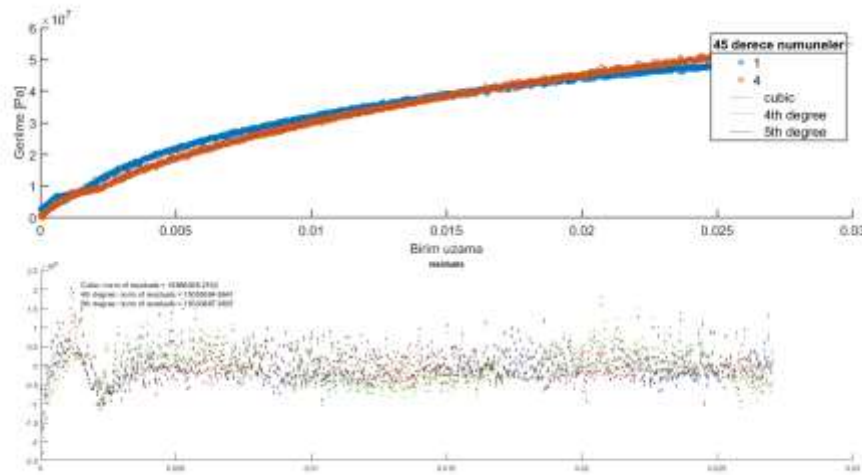




Şekil 3.21 : 0° açılı 3. numune için eğri uydurma.



Şekil 3.22 : 45° açılı 1. numune için eğri uydurma.



Şekil 3.23 : 45° açılı 4. numune için eğri uydurma.

Yapılan eğri çıkartma işlemlerinde sapma yakınsayana kadar polinom derecesi artırılmıştır. 0° için 4. derece, 45-1 ve 45-4 için 5. derece polinom kullanılmıştır. Hesaplanan katsayılar Çizelge 3.1’de verilmiştir. Katsayıların birimi Pascal’dır. 5. derece polinom için Denklem 3.7’de verilmiştir. İntegral ve Young modülü hesaplaması için kullanılan MATLAB kodu EK. G kısmında bulunabilir.

**Çizelge 3.1 :** Malzemelerin lineer bölgeleri için polinom katsayıları.

Katsayı	0° 1. numune	45° 1. numune	45° 4. numune
p1	-5.8971e+15	2.6717e+15	1.9525e+15
p2	1.9622e+14	-3.4514e+14	-2.1288e+14
p3	-2.4691e+12	1.5625e+13	9.308e+12
p4	1.8319e+10	-3.5358e+11	-2.2688e+11
p5	-2.0331e+06	5.2369e+09	4.3944e+09
p6	Tanımsız	2.4896e+06	1.3355e+06

$$y = p1 \cdot x^5 + p2 \cdot x^4 + p3 \cdot x^3 + p4 \cdot x^2 + p5 \cdot x + p6 \quad (3.7)$$

**Çizelge 3.2 :** Test sonuçları.

	0° 1. numune	45° 1. numune	45° 4. numune
<i>Birim uzama (<math>\epsilon</math>)</i>	0.014	0.0275	0.027
<i>Akma gerilmesi (<math>\sigma</math>) [MPa]</i>	82.5	48.87	52.8
<i>Elastik potansiyel enerji (u) [kJ]</i>	742.1	938.5	901
<i>Young modülü [MPa]</i>	7793	2482	2472

### 3.4 Kompozit Malzemelerde Hasar Kriterleri

Tasarlanan araç gövdesi bir çok farklı türde yükler altındadır. Ancak araç gövdesinin bilinen mekanik özellikleri asal ve enine doğrultuda çekme ve kayma modülleridir. Ayrıca sadece bu doğrultularda akma ve kopma gerilmeleri bilinmektedir. Ancak araç gövdesine bu gerilmeler eğilme, burulma, çekme ve basma yükleri altında bileşke olarak etki etmektedir. Oluşan bileşke gerilmenin çekme, basma ve kayma mukavemetleri ile kıyaslanabilmesi için bazı hasar kriterleri bulunmaktadır. Gövde analizi sonuçlarının sağlıklı olarak incelenebilmesi için bu çalışmada kullanılan kompozit hasar kriterleri incelenecektir.

#### 3.4.1 Maksimum gerilme teorisi

Maksimum gerilme teorisinde katman asal koordinat sistemine göre oluşan gerilme ve hasar gerilmesi kıyaslanır.

$$-\sigma_{1c} < \sigma_1 < \sigma_{1t} \quad (3.8)$$

$$-\sigma_{2c} < \sigma_2 < \sigma_{2t} \quad (3.9)$$

$$-\tau_{12m} < \tau_{12} < \tau_{12m} \text{ veya } |\tau_{12}| < \tau_{12m} \quad (3.10)$$

$\sigma_{1t}$ : kompozit malzemenin 1- yönündeki (lif yönü) çekme mukavemetini,

$\sigma_{1c}$ : kompozit malzemenin 1- yönündeki (lif yönü) basma mukavemetini,

$\sigma_{2t}$ : kompozit malzemenin 2- yönündeki (life dik yön) çekme mukavemetini,

$\sigma_{2c}$ : kompozit malzemenin 2- yönündeki (life dik yön) basma mukavemetini,

$\tau_{12m}$ : kompozit malzemenin 1-2 düzlemindeki kayma mukavemetini göstermektedir.

#### 3.4.2 Maksimum birim uzama teorisi

Maksimum birim uzama teorisinde katman asal koordinat sistemine göre oluşan birim uzama ve hasar birim uzama değeri kıyaslanır.

$$-\varepsilon_{1c} < \varepsilon_1 < \varepsilon_{1t} \quad (3.11)$$

$$-\varepsilon_{2c} < \varepsilon_2 < \varepsilon_{2t} \quad (3.12)$$

$$-\gamma_{12m} < \gamma_{12} < \gamma_{12m} \text{ veya } |\gamma_{12}| < \gamma_{12m} \quad (3.13)$$

$\varepsilon_{1t}$ : kompozit malzemenin 1- yönündeki (lif yönü) çekme hasar birim uzamasını,

$\varepsilon_{1c}$ : kompozit malzemenin 1- yönündeki (lif yönü) basma hasar birim uzamasını,

$\varepsilon_{2t}$ : kompozit malzemenin 2- yönündeki (life dik yön) çekme hasar birim uzamasını,

$\varepsilon_{2c}$ : kompozit malzemenin 2- yönündeki (life dik yön) basma hasar birim uzamasını,

$\gamma_{12m}$ : kompozit malzemenin 1-2 düzlemindeki kayma hasar birim uzamasını göstermektedir.

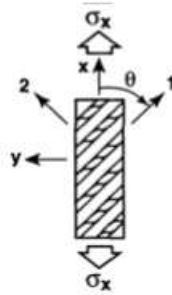
### 3.4.3 Tsai-Hill hasar teorisi

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_{1t}^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_{1t}^2} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_{2t}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_{12m}^2} = 1 \quad (3.14)$$

Kuadratik hasar kriterlerinde tüm gerilme veya birim uzama bileşenleri ikinci dereceden polinom olan tek bir formül ile ifade edilir. Tsai-Hill, Tsai-Wu ve Hoffman olarak üçe ayrılan bu kriterlerde tek doğrultulu (uni-directional) ve dokuma (woven) tipi elyafların ayrımı yapılabilmektedir. Kuadratik hasar kriterleri fiber takviyeli kompozitler için en sık kullanılan hasar kriterlerinden biridir [6].

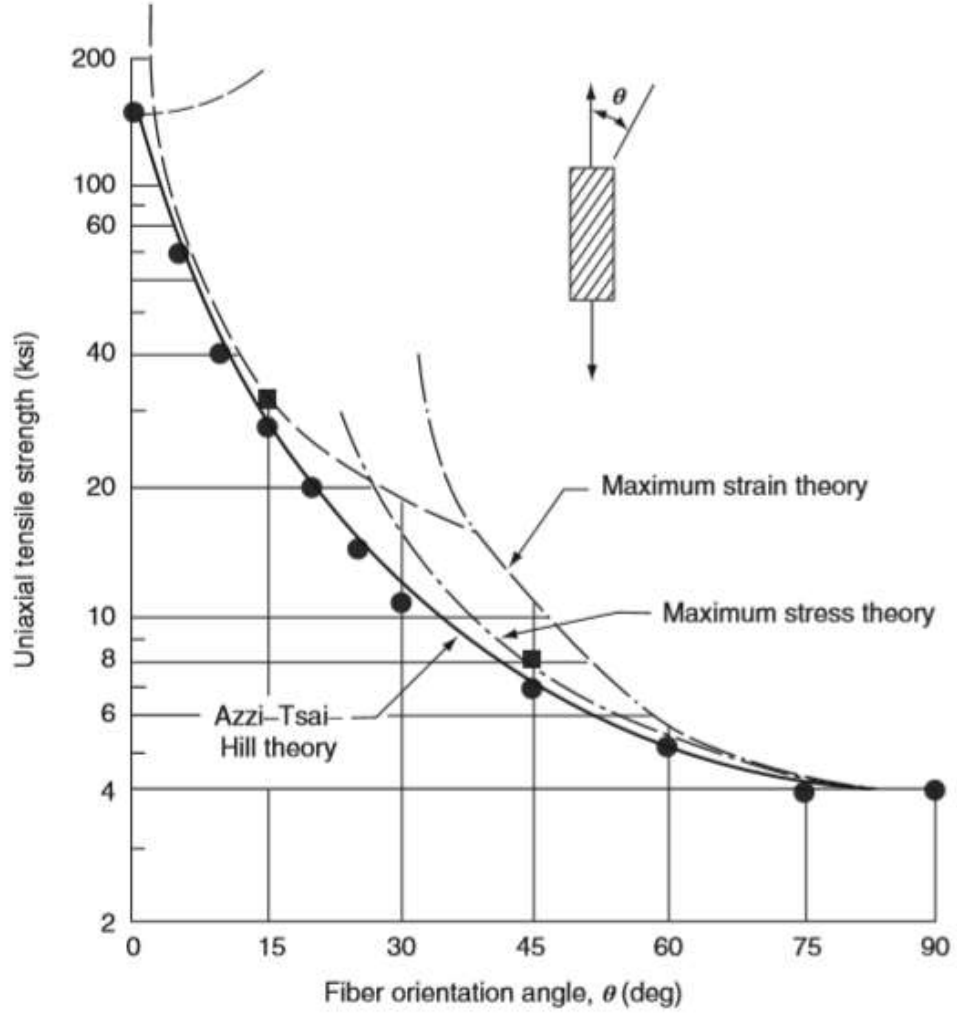
Bu ifade asal malzeme doğrultusundaki normal gerilmeler ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) pozitif alınarak çıkarılmıştır. Dolayısı ile basma gerilme bileşenleri gerekli denklemlerde işaretleriyle birlikte kullanılır. Tek eksenli bir gerilme durumunda ise bağıntı şu şekilde yazılır;

$$\sigma_x = \frac{1}{\left( \frac{\cos^4 \theta}{\sigma_{1t}^2} - \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{\sigma_{1t}^2} + \frac{\sin^4 \theta \cos^2 \theta}{\tau_{12m}^2} \right)^{1/2}} \quad (3.15)$$



Şekil 3.24 : Gerilme doğrultuları

Şu ana kadar incelenen üç teorinin tek eksenli yükleme durumu için karşılaştırılması Şekil 3.25’de verilmiştir.



Şekil 3.25 : Maksimum gerilme, maksimum birim uzama ve Tsai-Hill teorilerinin karşılaştırılması (Mallick, 2008).

#### 3.4.4 Hoffman hasar teorisi

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_{1t}\sigma_{1c}} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_{1t}\sigma_{1c}} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_{2t}\sigma_{2c}} + \frac{\sigma_{1c} - \sigma_{1t}}{\sigma_{1f}\sigma_{1c}}\sigma_1 + \frac{\sigma_{2c} - \sigma_{2f}}{\sigma_{2t}\sigma_{2c}}\sigma_2 + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_{12m}^2} = 1 \quad (3.16)$$

Yukarıdaki 3.14 numaralı denklem basma mukavemetlerinin negatif işareti de dikkate alınarak yazılmıştır. Dolayısı ile bu bağıntı kullanılırken basıdaki mukavemet değerleri mutlak değer olarak yani pozitif yazılmalıdır. Çekme ve basma durumundaki mukavemetlerin eşit alınması durumunda bu bağlantı Tsai-Hill bağıntısına dönüşür.

### 3.4.5 Tsai-wu hasar teorisi

Bu teoriye göre düzlem gerilme durumundaki bir kompozit tabaka için;

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\tau_{12} + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 \geq 1 \quad (3.17)$$

olduğunda hasar başlar veya hasar meydana gelir.

$$F_1 = \frac{1}{\sigma_{1t}} - \frac{1}{\sigma_{1c}} \quad (3.18)$$

$$F_{11} = \frac{1}{\sigma_{1t}\sigma_{1c}} \quad (3.19)$$

$$F_2 = \frac{1}{\sigma_{2t}} - \frac{1}{\sigma_{2c}} \quad (3.20)$$

$$F_{22} = \frac{1}{\sigma_{2t}\sigma_{2c}} \quad (3.21)$$

$$F_6 = 0 \quad (3.22)$$

$$F_{66} = \frac{1}{\tau_{12m}^2} \quad (3.23)$$

$$F_{12} = -\frac{1}{2}(F_{11}F_2)^{1/2} \quad (3.24)$$

### 3.5 Kompozit Gövde Analizi

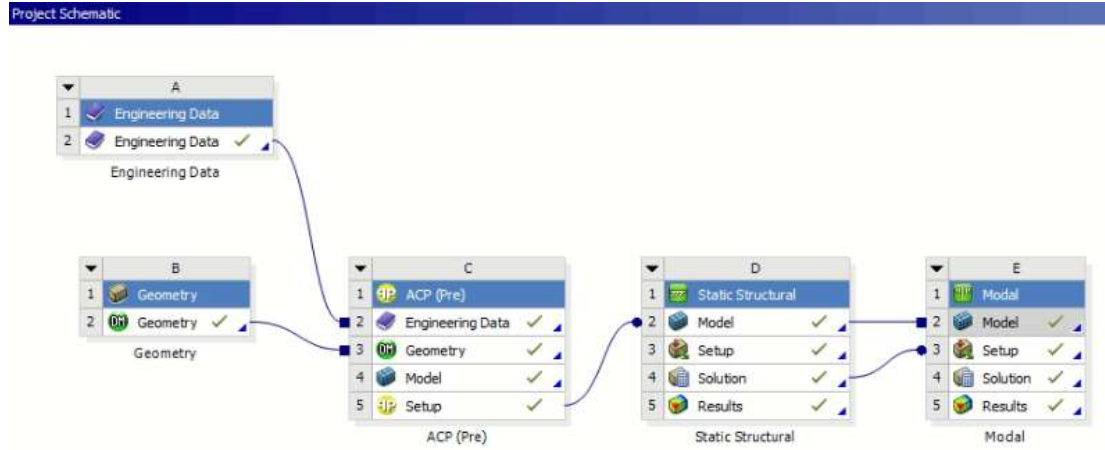
Tasarlanan aracın üretim aşamasından önce bilinen kritik yüklemeler altında sonlu elemanlar analizi yapılarak tasarımın hasara uğrama durumu incelenebilir.

Yapılacak olan analiz için Bölüm 3.1 Araç Kinematik Modeli Oluşturulması başlığında incelenen model kullanılabilir. Ancak bu çalışma kapsamında statik yükleme koşulu incelenecektir.

Sağlıklı sonuçları olan sonlu elemanlar analizi gerçekleştirebilmek için ilk koşul kullanılan malzemenin özelliklerinin doğru tanımlanmasıdır. Özellikle kompozit malzemeler için bu durum kritik öneme sahiptir. Araçta kullanılacak olan kompozitler

incelendiğinde; gövde prepreg ile otoklav fırınında üretileceğinden standart malzeme özelliklerine yakın davranış gösterecektir. Ek olarak, malzemenin üretileceği koşullarda numune üretilip test yapılması sağlıklı olacaktır. Lakin prepreg malzemelerden farklı olarak, el yatırması ve vakum torbalama gibi yöntemler üretim koşullarına bağlı olarak çok fazla değişim göstermektedir. Bundan dolayı, Bölüm 3.4 Malzeme Özelliklerinin Deneysel Olarak Bulunması kısmında kutu ve roll-bar’da kullanılacak olan malzeme özelliklerinin bulunması için yapılmıştır.

Sonlu elemanlar analizlerinin gerçekleştirilmesi için ticari ve akademik olarak yaygın kullanıma sahip ANSYS programı kullanılacaktır. Programda bulunan ACP (Ansys Composite PrepPost) modülü hem kompozit modellenmesine olanak sağlarken hem de malzeme verilerinin direkt olarak statik, zamana bağlı, harmonik gibi diğer modüllere aktarılmasına olanak sağlar. Tüm kompozit parçaların modellemeleri bu modülde yapılacaktır.



**Şekil 3.26 :** Analiz şeması.

### 3.5.1 Sonlu elemanlar yöntemi

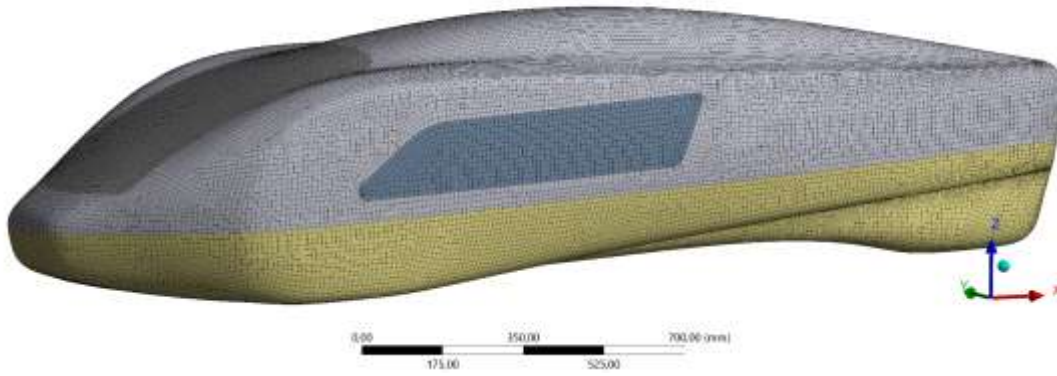
Sonlu elemanlar analizinde yapılan sonuçların teorik hesaplamalarını etkileyen en önemli hususlardan biri çözüm ağıdır (Şekil 3.27). Çözüm ağı (mesh), incelenen yapının sonlu büyüklükte eleman olarak adlandırılan küçük parçalara bölünmesi (ayrıklaştırılması) ile oluşturulur. Elemanların köşe noktalarında düğüm noktası (node) adı verilen noktalar bulunur. Elemanların ideal elemana yakınlığı teorik sonuca yakınlık ile orantılıdır. Dolayısıyla elemanların ve düğüm noktalarının oluşturması yapılan analizin doğruluğuna direkt olarak etki edecektir. Genel olarak elemanların küçültülmesi ile ideal elemana yaklaştıracaktır. Ancak eleman sayısının artması çözüm için gereken hesaplama gücünün artmasına sebep olur [4]. Yapılacak olan analiz kompozit gövde

laminasyonu belirlenmesi için yapılacağından dolayı kompozit yapılarda eleman kalitesi dikkate alınacaktır.

### 3.5.2 Çözüm ağı

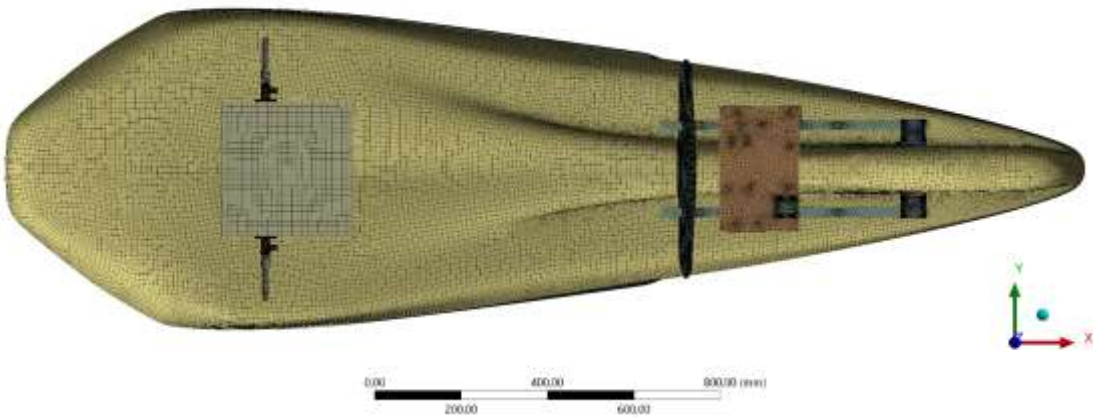
Çözüm ağı oluşturulması sırasında iki boyutlu (plakalar) ve üç boyutlu (katı) yapılar birlikte modellenmiştir. Kompozit yapılar kalınlık diğer boyutlara göre çok küçük kaldığından plaka olarak modellenebilir. Gövde, kutu, roll-bar (bölme duvarı) ve camlar plaka olarak modellenmiştir. Ancak metal parçalar üç boyutlu elemanlar ile modellenmiştir. İki boyutlu eleman olarak dörtgen (quadrilateral), üç boyutlu eleman olarak dört yüzlü (tetrahedral) elemanlar kullanılmıştır. Modelin büyüklüğünden ötürü çözüm süresinin azaltılması bakımından lineer elemanlar tercih edilmiştir.

Çözüm Ağı



Şekil 3.27 : Çözüm ağı (izometrik).

Çözüm Ağı



Şekil 3.28 : Çözüm ağı (üstten).



Şekil 3.28’de görülebileceği üzere kalite düşüklüğü metal parçalarda yoğunlaşmaktadır. Analiz süresi ve doğruluğunun kullanılan iş istasyonunun özelliklerine göre optimizasyonunun yapılması gerektiğinden bazı elemanların kalitesinin düşük olması kaçınılmazdır. Bu çalışmada kompozit gövde incelemesi yapılacağından metal parçaların eleman kalitesinden taviz verilmiştir. Ayrıca Çizelge 3.3’te eleman kalitesini ifade eden dört ölçüt için ortalama değer ve standart sapma gösterilmiştir. Çizelge incelendiğinde elde edilen değerlerin literatürde kullanılan değerleri sağladığı görülmektedir [5].

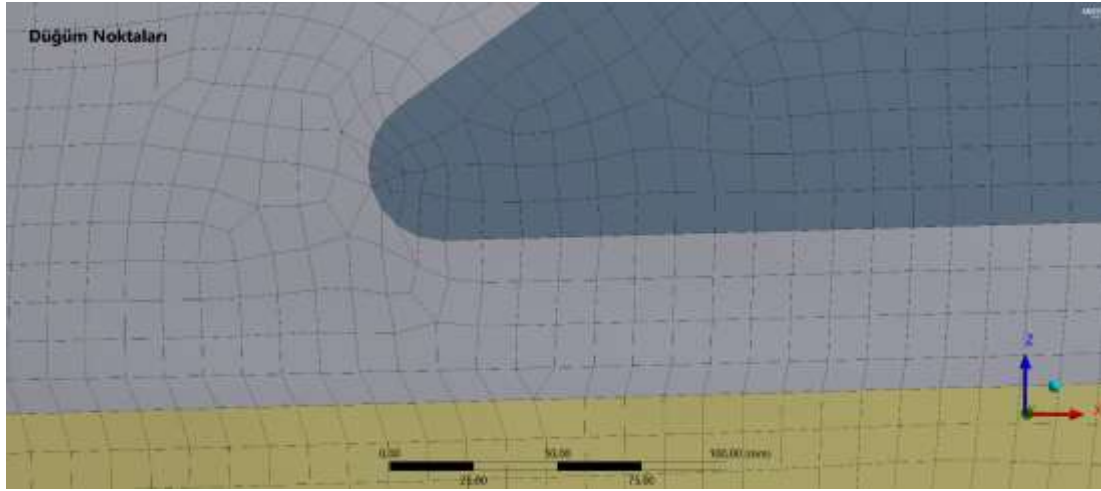
Çözüm ağının doğruluk seviyesinin kontrolü için eleman kalitesi dışında kullanılabilir birkaç farklı ölçüt bulunmaktadır. Bunlardan biri çözüm elde edildikten sonra daha fazla eleman kullanılarak tekrar çözüm elde edilmesidir. Bu yöntem, çözüm ağından bağımsızlık testi olarak geçmektedir. Yöntemde kıyas ölçütü olarak toplam birim şekil değiştirme enerjisi kullanılmıştır. Kullanılan veri çözüm elde edildikten sonra bulunmuş olsa da burada bahsedilmesi uygun görülmüştür. Oluşturulan ilk çözüm ağı Şekil 3.27 ve Şekil 3.28’de verilmiştir. Bu çözüm ağında toplam eleman sayısı 751097 olmaktadır. Çözüm sonrasında elde edilen toplam birim şekil değiştirme enerjisi ise 2383,2 mJ olarak hesaplanmıştır. Eleman boyutu küçültülerek 879327 elemana sahip bir başka çözüm ağı oluşturulmuştur ve birim şekil değiştirme enerjisi 2439,7 mJ olarak değişmiştir. Yapılan iki analizde eleman sayısı %17 artmasına rağmen enerji %2.3 değişim göstermiştir. Ancak iki statik analiz arasındaki çözüm süresi %50 arttığından dolayı eleman sayısının düşük tutulmasına karar verilmiştir. Enerjideki değişime göre çözüm, çözüm ağından bağımsızdır denebilir. Enerjideki değişim kabul edilebilir bir seviyede tutulmak kaydıyla eleman sayısı azaltılarak çözüm süresi hızlandırılabilir ancak verilerin doğruluğu için Şekil 3.27 ve Şekil 3.28’de gösterilen çözüm ağı kullanılmıştır.

Bir diğer doğrulama yöntemi ise birim şekil değiştirme enerjisi hatası (SERR) olarak adlandırılan ölçüttür. Kullanılan ticari program tarafından her eleman için birim şekil değiştirme enerjisi hesaplanır ve birbirlerine bağlı elemanlar arasındaki fark bulunur. İki eleman arasında oluşan fark süreksizliği göstermektedir. Bulunan değer toplam enerjiye bölünerek yüzde cinsinden ifade edilebilir. İncelenmek istenen bölgede farkın %5 mertebelerinde olması literatürde kabul görmektedir [7]. Bu yöntem kullanılarak bulunan sonuçlar ilerleyen kısımda gösterilmiştir.

	Eleman Kalitesi		Eğrilik (Skewness)		Jacobian Oranı (MAPDL)		Diklik Kalitesi	
Orta-lama	0.83	0.85	0.23	0.2	1	1.03	0.77	0.8
Standart Sapma	0.1	0.1	0.13	0.14	0.3	0.27	0.13	0.15

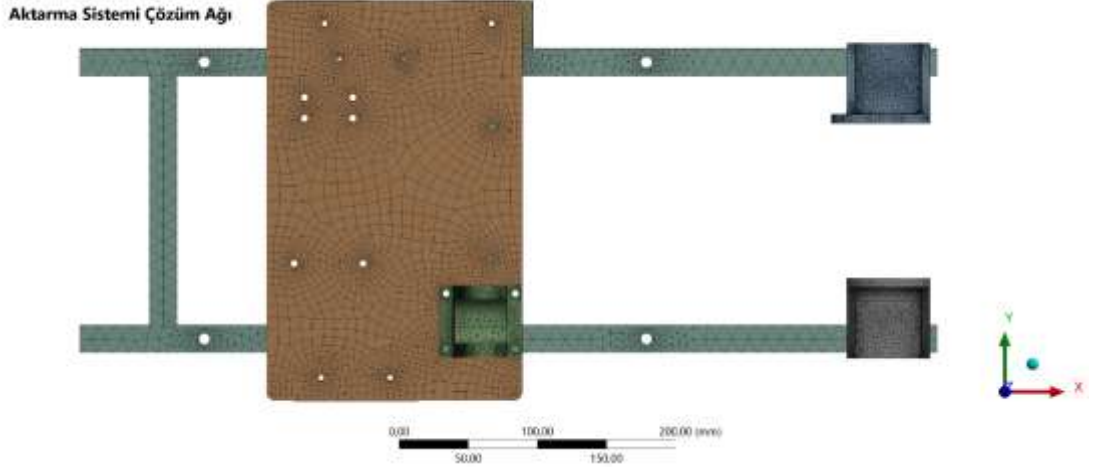
**Çizelge 3.3 :** Eleman kalitesi ölçütleri.

Analizde birden fazla parça bulunduğundan bağlantıların tanımlanması gerekmektedir. Bağlantı olan yüzeylerde veya köşelerde malzemelerin düğüm noktaları aynı olmalıdır. Noktaların aynı olmasının sağlanması için bağlantıların tanımlanması gerekmektedir. Aracın üst gövde, alt gövde ve yan camı arasındaki düğüm noktaları Şekil 3.29’da görülebilir.



**Şekil 3.29 :** Bağlantı bölgeleri.

Metal parçalardan oluşan aktarma ve direksiyon sistemi için oluşturulan çözüm ağları Şekil 3.30 ve Şekil 3.31’de gösterilmektedir. Bahsedilen sistemlerin analizleri ve boyutlandırması önceki çalışmalarda yapıldığından eleman sayısının azaltılması için eleman kaliteleri ayrıca incelenmeyecektir (Güdülü, O., Eğer, E., Koten, U., 2019).



Şekil 3.30 : Aktarma sistemi çözüm ağı.



Şekil 3.31 : Direksiyon sistemi çözüm ağı.

### 3.5.3 Kompozit modellenmesi

Çözüm ağı oluşturulması aşamasından sonra ACP modülünde kompozit malzemelerin tanımlanması kısmına geçilmiştir. İlk olarak mekanik modülünde kompozitlerin isimlendirilmesi (named selection) ileriki aşamada kolaylık sağlayacaktır. ACP modülü malzeme özelliklerini “mühendislik verisi (engineering data)” kısmından almaktadır. Kumaş kısmından malzeme özellikleri seçilerek kalınlık tanımlanır. Oluşturulan kumaşlar ve çekirdek malzemeler birleştirilerek lamineler oluşturulabilir. Araçta kullanılan lamineler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Ayrıca malzeme polarları için EK B.1’e bakınız.

<i>Kısım</i>	<i>Alt gövde</i>	<i>Üst gövde</i>	<i>Kutu</i>	<i>Roll-bar</i>
<i>Malzeme</i>	3 kat karbon fiber (0,45,0)	2 kat karbon fiber (0,45)	Karbon fiber sandviç yapı (PVC köpük 5 mm)	Karbon fiber sandviç yapı (PVC köpük 8 mm)

**Çizelge 3.4 :** Kompozit lamine yapısı.

Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri program tarafından hesaplanmaktadır.

	<i>Alt</i>	<i>Üst</i>	<i>Kutu</i>	<i>Roll-bar</i>
<i>Eğilme lamine kayma katılığı</i>	17905	22971	14242	10778
<i>Eğilme katılığı E1</i>	58718	52640	48141	36431
<i>Eğilme katılığı E2</i>	58718	52640	48141	36431
<i>Eğilme kayma katılığı</i>	21147	22971	7522	4792
<i>Lamine katılığı E1</i>	54956	52640	25416	16189
<i>Lamine katılığı E2</i>	54956	52640	25416	16189
<i>Düzlem dışı kayma G23</i>	2256	2249	44	28
<i>Düzlem dışı kayma G31</i>	2256	2249	44	28
<i>Kayma düzeltme k44</i>	0.835	0.833	0.0375	0.0370
<i>Kayma düzeltme k55</i>	0.835	0.833	0.0375	0.0370

**Çizelge 3.5 :** Laminelerin mekanik özellikleri.

İşlemler sonunda oluşan yapı Şekil 3.32’de görülebilir.

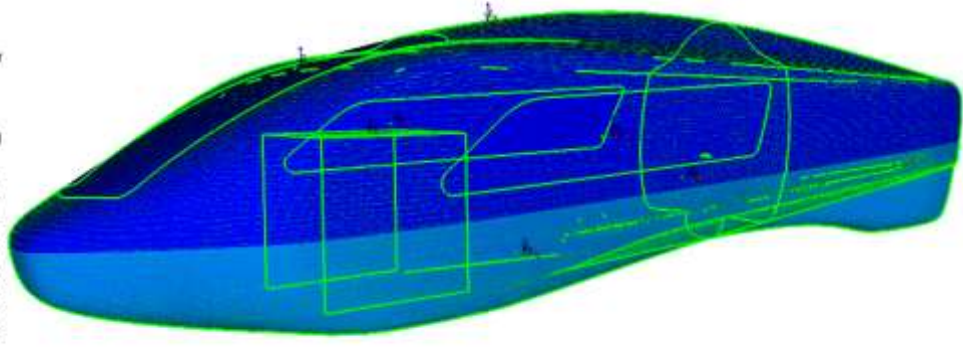
ACP Model  
5.1.2020 18:30

Thickness  
Element-Wise  
Unit: mm  
Max: 9.32  
Min: 1

Selection:  
NP - üst  
NP - orta  
NP - solbar  
NP - alt

Thickness,1  
9.32  
8.3956  
7.4711  
6.5467  
5.6222  
4.6978  
3.7733  
2.8489  
1.9244  
1

ANSYS  
R19.0



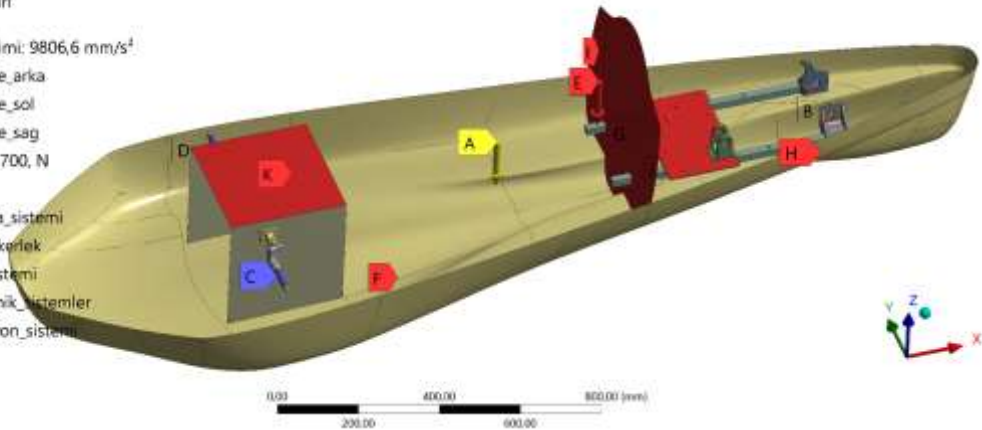
Şekil 3.32 : Gövde laminasyonu.

### 3.5.4 Statik analiz

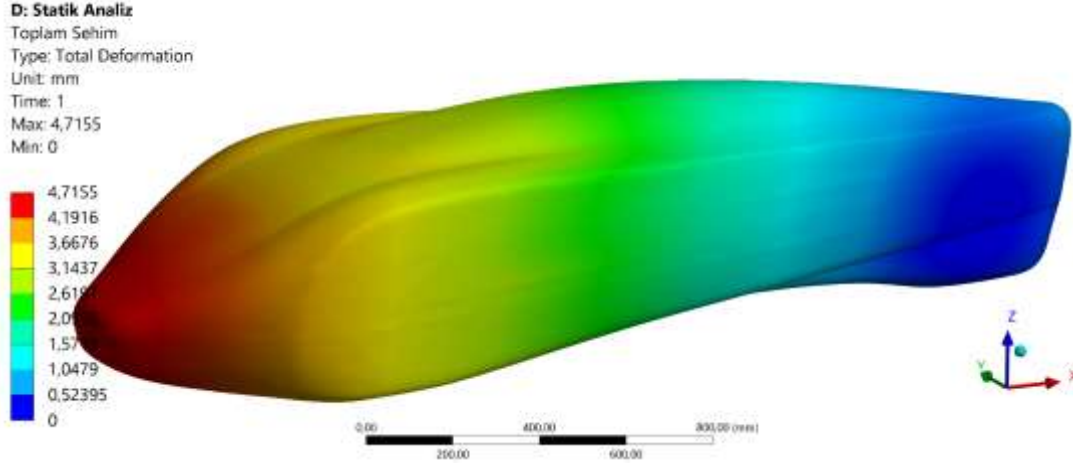
Bu aşamadan sonra statik analiz kısmına geçilmiştir. Sınır koşulları olarak tekerlek bağlantılarından sabit mesnet, yer çekimi, sürücü ağırlığı ve motor bölgesindeki parçaların ağırlığı uygulanmıştır. Statik analizde sınır koşulları uygulandıktan sonra analiz yapılır. Şekil 3.33'te sınır koşulları verilmiştir. Sarı renkle gösterilenler ivme, mor ile gösterilenler ankastre mesnet, kırmızı ile gösterilenler ağırlıkları ve dış kuvvetleri göstermektedir.

D: Statik Analiz  
Sınır Koşulları

- A yer\_çekimi: 9806,6 mm/s<sup>2</sup>
- B ankastre\_arka
- C ankastre\_sol
- D ankastre\_sag
- E rollbar: 700, N
- F pilot
- G aktarma\_sistemi
- H arka\_tekerlek
- I yakıt\_sistemi
- J elektronik\_sistemler
- K direksiyon\_sistemi

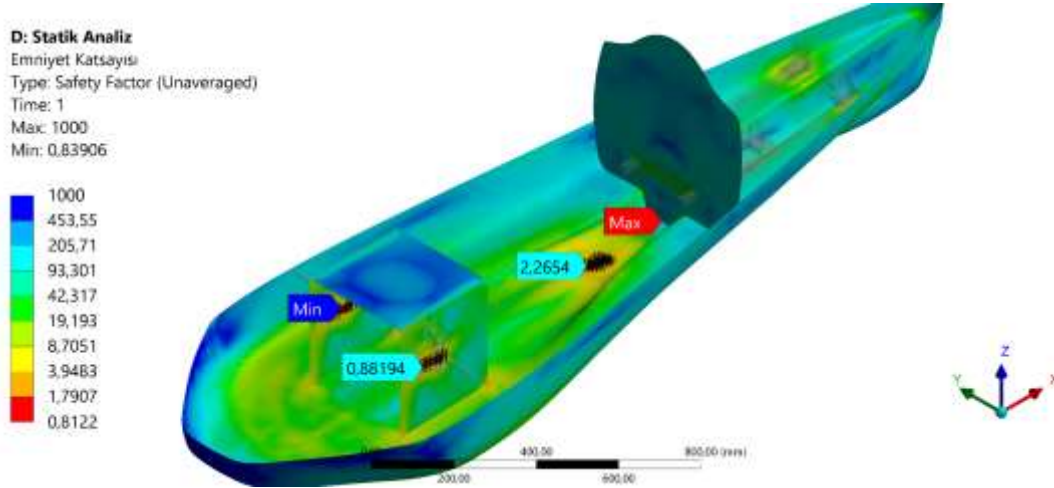


Şekil 3.33 : Sınır koşulları.



**Şekil 3.34** : Toplam şekil değıştirme.

Şekil 3.34'te toplam şekil değıştirme miktarı gösterilmiştir. Aracın mesnete en uzak kısmı olan burun kısmında şekil değıştirmenin en fazla olduğu görülmektedir. Aktarma sistemi ile desteklenen arka gövdede ise sehim miktarı çok düşüktür



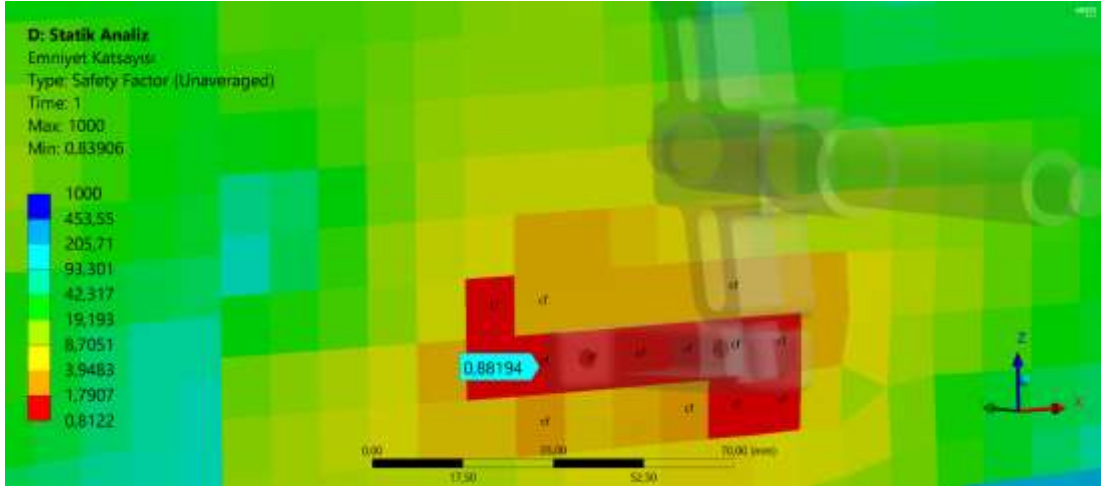
**Şekil 3.35** : Kompozit yüzeyler için emniyet katsayısı (çekirdek hasarı).

Şekil 3.35'de kompozit yüzeyler için çekirdek hasarı ve kuadratik hasar kriterleri birlikte hesaplanarak bulunan emniyet katsayısı gösterilmektedir. Aracın üst yüzeyinde gerilme miktarı çok düşük olduğundan gizlenmiştir. Şekilde görülebileceği üzere direksiyon sisteminin bağlandığı kısımda emniyet faktörü 0,88 olmaktadır. Şekil 3.36'da daha yakından verilen bu kısımda en kritik hasar kriteri çekirdek hasarıdır. Çekirdek olarak kullanılan malzemenin hasara uğraması yapı bütünlüğüne zarar vermeyeceğinden bu durum için yapı değışikliğine gidilmeyecektir. Ancak yine de farklı çekirdek mazlemeler ile analiz tekrar yapılmıştır. Çizelge 3.6'da farklı malzemeler için bulunan emniyet katsayıları görülebilir.

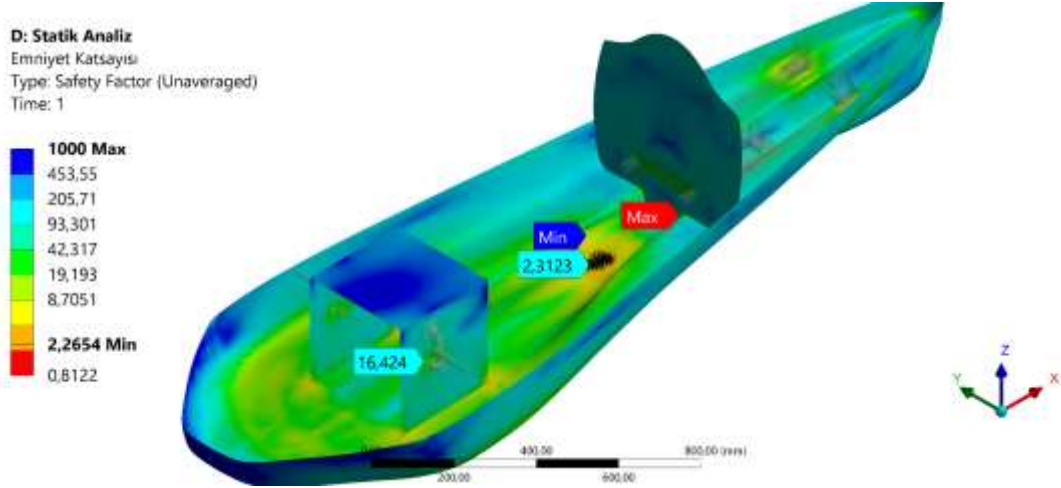
Kutu Çekirdek 5 mm PVC köpük 8 mm PVC köpük Bal Peteği (Honeycomb)  
Mazlemesi

Emniyet	0.88	0.92	0.92
Katsayısı			

Çizelge 3.6 : Farklı çekirdek malzemeler için emniyet katsayıları.



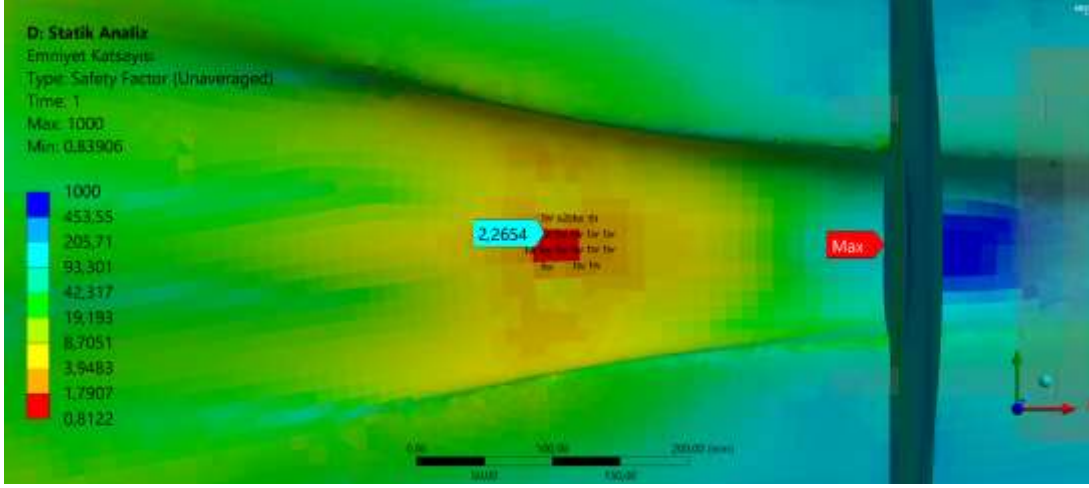
Şekil 3.36 : Çekirdek hasarı görülen bölge (5 mm PVC köpük).



Şekil 3.37 : Kompozit yüzeyler için emniyet katsayısı (kuadratik hasar kriteri).

Şekil 3.37'de çekirdek hasarı göz önünde bulundurulmadan emniyet katsayısı incelenmiştir. Direksiyon bağlantı bölgesinde açıkça görülebileceği üzere kuadratik hasar kriterleri bakımından yapı emniyetlidir. Emniyet katsayısı düşürülerek ağırlık azaltılabilir. Ancak yapı üzerinde bağlama elemanlarının fazla olmasından dolayı önceki tecrübelerle dayanarak yapının bahsedilen laminasyonda tutulması

kararlaştırılmıştır. Bahsedilen bölgede bağlantıların sağlamlığının sağlanması için alüminyum plakalar ile güçlendirme yapılması zlp sklme sırasındaki aşınmalar için nlem olabilir. En düşük emniyet katsayısı ise pilotun oturduğu bölgede oluşmaktadır (şekil 3.38). Yapı bynlğnn sağlanması ve hesaba katılmayan hafif çarpışmalar gibi sebeplerden ötürü yapının kalanının laminasyonunda değişikliğe gidilmeyecektir.



**şekil 3.38** : Kuadratik hasar kriteri en düşük olan bölge.

Metal parçaların analizinde maksimum biçim değiştirme enerjisi (von-Mises) hipotezi kullanılmıştır. Alüminyum gibi sünek metallerin incelenmesinde bu kriter sıkça kullanılmaktadır [8]. Malzemedeki asal gerilmeler  $\sigma_1$  ve  $\sigma_2$  (düzlem gerilme hali için), akma gerilmesi  $\sigma_{ak}$  ve mukayese gerilmesi  $\sigma_v$  olmak üzere;

$$\sigma_{ak} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (3.25)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (3.26)$$

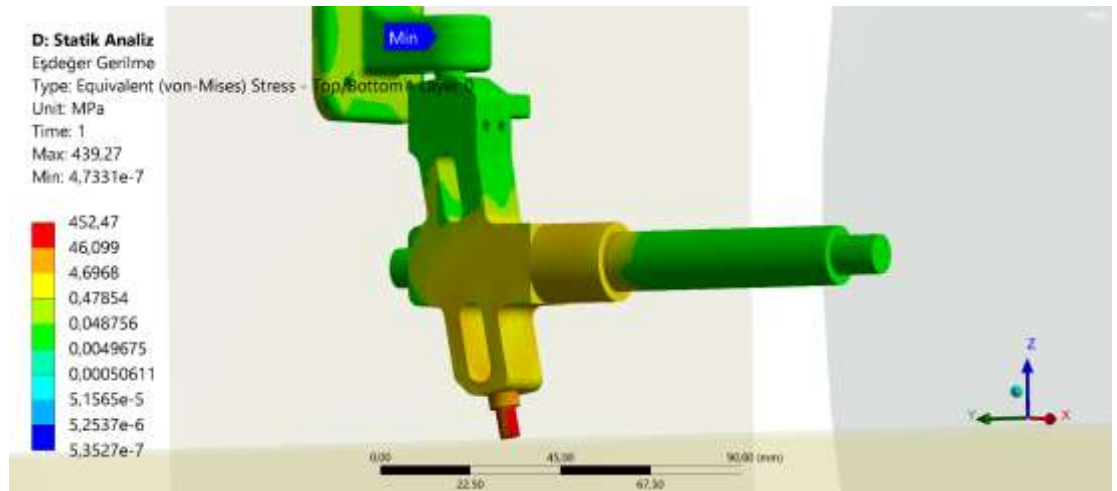
olmaktadır. Denklem 3.35 hasar şartını, denklem 3.26 mukayese gerilmesini ifade eder [9].

şekil 3.39’da araçtaki en yüksek gerilmenin oluştuğu parça gösterilmiştir. Kullanılan programda kompozit ve metaller bir arada kullanıldığında metaller için emniyet katsayısı hesaplanamamaktadır. Ancak malzemenin (Al 7075 T6) akma gerilmesi akma gerilmesine bölünerek en düşük emniyet gerilmesi bulunabilir (Denklem 3.27). Bulunan değer akma sınırına yakın çıkmaktadır. Ancak akson ve akson yatağı arasında



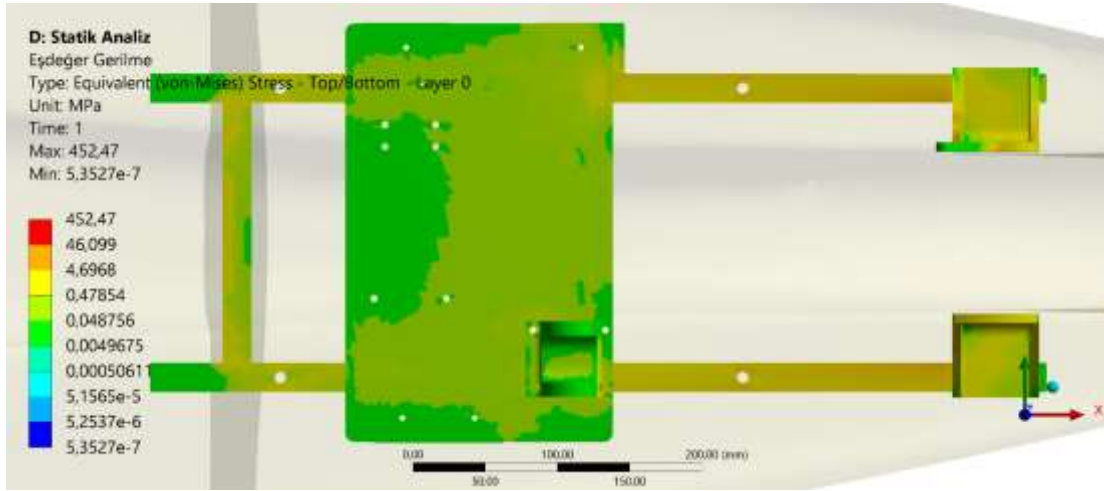
kalan bu kısımda bulunması gereken radyal ve aksel rulmanlar analizde gösterilmediğinden gerilme olması gerekenden fazla çıkmaktadır. Yapılan analizde model büyüklüğünün azaltılması için bu rulmanlara yer verilmemiştir. Aradaki bağlantı silindirik mafsallık ile tanımlanmıştır. Bu bağlantı malzemenin şekil değiştirmesine izin vermemektedir. Bağlantı bölgesinde rulman bulunması durumunda ise yükün bir kısmı rulman tarafından taşınacaktır. Analiz sonuçlarına göre parça bu şartlar altında bile emniyetli olduğundan yapı emniyetli kabul edilebilir.

Şekil 3.40'da aktarma sistemi için eşdeğer gerilme gösterilmektedir. Aracın analizi statik yükleme koşulu altında gövde laminasyonu belirlenmesi amacı ile yapılmıştır. Bu durum gövde için hasar modlarından biri olsa da aktarma sistemi üzerinde herhangi bir zorlanma oluşturmamaktadır. Gelecek çalışmalarda araçta üzerindeki aktarma sistemi ve diğer metal parçaların bulunduğu sistemlerin kritik koşulları üzerine kinematik model ve testler kullanılarak araştırmalar yapılmalıdır. Örnek olarak, araç ivmelenmesi sırasında zincir üzerinde oluşacak kuvvetler ile aktarma sistemi, araç havada taşıma durumundayken veya yüksek hızla viraja girme durumunda direksiyon sistemi veya pilotun direksiyon kontrolü yaptığı sırada kutu incelenebilir.



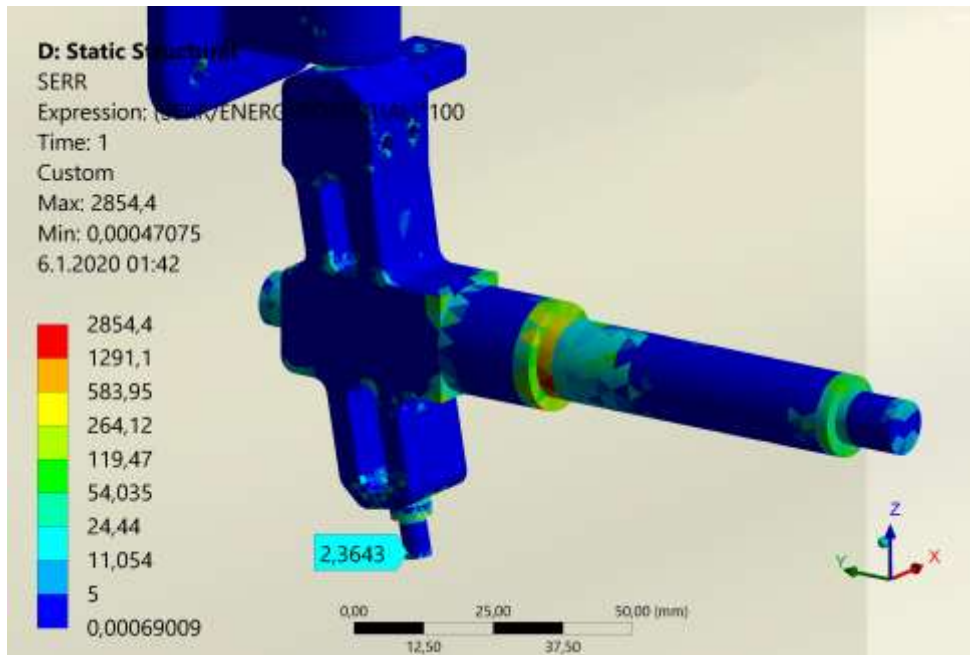
Şekil 3.39 : En yüksek gerilme oluşan parça (akson).

$$S = \frac{\sigma_{ak}}{\sigma} = \frac{452,5}{475} = 1.05 \quad (3.27)$$

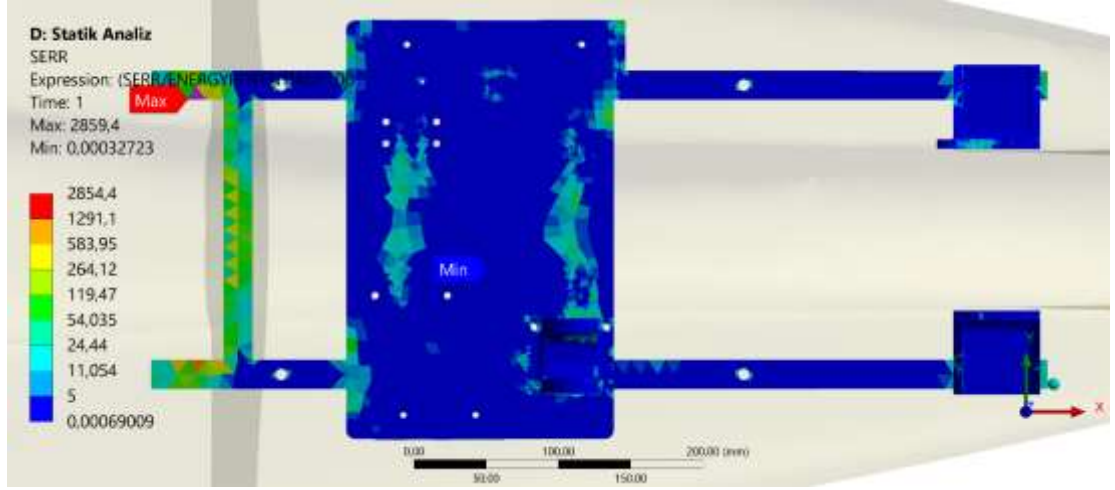


Şekil 3.40 : Aktarma sistemi için von-Mises gerilmesi.

Gerilmenin en yüksek olduğu bölgedeki sonucun çözüm ağından bağımsız olup olmadığının incelenmesi için birim şekil değiştirme enerjisi hatası incelenebilir. Bu işlemin detayları Bölüm 3.5.2 Çözüm ağı kısmında açıklanmıştır. Şekil 3.41 ve Şekil 3.42’de verilen görsellerde metal parçalar için dağılım görülebilir. Mavi ile renklendirilen kısımlarda enerji hatası değeri %5 sınırından aşağıda kalmaktadır. Gerilmenin en yüksek olduğu bölgede de bu değer %2 ila %5 arasında değişmektedir. Birim şekil değiştirme enerjisi hatasının bazı bölgelerde çok yüksek çıktığı görülebilir. Ancak bu bölgelerde herhangi bir kritik yükleme durumu olmadığından azaltılması için çalışma yapılmamıştır.



Şekil 3.41 : Eşdeğer gerilmenin en yüksek olduğu bölge için birim uzama enerjisi hatası.



Şekil 3.42 : Aktarma sistemi için birim uzama enerjisi hatası.

### 3.5.5 Modal analiz

Mod	Frekans (Hz)
1	20,587
2	22,091
3	26,932
4	57,039
5	65,964
6	67,618
7	70,699
8	80,635
9	89,435
10	104,01
11	105,27
12	105,95
13	113,75
14	114,86
15	115,53
16	120,05
17	121,21
18	131,74
19	138,23
20	139,37

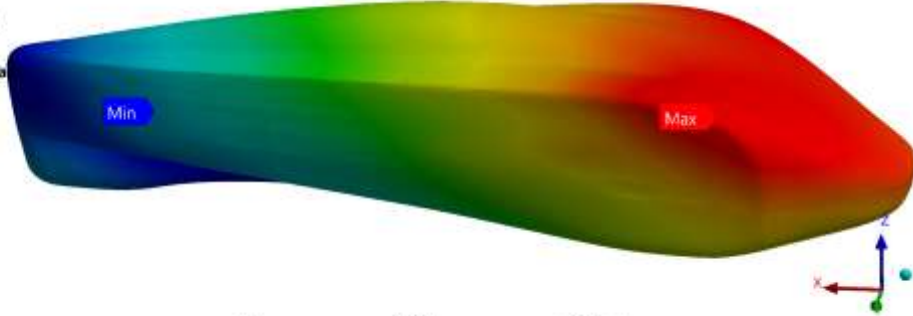
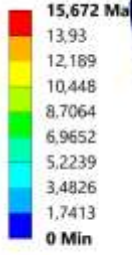
Çizelge 3.7 : Gövdenin ilk 20 doğal frekansı.

Araç için statik analize ek olarak modal analiz gerçekleştirilmiştir. Bulunan ilk 20 doğal frekans Çizelge 3.7’de verilmiştir. Bu frekansların ilk altısına verilen tepkiler Şekil 3.43’de görülebilir. Modal analiz sonuçlarında bağlantı noktalarında ayrılma olmaması bağlantıların doğru tanımlandığını göstermektedir. Ayrıca aracın arka kısmının

kapalı bir kesit olarak mukavemeti arttırması ve tekerlek motor bağlantısını gerçekleştiren alüminyum profillerin yapının rijitliğine sağladığı fayda sonuçlarda gözlemlenmektedir. Aracın maksimum hızının 15 m/s olduğu düşünülduğünde, yapının yarışma sırasında en düşük doğal frekans değerine ulaşmayacağı düşünülmektedir.

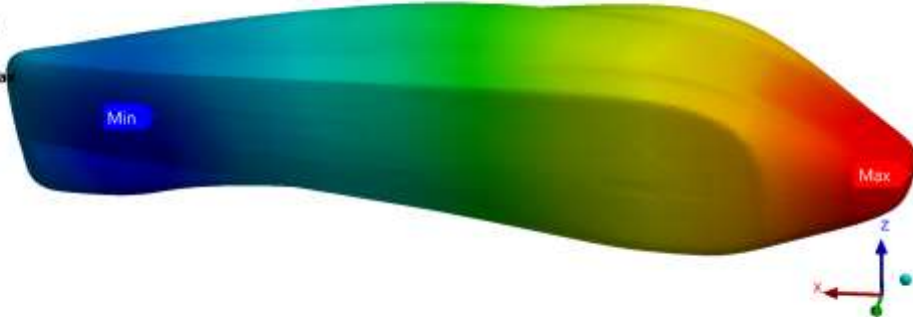
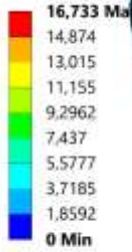
**E: Modal**

Toplam Sehim  
Type: Total Deformation  
Frequency: 20,587 Hz  
Unit: mm  
6.1.2020 19:18



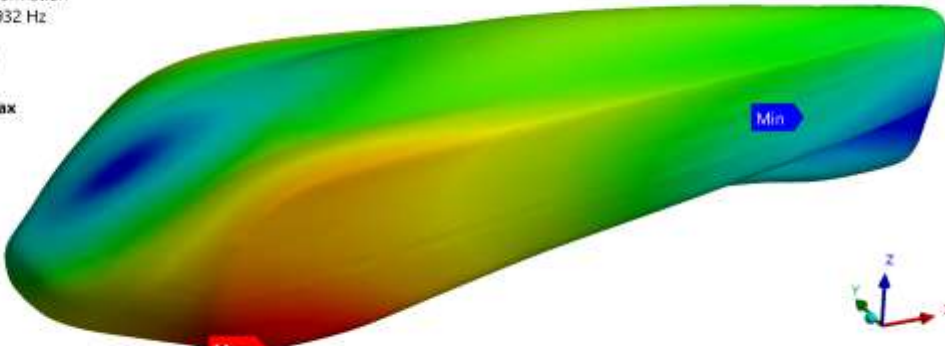
**E: Modal**

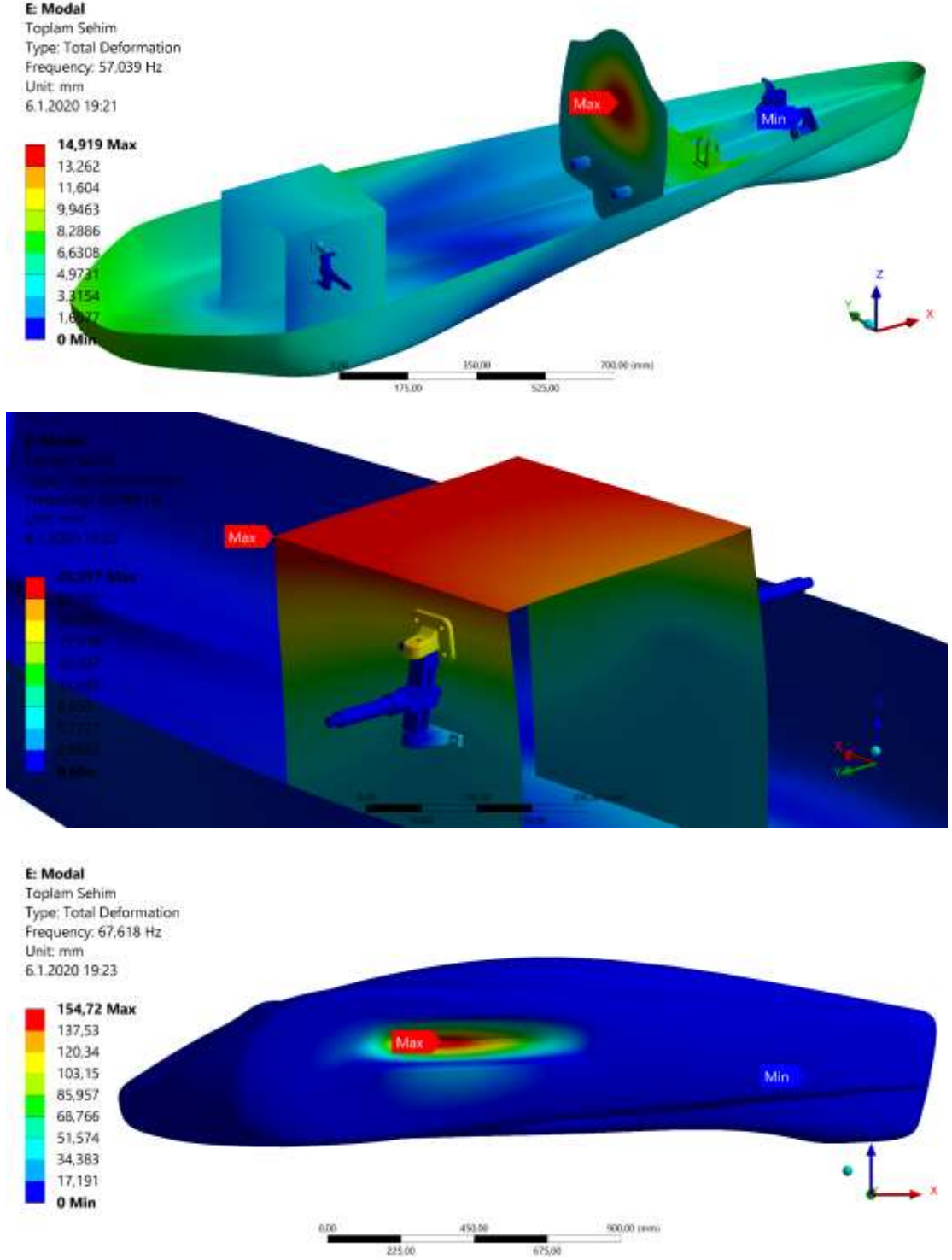
Toplam Sehim  
Type: Total Deformation  
Frequency: 22,091 Hz  
Unit: mm  
6.1.2020 19:18



**E: Modal**

Toplam Sehim  
Type: Total Deformation  
Frequency: 26,932 Hz  
Unit: mm  
6.1.2020 19:20





**Şekil 3.43 :** Araç gövdesinin rezonans tepkileri.

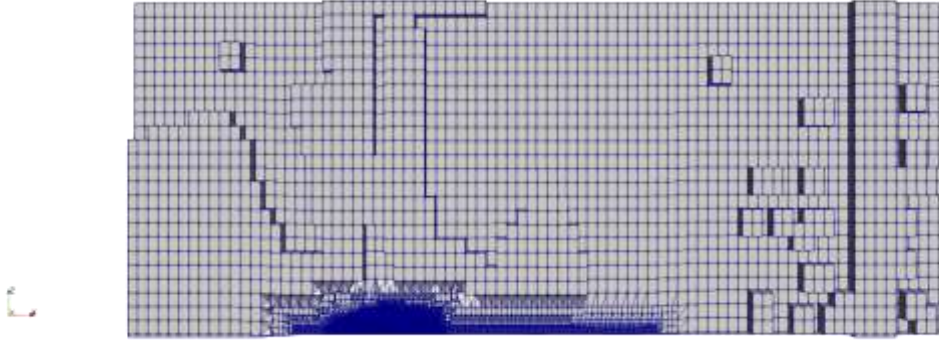
Bulunan doğal frekanslar ile başlangıç noktasında tahminler yapılabilir. Çalışma ilerletilmek istenirse aracın zorlanmış titreşim cevabının incelenebilmesi için aracın kullanıldığı hız aralığında yoldan gelecek harmonik kuvvetler ile harmonik analiz yapılmalıdır. Ayrıca aracın arka kısmında bulunan içten yanmalı motorun çalışma aralığı incelenerek oluşturduğu frekansların rezonans oluşturma ihtimali incelenebilir.

### 3.6 Aerodinamik Analiz

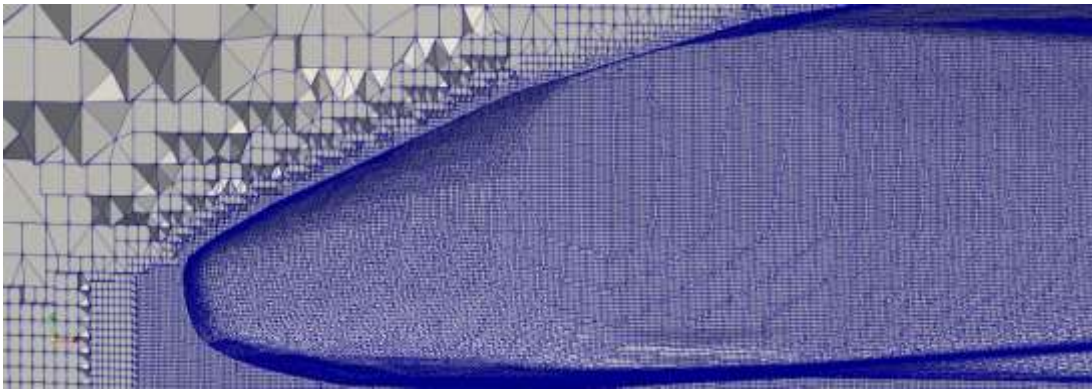
Aracın aerodinamik özellikleri yakıt tüketiminin azaltılması için büyük öneme sahiptir. Aerodinamik katsayıların hesaplanması için hesaplamalı akışkanlar mekaniği yöntemi kullanılmıştır. Hesaplamalı analizler OpenFOAM adlı açık kaynaklı platformda gerçekleştirilmiştir.

Yeni tasarlanan aracın ölçüleri, sürececek olan pilot seçiminde esneklik oluşturulması ve araç içerisinde çalışma alanının artırılması gibi kritik sebeplerden ötürü artırılmıştır. Bu durumun sürüklenme kuvvetinde artışa neden olacağı barizdir. Bu kuvvetteki artışın %10'dan fazla olmaması hedef olarak belirlenmiştir.

HAD kullanılırken ilk olarak çözüm ağı oluşturulmalıdır. OpenFOAM platformunda *blockmesh* ve *snappyhexmesh* komutları kullanılarak çözüm ağı oluşturulmuştur (Şekil 3.44). Ayrıca sınır tabaka akışının net olarak gözlemlenebilmesi için eleman boyutları araç geometrisi etrafında sıklaştırılmıştır. Oluşturulan çözüm ağı literatürde sıkça kullanılan kalite kriterlerini sağlamaktadır.



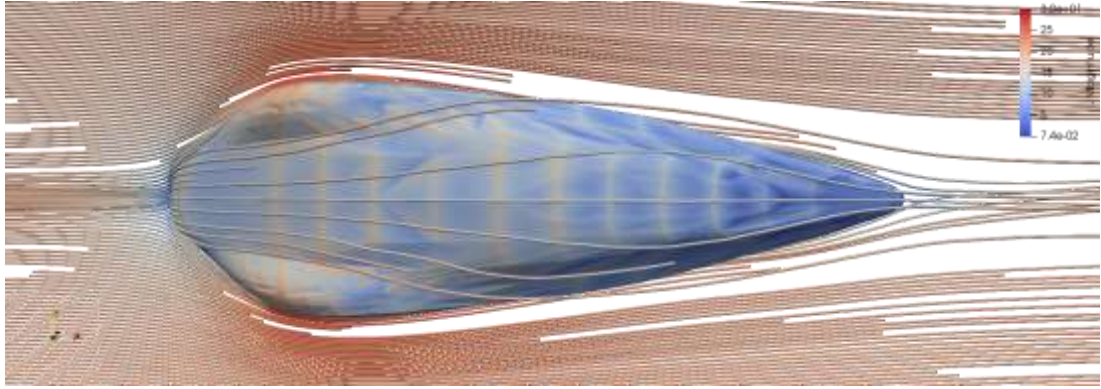
Şekil 3.44 : HAD çözüm ağı.



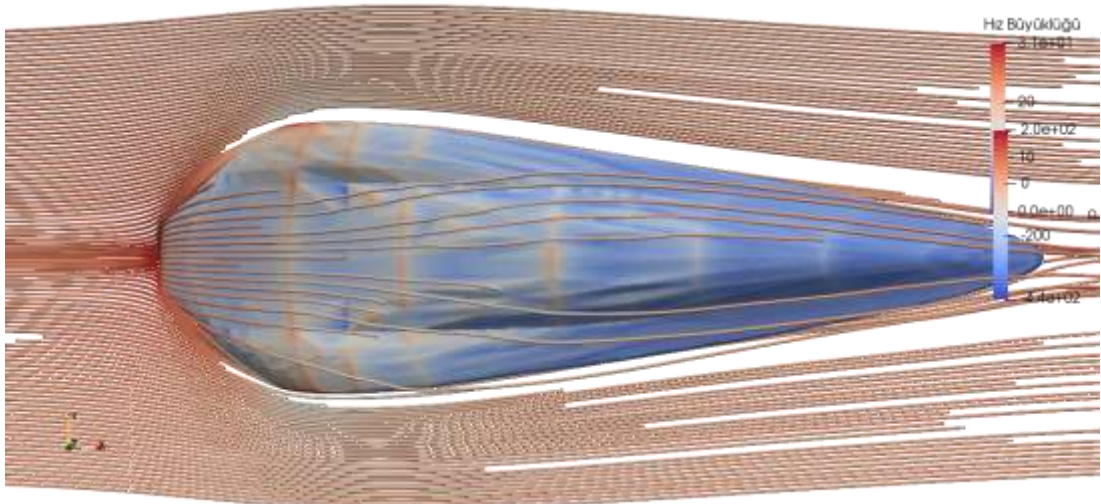
Şekil 3.45 : Çözüm ağının sıklaştığı sınır tabaka bölgesi.

Başlangıç koşulları olarak giriş düzleminde 20 m/s hız uygulanmıştır. Diğer sınır koşulları için standart özellikler kullanılmış (1 atm, kaymama koşulu vb.) veya programa hesaplatılmıştır (zerogradient). Ayrıca çözüm aşamasından önce *potentialfoam* fonksiyonu kullanılarak ilk sınır koşulları programa hesaplatılmıştır. Bu fonksiyon kütle korunumu ve basınç dengesi denklemlerini çözmektedir.

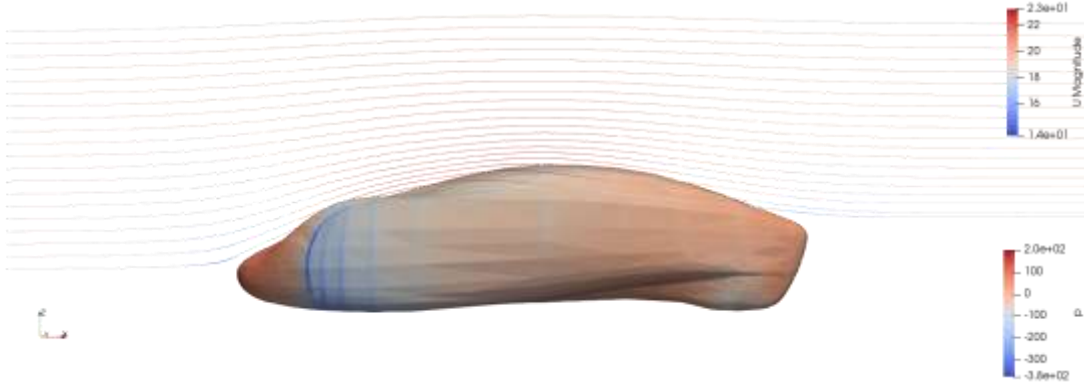
Çözücü olarak *simplefoam* çözücüsü kullanılmıştır. Bu çözücü, SIMPLE algoritması kullanarak sıkıştırılmayan türbülanslı akışlar için zamandan bağımsız çözüm yapar. Çözücü, benzer problemler için literatürde kullanılan en popüler çözücülerden biridir. Türbülans modellenmesi için Reynolds ortalamaları simülasyonlarından *kOmegaSST* kullanılmıştır. Bu modelde “k” türbülans kinetik enerjisini, “ $\omega$ ” türbülansın ölçeğini, SST ise kayma gerilmesi transportunu ifade eder.



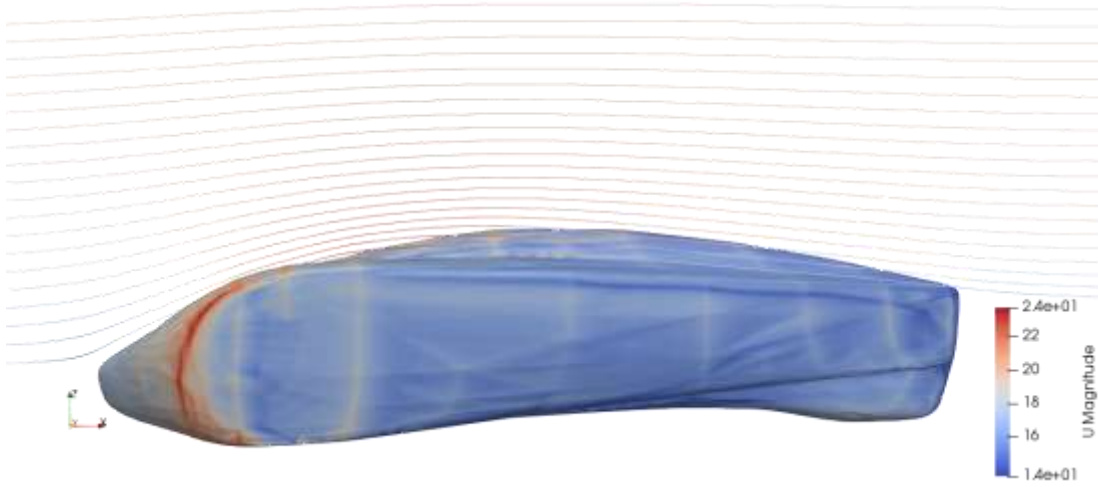
Şekil 3.46 : Macaw 2 için akış çizgileri(xy düzlemi).



Şekil 3.47 : Macaw 3 için akış çizgileri (xy düzlemi).



**Şekil 3.48** : Macaw 2 için akış çizgileri(xz düzlemi).



**Şekil 3.49** : Macaw 3 için akış çizgileri(xz düzlemi).

Yukarıdaki şekillerde Macaw 2 ve Macaw 3 için akış çizgileri (streamline) 2 farklı düzlem için gösterilmektedir. Çizgiler akış hızına göre renklendirilmiştir. Sonuçlarda Macaw 3 adlı aracın akışa daha fazla direnç gösterdiği görülmektedir. Ancak aracın büyümesi gerektiği gerçeği olduğundan bu durumun etkisi en aza indirilmesi için tasarım yapılmıştır.

Sonuç olarak Macaw 2'nin sürüklenme katsayısı 0,172 olurken, Macaw 3'de 0,195 olmaktadır.

*Sürüklenme Katsayısı*    *Sürüklenme Kuvveti (12 m/s) [N]*

Macaw 2	0,172	63,61
Macaw 3	0,195	75,35



Analiz ile ilgili diğer görseller Macaw 2 için EK C.1’de Macaw 3 için EK C.2’de bulunabilir.



## **4. MALZEME SEÇİMİ VE ÜRETİM**

Araçlarda yakıt ekonomisine en fazla etki eden faktörlerden biri aracın ağırlığıdır. Bir pilot ile kullanılan, gerçek bir motor sporları pistinde yirmi farklı araç ile aynı anda seyir eden, içten yanmalı motor ile çalışan aracın gövde malzemesinin seçimi için dikkat edilmesi gereken kriterler şu şekildedir:

- 1.Hafiflik: Gövde, yakıt verimliliği için hafif olmalıdır.
- 2.Şekil verme kolaylığı: Aerodinamik isterlerin karşılanması için gövde, damla modeli şeklinde tasarlanmıştır. Seçilen malzeme bu geometride üretilmeye uygun olmalıdır.
- 3.Üretim kolaylığı: Gövde, seri üretim imkânları bulunmayan takım atölyesinde imal edilebilmelidir.
- 4.Güvenlik: Tasarlanan araç aynı anda yirmi takımın aracının bulunduğu pistte yarışmaktadır. Yarışma sırasında yarış stratejisinden ötürü aracın hızı 50 km/s hızlara çıkabilmektedir. Gövde malzemesinin seçiminde, bu şartlar altında kaza olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.
5. Maliyet: Takım bütçesi ile üretilecek olan gövdenin maliyetinin bütçede belirlenen sınırlar içerisinde kalması gerekmektedir.

Bu hususlar göz önünde bulundurularak kapsamlı bir literatür araştırması gerçekleştirilmiştir.

### **4.1 Literatür araştırması**

Yapılan araştırmalar sırasında günümüzde otomotiv sektöründen savunma sanayiine kadar pek çok sektörde revaçta olan kompozit malzemeler üzerine yoğunlaşmıştır.

#### **4.1.1 Kompozit malzemeler**

##### **4.1.1.1 Fiber materyaller**

Kısa veya uzun devamlı elyaf formunda kullanıldığı ve matrisi yaklaşık %60 hacim oranında pekiştirici işlevi olan malzemelerdir. Cam, karbon ve aramid otomotiv sektöründe yaygınca kullanılan tipleridir.

## **Cam elyaf**

Elyaf takviyeli kompozitler arasında en yaygın bilinen ve kullanılan fiber tipi olan cam elyaflar; silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda gibi cam üretim maddelerinden üretilmektedir. Cam elyaflar diğer kompozit malzemelerine kıyasla daha ucuzdurlar, korozyon dirençleri iyidir ve elektrik iletmezler. Cam elyafı dibinde küçük delikler bulunduran özel tasarlanmış bir ocaktan eritilmiş camın itilmesiyle üretilir. Bu ince lifler soğutulduktan sonra makaralara sarılır. Matris ile cam arasında yapışma gücünü arttıran ve cam elyaf üzerinde ince bir film oluşturan kimyasallar kullanılır. Matris ile fiber iyi yapışmaz ise kompozit malzemenin sertliği ve sağlamlık performansı düşebilmektedir. Farklı türde cam elyaf üretebilmek için değişik kimyasallar eklenir ve özel üretim metotları kullanılır. Bu farklı tipteki camlara örnek olarak A Cam, C Cam ve E Cam verilebilir. A Cam kompozitlerde çok fazla kullanılmaz daha çok pencere ve şişelerde kullanılır. C Cam depolama tankları gibi yüksek kimyasal dirence ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılır. E Cam ise düşük maliyet, iyi yalıtım ve düşük su emiş oranına sahiptir. Takviye elyaflarının üretiminde en çok kullanılan cam türüdür.

## **Aramid**

Yüksek dayanıklılık, yüksek darbe dayanıklılığı ve düşük yoğunluk aramidin öne çıkan özellikleridir. Ayrıca yorulma dayanımı ve korozyon direnci de yüksektir. Kevlar elyafı kompozitler cam elyafı kompozitlere kıyasla ortalama %35 daha hafiftir. Aramid elyafının piyasadaki ticari ismi kevlar'dır. En çok bilinen ve kullanılanları ise Kevlar 29 ve Kevlar 49 çeşitleridir. Kevlar 29 üstün darbe dayanımı özelliği nedeniyle kurşungeçirmez yelek yapımı gibi uygulamalarda tercih edilmektedir. Genellikle polimer matrisler için takviye elemanı olarak kullanılan aramid elyafı; balistik koruma uygulamalarında, hava araçları gövde parçalarında, debriyajda bulunan sürtünme balataları ve fren kampanalarında kullanım alanına sahiptir.

Aramidin bazı türleri ultraviyole ışık altında bozulma gösterebilmektedir bu nedenle karanlıkta muhafaza edilmelidirler. Ayrıca aramid elyaflarda elyaflar çok iyi birleşmemelidir, iyi birleşmeme reçinede mikroskobik çatlaklara yol açarak malzeme yorulduğunda su emişine neden olmaktadır.

## **Karbon elyafı**

Karbon elyafları epoksi matrisler ile birleştirildiğinde yüksek dayanıklılık ve sertlik özellikleri göstermektedirler ve düşük ağırlığa sahiptirler. Karbon elyaflar çelikten

%70, alüminyumdan ise %40 daha hafiftir (Rehkopf vd., 2012). Düşük ağırlık; otomobillerde yakıt tasarrufu, artan tork ve rahat bir sürüş sağlamaktadır. Karbon elyafı kompozitler, karbonun yüksek sertliğinden dolayı rijit yapıların elde edilmesine olanak verir. Aramid ve cam elyafın aksine karbon elyaflar elektrik iletkenliğine sahiptir. Karbon elyaflarının geleneksel üretim yöntemleriyle üretimi zordur ve bu nedenle üretimi pahalı ve seri üretime uygun olmayan bir malzemedir. Üretimini pahalı olması kullanım alanını da kısıtlamaktadır. Ferrari, BMW, Honda ve Mercedes gibi ünlü otomobil üreticisi firmalarının kullanımı dışında uçak sanayi, spor gereçleri ve yüksek değerli tıbbi uygulamalarda da kullanılmaktadır. Karbon elyafı çoğunlukla iki malzemenin elde edilmesinden oluşur; zift ve PAN (poliakrilonitril). Zift tabanlı olanlar daha düşük mekanik özelliklere sahip olduklarından yapısal uygulamalarda nadiren tercih edilir. PAN tabanlı karbon elyafları daha sağlam ve daha hafif bir sistem elde edilmesine olanak vermektedir. Karbon elyafları piyasada iki biçimde bulunmaktadır; sürekli ve kırılmış elyaf. Bütün reçinelerle kombine edilebilen sürekli elyaflar dokuma, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda ve prepreglerde kullanılmaktadır. Kırılmış elyaflar ise enjeksiyon kalıplamada, basınçlı kalıplarda makine parçaları yapımı ve kimyasal valf yapımında kullanılır. Elde edilen ürünler yüksek sertlik ve dayanımın yanı sıra yüksek korozyon dayanımına da sahip olurlar.

#### **4.1.1.2 Matris tipleri**

Matris, birlikte kullanıldığı elyafı uyumlu seçilir ve elyafa iyi yapıştırsa elyafı darbelerden korumak, kuvvetleri elyafa iletmek ve düzgün dağılımını sağlamak, kompozit malzemenin tokluğunu arttırmak gibi özelliklerin kazanılmasını sağlar. Otomotiv endüstrisinde polimer tabanlı matrisler, metal tabanlı matrisler ve seramik tabanlı matrisler kullanılmaktadır.

#### **Polimer matrisler**

Polimer matrisler termoplastik ve termosetler olarak ikiye ayrılır.

#### **Termoplastikler**

Termoplastikler elde etmesi kolay ve yüksek kopma uzamasına sahip malzemelerdir. Polipropilen ve naylon cam elyaflarla birlikte kompozit oluşturularak otomotiv endüstrisinde oldukça kullanılmaktadır. Termoplastiklerin en büyük dezavantajı yüksek işletme sıcaklıklarında kullanılamamalarıdır.

## **Termosetler**

Termosetler yoğun çapraz bağlara sahip polimerlerdir ve ısı sertleşir plastikler olarak bilinirler. En çok kullanılan termoset reçine epoksidir. Epoksiler iyi mekanik özelliklerinin yanında suya dayanım, ısı dayanımı ve sertleşme sırasında düşük çekme özelliklerine sahiptirler ve genellikle otomotiv, havacılık ve deniz araçları elemanları gibi kullanım alanlarına sahiptirler. Kalıplama, elyaf sarma ve elle yatırma gibi önemli proseslerde kullanılırlar. Epoksilerde kürleştirme elemanı doğru seçilmelidir çünkü son malzeme özelliklerini ve konstrüksiyonun ömrünü etkileyebilmektedir. Ayrıca yüksek performans istenilen uygulamalarda epoksi kullanımı pahalı olabilmektedir.

## **Metal matrisler**

Matris olarak metal malzeme tercih edilmesinin en önemli sebeplerinden biri ileri mühendislik uygulamalarında yüksek dayanım, düşük genleşme katsayısı ve yüksek sertlik gibi kritik performans gereksinimlerini karşılayabilecek uygunluğa getirilebilmesidir. Metal matrisli kompozitlerde genellikle seramik bir takviye fazı kullanılır. Titanyum, alüminyum ve bakır yaygın kullanılan metal malzemelerdir. Metal matris kullanıldığında kompozitin çoğu mekanik özelliği iyileşirken, korozyon direnci azalmaktadır.

## **Seramik matrisler**

Seramik sert ve yüksek sıcaklık dayanımına sahip bir malzemedir. Ayrıca kırılğan ve termal şok direnci düşük malzemelerdir. Seramik matrise ilave edilen karbon, seramik ve cam fiberler özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları gibi özel şartlar için geliştirilmektedir. Alümina ve zirkonya esaslı seramik kompozitler roket başlıklarında kullanılmaktadır. Ayrıca insan vücudunda biyomalzeme olarak kullanılmaları için çalışmalar vardır.

### **4.1.1.3 Aramid, karbon elyaf ve e camın mekanik özelliklerinin karşılaştırılması**

Kompozit elyaflar tabakalı yapıda farklı özellikler göstermektedirler. Kompozit elyaflar arasında karşılaştırma yaparken tabakalı yapılarının özelliklerine bakmak gerekir. Aşağıda bazı elyafların epoksi ile beraber mekanik özellikleri gösterilmektedir. Ancak tabaka mukavemetinin değişken bir özellik olduğunu unutmamak gerekir.

### Çekme dayanımı

Tabloda görüleceği üzere malzemelerin çekme mukavemeti tabakalı yapıda daha düşüktür. Karbon elyaf en yüksek çekme dayanımına sahipken, E Camı aramidden ya da piyasadaki adıyla kevlerden daha yüksek bir çekme mukavemetine sahiptir.

	Fiber Mukavemeti	Tabaka Mukavemeti
E Cam	3450 MPa	1500 MPa
Karbon Elyaf	4127 MPa	1600 MPa
Kevlar	2757 MPa	1430 MPa
Epoksi	Tanımsız	12-40 MPa

**Çizelge 4.1 : Çekme Mukavemeti Karşılaştırması**

### Yoğunluk ve Mukavemet

Tablodan görüleceği üzere üç malzeme ile yapılacak aynı boyutlardaki parça için en hafif olanı kevlar olacaktır. Bu üç malzeme arasından yoğunluğu en yüksek olan ise E Camdır. Kevlar veya karbon elyafı kullanarak E Cama göre çok daha hafif konstrüksiyonlar elde edilebilir. Başka bir deyimle E Camının yarısı kadar karbon elyafı veya kevlar kullanılarak aynı mukavemete sahip bir sistem elde edilebilir. Bu ayırıcı özellik mukavemet/ağırlık oranı olarak bilinmektedir.

	Tabaka Yoğunluğu [gr/cm <sup>3</sup> ]	Mukavemet Ağırlık Oranı
E Cam	2.66	564
Karbon Elyaf	1.58	1013
Kevlar	1.44	993
Epoksi	1-1.15	28

**Çizelge 4.2 : Yoğunluk ve Mukavemet Ağırlık Oranı Karşılaştırması**

### **Basma dayanımı**

Karbon ve cam elyafların basma dayanımları çekme dayanımlarına göre biraz daha düşüktür. Ancak kevların ise basma dayanımı çekme dayanımına göre oldukça düşüktür. Kevların basma dayanımı, çekme dayanımının onda biri kadardır ve bazı testlerde görülmüştür ki basma kuvveti altında kevlar, matris malzemesinden daha önce hasara uğramıştır (Downing vd., 2004).

### **Elastisite modülü**

Tabloda görüldüğü üzere karbon elyafı en yüksek Young Modülüne sahip malzemedir. E Cam ise en düşük Young Modülüne sahip olan malzemedir. Bir malzemenin elastisite modülü her yönde aynı değere sahip olmamaktadır. Bu nedenle takviye elemanları belirli bir yönde daha fazla dayanım elde etmek adına iyi hizalanmalıdır.

Malzeme	Young Modülü [GPa]
E Cam	30-40
Karbon Elyaf	125-181
Kevlar	70.5-112.4
Epoksi	3

**Çizelge 4.3 : Elastisite Modülü Karşılaştırması**

### **Alev dayanımı**

Karbon elyafı ve kevlar yüksek sıcaklıklara karşı dirençli malzemelerdir ve her ikisi de erime noktasına sahip değildir. İki malzeme de yangına karşı koruyucu ekipman yapımında ve kaynak eldivenlerinin yapımında kullanılmaktadır. Cam elyafı ise erime noktasına sahiptir ancak bu malzeme de yüksek sıcaklıklara karşı dirençlidir. Elyaf tek başlarına nadiren kullanıldıklarından epoksi gibi matris malzemelerinin de termal direnci öneme sahiptir. Epoksi ısıya maruz kaldığında hızlıca yumuşayabilmektedir.

### **Matrise yapışma**

Karbon elyafı, kevlar ve cam elyafının iyi performans verebilmeleri için matris tarafından doğru pozisyonda tutulmaları gerekir. Bu elyaflar genellikle epoksi matris ile birlikte kullanılmaktadır. Bu nedenle epoksi ve kullanılan elyafın bir arada tutulması



önemlidir. Karbon ve cam elyafları epoksi ile herhangi bir yapışma sorunu göstermezler ancak kevlar, epoksi ile iyi bir bağ oluşturamaz ve zayıf bir sistem elde edilmesine yol açar. Epoksi ve kevlar iyi yapışmadığından kompozit içerisine su gibi akışkanlar nüfuz edebilir ve kompozitin iyi mekanik özellikler göstermesini engelleyebilir.

#### **4.1.1.4 Elyaf formları**

Elyaf lar farklı formlarda bulunabilirler ve bu formlar elyafın mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Düzensiz, tek yönlü, çift yönlü, dokusuz, keçe elyaf ve kırılmış elyaf formları piyasada oldukça kullanılan formlardır.

##### **Düzensiz form**

Bu formda elyaflar aynı doğrultudadır ve burulma özelliği göstermezler. Elyaf sarmaya uygun bir elyaf formudur. Piyasada 3K, 6K ya da 12K şeklinde isimlerle bulunurlar, buradaki K harfi 1000 adet elyafı temsil etmektedir.

##### **Tek yönlü elyaflar**

Tek yönlü formda elyaflar sadece bir yönde uzanırlar ve farklı açılar için farklı dayanımlar gösterirler. Kompozit piyasasında en çok kullanılan yönlenme açıları 0°, 45° ve 90°'dir. Tek yönlü elyaflar düz ve kıvrımsızdır. Daha iyi mekanik özellikler elde edebilmek adına tek yönlü elyaflar prepreg yöntem kullanılarak üretilir.

##### **Çift yönlü elyaflar**

Bu elyaf formu birden fazla elyaf yönlenmesi istendiğinde kullanılmaktadır. 0° ve 90° açılarında konumlandırılmış elyaflar bir modele göre birbirine geçirilir. Elyaf ların mekanik kilitlemesi kumaşın bütünlüğünün korunmasını sağlar. Örgü stilleri, kumaşın yüzey düzgünlüğünü ve dengesini kontrol etmeyi sağlar.

##### **Dokusuz elyaf**

Örme ve dikişli kumaşlar birçok farklı mekanik özellik sağlamaktadır. Dokusuz kumaşlar geniş bir yelpazede çok katlı yönlenme sunabilmektedir. Kayma ve tokluk özellikleri artırılmış olsa da, yapının ağırlığında bir artma veya daha kötü mekanik özellikler elde etme durumu olabilir.

##### **Mat elyaf**

Cam elyaf matı yapısal olmayan uygulamalar için en çok kullanılan takviye formlarından biridir. Ucuzdur, kullanımı kolaydır ve hızlı bir şekilde katman oluşturabilir. Her yöne eşit bir dayanım yaratan, rastgele yönlendirilmiş iplikler içermektedir.

## **Kırpılmış elyaf**

Kırpılmış elyaflar kısa ve dağınık liflerden oluşmaktadır. Kırpılmış liflerin en büyük özelliklerinden birisi reçine malzeme seçimi konusunda sunduğu esnekliktir. İmalat işlemini kolaylaştırmak için kalıplamadan önce belirli şekiller halinde hazırlanabilmektedir. Ucuz bir fiber formudur ve 3D kalıplama için uygundur.

### **4.1.1.5 Çekirdek malzemeleri**

Çekirdek malzemeleri kompozite düşük yoğunlukta, yüksek miktarlarda katılık ve mukavemet özelliği kazandırır. Tabakalı kompozitlere kıyasla daha iyi eğilme dayanımına sahiptirler. Piyasada en çok karşılaşılan çekirdek malzeme tipleri ise köpük ve honeycomb malzemeleridir.

#### **Köpük**

En çok kullanılan köpük çekirdek malzemesi poliüretandır. Poliüretanın tercih edilme sebepleri kolay ulaşılabilir olması ve ucuzluğudur. Poliüretanın haricinde PVC köpükler kolay ebatlanması, hafifliği, uygun fiyatı sebebiyle tercih edilebilmektedir. Ancak köpük çekirdek malzemeleri honeycomb malzemeler kadar iyi mekanik özellikler göstermemektedir.

#### **Honeycomb**

Bu çekirdek malzeme tipi özellikle havacılık sektöründe ve Formula 1 araç üreticileri tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Genellikle metalik hücre malzemeleri; alüminyum, korozyon direnci yüksek çelikler, titanyum ve nikel esaslı alaşımlardan oluşmaktadır. Metal dışında nomex, cam elyaf, termoplastik ve kraft kâğıdından da elde edilmektedir. Metal dışı hücrelerde son yoğunluğa ulaşabilmek için malzeme sıvı fenolik, polyester veya poliamid reçineye daldırılmalıdır. Kullanılan üç temel hücre biçimi vardır; aşırı uzatılmış, altıgen ve flex-core. Bu yapılar dışında pek yaygın olarak kullanılmayan kare ve takviyeli çeşitleri de mevcuttur. Honeycomb yapının tercih edilmesinin en önemli sebepleri hafifliği ve mukavemetidir. Ayrıca darbe dayanımı yüksek olan yapılardır.

### **4.1.1.6 Fiber yönelimleri**

Kompozit malzemelerde fiber yönelimleri mekanik özellikleri doğrudan etkilediğinden büyük bir önem arz etmektedir. Elyafın yönelimine göre kompozit malzeme farklı eksenlerde farklı özellikler göstermektedir. Bu sebeple yapılan dizaynda elyaf yöne-

limlerinin doğru tercih edilmesi dayanım/ağırlık oranında ve kompozitin verimliliğinde iyileşmelere olanak vermektedir. Elyaf lar 0° ile yönlendirilir ise aksenel yük lere karşı, 45° ile yönlendirilirse kayma yük lere karşı ve 90° ile yönlendirilirse yan yük lere karşı daha yüksek dayanım gösterirler. Bahsi geçen bu üç açı kompozit endüstri-sinde en çok kullanılan fiber yönelim açılarıdır.

#### **4.1.2 Kompozit üretim yöntemleri**

İstenilen özelliklerde ve biçimde kompozit malzeme üretimi için birçok yöntem kullanılmaktadır. El yatırma yöntemi, püskürtme, elyaf sarma, vakum infüzyon yöntemi, otoklav pişirme ve reçine transfer kalıplama yöntemi bu yöntemlerden bazılarıdır.

##### **4.1.2.1 El yatırma yöntemi**

El yatırma yönteminde dokuma veya kırılmış elyaf larla hazırlanmış takviye kumaş-ları daha önceden hazırlanmış olan kalıbın üzerine elle yatırılarak üzerine reçine sürü-lerek elyaf katmanlarına emdirilir. Elyafi kalıba yatırmadan önce son ürünün parçadan rahat ayrılması ve oluşabilecek kalıp hatalarını önlemek için kalıp temizlenir ve üze-rine jelkot sürülür. Jelkotun sertleşmesinin ardından elyaf katları kalıp üzerine yatırılır. Bu yöntemde reçinenin elyafa iyi nüfuz etmesi çok önemli bir konudur. Epoksi ve polyester bu yöntemde en çok tercih edilen reçinelerdir. Bu reçinelerin haricinde vinil ester ve fenolik reçineler de tercih edilebilmektedir. El yatırma yöntemi yoğun işçilik gerektirdiğinden düşük sayılardaki üretimler için uygundur.

##### **4.1.2.2 Püskürtme**

Püskürtme yöntemi için el yatırma yönteminin alet kullanılarak yapılan hali denilebi-lir. Elyaf lar kalıp yüzeyine içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte bir tabanca yar-dımı ile püskürtülür. Bu tabanca aynı zamanda elyafi kırpmaya yarayan özel bir kırpıcı mekanizmaya da sahiptir. Püskürtülme işlemi tamamlandıktan sonra yüzeyin düzeltil-mesi için bir rulo kullanılır.

##### **4.1.2.3 Elyaf sarma**

Elyaf sarma yönteminde sürekli elyaf reçine banyosundan geçirilerek ıslatıldıktan sonra bir makaradan geçirilerek döner kalıp üzerine sarılır. Bu yöntemde farklı meka-nik özellikler elde edebilmek adına elyaf lifleri bir kılavuz yardımıyla döner kalıba farklı açılarla sarılabilmektedir. Sarma işleminin tamamlanmasının ardından ürünün

sertleşmesi beklenir ve kalıptan ayrılır. Elyaf sarma yöntemiyle genellikle silindirik şekle sahip ürünler elde edilmektedir.

#### **4.1.2.4 Vakum infüzyon yöntemi**

Bu yöntemde daha önceden hazırlanmış kalıp üzerine kalıp ayırıcı kimyasallar sürüldükten sonra elyaf kumaşları belirlenen dizilişe uygun olarak yerleştirilir. Vakum infüzyon yönteminde daha çok karbon elyafı ve cam elyaf tercih edilmektedir. Kalıbın çevresine yerleştirilen macun bantlar ve vakum torbası ile elyaf kumaşları dış ortamdan izole edilir ve vakum ortamı yaratılır. Bu yöntemde reçineyi transferini sağlayacak olan kanallar iyi konumlandırılmalıdır. Ayrıca reçinenin daha hızlı ilerleyebilmesi için ağ yapısına sahip bir malzeme kullanarak akış kolaylaştırılabilmektedir. Reçinenin haznedan vakum torbası içerisine akışı sağlanarak işlem tamamlanır.

#### **4.1.2.5 Otoklav**

Kompozit malzemenin performansını arttırmak için elyaf/reçine oranını arttırmak ve malzeme içinde oluşabilecek hava boşluklarını önlemek gerekmektedir. Otoklav bu özellikleri elde edebilmek adına malzemeye yüksek ısı ve basınç uygulanan bir yöntemdir. Otoklav kesin basıncın, ısının ve emişin kontrol edilebildiği basınçlı bir kaptır ve vakum infüzyon yöntemiyle benzerdir. Ancak otoklav kullanılarak çok daha yüksek kalitede ürünler elde edilmektedir. Otoklav yöntemi uzun bir sürede uygulanır ve pahalı bir yöntemdir.

#### **4.1.2.6 Reçine transfer kalıplama**

Bu yöntemde el yatırma yöntemine göre daha hızlı bir yöntemdir. Reçine transfer kalıplama yönteminde iki parçalı kalıp kullanmak gerekmektedir. Kalıp maliyetin daha düşük olması için çelik yerine kompozit malzemedan yapılmış olabilmektedir. Bu yöntem jelkotlu ve jelkotsuz olarak her iki yüzeyde de düzgünlük istenen uygulamalarda tercih edilmektedir.

### **4.2 Macaw 2 Gövde Üretim Aşamaları**

Aracın üretim aşamasında vakum infüzyon yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem haricinde bu araç yapısı için el yatırma yöntemi de kullanılabilecek bir yöntemdir. Ancak el yatırma yönteminin ucuz bir üretim metodu olmasına rağmen tercih edilmemesinin sebebi yüksek işçilik kabiliyeti istemesidir. Reçinenin doğru miktarda kullanılmaması

durumunda araç ağırlığı artacaktır. Ayrıca vakum infüzyon yöntemine göre daha kötü bir yüzey kalitesi elde edilmektedir. Vakum infüzyon yöntemi daha az reçine kullanılmasına olanak vermektedir.

Araç üretimine, aracın strafor köpükten modeli oluşturularak başlanmıştır. Bu model üzerinden kalıp eldesi yapılmıştır. Kalıp elde etmek adına; model üzerine yapıştırıcı uygulayarak model sertleştirilmiştir. Yapıştırıcı uygulamasının ardından model üzerine çelik macun sürüldü. Çelik macunu ile kaplanan model yüzey kalitesini düzeltmek için kalından inceye 3 farklı zımpara ile zımparalandı. Bu işlem yüksek doğruluk için 3 defa tekrar edildi. Zımpara yapılırken alt kattaki çelik macununa kadar zımpara yapılmadığından emin olmak için atılan her kat çelik macunu farklı renk tercih edildi. Çelik macunun sürülmesinin ardından yüzey hatalarını örtmek ve yapıyı düzeltmek için polyester macun uygulanmıştır. Son olarak ise yüzey düzgünlüğü sağlamak adına astar kullanıldı. Kalıp malzemesi olarak cam elyaf ve polyester kullanıldı. Kalıp almak için hazırlanan modelin üzeri saf alkol ile temizlendi ve ardından kalıp ayırıcı wax sürüldü ve kuruması için beklendi. Modelin üzerinden çıkarılacak iki kalıbın birbiri ile ayıran eğrinin yerini işaretlemek için pleksi malzemesinden kesilen parça modelin üzerine yerleştirildi. Kuruma tamamlandıktan sonra parlak ve pürüzsüz bir yüzey elde etmek için jelkot sürüldü. Jelkot sürüldükten sonra doğru kıvama gelmesi için bir süre beklendi ve ardından ilk tabakada pürüzsüz ve katı bir yüzey elde etmek için cam elyaf matı kullanıldı. Katmanlar arasında etkileşimi ve sertleşmeyi sağlamak için polyester kullanıldı. Dişi kalıp için üç katman yeterli bulunmuştur. Kalıbın tamamen kurumması için yaklaşık 48 saat beklenildi. Yapılan tüm bu uygulamalar diğer taraf için de uygulandı ve kalıp çıkarıldı. İki kalıp da hazırlandıktan sonra kalıplar ve model üçgen takozlar yardımı ile birbirinden ayrıldılar. Kalıplarda modelden ayrılmadan dolayı oluşan hasarlar tamir edilerek kalıp vakum infüzyon için hazırlandı. Kalıp hazırlanması ardından gövde eldesi aşamasına geçildi. Kalıp temizlendi ve kalıp ayırıcı wax sürüldü. Kalıptan araç kabuğunun çıkabilmesi için ilk önce kalıp 7 kat wax uygulandıktan sonra yapıştırıcı sprey yardımıyla karbon fiber kumaş yerleştirildi. Kalıp ayırıcı uygulamasından 15 dakika sonra +45° yönlendirmeye sahip karbon elyafı uygulandı ve üzerine Nomex Honeycomb yerleştirildi. Ardından -45° yönlendirmeye sahip karbon elyafı yerleştirildi. İnfüzyon filesi, soyma kumaşı (telfon kumaş), infüzyon ve vakum hattı, vakum bantları ve vakum torbası reçine her yere eşit bir şekilde dağıtılacak şekilde yerleştirildi. Ardından vakum ortamı oluşturuldu ve epoksi reçine hazırlanan

bu ortam içerisinde karbon elyaflar ve sandviç yapı üzerine infüze edildi. Belirli bir süre beklendikten sonra gövde çıkarıldı ve hafif aynı zamanda üzerinde rahat çalışılabilen bir yapı elde edildi.



**Şekil 4.1** : Strafor köpükten model.



**Şekil 4.2** : Yapıştırıcı uygulaması.



**Şekil 4.3 :** Çelik macun.



**Şekil 4.4 :** Kalıp ayırım yerinin işaretlenmesi.



Şekil 4.5 : Jelkot ve cam elyafı.



Şekil 4.6 : Ayrılan kalıplar.





**Şekil 4.7 : Karbon fiber kumaş.**



**Şekil 4.8 : Nomex honeycomb.**



Şekil 4.9 : Vakum elemanları.



Şekil 4.10 : Macaw 2

### **4.3 Macaw 3 Aracı için Üretim Yöntemi Belirlenmesi**

Macaw 2 adlı aracın üretimi sırasında yaşanan sorunlar ve kullanım esnasında fark edilen problemler bulunmaktadır. Bu sorunların incelenmesi, Macaw 3 adlı aracın üretiminde temel oluşturacaktır. Vakum infüzyon yönteminin avantajları ve dezavantajları iki alt başlıkta incelenecektir.

#### **4.3.1 Vakum infüzyon yöntemi**

##### **4.3.1.1 Vakum infüzyon yönteminin avantajları**

###### **Homojen reçine yayılımı**

Bir kesitinden reçine ile beslenen vakum ortamında sızdırmazlık sağlandığı takdirde reçinenin yayılımı homojen olmaktadır.

###### **Hafiflik**

Birinci madde ile doğrudan ilişkili olarak, vakum infüzyon yönteminde fazla reçinenin yapıdan alınması garanti altındadır. Bu durum el yatırması yöntemine göre kayda değer avantaj sağlamaktadır.

###### **Steril ortam**

Kompozit malzemeler hassaslık gereken kritik uygulamalarda “temiz oda” olarak adlandırılan steril ortamlarda üretilmektedir. Ancak takım atölyesinde bu imkân bulunmadığından kompozit üretimi sırasında matris malzemesinde dışarıdan yabancı madde girişi olabilmektedir. İnfüzyon yapılan reçine korunduğu takdirde, yapı vakum poşetine sarılı olduğundan yabancı madde girişi engellenebilir.

##### **4.3.1.2 Vakum infüzyon yönteminin karşılaşılan dezavantajları**

Vakum infüzyon yönteminin el yatırması yöntemine göre avantajları olsa da dezavantajları da bulunmaktadır. Üretim sırasında karşılaşılan dezavantajlar şu şekildedir:

###### **Sızdırmazlık**

Aracın boyutlarının büyük olması nedeniyle vakum poşetinin sızdırmazlığının sağlanması sorun yaratmaktadır. Ayrıca karşılaşılan en büyük sorunlardan biri, üretilen kalıbın cam elyafı olmasından dolayı, üretim yapılmayan yüzeyde eğimden dolayı sivrilikler oluşturan cam elyafın vakum torbasını delmesidir.

## **İnfüzyon**

Kullanılacak olan vakum pompasının gücü, infüzyonun sağlanması için çok önemlidir. Ancak çok noktadan vakum yapabilen güçlü vakum pompalarının kurulum maliyetleri fazladır.

## **Kullanılan çekirdek malzeme**

Sandviç malzemeler için kullanılacak çekirdek malzemeler Bölüm 4.1.1.5’de incelenmiştir. Bu malzemelerin üretim yöntemleri için modifiye edilmiş farklı versiyonları olmasına dikkat edilmelidir. Örnek olarak; honeycomb (bal peteği) yapılarının içine reçine dolması, köpük yapıların reçine emmesi gibi problemler ağırlığı arttırmaktadır. Tersi durumda ise yapıda delaminasyon gözlemlenmektedir.

## **Kürlenme sonrası işlemler (Post-cure)**

Üretim aşamasından sonra mekanik özelliklerin artırılması için reçineye kürleme sonrası işlemler yapılmaktadır. Aracın üretimi sırasında kullanılan reçine bu işlem yapılmadan da yeterli özellikleri gösterse de üst düzey performans için kürleme sonrası işlem gerekmektedir. Bu süreç genel olarak, kullanılan reçine özelliklerine bağlı olarak, yapının basınçsız fırın ortamında 60° ila 80° sıcaklıkta 24 ila 28 saat arasında bekletilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Takımın bu tarz bir fırına erişimi bulunmadığından Macaw 2’nin üretiminde bu işlem yapılamamıştır. Üretimi takip eden yarışmaya araç boyasız olarak götürülmüştür. Karbon fiberin renginden ötürü, 35° sıcaklıkta ve direkt olarak güneş altında beklendiğinde gövdede yumuşama görülmüştür. Durumun engellenmesi için bir sonraki sene araca boya işlemi uygulanmıştır ve sıcaklıkta yumuşama sorunu ortadan kaldırılmıştır. Ancak monokok gövdeye sahip araç üretimi öncesinde kürleme sonrası işlemlerin planlanması gerekmektedir.

## **4.3.2 Prepreg kompozit yapılar**

Fiber destekli kompozit yapılar arasında üretimi malzeme özellikleri bakımından en kaliteli olan yöntem prepreg yapılarıdır. Bu tarz yapılar Bölüm 4.1.2.5’de açıklanan otoklav yöntemi ile üretilmektedir. Aracı üreten ekibin daha önce elde ettiği birikime dayanarak, aracın gövdesinin bu üretim yöntemi ile üretilebileceği düşünülmektedir. Ancak prepreg yapıların gereksinimi olan otoklav kullanımı üretimin önündeki en büyük engel olmaktadır. Aracın sığabileceği boyutlarda bir otoklav araştırılmıştır. İletişime geçilen firmalar ve alınan cevaplar şu şekildedir:

- 1) Türk Havacılık Uzay Sanayii: Firmada bulunan otoklavın araç üretimi için kullanımını için başvuru yapılmıştır. Firmanın, görüşme yapılan tarihte, sadece havacılık alanında faaliyet gösteren ekiplere destek sağladığı şeklinde geri dönüş alınmıştır.
- 2) Turkish Technic: Uçak bakım onarımı amacıyla firmada bir otoklav bulunmaktadır. Firma ile ücretsiz destek kapsamında görüşmeler devam etmektedir.
- 3) Sabancı Üniversitesi Kompozit Mükemmeliyet Merkezi: Merkez ile gerçekleştirilen görüşmeler neticesinde ücretsiz olarak destek olunamayacağı, fiyat teklifi verilebileceği belirtilmiştir. Ancak otoklav kullanım maliyetine çalışmanın yapıldığı tarihte takımın yeterli bütçesi bulunmamaktadır.

Aracın yapımındaki en büyük maliyetlerden biri olan prepreg temini için Kordsa firmasından ücretsiz destek için olumlu dönüş alınmıştır. Ayrıca model üretimi için Hexagon firması ile görüşülmüş ve destek kapsamında bu imkânın sağlanabileceği belirtilmiştir.

Aracın prepreg kullanılarak üretimi için gereken tek eksik olan otoklav sağlanması durumunda üretim aşamasına geçilebilir.

Otoklav bulunamaması durumunda Macaw 2 adlı araçta yapılamayan kürlenme sonrası işlemler yapılarak vakum torbalama yöntemi kullanılabilir. Bu yöntemin kullanılması, vakum infüzyon yönteminde karşılaşılan en büyük sorunlardan biri olan reçine infüzyonuna çözüm üretmektedir. Ayrıca vakum işlemi de yapıldığından elle yatırma yöntemine göre daha hafif bir yapı eldesine olanak sağlanır.

Kürleme sonrası işlem yapılması mekanik özellikleri büyük oranda etkilediğinden dolayı, prepreg olmasa bile mevcut araç ile kayda değer oranda mekanik özellik farkı gözlenecektir. Bu işlem için gereken fırında basınç gereksinimi olmaması, sıcaklıkların prepreg kürlenme sıcaklıklarının yarısı mertebesinde olması kürleme sonrası fırının bulunmasını kolaylaştırmaktadır. Ek olarak, takımın imkânları kullanılarak fırın üretiminin planlanması olasıdır.

Sonuç olarak, tasarlanan aracın üretimi için kullanılacak iki adet alternatif önerilmiştir. Önerilerin seçimi takımında bulunan maddi imkânlarla göre yapılabilir. Bahsedilen alternatifler kullanılarak üretilebilecek olan araçta, önceki aracın üretimi sırasında karşılaşılan sorunlar göz önüne alındığında, malzeme kalitesi ve mekanik özellikler bakımından daha düşük bir risk aralığı bulunmaktadır. Ayrıca, araç üretimi ile eş zamanlı olarak, aynı üretim şartları sağlanarak (basınç, sıcaklık, kürlenme süresi vb.),

çeşitli mekanik testlerin yapılabilmesi için (çekme, eğilme, burulma, lamine ayrılması vb.) numune üretimi tavsiye edilmektedir.

## **5. MOTOR TESTİ VE OPTİMİZASYONU**

### **5.1 Literatür Araştırması**

#### **5.1.1 Dinamometre**

Shell Eco-marathon yarışmasında ana amaç yakıt verimliliğidir. Bu sebeple aktarma oranı ve motor kalibrasyonu gibi parametreler önem arz etmektedir. Dinamometrenin işlevi, test edilen motora değişken yükleme koşulları uygulamak ve böylece motorun tork ve güç çıkışının doğru ölçümünü sağlamaktır (Atkins, 2009). Dinamometreler araç-yol simülasyonu ve motor kalibrasyonu açısından önem taşımaktadır. Motor üzerinde yapılan herhangi bir değişikliğin araç performansı üzerinde yarattığı etki incelenebilmektedir. Bu nedenle tasarlanan araç performansını iyi inceleyebilmek adına en uygun sistem tercih edilmeye çalışılmıştır.

##### **5.1.1.1 Dinamometre çeşitleri**

###### **Sabit frenli dinamometreler**

###### **Manyetik tozlu dinamometre**

Manyetik tozlu fren üç ana bileşenden oluşur. Bunlar bobin, stator ve rotordur. Frene elektrik verildiğinde, bobinin içindeki manyetik alan akım yoğunluğuna bağlı olarak dalgalanmaya başlar. Sonunda, bu manyetik alan dalgalanmaları, rotor ve stator arasındaki manyetik tozun viskozitesini etkiler. Bobine elektrik gücü uygulandığında, toz parçacıkları rotor ve statoru birbirine bağlayan manyetik alanın kuvvet çizgileri boyunca sıralanır. Bu sürtünme üretir ve frenleme oluşur. Tüm fren sistemlerinde görüldüğü üzere kinetik enerji ısı enerjisine dönüşmektedir. Manyetik tozlu frenler çok büyük yük karşı torklar oluşturabilmektedir ancak yüksek miktarda ısı açığa çıktığından düşük hızlar için fren kontrolünde kullanılmaktadırlar.

###### **Eddy current tipi dinamometre**

Ani yük değişimlerine hızlı cevap veren eddy current tipi frenler şasi dinamometrelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu frende manyetik alan içerisinden geçen iletken üzerinde eddy tipi akımlar indüklenir ve bu akımlar mıknatıslar ile iletken arasında

elektromanyetik kuvvet oluşturur. Bu sayede harekete ters bir kuvvet elde edilmiş olur ve elektromıknatis sarımları üzerindeki akım değiştirilerek bu kuvvet ayarlanabilir. Frenleme sürtünme ile sağlanmadığından aşınma görülmez ve ömürleri uzundur.

### **Hidrolik dinamometre**

Hidrolik dinamometreler kuru sürtünme yerine akışkan sürtünmesi kullanarak gücü dağıtırlar. Motorun çıkış miline bağlı olan bir iç dönen eleman veya pervaneden oluşur ve bu pervane hidrolik sıvıyla dolu bir kasada döner. Dış gövde, oluşan merkezkaç kuvveti nedeniyle pervane ile birlikte dönme eğilimindedir, ancak denge ağırlığını destekleyen tork kolu buna karşı çıkar. Pervane ile hidrolik sıvı arasında sürtünme oluşur ve karşı kuvvet sağlanmış olur. Kuvvet kontrolü sıvı miktarı değiştirilerek sağlanabilmektedir. Oluşan ısı kullanılan hidrolik sıvı üzerinden uzaklaştırılabildiğinden yüksek güçlerde kullanıma uygun bir frendir ancak yüksek güçler için kullanılacak sıvı miktarı da artacağından büyük tanklar gerekebilmektedir.

### **Histerezis dinamometre**

Histerezis dinamometreler manyetik parçacık kullanımını veya sürtünme bileşeni olmadan, manyetik bir hava aralığı boyunca tork üretir [1]. Çoğunlukla alüminyum, nikel, kobalt alaşımından yapılmış manyetik bir rotor bulunmaktadır. Manyetik alanı oluşturan akımın büyüklüğüne bağlı olarak tüm hız aralıklarında yüksek sabit tork üretebilmektedir. Yaygın kullanımı olan dinamometre çeşitlerindedir.

### **Jeneratörlü dinamometre**

Elektriksel çıkışı test hücresi dışından kontrol edilebilir bir yük bankasına iletilen bir jeneratörden oluşur (Atkins, 2009). Alternatif veya doğru akımla çalışan bir elektrik motoru frenlemeyi sağlamaktadır. Bu dinamometre türü vites değişimleri ve eğimli yol etkilerini gözlemlemek amacıyla kullanılmaktadır. Karmaşık ve pahalı bir sistemdir. Özel uygulamalar haricinde yaygın kullanılmayan bir dinamometre türüdür.

### **Yağlı sürtünmeli dinamometre**

Frenleme dinamometrede bulunan sürtünme disklerinin çelik bir plakaya basması ile gerçekleştirilir. Plaka ile disk arasında oluşan aşınmanın önlenmesi için yüzeyler arasında yağlama yapılmaktadır. Yağlama ve soğutma sayesinde yüksek torklarda frenleme yapılabilmektedir ve üretilen ısı kolayca uzaklaştırılabilmektedir. Tork kontrolü ise pnömatik, hidrolik veya manyetik olarak yapılabilmektedir.



### **Fan dinamometresi**

Ağır, dökme demir desteğe uygun bir şekilde monte edilmiş bir şafttan oluşur. Şaftın bir ucunda üniversal kavrama diğer ucunda iki adet kol taşıyan ağır bir göbek bulunmaktadır. İki adet düz, dikdörtgen fan kanadı kollarda taşınır ve kollara cıvatalarla bağlıdır (Wicks, 1911). Yük fana aktarılan gücün kontrolü veya üflenlen havanın debisinin değiştirilmesiyle değiştirilebilmektedir. Havanın viskozitesi düşük olduğundan yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılamamaktadırlar.

### **Eylemsizlik dinamometresi**

Eylemsizlik dinamometreleri, eylemsizlik ivmesinin ölçümü için kullanılmaktadırlar. Tekerin bağlı olduğu tamburlar sayesinde, düz yolda ilerleyen aracın doğrusal hızı ve kütlesi, açısız hız ve atalet momentine dönüştürölüp hız ve ivme ölçümü yapılmaktadır. Volanlardan oluşun sistem bir şaftta monte edilir ve aracın kütlesi simüle edilir. Değişen eylemsizlik ise uygun volanın bağlanmasıyla elde edilir.

## **5.2 Tasarım Kriterleri**

Histerezis tipi dinamometreler ile hassas fren torku uygulanması mümkündür. Değişken gerilim uygulanarak fren torku büyüklüğü kontrol edilebilir. Voltaj ve devir bilindiğinden frenin tork-voltaj-devir haritası bilinirse karşı tork miktarı da bilinecektir. Bu sayede motorun hangi devirde ne kadar tork ürettiği, dolayısıyla ürettiği güç bulunabilir. Motor kalibrasyonu ve modifikasyonları üretilen güç ve tork miktarlarına bakılarak optimize edilecektir.

Geçtiğimiz yıl sabit hızda motor testi için hassasiyet ve düşük ısı üretimi sebebi ile histerezis fren satın alınmıştır. Satın alınan fren, maddi koşullardan ötürü küçük bir üreticiden 2000 Türk Lirası karşılığında alınmıştır. Piyasa değerleri 20.000 Türk Lirası'na ulaşun histerezis frenler için bu miktar uygun görölmüştür. Ancak üretici tarafından frenin karakteristik eğrileri çıkartılamamıştır. Frenin motor test düzeneğinde kullanılabilmesi için tork-devir-voltaj eğrilerinin çıkartılması gerekmektedir.

### 5.3 Histerezis Fren Testi

Histerezis frenin testi için İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi'nde bulunan Elektrik Makinaları Laboratuvarından destek alınmıştır. Çalışmamızın bu kısmının gerçekleşmesi için değerli vaktinden zaman ayırıp bize destek olan Dr. Öğr. Üyesi Derya Ahmet Kocabaş'a teşekkürlerimizi sunarız.

#### 5.3.1 Test düzeneği konstrüksiyonu



Şekil 5.1 : Histerezis fren test düzeneği

Histerezis freninin test edilebilmesi için temel olarak frenden daha fazla güç üretebilen bir motora ve tork ölçümü için tork sensörüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemin aynı eksen üzerine monte edilmesi gerekmektedir. Sistem montajı sırasında dikkat edilen hususlardan en önemlisi güvenlik olmaktadır.

Bahsedilen elemanların yer ile bağlantısının sağlanabilmesi için NPU 60 tipi profil seçilmiştir. Uygun konumlar belirlendikten sonra cıvata bağlantıları için kanallar açılmıştır. Profillerin yere bağlantısı M20, motorun ve frenin bağlantısı için M16 cıvata tercih edilmiştir. Kullanılan cıvatalar; DIN 985 standartında fiberli çelik somunlar ile DIN 7980 yaylı rondela ve DIN 125 düz rondelalar kullanılarak uygun momentler ile ön gerilmeli olarak sıkılmıştır.

Millerin bağlantısı için yıldız tipi elastik kavrama kullanılmıştır. Motor tork sensörü bağlantısı için YK-110, fren tork sensörü bağlantısı için YK-65 alınmıştır. Motor ve fren milleri için DIN 6885 standartında mil çaplarına denk düşen kamalı bağlantılar

yapılmıştır. Tork sensörü millerinde ise yük aktarımı olmadığından setskur ile bağlantı yapılması tercih edilmiştir.

Kullanılan motorun plaka değerleri Şekil 5.2’de görülebilir.



Şekil 5.2 : Denede kullanılan asenkron motorun plaka değerleri.

Denede kullanılan tork sensörü ise, temassız, dönen bir tork sensörü olan Lorenz DR3000 tork sensörüdür. Tork sensörünün temassız olması olası kayıpları engellemektedir. Ayrıca hem tork hem de hız ölçümü yapılabilmektedir. Dened düzeneğinin nihai hali Şekil 5.1’de görünmektedir. Dened yapıldığı sırada güvenlik amacıyla sistemin üzeri sac metallere ile kapatılmıştır.

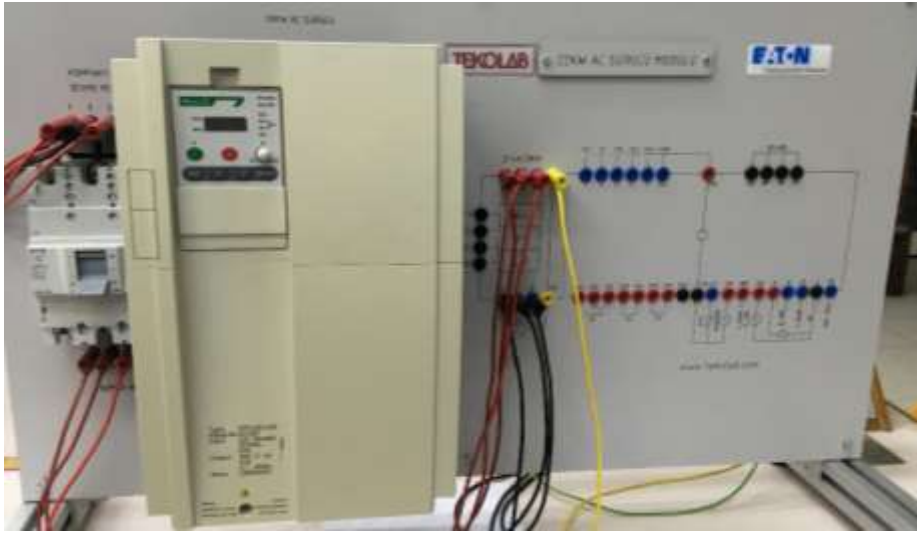
### 5.3.2 Test düzeneğinin elektrik sistemi

Kullanılan asenkron motor üç fazlı alternatif akım ile çalışmaktadır. Motorun güvenli ve amaca uygun bir şekilde beslenebilmesi için bir takım güç elektroniği devre elemanları kullanılmıştır. Sistemde ilk olarak bir sigorta bulunmaktadır. Daha sonra akımın ölçülebilmesi için akım trafoları ve ampermetre seri olarak bağlanmıştır. Bu devre Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3 : Motora giden akım ve voltajın ölçümü için kurulan devre.

İçten yanmalı motorun farklı devirlerinin testi için fren farklı devirlerde kullanılacaktır. Farklı devirlerde fren testi yapılabilmesi için motor AC motor sürücü ile sürülmüştür.



Şekil 5.4 : Motor hızının değiştirilebilmesi için kullanılan AC motor sürücü.

### 5.3.3 Test aşaması

Fren testi sırasında 18 farklı noktada ölçüm alınmıştır. Bu değerler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Frekans [Hz]	Teorik Hız [d/d]	Voltaj [V]
10	600	6, 12, 18, 24
20	1200	6, 12, 18, 24
30	1800	6, 12, 18, 24
40	2400	6, 12, 18, 24
50	3000	6, 12

**Çizelge 5.1 :** Ölçüm sırasındaki değişkenler.

Değişkenler uygulandıktan sonra kararlı bölgeye geçiş için bir süre beklenmiştir. Kararlı bölgede yapılan ölçümler sırasında salınım gözlemlendiğinden nominal değerler kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçları Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Hz	Teorik hız	I	V	Gerçek Hız	Tork [Nm]	Güç [kW]
10	600		6	586	0.5	0.03
10	600	0.61	12	572	1	0.06
10	600	0.91	18	565	1.8	0.1
10	600	1.2	24	558	2.7	0.15
20	1200	0.29	6	1184	0.9	0.092
20	1200	0.58	12	1172	1.4	0.175
20	1200	0.87	18.1	1151	2.7	0.325
20	1200	1.16	24.1	1116	4.3	0.503
30	1800	0.29	6.1	1783	0.9	0.165
30	1800	0.58	12.1	1764	1.9	0.346
30	1800	0.86	18	1737	3.6	0.646
30	1800	1.14	24	1689	5.8	0.974
40	2400	0.28	6	2382	1	0.251
40	2400	0.57	12	2357	2.3	0.562
40	2400	0.85	18	2317	4.2	1.015
40	2400	1.13	24	2239	7.6	1.717
50	3000	0.28	6.2	2984	1	0.318
50	3000	0.57	12.3	2957	2	0.6

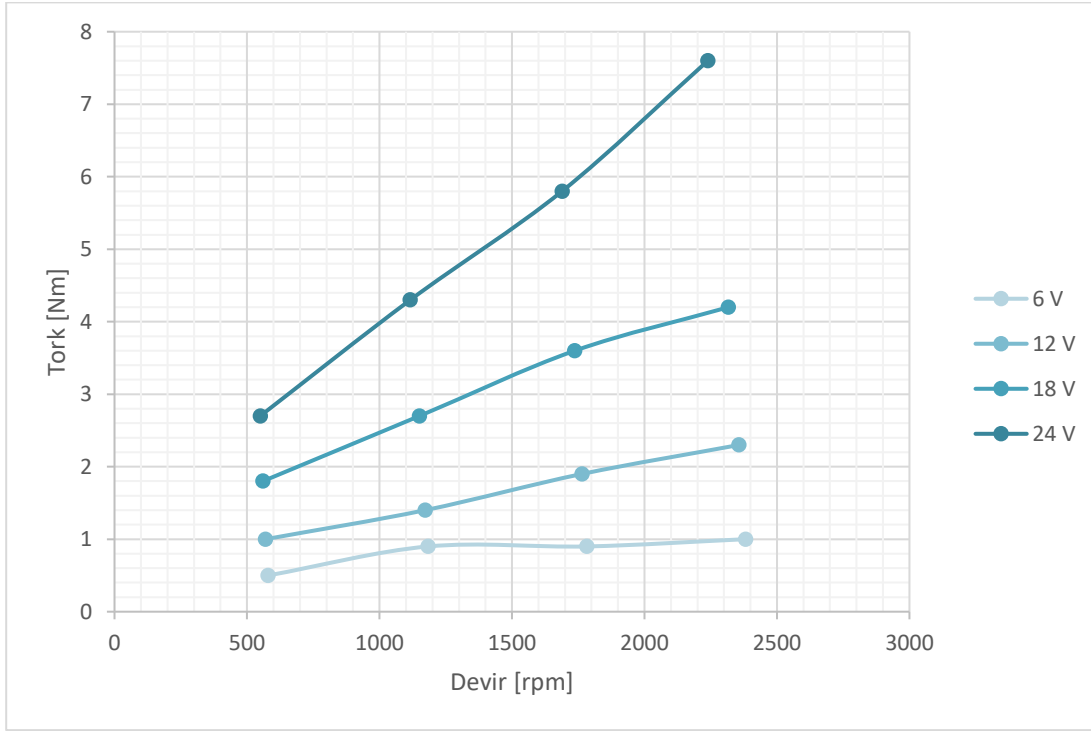
**Çizelge 5.2 :** Histerezis fren testi ölçüm sonuçları.

Elde edilen sonuçlardan 3000 d/d için olan değerlerin kullanılmasına ihtiyaç duyulmamıştır. Şekil 5.6’da verilen grafik tork sensöründen elde edilmiştir. Kırmızı eğri devri,

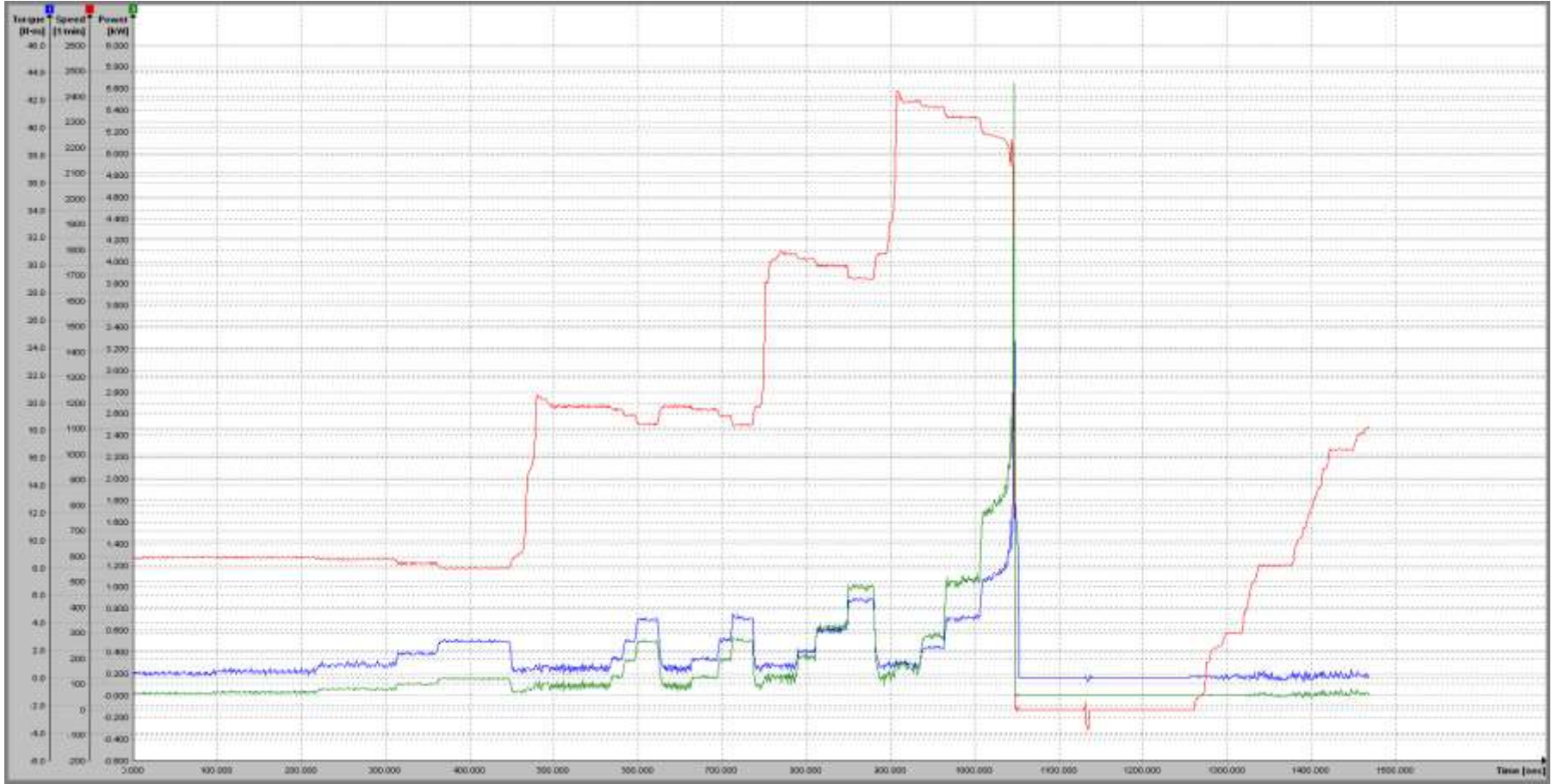
yeşil eğri gücü, mavi eğri torku göstermektedir. Eğrilerde beklenen süreler açık bir şekilde gözükmemektedir.

Yaklaşık olarak 17. dakikaya denk gelen kısımda gücün tepe yaptığı görülmektedir. Bu sırada frenin genişlemesinden kaynaklı olarak rotor ve stator temas etmiştir ve sıkışmıştır. Takip eden süreçte motor serbest bırakılmış ve fanla soğutulmuştur. Daha sonra fren soğuması için yüksüz çalıştırılmıştır. Sıcaklık artışı hem sıkışma, hem de manyetik malzemenin manyetik özelliğini kaybetmesine neden olmaktadır. Bu sebeple devam eden süreçte sürekli olarak lazer termometre ile sıcaklık kontrolü yapılmıştır ve kompresör yardımı ile aktif soğutma gerçekleştirilmiştir.

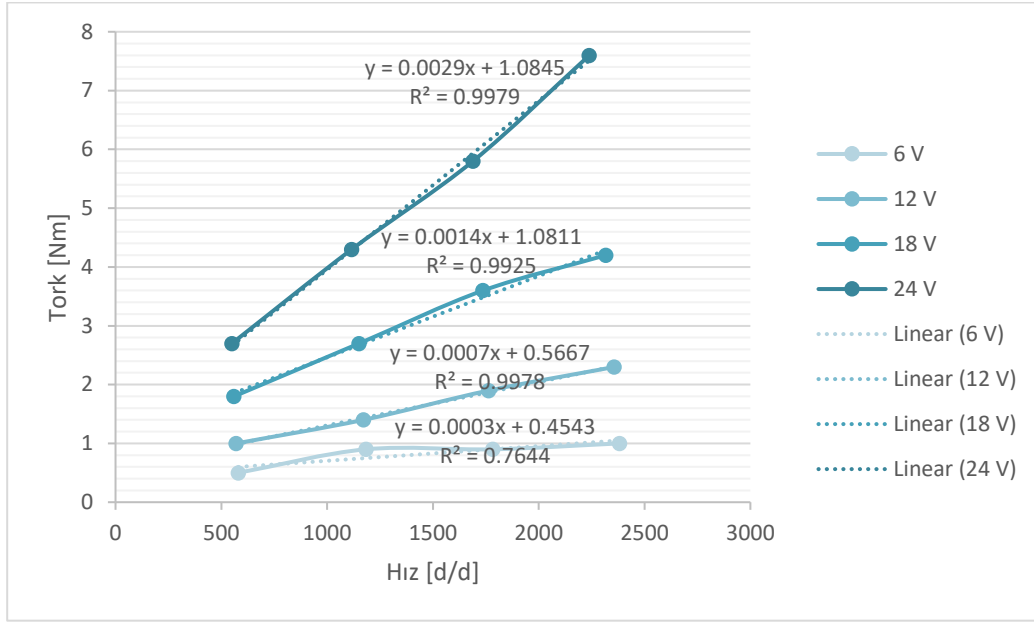
Sonuçlar kullanılarak bir takım grafikler elde edilmiştir.



Şekil 5.5 : Histerezis fren güç devir grafiği

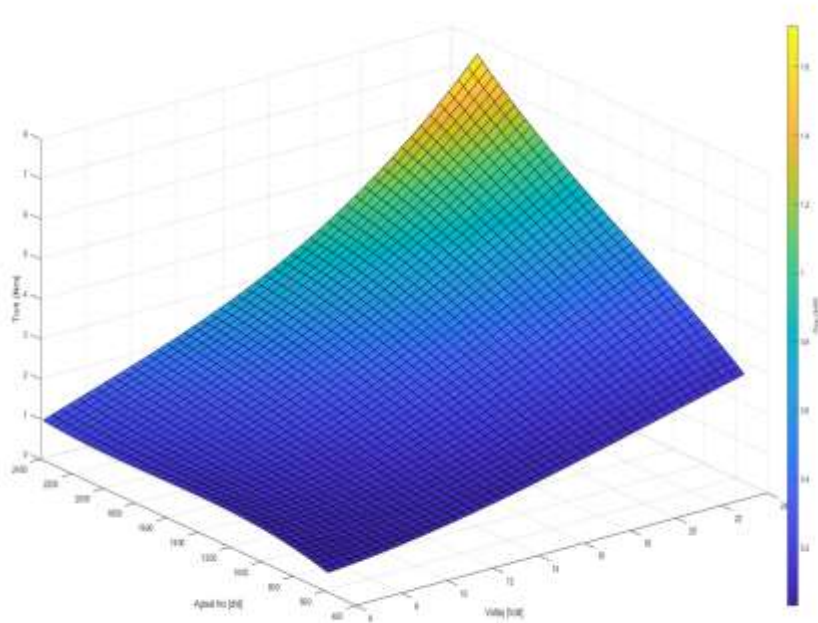


Şekil 5.6 : Tork sensöründen elde edilen fren testi verileri.



Şekil 5.7 : Histerezis fren tork devir grafiği.

Bu sonuçlar ile MATLAB programında *surf* komutu kullanılarak, dört boyutlu harita elde edilmiştir. Oluşturulan haritadaki arada kalan değerler *interp2* komutu ile spline olarak interpolate edilmiştir. Çözüm ağı Şekil 5.8’de gösterilen haritada resimde anlaşılabilirlik için 4. seviye bölme yapılmıştır, ancak kullanılan haritada 6. seviye kullanılmıştır.



Şekil 5.8 : Histerezis fren haritası.



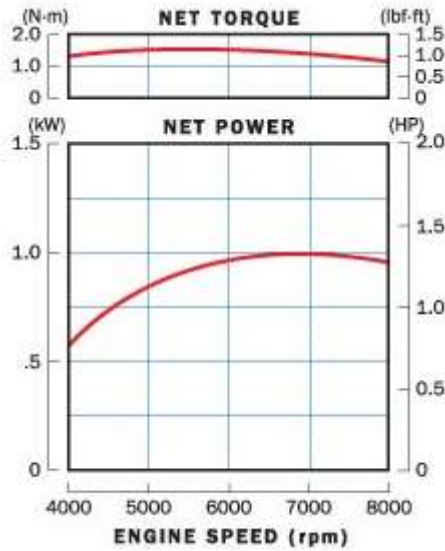
Oluşturulan değerlerdeki çözüm ağı noktalarının kolay bulunabilmesi için arama algoritması geliştirilmiştir. Fren testi ile sonuçların elde edilmesinin ardından motorun testine geçilmiştir.

#### 5.4 Sabit Hızda Motor Testi

Araçta kullanılan içten yanmalı motor Honda GX35 motorudur. Motorun fabrika çıkışı özellikleri Çizelge 5.3’de görülebilir. Ayrıca fabrika çıkışı tork devir ve güç devir grafikleri Şekil 5.9’da yer almaktadır.

Motor Tipi	Hava soğutmalı	Zaman	4 zamanlı
Egzantrik	Üstten eksantrikli	Motor Hacmi	35 cm <sup>2</sup>
Net Güç	1.3 BG (1.0 kW) @ 7,000 d/d	Net Tork	1.6 Nm @ 5,500 d/d
Sıkıştırma oranı	8,0:1	Karbüratör	Diyaftram tipi

Çizelge 5.3 : Honda GX35 fabrika çıkışı özellikleri.

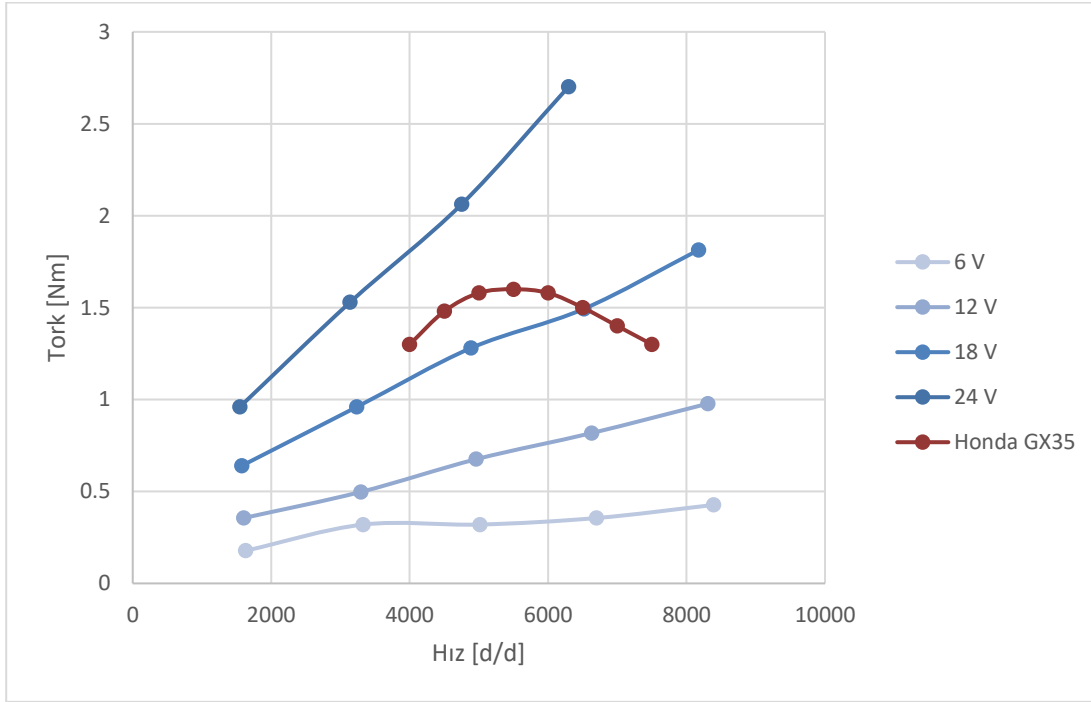


Şekil 5.9 : Honda GX35 performans grafikleri.

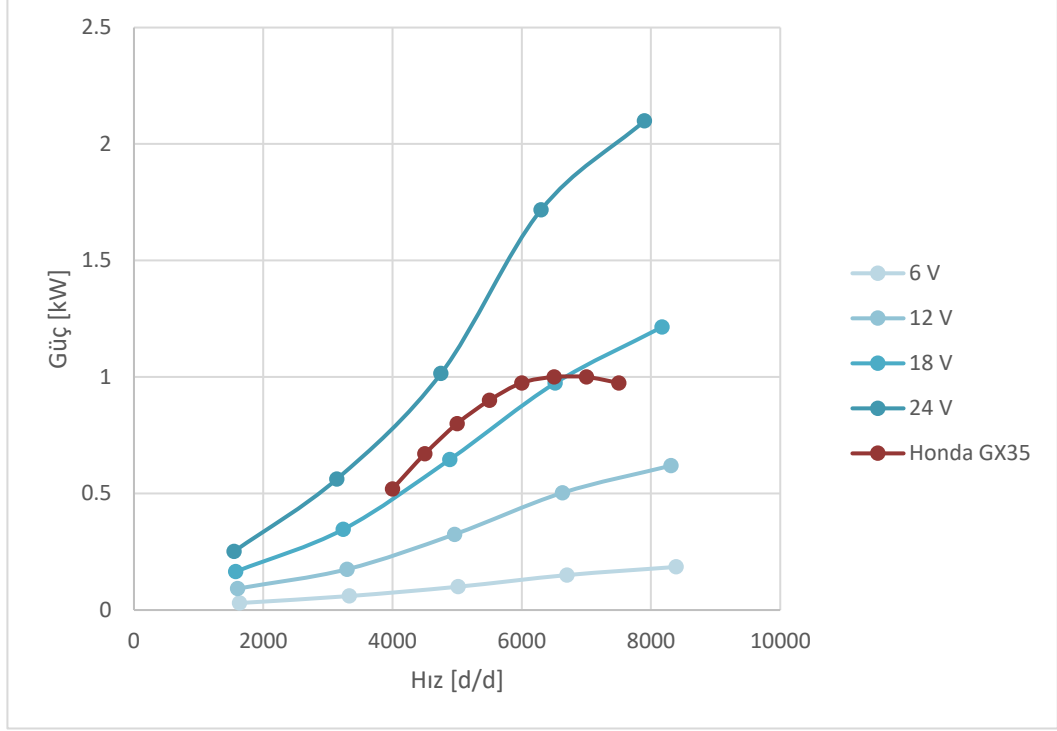
Testi yapılan fren ile fabrika çıkışı motor verileri kullanılarak doğrulama çalışması yapılacaktır.

### 5.4.1 Kavram kanıtı çalışması

Histerezis fren yapılan testler ile Honda GX35'in fabrika verileri kullanılarak fren ve motorun torklarının ve güçleri kıyaslandığında aktarma oranı 2.815 olduğunda frenin yeterli torku ve gücü sağlayabildiği Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de görülmektedir. Grafiklerde fren için 2.815 aktarma oranı uygulandığına dikkat edilmelidir, ayrıca belirtilen oranda frenin 6750 devir/dakika sonrası için ekstrapolasyon yapılmıştır.



Şekil 5.10 : Histerezis fren ve motor torku grafiği.



Şekil 5.11 : Histerezis fren ve motor güç grafiği.

#### 5.4.1.1 Test prosedürü

İçten yanmalı motorlar için bilinen test prosedürleri bulunmaktadır. Tork devir grafiğinde görülebileceği üzere motorun maksimum torku ve maksimum gücü ürettiği noktalar birbirinden farklı olmaktadır. Gücün ve torkun tepe yaptığı noktaların öncesi ve sonrası olmak üzere iki aşamada ölçüm yapılabilir.

Torkun tepe noktasının üzeri için motor devri yüksüz olarak ölçümü yapılacak noktaya çıkartılır. Daha sonra frenin gerilimi artırılarak yük uygulanmaya başlanır. Uygulanan fren momenti arttıkça motor devri düşecektir. Her gerilim için bir denge devri oluşacaktır, bu denge devirleri ve voltajları kaydedilir. Kaydedilen veri noktaları birleştirilerek tork eğrisi bulunur.

#### 5.4.1.2 Test sonuçları ve değerlendirme

Yapılan kavram kanıtlama çalışmasında motorun tepe noktasından yukarısı için sonuç elde edilmiştir. Tepe noktasının altı için test yapılmamasının temel sebebi kullanılan santrifüj kavramanın ilk temas noktasının 4300 devir/dakika olması ve izafi hareketin 5300 devir/dakikada bitiyor olmasıdır. Kullanılan kavrama değiştirilerek sağlıklı bir test yapılabilir.

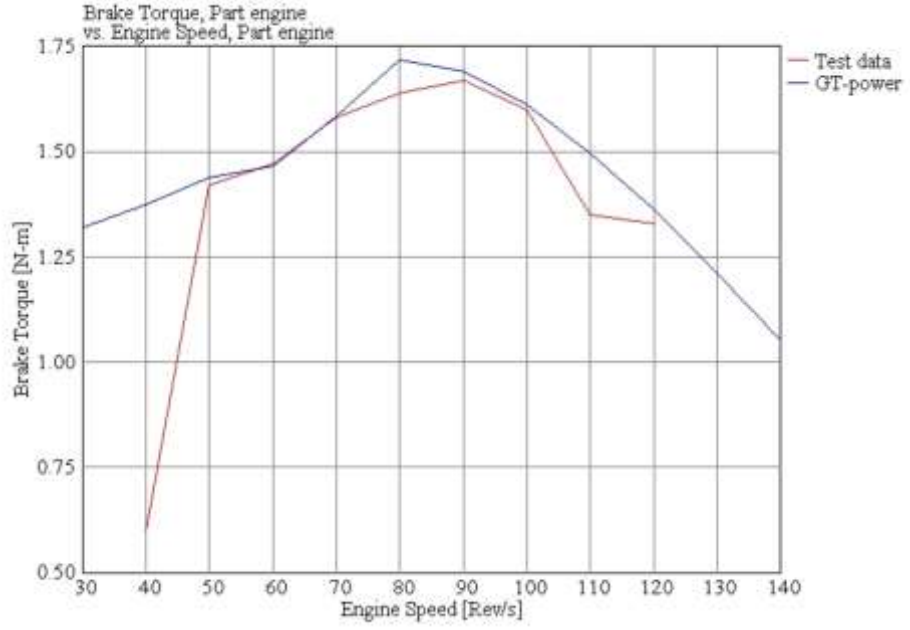
Test iki aşamalı olarak yapılmıştır. İlk deneme sırasında yüksüz olarak 7300 d/d hıza çıkılmıştır, bu hızda gerilim yükseltilecek motorun yavaşlaması sağlanmıştır. İkinci denemede motoru 6000 d/d hızlarda tutacak olan gerilim ile teste başlanmıştır, daha sonra gerilim azaltıldıkça motor hızlanmıştır. İki test verisinin arasındaki fark, farkın en fazla olduğu durumda %10'dan düşük olmaktadır (Şekil 5.14).

Yapılan test sonuçları SEMCON firması tarafından yapılan test ile kıyaslanabilir (Şekil 5.12). Referans alınan test verisi ile %10 oranında bir fark görülmektedir. Ancak verilerin yönelimine bakıldığında tutarlılık net olarak gözükmemektedir. Aradaki oluşan fark için birkaç neden bulunmaktadır. Zincir kullanılarak yapılan aktarma, fren içerisine biriken manyetik toz parçacıkları, kullanılan kavramanın balatalarının üzerinde oluşan yıpranma, test ortamının şartlandırılması gibi sebepler verim kaybına neden olmaktadır. Bahsedilen bu sorunların çözüme ulaştırılarak yeniden test yapılması daha sonra yapılacak olan çalışmalar için hedef olarak belirlenmiştir.

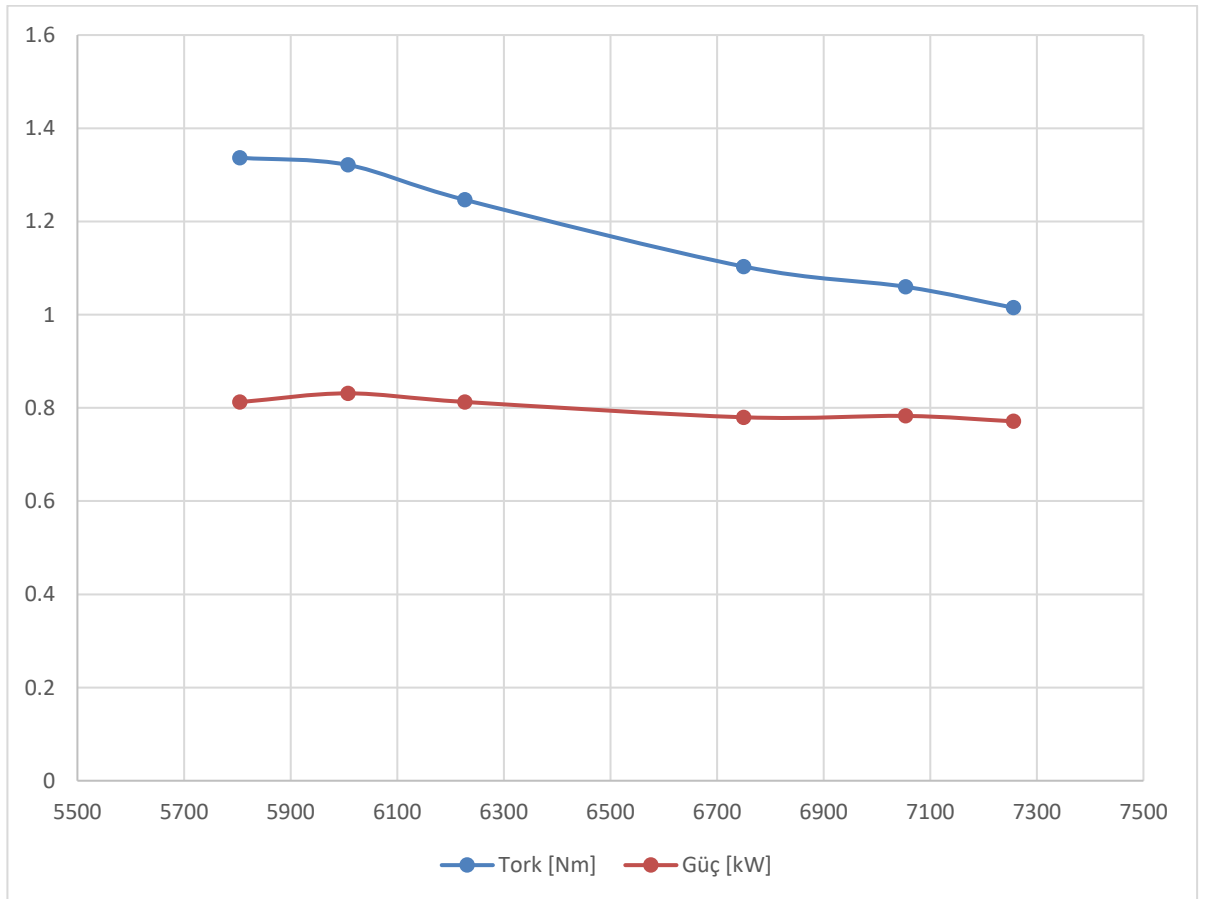
Motor ve fren arası aktarma oranı farklı olan iki farklı alternatif denemesi yapılmıştır. Aktarma oranı yukarıda belirtilen değerde olduğunda, motor devri 6750 üstü için ekstrapolasyon yapılması gerekmektedir. Bu durumdan kaynaklanan belirsizliğin giderilmesi için hem 45/16 aktarma oranına ilave olarak 65/16 aktarma oranında testler yapılmıştır.

Araçta kullanılan motor üzerinde yapılan değişiklikler sonucunda motor enjektör sistemine geçirilmiştir. Yani testi yapılan motor ile araçta kullanılan motorun yakıt ve ateşleme sistemleri birbirinden farklıdır. Kavram kanıtlama çalışmasından sonra enjektörlü motorun testi aşamasına geçilmiştir. Lakin motorun kullanım amacı yakıt tüketimi olduğundan tek başına üretilen gücün veya torkun incelenmesi yeterli olmamaktadır. Aynı devir için motorun ürettiği torkun düşmesi yakıt tüketiminin artacağı anlamına gelmemektedir.

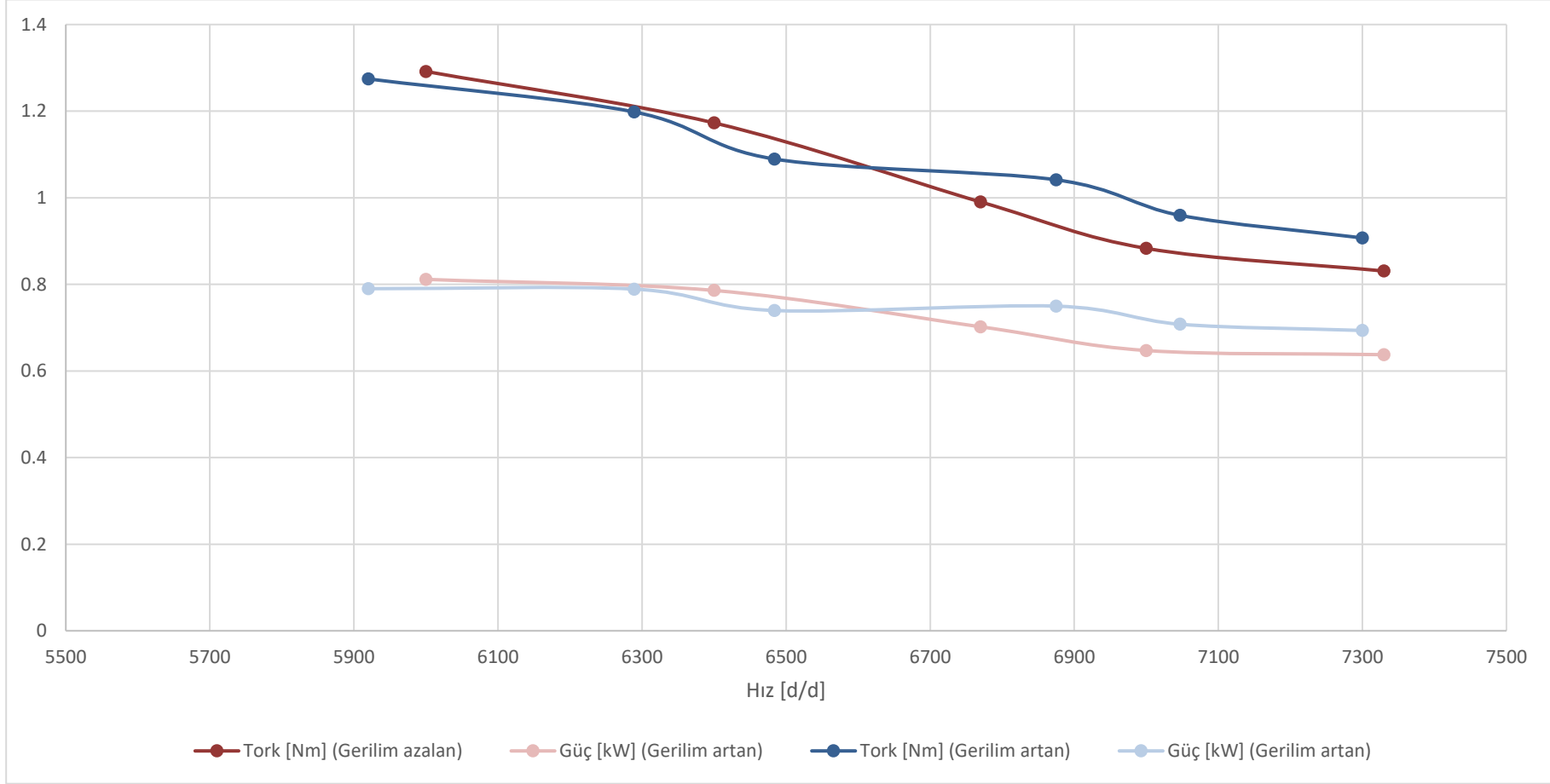
Yakıt tüketimi miktarının kıyaslanabilmesi için birkaç farklı yöntem bulunmaktadır. Örnek olarak, yakıt debisi debimetre yardımı ile ölçülebilir, ancak uygun debimetre fiyatları takımın bütçesini aşmaktadır. Başka bir gösterge olarak hava yakıt oranı incelenebilir. Gereken sensör takımının envanterinde bulunmaktadır, ancak sensörün okunması için gereken deney düzeneği için araştırmalar devam etmektedir. Hava yakıt oranının 1.1 civarlarında tutulması, zengin yakıt karışımlarına oranla %15'e varan yakıt tasarrufu sağlamaktadır.



Şekil 5.12 : SEMCON firması tarafından yapılan Honda GX35 testi sonuçları [3].



Şekil 5.13 : Honda GX35 test sonuçları ( $i=2.813$ ).



Şekil 5.14 : Honda GX35 test sonuçları ( $i=4.063$ ).

## 5.5 Motor İçin Optimum Manifold Çapları ve Uzunlukların Optimizasyonu

GT-SUITE programının v2016 sürümü kullanılarak motor modellemesi yapılmıştır. Modelde kullanılan motorun ölçüleri aşağıdaki gibidir.

Çap (mm)	39
Strok (mm)	30
Biyel kol uzunluğu (mm)	51
Sıkıştırma Oranı	8.2
Emme valfi çapı (mm)	15.5
Egzoz valf çapı (mm)	14
Emme port uzunluğu (mm)	69
Emme port giriş çapı / çıkış çapı (mm)	9.8 / 9.2
Egzoz port uzunluğu (mm)	30
Egzoz port giriş çapı / çıkış çapı (mm)	10.4 / 11.5
Egzoz manifold çapı / uzunluğu (mm)	17 / 500
Emme manifold 1.kısım çapı / uzunluğu (mm)	34.8 / 15
Emme manifold 2.kısım çapı / uzunluğu (mm)	28 / 44
Emme valfi açılma zamanlaması	10 BTDC
Emme valfi kapanma zamanlaması	57 ABDC
Egzoz valfi açılma zamanlaması	48 BBDC
Egzoz valfi kapanma zamanlaması	28 ATDC
Maksimum valf açılması (mm)	2.754

**Çizelge 5.4 :** Honda GX35 boyutsal özellikleri.

Geometrik değerlere ek olarak SEMCON firmasından aşağıdaki tablolarda belirtilmiş olan emme valfi ve egzoz valfi için akış sabitleri valf ögesine tanımlanmıştır.

Emme valfi akış sabitleri		
L/d	Forward Cd	Reverse Cd
0	0	0
0.032258	0.070618	0.070618
0.064516	0.141237	0.141237
0.096774	0.200991	0.200991
0.129032	0.244448	0.244448
0.16129	0.260745	0.260745
0.193548	0.282474	0.282474
0.225806	0.293338	0.293338
0.258065	0.304202	0.304202
0.290323	0.309635	0.309635
0.322581	0.309635	0.309635

Egzoz valfi akış sabitleri		
L/d	Forward Cd	Reverse Cd
0	0	0
0.032258	0.077398	0.077398
0.064516	0.174145	0.174145
0.096774	0.251543	0.251543
0.129032	0.303141	0.303141
0.16129	0.32894	0.32894
0.193548	0.354739	0.354739
0.225806	0.367639	0.367639
0.258065	0.374089	0.374089
0.290323	0.380539	0.380539
0.322581	0.386988	0.386988

**Çizelge 5.5 :** Emme ve egzoz valfi için akış sabitleri.

Daha sonra ısı transferi için emme manifoldu, emme portu, egzoz portu ve egzoz manifoldu sıcaklıkları sırasıyla Kelvin cinsinden 298, 298, 550, 550 olarak girilmiştir ve model olarak Woschni modeli kullanılmıştır.

Yanma modeli olarak Wiebe modeli seçilmiştir ve motorun %50 yanma noktası ve %10-90 yanma süresi aşağıda gösterildiği gibi belirlendi.

Motor Hızı (RPM)	%50 yanma noktası	%10-90 yanma süresi
1800	8	40
2400	8	40
3000	8	40
3600	8	40
4200	8	40
4800	8	40
5400	8	40
6000	8	55
6600	8	60
7200	8	60
7800	8	60
8400	8	60

**Çizelge 5.6 :** Motor hızı ve yanma süresi.



Aşağıdaki tabloda görülen sürtünme değerleri için GT-SUITE'in "EngFric" modeli kullanılmıştır.

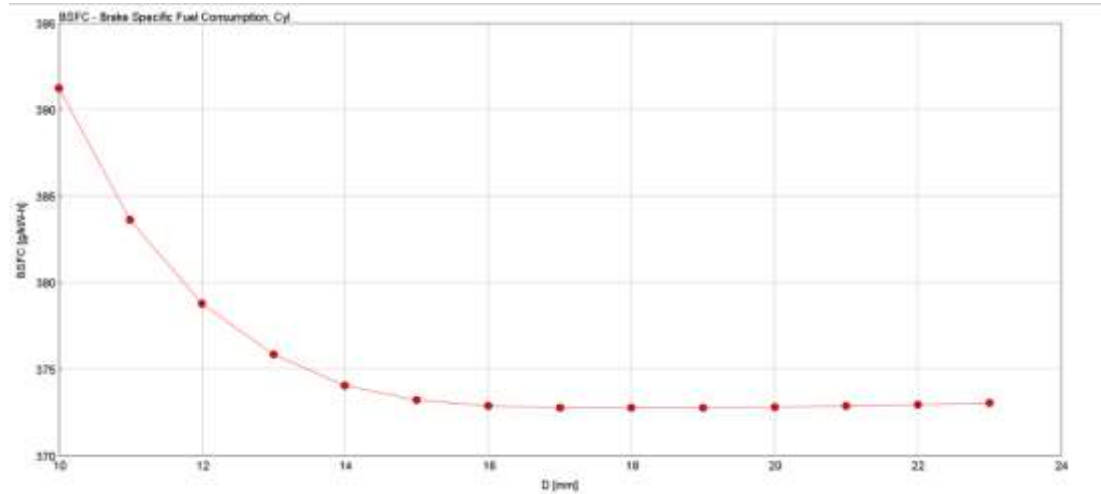
Constant of FMEP (bar)	3.1
Peak cylinder pressure factor	0.002
Mean piston speed factor	0
Mean piston speed squared factor	0

**Çizelge 5.7** : Sürtünme değerleri.

### 5.5.1 Emme ve egzoz manifold çap ve uzunluk optimizasyonları

Yapılan analizlerde emme ve egzoz manifoldlarının uzunluklarının ve çaplarının motorun maksimum torku veya gücü aldığı devir sayısını değiştirmedeği tespit edilmiştir. Bu sebepten dolayı, çap ve uzunluk optimizasyonunun yapıldığı devir motorun maksimum gücü aldığı devir olarak seçilmiştir ve bu devirdeki tork, güç ve BSFC değerleri çap ve uzunluğa bağlı olarak analiz edilmiştir. Bu kısımda sadece BSFC grafikleri verilmiştir. Tork ve gücün devre göre değişimi grafikleri EK D kısmında verilmiştir.

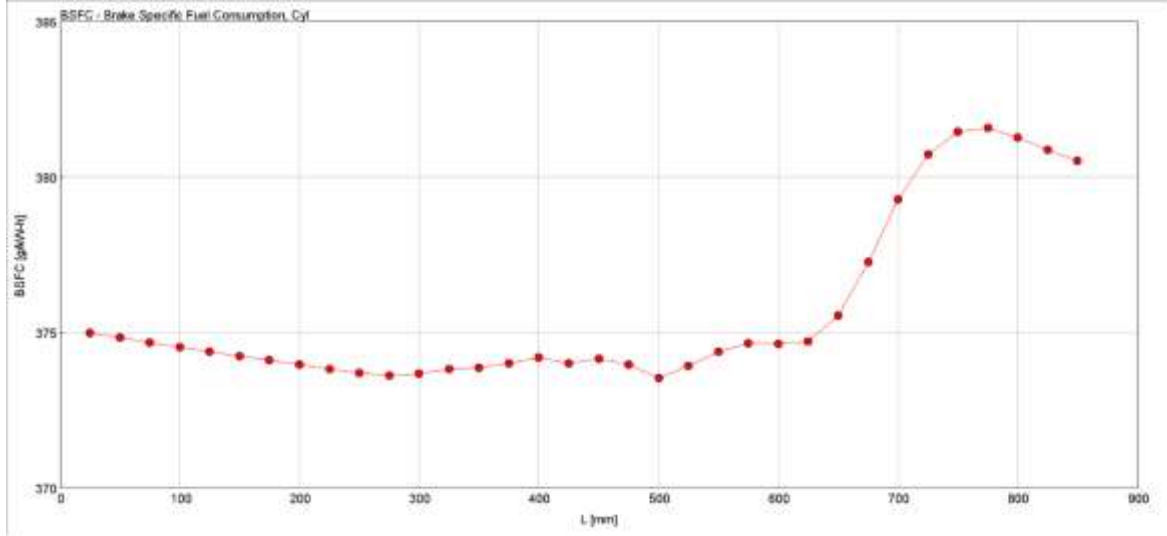
Egzoz borusunun çapı optimize edilirken motordaki diğer tüm veriler sabit tutularak çap değişikliğinin sabit bir devir sayısındaki BSFC değerine etkisi tespit edildi ve buna bağlı olarak en uygun çap saptanmıştır.



**Şekil 5.15** : Egzoz borusu çapı için BSFC grafiği.

Grafikler incelendiğinde hem düşük yakıt tüketimi hem de yüksek tork ve güç elde edebilmek adına en uygun çapın 15 mm olduğu görülmektedir.

Egzoz borusunun uzunluğu optimize edilirken motordaki diğer tüm veriler sabit tutularak uzunluk değişikliğinin sabit bir devir sayısındaki güce, torka ve BSFC değerine etkisi tespit edilmiştir ve buna bağlı olarak en uygun uzunluk bulunmuştur.

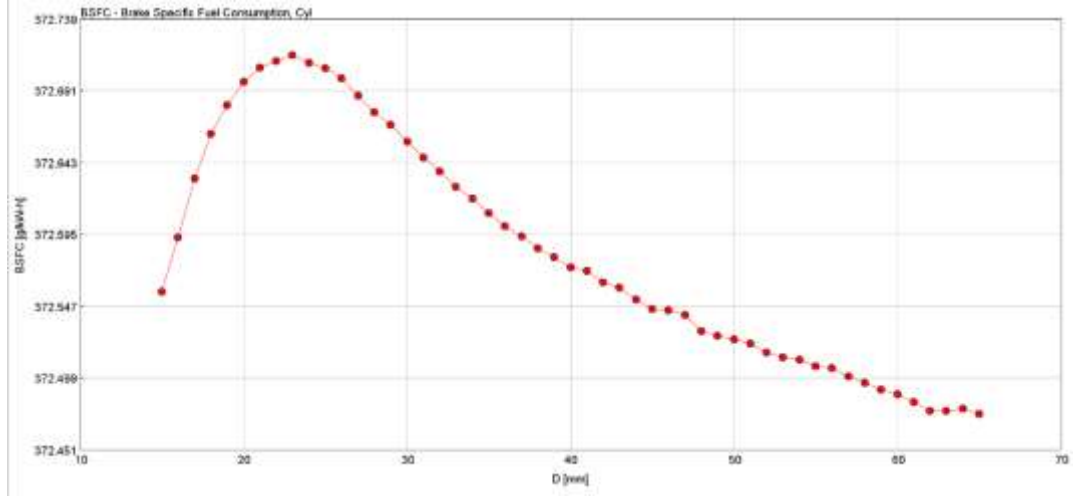


**şekil 5.16 :** Egzoz borusu uzunluğu için BSFC grafiği.

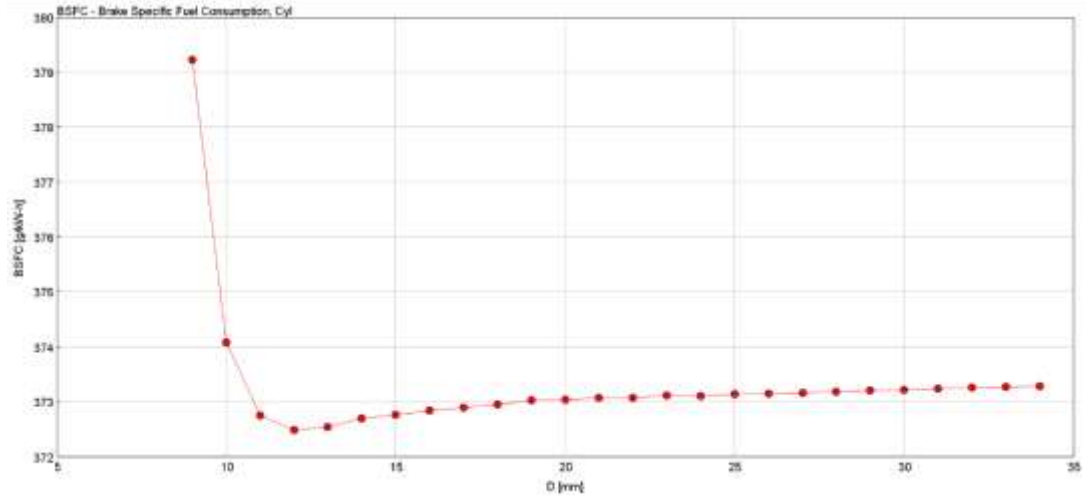
Grafiklere bakıldığında 300 mm ve 500 mm egzoz uzunluğu için BSFC değerlerinin yakın olduğu görülmektedir. 300 mm uzunluğunda egzoz borusu kullanıldığında tork ve gc değerlerinin daha fazla olması, bu borunun araç içinde daha az alan kaplaması ve ağırlığının daha az olacak olması sebeplerinden dolayı en uygun uzunluk değeri 300 mm olmaktadır.

Kullanılan emme manifoldu belirli bir noktadan sonra daralmaktadır. Bu nedenle programda emme manifoldu iki ayrı parça olarak modellenmiştir. Her bir parçanın çapı ve uzunluğu ayrıca analiz edilmiştir.

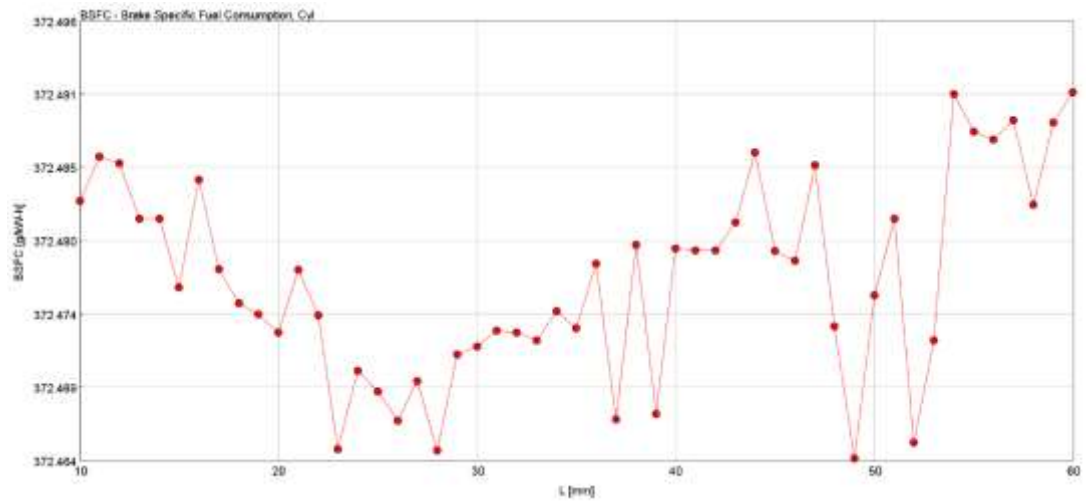
Emme manifoldunun giriş kısmının çap değerlerine karşılıık gelen BSFC değerlerine göre en uygun giriş çapı 62 mm olmaktadır, zira bu değerden sonra BSFC değeri önemli ölçüde değişmemektedir ve neredeyse en düşük değere burada ulaşmaktadır. Ayrıca bu noktada tork ve gc değerleri de yüksektir. Emme manifoldunun çıkış kısmının çapının değişiminin BSFC değerlerine göre en uygun değerin 12 mm olduğu görülmektedir, çünkü 12 mm değerinde BSFC en düşük değerini almakta ve gc ve tork değerleri en yüksek değerleri almaktadır.



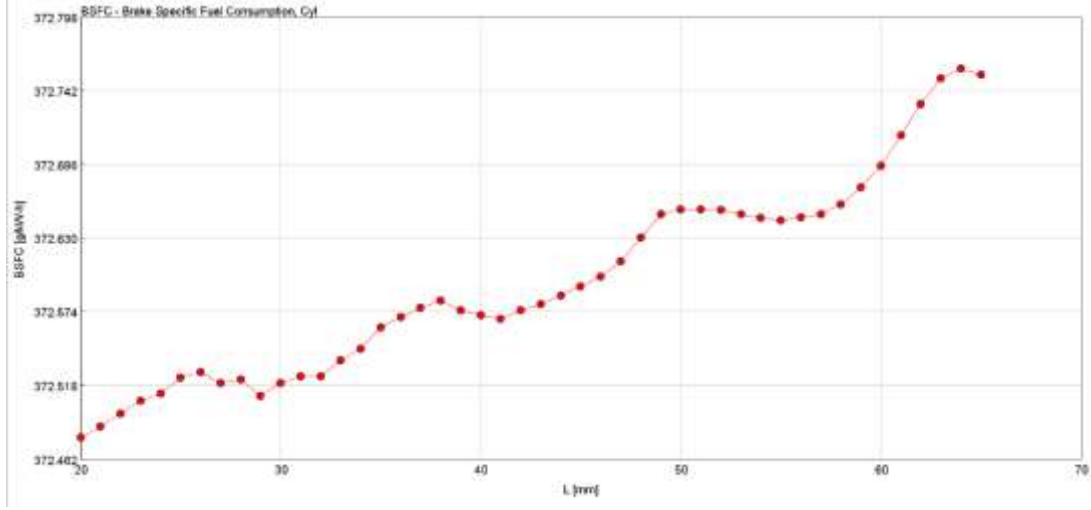
Şekil 5.17 : Emme manifoldu giriş çapı için BSFC grafiği.



Şekil 5.18 : BSFC'nin emme manifoldu çıkış çapına göre değişimi.



Şekil 5.19 : BSFC'nin emme manifoldu giriş uzunluğuna göre değişimi.



Şekil 5.20 : BSFC'ın emme manifoldu çıkış uzunluğuna göre değişimi.

## 6. MALİYET ANALİZİ

	Malzeme	Miktar	Firma	Fiyat (TL)
Direksiyon Sistemi	Lastik	4 adet	Schwalbe	800
	Jant	2 adet	Pedal Bisiklet	160
	Küresel Mafsal	2 adet	WTW	130
Gövde	PVC Köpük	1 adet	Metyx	Sponsor
	Karbon fiber kumaş	60 m	Dowaksa	Sponsor
	Reçine	2 kg	Duratek	360
Dinamometre	Demir Profil	8 m	Bülbüller Demir	200
	Tambur	2 adet	Bülbüller Demir	500
	Rulmanlı Yatak	2 adet	Bülbüller Demir	120
	Tekerlek	4 adet	Bülbüller Demir	30
	Zincir	1 m	Güney Zincir	10
	Dişli	1 adet	Güney Zincir	30
	Yıldız tipi kavrama (YK65)	1 adet	Özsayın	40
	Yıldız tipi kavrama (YK110)	1 adet	Özsayın	60
	Sarf malzeme			150
Motor ve Motor Kontrol Ünitesi	Motor	2 adet	Honda	3300
	Lambda Metre	1 adet	ECOTRONS	600
	DTAFast S60 Pro	1 adet	DTA	3000
	Zoomer enjektör	2	Honda	1200
Toplam Maliyet				10690



## 7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Shell Eco-marathon yarışmasına katılan ekiplerin temel hedefi yakıt tüketiminin azaltılmasıdır. Bu kapsamda araç üzerinde geliştirilmesi gereken iki temel husus şu şekildedir: Gövde tasarımı ve içten yanmalı motor optimizasyonu.

İlk olarak aracın üretimi ve kullanımı sırasında yaşanan sorunlar incelenerek sorunların tespiti için sistematik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda görüş alanının artırılması, boyutların büyütülmesi ile sürücü seçimi konusunda esneklik sağlanması, üretim yöntemi ve malzeme değişikliği ile mukavemetten taviz verilmeyen ağırlığın azaltılması gibi hususlar çözüme ulaştırılmıştır. Ayrıca araçta kullanılacak olan bağlama elemanları için kapsamlı bir literatür araştırması yapılmıştır. Verimliliğin yanında aynı zamanda bir dayanıklılık yarışı da olan Shell Eco-marathon için tüm tasarım kriterleri ve kurallar göz önüne alınmıştır. Aracın mümkün olduğunca az kayıp ile güvenilir olarak çalışması için konstrüksiyon ve mühendislik esasları oldukça detaylı ve hassas bir şekilde uygulanmıştır.

Tasarımın boyutlandırılması ve kıyaslanması amacıyla sonlu elemanlar analizi ve hesaplamalı akışkanlar mekaniği yöntemleri kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarının doğruluğunun artırılması için üretilen kompozit numunelere çekme testi yapılmıştır. Yapılan bu test; takımın tüm tasarım süreçlerinde “örnek uygulama” olarak uygulanması açısından büyük öneme sahiptir.

Motor testi yapılabilmesi için satın alınan histerezis frenin karakteristik grafikleri çıkarılmıştır. İlerleyen süreçlerde motor ve araç testlerinde kullanılacak olan bu frenin hassas biçimde ölçümünün yapılmış olması testlerin doğruluğuna direkt olarak etki etmektedir. Histerezis fren ile yapılan sabit hız testleri fabrika çıkışı motor üzerine yapılan diğer çalışmalar ile kıyaslandığında hata oranının düşük olduğu görülmektedir. Yapılan bu çalışma sayesinde, üstün teknolojilere sahip ve takımın ihtiyaçlarına uygun içten yanmalı benzinli motor tasarımı projesi tamamlandığında gerekli alt yapı hazır olacaktır. Ayrıca bahsedilen projenin ön çalışması ve kavram kanıtlama aşaması olan mevcut motorun modellenmesine çalışmada yer verilmiştir.

Takım arkadaşlarımız, sekiz yıldır olduğu gibi bu sene de birçok fedakârlık yaparak Shell Eco-marathon 2020 Avrupa yarışmasında ülkemizi ve üniversitemizi en iyi şekilde temsil edecektir. Yazmış olduğumuz bu tezin, takımımızın gelecek üyeleri ve gelecek çalışmaları için bilgi birikimi oluşturması, yeni hedefler göstererek yol gösterici nitelikte olması temenni edilmektedir.



## **KAYNAKLAR**

- Atkins, R. (2009).** An introduction to engine testing and development. Warrendale, Pa.: SAE International.
- Downing, J.W., Jr. and Newell, J.A. (2004),** Characterization of structural changes in thermally enhanced Kevlar-29 fiber. J. Appl. Polym. Sci., 91: 417-424. doi:10.1002/app.13021
- Gay, D. (2015).** Composite materials (3rd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Güdülü, O., Eğer, E., Koten, U. (2019).** Benzinli Hafif Taşıtlar İçin Aktarma Sistemi Tasarımı. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Hibbeler, R. C. (2011).** ‘Chapter 3: Mechanic Properties of Materials’. Mechanics of Materials.
- Käpplein, Saskia & Misiak, Thomas. (2011).** EASIE - Axially loaded sandwich panels.
- Kawai M., Morishit M., Satoh H., Tomuras S.,** Effect of end-tape shape on strainfield of unidirectional carbon/epoxy composite specimens subject to off-axis tension, Composite Part A, Vol. 28A, pp 267-275, 1997.
- Kollár, L., & Springer, G. (2009).** Mechanics of composite structures. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kostak, Ş.T., Bekar, İ.C. (2018).** Benzinli Hafif Taşıtların Dinamik Modelinin Oluşturulması ve Yol Simülasyonu. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Mallick, P. (2008).** Fiber-reinforced composites. Boca Raton: CRC.
- R. Rikards, A. Chate,** Optimal design of sandwich and laminated composite plates based on the planning of experiments, Structural Optimization, Riga Technical University, 1995.
- Rehkopf, Jackie D.,** 2012, Automotive Carbon Fiber Composites From Evolution to Implementation, Warrandale Pa.

- Temiz, V.** Dişli Çark Mekanizmaları Ders Notları, alındığı tarih 25.12.2019.
- Ulukan, L.** Konstrüksiyon Sistematiği Ders Notları, alındığı tarih 01.01.2020.
- Wicks, W. (1911).** FAN DYNAMOMETER. Transactions (Society of Automobile Engineers), 6, 617-621.
- [1] **Url-1**  
<[https://www.electrometers.com/Assets/PDF\\_files/Magtrol/Dynamometers/hysteresis.pdf](https://www.electrometers.com/Assets/PDF_files/Magtrol/Dynamometers/hysteresis.pdf)>, alındığı tarih 12.12.2019
- [2] **Url-2** <<https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/>>, alındığı tarih 24.12.2019
- [3] **Url-3** < <http://www.chalmersverateam.se/Rapporter/GTPowerGX35.pdf>>, alındığı tarih 24.12.2019
- [4] **Bhatti, M. A. (2005).** Fundamental finite element analysis and applications: with Mathematica and Matlab computations (p. 720). Hoboken, NJ: John Wiley.
- [5] **Url-4** < <http://dce.karabuk.edu.tr/icerikGoster.aspx?K=S&id=34&BA=index.> >, alındığı tarih 26.12.2019
- [6] **Url-5** <  
[https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v192/acp\\_ug/acp\\_ug.html](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v192/acp_ug/acp_ug.html) >, alındığı tarih 24.12.2019
- [7] **Url-6** < [https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/energy-error.](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/energy-error) >, alındığı tarih 24.12.2019
- [8] **Url-7** < [https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/energy-error.](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/energy-error) >, alındığı tarih 24.12.2019
- [9] **Url-8** < [https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/fea/what-is-von-mises-stress.html.](https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/fea/what-is-von-mises-stress.html) >, alındığı tarih 24.12.2019
- [10] **Temiz, V.** Mukavemet Ders Notları, alındığı tarih 25.12.2019.

## EKLER

### EK A.1: Shell Eco-marathon 2020 yarışma kuralları

## 3. VEHICLE DESIGN

### 3A – GENERAL

#### ARTICLE 25: VEHICLE DESIGN

- a) During vehicle design, construction and competition planning, participating teams must pay attention to all aspects of safety, including the safety of the driver, participants, volunteers and spectators.
  - i. Prototype vehicles must have three or four running wheels that are in constant contact with the road.
  - ii. Prototype vehicles must have a minimum crumple zone of 100 mm between the front of the vehicle body and the driver's feet.
  - iii. Urban Concept vehicles must have exactly four wheels that are in constant contact with the road.
- b) Aerodynamic appendages, which adjust or are prone to changing shape due to wind, are not allowed.
- c) Vehicle bodies must not include any external appendages that might be dangerous to participants; this includes pointed parts of the vehicle body. Sharp points must have a radius of 50 mm or greater or covered with foam or a deformable material.
- d) Vehicle body panels and windows must be rigid and may not change shape due to wind.
- e) The vehicle interior must not contain any objects that might injure the Driver in the event of a collision.  
Windows must not shatter into sharp shards. Protective film covering the windows is allowed but must not distort the driver's visibility.
- f) The energy compartment (engine/motor/transmission/battery, etc.) should be easy to access for quick inspection.
- g) All parts of the drive train, including fuel tank, hydrogen system components, etc. must be within the confines of the body cover.
- h) All objects in the vehicle must be securely mounted. Bungee cords or other elastic material are not permitted for securing heavy objects.
- i) All vehicles must have a solid floor and frame that prevent any part of the driver's body from contacting the ground.
- j) All vehicles must be fully covered. Open top vehicles are not allowed. Vehicles that look like bicycles, tricycles or wheelchairs are not acceptable.
- k) The Organisers will provide all Urban Concept vehicles with a telemetry System and require them to install in their vehicle for competition monitoring and result calculation (see Section 5).
- l) **The use of asbestos and asbestos-containing materials is forbidden.**

## ARTICLE 26: CHASSIS/MONOCOQUE SOLIDITY

- a) Teams must ensure that the vehicle chassis or monocoque will safely protect the driver's body, including crumple space in the event of a front, side, or rollover collision.  
*A monocoque is a construction that supports structural load by using an object's external skin as opposed to using a frame.*
- b) The vehicle chassis must be equipped with an effective roll bar that extends 50 mm around the driver's helmet when seated in normal driving position with the safety belts fastened.  
*If this position impairs the driver visibility it will be deemed that the roll bar is not adequate. The effectiveness of the roll bar and driver's visibility will be validated simultaneously, i.e. the driver must not be in such position that he or she must raise their head or torso above the roll bar to pass the visibility test.*
- c) The roll bar must extend in width beyond the driver's shoulders when seated in normal driving position with the safety belts fastened.  
*Teams may use a tubular or panel roll bar. If a tubular roll bar is used, it must be metal. A panel roll bar is the rigid partition separating the cockpit from the energy compartment, and it must be integrated into the vehicle chassis or monocoque.*
- d) The roll bar must be able to withstand a static load of 700 N (~ 70 kg) applied in a vertical, horizontal, and/or perpendicular direction, without deforming in any direction.
- e) If the vehicle must be lifted at a specific place on its body, it should be clearly marked with a rectangular box stating, "LIFT HERE".

## ARTICLE 27: PROPULSION AND ENERGY STORAGE SYSTEM ISOLATION

- a) A rigid Bulkhead must safely isolate and seal the vehicle's propulsion and energy storage systems from the driver's compartment.  
*A bulkhead is an upright partition separating the driver's compartment from the energy compartment. This means engines, fuel cells, fuel tanks, batteries (propulsion or accessory), hydrogen cylinders, supercapacitors, etc. must be placed outside the driver's compartment behind the bulkhead. The purpose of this bulkhead is that in the event of a fuel leak, fire or battery release incident, it prevents liquids and/or flames from reaching the driver. Avoid having any gaps or holes between the body and the bulkhead. It is recommended to seal gaps with materials such as metal/aluminium sheeting or aluminium tape.*
- b) The bulkhead must be able to protect the driver from an open flame in the energy compartment.
- c) The bulkhead must prevent manual access to the energy compartment by the Driver.
- d) If holes are made in the bulkhead to pass through wires or cables it is essential that the wires and cables are protected by a grommet or similar protective material to prevent chafing or damage. All gaps and holes must be filled.

## ARTICLE 28: VISIBILITY

- a) The Driver must have access to a direct arc of visibility ahead and to 90° on each side of the longitudinal axis of the vehicle. The Driver's field of vision must be achieved without aid of any optical or electronic devices. Movement of the Driver's head within the confines of the vehicle body to achieve a complete arc of vision is allowed, but the driver's helmet must always be 50 mm below the roll bar. **The side windows tinting must be light enough to allow the driver to be seen from outside the vehicle.**
- b) The vehicle must be equipped with a rear-view mirror on each side of the vehicle, each with a minimum surface area of 2500 mm<sup>2</sup> (e.g. 50 mm x 50 mm). An electronic device may not replace a rear-view mirror.

- c) For Urban Concept vehicles wet weather visibility is also mandatory (see Article 32).

## ARTICLE 29: SAFETY BELTS



### ROLL BAR & SAFETY BELTS

- a) The Driver's seat must be fitted with an effective safety harness with at least five mounting points to maintain the Driver securely in his/her seat. The five independent belts must be firmly attached to the vehicle's main structure and be fitted into a single buckle, specifically designed for this purpose.
- b) The safety harness must prevent any upward or forward motion of the Driver's torso. Any slack in the harness must be adjusted by using the seat belt length adjuster. The adjuster must be located as close as possible to the connection point. The crotch strap mounting point must be underneath the body, and the topmost straps should be mounted 0° to 10° below the top of the Driver's shoulder.
- c) The safety harness must always be worn tight and fastened to prevent the Driver from having free movement when the vehicle is in motion.
- d) Each safety harness mounting point must be able to withstand a 200 N force in any direction.
- e) The Urban Concept vehicle safety harness must be specifically manufactured for motorsport use (e.g. certified or compliant with FIA standards).

## ARTICLE 30: VEHICLE ACCESS

- a) It is imperative for Drivers, fully harnessed, to be able to vacate their vehicles at any time without assistance in less than 10 seconds.
- b) Prototype vehicles must be equipped with a sufficiently large opening for the cockpit. The driving position must be designed so that emergency services can easily extract the Driver from his/her vehicle, if necessary.
- c) **The driver compartment must have a single opening mechanism, which must be easily and intuitively operable from both inside and outside the vehicle.** The method of opening from the outside must be clearly marked by a red arrow and must not require any tools.
- d) It is forbidden to use adhesive tape to close the Driver's opening from the outside.

## ARTICLE 31: HORN

- a) Each vehicle must be equipped with an electrically powered horn typically used in current automobiles. Bike or cycling horns are no longer permitted.
- b) The horn must be mounted at the front of the vehicle without obstruction.
- c) The horn must emit sound greater than 85 dBA when measured 4 meters in front of the operating vehicle. The horn must produce a continuous single tone sound when activated – chirping or siren-like tones are not permitted.
- d) The horn must be powered by the vehicle battery. However, the power consumed by the horn does not need to be measured by the Joulemeter (See Article 56.iv).

## ARTICLE 32: NOT USED

## ARTICLE 33: DRIVER POSITION

For safety reasons, the head-first driving position is prohibited.

## ARTICLE 34: CLUTCH AND TRANSMISSION

- a) All vehicle propulsion must be achieved only through the friction between the wheels and the road.
- b) All vehicles with internal combustion engines must be equipped with a clutch system.
- c) For centrifugal/automatic clutches the starter motor speed must always be below the engagement speed of the clutch.
- d) Only Urban Concept ICE vehicles are required to have 'idling capabilities. This means the vehicle must be able to remain stationary while the engine is running.
- e) For manual clutches the starter motor must not be operable with the clutch engaged. An interlock is required to facilitate this functionality.
- f) Please refer to Article 109:b) regarding starter motor requirements.
- g) Guards for transmission chains and/or belts are mandatory.

*This is required to protect driver or technician when working on the car in the event of the chain or belt breaking. It must be made of metal or composite material rigid enough to withstand a break.*

## ARTICLE 35: EXHAUST SYSTEM

- a) The exhaust gases must be evacuated outside the vehicle body.
- b) Exhaust pipes must not extend beyond the rear or the side of the vehicle body.
- c) Exhaust pipes must be solid with no signs of fatigue or leaks.
- d) Exhaust pipes must be appropriate for high temperatures.

## ARTICLE 36: ENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS

All vehicles are expected to comply with reasonable environmental conditions including smoke, odour, and sound level emitted.

## ARTICLE 37: EMERGENCY SHUT-DOWN



### EMERGENCY SHUTDOWN

- a) The purpose of the emergency shutdown system is to disable the propulsion system of the vehicle. Different types of propulsion systems require different measures to accomplish this.
- b) Spark ignition engines (gasoline, ethanol) will require the emergency shutdown mechanism to shut down the ignition. It is not necessary to isolate the accessory battery.
- c) Compression ignition engines (diesel) will require the emergency shutdown mechanism to shut off the fuel or air flow. It is not necessary to isolate the accessory battery.
- d) For Battery Electric vehicles the emergency shutdown mechanism must provide a physical isolation of the propulsion battery from the vehicle electrical system. The use of a power controller or other logic systems to drive an isolation device is not permitted. **If relays are used, the relays must be a normally open contact type.**

*Care should be taken to ensure that the relay coil power is also removed when the relay coil is open. This may be achieved by **using** a latching circuit*

- e) For Hydrogen vehicles see Article 109:e).

- f) There must be both an internal and an external shutdown mechanism.
  - i. The internal emergency shutdown mechanism is for driver operation and may be designed in any effective way.
  - ii. The external emergency shutdown mechanism must be at the rear of the vehicle and permanently installed on a non-detachable part of the bodywork.
  - iii. A standard sticker (Blue triangle with red electrical arc) provided by the Organiser must be positioned on the vehicle body to indicate clearly the exterior position of the emergency shutdown actuator.
- g) The external emergency shutdown mechanism must be achieved by means of a latching red push button, which can only be re-activated by rotating it. Push/pull levers are not accepted.
- h) In addition to the above devices, all vehicles must be equipped with a "dead man's safety device" or sometimes referred to as "operator presence control." The purpose for this device is to ensure that in case the driver becomes incapacitated the vehicle's propulsion power is automatically disengaged (returns to an idle condition). This device may consist of a spring-loaded hand operated accelerator or foot pedal lever. An electric dead man switch is permissible if the switch is located on the steering wheel. If an electric dead-man switch is used the driver must directly (for example by thumb or index finger) engage the switch continuously while driving.
  - i. This device is a separate switch from the required "emergency shut-down" mechanisms identified in 37.
  - ii. If an ICE Prototype vehicle is designed with a WOT [wide open throttle] operation of the dead-man switch must switch off the ignition system.

### **ARTICLE 38: ADDITIONAL INSPECTIONS**

- a) After passing technical inspection, any alternation must be re-approved by the Organisers.
- b) After any significant incident to the vehicle, it must be re-inspected.
- c) At any time, the Organisers may perform unannounced inspections on the vehicles.

## **3B – PROTOTYPE CLASS**

### **ARTICLE 39: DIMENSIONS**

- a) The vehicle maximum height must be less than 1000 mm.
- b) The vehicle track width must be at least 500 mm, measured between the midpoints where the tyres of the outermost wheels touch the ground.
- c) The ratio of height divided by track width must be less than 1.25.
- d) The vehicle wheelbase must be at least 1000 mm.
- e) The maximum total vehicle width must not exceed 1300 mm.
- f) The maximum total length must not exceed 3500 mm.
- g) The maximum vehicle weight, without the Driver is 140 kg.
- h) None of the body dimensions above must be achieved by design singularities such as 'stuck-on' appendages or cut-outs.

### **ARTICLE 40: NOT USED**

## ARTICLE 41: TYRES, WHEELS, AXLES AND WHEEL HUBS

- a) All types of tyres and wheels are allowed.
- b) Any type of wheel rim may be used. Rims must be compatible with the dimensions of the selected tires to satisfy safety standards.

*Bicycle wheels are not generally designed to support substantial lateral cornering forces, such as may be found in Shell Eco-marathon vehicles at certain speeds.*

*The wheel axles must be designed for cantilever loads (like in wheelchairs) rather than for load distributed equally on both sides (like in bicycles).*

- c) Wheels located inside the vehicle body must be isolated from the Driver by a bulkhead and must not **touch** the chassis or body.
- d) Any handling or manipulation of wheels by the Driver is forbidden from the moment the vehicle is at the starting line until it crosses the finish line.
- e) All installations must be carried out in a way that there is no likelihood the wheels will **touch** other parts of the vehicle (i.e. cables, wires, hoses, and energy compartment components like batteries, etc.). These must be safely mounted/secured so that they cannot interfere with the turning wheel during driving and cause accidents.

## ARTICLE 42: TURNING RADIUS AND STEERING

- a) Only front wheel steering is permitted. If the Organisers are not satisfied with the effectiveness and/or control of a vehicles steering system, this vehicle will be removed from the competition.
- b) The turning radius must be 8 m or less. The turning radius is the distance between the centre of the circle and the external wheel of the vehicle. The external wheel of the vehicle must be able to follow a 90° arc of 8 m radius in both directions. The steering system must be designed to prevent any contact between tyre and body or chassis.
- c) Electrically operated indirect steering systems are permitted providing they are operated by a steering wheel or similar (rotary potentiometer), joystick operation is not permitted. If electronic steering systems are used, in the event of system failure, the vehicle must be equipped with manual steering override.
- d) The Organisers reserve the right to set up a vehicle handling course to verify the following when the vehicle is in motion: driver skills, turning radius and steering precision. For example, the Organisers will verify that steering is precise, with no play.

## ARTICLE 43: BRAKING



- a) **Vehicles must have two hydraulic braking systems, one per axle. Brakes that act on the tyres are not permitted.**
  - i. **The front brake(s) must have a single foot operated pedal controlling front wheel(s).**
  - ii. **The rear brake(s) must have a single lever action attached to the steering wheel or a single pedal.**



- iii. **For each axle, a maximum of two master cylinders is allowed, but they must act on single hydraulic circuit to ensure a proper balance between right and left wheel. One master cylinder per wheel is not allowed.**
  - iv. It must be possible to activate the two brake systems at the same time without taking either hand off the steering system.
- b) The effectiveness of the braking systems will be tested during vehicle inspection. The vehicle will be placed on a 20 percent incline with the driver inside. Each brake system will be activated separately, and each individual brake system must keep the vehicle immobile.
  - c) During practice or competition runs, the brakes must be protected against any adjustments made by the driver. The effectiveness of the protection will be evaluated during technical inspection and rechecked before entering the track. In addition, vehicles will be checked at the start and/or finish area. Any system that has been compromised will invalidate that run and a penalty may be issued by the Organisers.

## 4. ENERGY SOURCES

### 4A – GENERAL

#### ARTICLE 53: ENERGY TYPES

Vehicles may only use one of three energy categories listed below, which each have individual prize categories. (See Article 100.)

- a) Internal Combustion Engine:
  - i. Shell FuelSave Unleaded 95 (Europe and Asia)/Shell Nitrogen Enriched (US) Gasoline\*
  - ii. Shell FuelSave Diesel (Europe)/Shell Diesel (Asia and US)
  - iii. Ethanol E100 (Denatured)

*\* The gasoline and diesel provided by the Organisers during the competition are the Shell fuels prevalent in the local market where the event takes place. For testing and tuning purposes in the team's home countries where Shell fuels may not be available it is recommended to use the locally available Unleaded 95 (87 US) or Diesel instead.*

- b) Battery-Electric
- c) Hydrogen Fuel Cell

#### ARTICLE 54: RESULTS CALCULATIONS

- a) All live results displayed during the competition are provisional until verified and published by the Organisers after the completion of the event, usually within three days after the event.
- b) For Prototype vehicles, the results will be calculated based on the propulsion energy consumed.
- c) For Urban Concept vehicles, the results will be calculated based on the propulsion energy consumed PLUS the electrical energy consumed by the vehicle as measured by a joulemeter.
- d) Results for the Internal Combustion Category will be expressed in kilometres per litre (km/l) or miles per gallon (mpg) depending on region (i.e. theoretical distance covered using energy of gasoline equivalent) corrected to a temperature of 15°C on a tank-to-wheel basis.
  - i. Regardless of the fuel used, for the internal combustion category, the measurement will be determined from this equivalent consumption of gasoline. This calculation will be performed using the net calorific value (NCV), which represents the quantity of energy released per unit mass or volume of fuel during complete combustion yielding steam and carbon dioxide, and the energy consumed from the battery as measured by the joulemeter, corrected to allow for the efficiency of the electricity production process. The inclusion of electrical energy consumed is only applicable for Urban Concept vehicles only. (See Article 109:b).
  - ii. Typical NCV values (mass basis) for different fuels are given in the table below. The NCV values (vol.) at 15°C are calculated on the day of competition by multiplying the actual mass-based NCV by the fuel density at 15°C.

ENERGY TYPE	NCV BY MASS (kJ/kg)
Shell FuelSave Unleaded 95 (Europe and Asia), Shell Nitrogen Enriched (US) Gasoline	42,900
Shell FuelSave Diesel (Europe), Shell Diesel (Asia and US)	42,600
Ethanol E100	26,900
Hydrogen	119,930

iii.

Example: 1000 km is covered with one litre of Shell FuelSave Diesel and the total electrical energy consumed is 200 kJ. Given that the general density values of diesel and gasoline are 0.83716 and 0.7646 kg/l @ 15°C respectively, and NCVs as per the table above, then the corresponding gasoline equivalent volumes consumed are:

*Diesel:*  $1 \times 0.83716 \times 42600 / (42900 \times 0.7646) = 1.09$  litres gasoline

*Electricity:*  $200 / 0.25 / 0.75 / (42900 \times 0.7646) = 0.03$  litres gasoline

*Nett = 1.09 + 0.03 = 1.12* litres gasoline

Where

0.25 = efficiency of the engine conversion process

0.75 = the efficiency of engine driven alternator generated electricity

The final fuel consumption result is thus:

*Fuel consumption (km/L) = 1000 / 1.12 = 892.9 km/litre gasoline equivalent at a reference temperature of 15°C*

iv. The results for hybrid vehicles will be expressed based on the primary energy used.

- e) Results for Battery Electric vehicles will be expressed in kilometres per kilowatt hour (km/kWh), or miles/kWh depending on region, and will be determined by using a joulemeter supplied by the Organisers.
- f) Hydrogen Fuel Cell vehicles will use a flow meter to measure the H<sub>2</sub> consumed, and for Urban Concept vehicles, the energy consumed from the starter or accessory battery will be measured by the joulemeter. The results will be calculated using the NCV of H<sub>2</sub> listed above and expressed in km/m<sup>3</sup> hydrogen.

## ARTICLE 55: FUELS SUPPLY AND HANDLING

- a) Only the fuels listed in Article 53: will be provided to the Participants by the Organisers during the event.
- b) No additives may be added to the fuel. Only the energy derived from the combustion of the fuel in the presence of air alone within the engine system may be used for forward propulsion. No other material that could serve as engine fuel may be used at any time during the event.
- c) Participants handling fuel must wear safety glasses and chemically resistant gloves.
- d) No additives, catalysts, water injection, or fuel treatment devices are allowed.

## ARTICLE 56: JOULEMETERS

- a) Joulemeters will be installed on all Urban Concept, prototype battery electric, and selected Prototype ICE and hydrogen vehicles.

- b) The Organisers will provide a joulemeter to selected teams at the event.
- c) Joulemeters must be installed inside the engine compartment. Joulemeters mounted outside the vehicle are not allowed.
  - i. For internal combustion vehicles, the joulemeter must be easy to read and reset.
 

*Easy to read means someone standing outside the vehicle can easily read the screen of the joulemeter and have access to the on-off switch at the side of the of the joulemeter.*
  - ii. For battery electric and hydrogen vehicles, the joulemeter must be positioned so that the display can be easily read and reset from outside the vehicle without the removal of any vehicle body components. It is acceptable to access the joulemeter from outside the vehicle through a hinged door.
- d) Joulemeter placement in vehicle electrical circuit:
  - i. For Urban Concept and non-battery electric Prototypes vehicles, the joulemeter must be installed between the battery and the vehicle electrical system.
 

*For ICE vehicles, the starter motor cable must be connected after the joulemeter but before the main vehicle fuse. This placement is to insure the joulemeter measures the starter energy. The starter motor is not required to be fused.*
  - ii. For Prototype battery electric vehicles, the joulemeter should be located between the vehicle electrical system and the motor controller.
  - iii. For Urban Concept hydrogen vehicles without an accessory battery, the joulemeter must be installed between the external starter battery and the vehicle electrical system. (See Article 65:ii.)
  - iv. The horn circuit may be powered by a separate circuit connected directly to the battery. (See d.)
 

*This means the horn circuit does not need to pass through the joulemeter (if installed) and the horn energy will not be measured by the joulemeter*
- e) The location and placement of the joulemeter will be verified during technical inspection.

## ARTICLE 57: VEHICLE ELECTRICAL SYSTEMS

- a) For safety reasons, the maximum voltage on board of any vehicle at any point must not exceed 48 Volts nominal or 60 Volts max. (This includes on-board batteries, external batteries, supercapacitors, fuel cell stack, etc.)



### BATTERY SAFETY

- b) For all energy types, only one vehicle battery is allowed.
  - i. For ICE and hydrogen fuel cell vehicles this is called the accessory battery (see Article 109:h)
  - ii. For battery electric vehicles this is called the propulsion battery, which means that an accessory battery is not allowed.
 

*Battery definition: A 'battery' is defined as a source of electrical energy, which has exactly two connectors and **can be described as a unit. This unit may contain more than one sub-unit. If more than one sub-units are used they should be packaged together in a single physical package. The package may be made of any material provided it contains the entire battery.***
- c) The battery must be installed outside of the Driver's compartment behind the bulkhead. (See Article 27:) Batteries mounted directly under the driver's seat are not allowed.

- d) If Lithium-based batteries are used,
- i. Battery Management Systems (BMS) must be tailored to the lithium chemistry to control and protect the battery against risk of fire.
    1. The BMS must provide cell balancing and overvoltage protection during off-track charging.
    2. For battery electric vehicles, the additional requirement of cell level over-discharge, cell level overcurrent and **battery over-temperature** must be provided as part of the on-vehicle system. The BMS must AUTOMATICALLY isolate the battery, without operator intervention, if a limit or out of range condition is reached on any of the above parameters.
    3. **For battery electric vehicles, the on-vehicle BMS must be located in the physical battery package (See Article 57:b,ii above.)**
  - ii. For all self-built batteries, the following applies (note: a battery with a separately purchased BMS is also considered a self-built battery).
    1. If there are one or more cells or modules, the overcurrent protection value for cells in parallel must be selected such that under normal operating or expected failure conditions, no single cell will be exposed to current beyond its rating.
    2. All cells or modules must be identical in configuration. (i.e. a battery constructed from cells of different capacities is not allowed).

*If the BMS is purchased separate from the battery, ensure it is compatible with battery chemistry. Example: Li-Polymer (LiPo) batteries require a BMS designed for LiPo batteries.*
  - iii. Charging of batteries must be done with the battery charger purchased together with the battery or a purpose-built charger specifically suited to the given battery chemistry. For self-built batteries, teams must demonstrate that the charger is suitable and is integrated with the BMS system.
  - iv. The maximum capacity of any Lithium-based battery used is 1,000 Wh. For batteries not rated in Wh, the Wh rating is calculated by multiplying the amp-hour rating of the battery by its nominal voltage.
  - v. Protection for Lithium-based battery charging, whether in or out of the vehicle must be provided, see Article 109:h).
  - vi. Any Lithium based battery must be equipped with a **solid metal containment tray under the battery** OR the battery must be enclosed in a battery charging bag. Either the tray or bag must be suitable to prevent the battery, in the event of a battery fire, from burning through the battery mounting or the vehicle body and dropping to the ground **or in the engine compartment in the event of a vehicle rollover**. Lightweight aluminium, other semi-metallic materials, or non-solid trays are not acceptable as metal containment.
  - vii. Power tool or hand-held equipment batteries are not permitted as a battery electric propulsion battery.
  - viii. Printed manufacturer's documentation for lithium-based batteries and the associated battery management system must be available for review during technical inspection (see c).
- e) All batteries and Supercapacitors must be short circuit protected. Protection may be in the form of a fuse, fusible link, or a current interrupting device (circuit breaker). Automatic reclosing current interrupting devices are not allowed. Short circuit protection devices must be located on the positive conductor and as close as possible, or a maximum 300 mm from the positive terminal of the battery or Supercapacitor. The rating of the short circuit protection device must enable the battery or Supercapacitor to always supply enough

short circuit current to open the device. For vehicles with a starter motor, the starter motor cable is NOT required to be protected.

- f) For safety reasons, both the positive and negative circuits of the propulsion battery (for battery-electric vehicles) and Supercapacitors must be electrically isolated from the vehicle body, frame, and metal components.
- g) All vehicle electrical circuits must be protected against electrical overload. Overload protection may be in the form of fixed current limits within electric controllers or by the insertion of individual circuit fuses.
- h) Accessory battery
  - i. The accessory battery provides all allowed electrical needs such as safety devices (windscreen wipers, lights, hydrogen sensors, hydrogen relays and hydrogen shutdown valve), ignition, fuel injection control, and starter motor.
  - ii. The accessory battery may also power electrically driven engine components such as engine oil and cooling pumps, electric turbo compounding, electromechanical variable valve timing, compressors/blowers, etc. The use of electric fuel pumps is not allowed.  
**Only Urban Concept vehicles** can utilize electrically driven engine components.
- i) The following devices may be powered by batteries other than the vehicle battery provided they use built-in batteries: radio communication system and driver ventilation.
- j) All electrical/electronic enclosures purchased or built by the teams must be made of transparent material or at least have a transparent cover to allow the technical inspectors to view the contents.
- k) Electrical wiring must be in good condition, neat, secured and not close to moving parts. All wiring connections and terminations must be visible and easily accessible. Splices are not allowed.

## ARTICLE 58: TECHNICAL DOCUMENTATION



### TECHNICAL DOCUMENTS

- a) Competitors need to provide technical documentation in 2 stages:
  - i. Prior to the event during the online submittal process (see Article 109:b)  
This documentation serves only to verify that the teams understand the Rules. Online approval in no way constitutes a pre-approval for the Technical Inspection phase.
  - ii. At the event (see Article 109:c)  
This should be a precise technical description of the vehicle. During technical inspection, the documentation will be compared against the vehicle. Deviations between the technical documentation and the vehicle will be required to be reconciled prior to passing technical inspection.
- b) Technical Documentation - prior to event.
  - i. Competitors must provide, through the online submittal process, documentation on the vehicle energy supply and propulsion system. It is not necessary to submit detailed component specifications or electrical schematics as part of the online submittal process.
  - ii. Energy supply block diagram  
The online submitted energy supply block diagram and associated text description must contain information describing the energy flow and component function for the vehicle energy systems. Specific items to be included in the block diagram for each energy category are listed below:

- ICE: engine, fuel tank, fuel line, injector, pressure relief valves, pressure regulators, pressure gauge, compressed air bottle, vehicle cut-off mechanism
- H2: Fuel cell, cylinder, solenoid valve, pressure regulator, flow meter, motor controller, motor, supercapacitor, vehicle cut-off mechanism
- BE: Motor, battery/BMS, fuse, wiring, e-stop switches, motor controller, vehicle cut-off mechanism

iii. Propulsion system block diagram

The online submitted propulsion system block diagram and associated text description must contain information describing the propulsion mechanism for each energy category below:

- ICE: Engine/Motor to road (engine, transmission, clutch, wheel, motor, supercapacitor, motor controller)
- H2: Motor to road
- BE: Motor to road

c) Technical Documentation - at event (to be reviewed during Technical Inspection)

- i. Competitors must have available for inspection with the vehicle printed documentation describing selective technical aspects of the vehicle. The printed documentation must be bound and divided into the following sections. The specific required sections for each energy category are defined below.

**ICE energy category**

- Energy Supply Diagram
- Propulsion System Diagram
- Electrical Schematic
- Hybrid System +
- Battery/BMS ++

**Battery Electric energy category**

- Energy Supply Diagram (Electrical Schematic)
- Propulsion System Diagram
- Battery/BMS
- Motor/Motor Controller

**Hydrogen category**

- Energy Supply Diagram
- Propulsion System Diagram
- Fuel Cell
- Electrical Schematic
- Motor/Motor Controller
- Supercapacitor +
- Battery/BMS ++

+ If included in the vehicle

++ If a Lithium-based accessory battery is included in the vehicle

ii.

The minimal contents of each of the above required sections are defined below.

- **Energy Supply Diagram:** include updated diagrams and associated descriptive text as defined in Article 109:b) above.
- **Electrical Schematic:** provide a vehicle level schematic showing all vehicle wiring and associated components and connections. The schematic should include component values such as voltage levels and fuse ratings. Schematics of components such as the engine management system or fuel cell controller are not required in this section.
- **Hybrid System:** include manufacturers' component specifications at the lowest level of purchased components. Include diagrams describing the power flow into and out of the hybrid system. Include supercapacitor documentation (see the **supercapacitor** section below).
- **Battery/BMS:** (For Lithium-based batteries only) Provide battery/BMS manufacturer component specifications at the lowest level of purchased components. At minimum, the battery documentation should include cell chemistry, cell electrical characteristics, cell series or parallel configurations, battery voltage, and current ratings. The BMS data **MUST** include:
  1. Cell over-voltage and under-voltage protection limits
  2. Battery over-current limit (not required for accessory battery)
  3. Operation of cell balancing (how and when)
  4. Battery over-temperature limit (not required for accessory battery)
  5. How the BMS will protect the battery when an over-voltage, under-voltage, over-current or over-temperature condition is reached, i.e. how will the BMS protect or isolate the battery, in the case of Battery Electric Vehicles, when these limits are reached?
- **Motor/Motor Controller:** Provide motor/motor controller manufacturers component specifications at the lowest level of purchased components. For Battery Electric Vehicles, include design documentation on the purpose-built motor controller. The documentation may contain control flow diagrams, motor controller and sub-component schematics and PC board layouts if PC boards were used. Also, include software documentation if software was written as part of the motor controller development.
- **Fuel Cell:** Provide fuel cell manufacturers component specifications at the lowest level of purchased components. This should also include the surface area of the fuel cells, rated power and voltage.
- **Supercapacitors:** Provide supercapacitor manufacturers component specifications at the lowest level of purchased components. At a minimum, include supercapacitor system rated voltage and maximum current.

## **4B – INTERNAL COMBUSTION ENGINES**

### **ARTICLE 59: PROPULSION**

The type and design of the internal combustion engines are not restricted; however, they must run only on the fuel provided by the Organisers and must not consume any engine oil (2 stroke engines are not allowed).

## ARTICLE 60: OTHER ON-BOARD ENERGY SOURCES

- a) For all fuel categories stored pneumatic energy not replaced during the competition by the engine may only be used for the fuel injection system. Fuel pumps are permitted for all fuels provided they are mechanically driven by the engine only.  
*Electric fuel pumps are prohibited.*
- b) It is permitted to pressurise the liquid fuel tanks, to feed the engine, only under the following conditions:
  - i. Pressurisation is done by means of a translucent compressed air bottle fitted with a safety valve set to 5 bars maximum - or the lower operation pressure of the vehicle system. This safety valve must be located between the pressure regulator and the **pressurised air bottle**.
  - ii. The pressurisation is done in the starting area by means of an air pump.
  - iii. The Driver must not modify the pressure during the competition.
- c) Auxiliary energy sources (chemical, latent energy from phase changes, etc.) are not permitted.
- d) For Urban Concept vehicles engine temperature can be regulated with a pressurized pure water or commercially available coolant in a cooling system powered by an electrical pump.
- e) For Prototype vehicles, if the engine temperature is regulated with water, the said regulation should be limited to the use of pure, un-pressurised water as coolant and a mechanical water pump.
- f) The external regulation temperature of the engine by external heating devices is limited to 100°C.
- g) **The use of vacuum from air intake cannot be used for auxiliary equipment such as clutches.**

## ARTICLE 61: FUEL TANKS (ICE VEHICLES)

- a) The vehicle must be equipped with only one of the following approved fuel tanks supplied by the Organisers:  
Tank capacities: Prototype: 30, 100 or 250 cc  
Urban Concept: 30, 100, 250 or 350 cc
- b) Only tanks bearing a clearly visible stamp proving its "APAVE" certification compliance can be used for pressurised systems.  
*APAVE tests fuel tanks and certifies their ability to withstand a pressure of five bar.*
- c) The fuel tank must be mounted in an accessible and zero-degree vertical position which allows in-situ filling with a burette of approximately 1 metre height.
- d) The fuel tank must be mounted in a way that its top is at least 50 mm below the roll bar and far from any moving parts, batteries, heat and ignition sources.
- e) The fuel tank cap, whether it is leak proof or not (drilled), must be in place during the competition. For diesel engines, a small (<3 mm) hole must be drilled in the centre of the cap to allow air to enter the tank, hence allow fuel out.
- f) Fuel return lines must be fed into the fuel feed line below the fuel tank. For diesel engines, the return line can be fitted to the fuel cap only if the engine was originally equipped with a manual priming pump and this return line and the pump have not been modified.
- g) Teams must equip their vehicle with clear fuel lines which are not prone to expansion when pressurised (max. internal diameter 8 mm).
- h) For all pressurised fuel systems, the hoses connecting the pressure bottle to the fuel tank cap must be flexible (do not need to be Rilsan/Nylon type) to allow easy connection and to prevent side loading to the tank necks.



## ARTICLE 62: FUEL SYSTEM

- a) Participants must provide a description and a precise technical drawing of the fuel supply system from tank to engine.
- b) This system must be designed that it can be completely drained and refilled before the competition.
- c) The fuel line between the tank and the engine must not include any additional components, for example filters. A second valve directly at the bottom of the fuel tank is tolerated.
- d) For diesel engines, a cut-off solenoid valve is required. (See c)
- e) Engines with carburetors are prohibited (Fuel injection is mandatory).
- f) The air intake manifolds must not contain any fuel (or be able to accumulate any fuel) or blow-by gas when the vehicle is on the starting line prior to departure. Air filters are not allowed in the intake system. Blow-by gas must not be recycled during the competition but must be collected in a specific canister for environmental protection.

*Blow-by gas: gas inside the engine (oil vapours, unburnt fuel, or gas in the combustion chamber that has not been evacuated in the exhaust). This gas is usually recovered at the intake manifold. This is known as blow-by gas re-circulation.*

- g) The fuel system must be easily accessible for inspection and measurements.
- h) It must be possible to set the fuel supply system to atmospheric pressure for measurement of the fuel level. The pressurisation system must be equipped with a pressure gauge and normal running pressure must be clearly marked on the gauge.
- i) The standard fuel consumption measurement method for liquid fuels is by volumetric replacement of the fuel consumed with a temperature corrected volume of the fuel.
- j) The fuel consumption of all ICE vehicles that have achieved more than 1500 km/l (3,528 mpg) will be measured gravimetrically. At the start, the Technical Team will fill the fuel system, and the entire fuel system (including tank, injector, pipes, injector) will be weighed on a precision balance. All the components must be compact and easily detachable for weighing purposes. After completion of a successful run, the entire fuel system will be removed and weighed again on the same balance. This handling of the fuel system and transportation to the weighing room must be performed by a competent team member who has a valid access pass. The handling of the fuel system will be supervised by a Technical Team member who will also perform the weighing, which must **be witnessed** by a Participant.
- k) Fuel is a volatile product. Therefore, it is not allowed to artificially increase the fuel system temperature, which would lead to the formation of vapour locks. Conversely, cooling or refrigeration of the fuel below ambient temperature is also prohibited.

## ARTICLE 63: VEHICLES USING HYBRID TECHNOLOGY

- a) A Supercapacitor is the only allowed energy storage device for hybrid vehicles. Mechanical or hydraulic energy storage is not permitted. The use of any battery in the hybrid propulsion system is forbidden.
- b) This capacitor must be the only source of stored energy for the electric motor driving the vehicle.
- c) Two connectors must be installed safely outside the vehicle to allow the voltage measurement on the starting line. These must be labelled "Supercapacitor Voltage".
- d) The state of charge of the Supercapacitor will be checked before and after each run by measuring its voltage. The voltage registered after the run must be at least equal to the voltage registered before the run. In the event of the contrary, the Supercapacitor must be re-charged by running the engine until its

voltage is equal to the voltage registered before the run. The time required to recharge the Supercapacitor by running the engine after the competition is added to the recorded time of the relevant run.

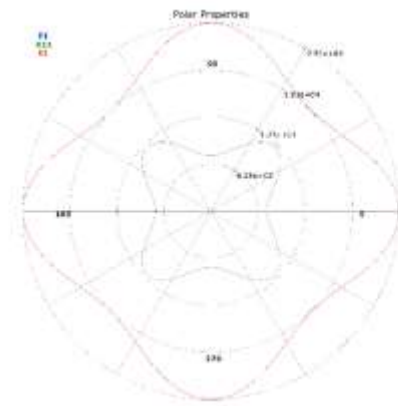
- e) The electric circuitry must be correctly fused to prevent overloading any of its parts. The fuse needs to be clearly labelled in the technical drawings and easily accessible for Technical Inspection (see Article 109:g).

**ARTICLE 64: STARTER**

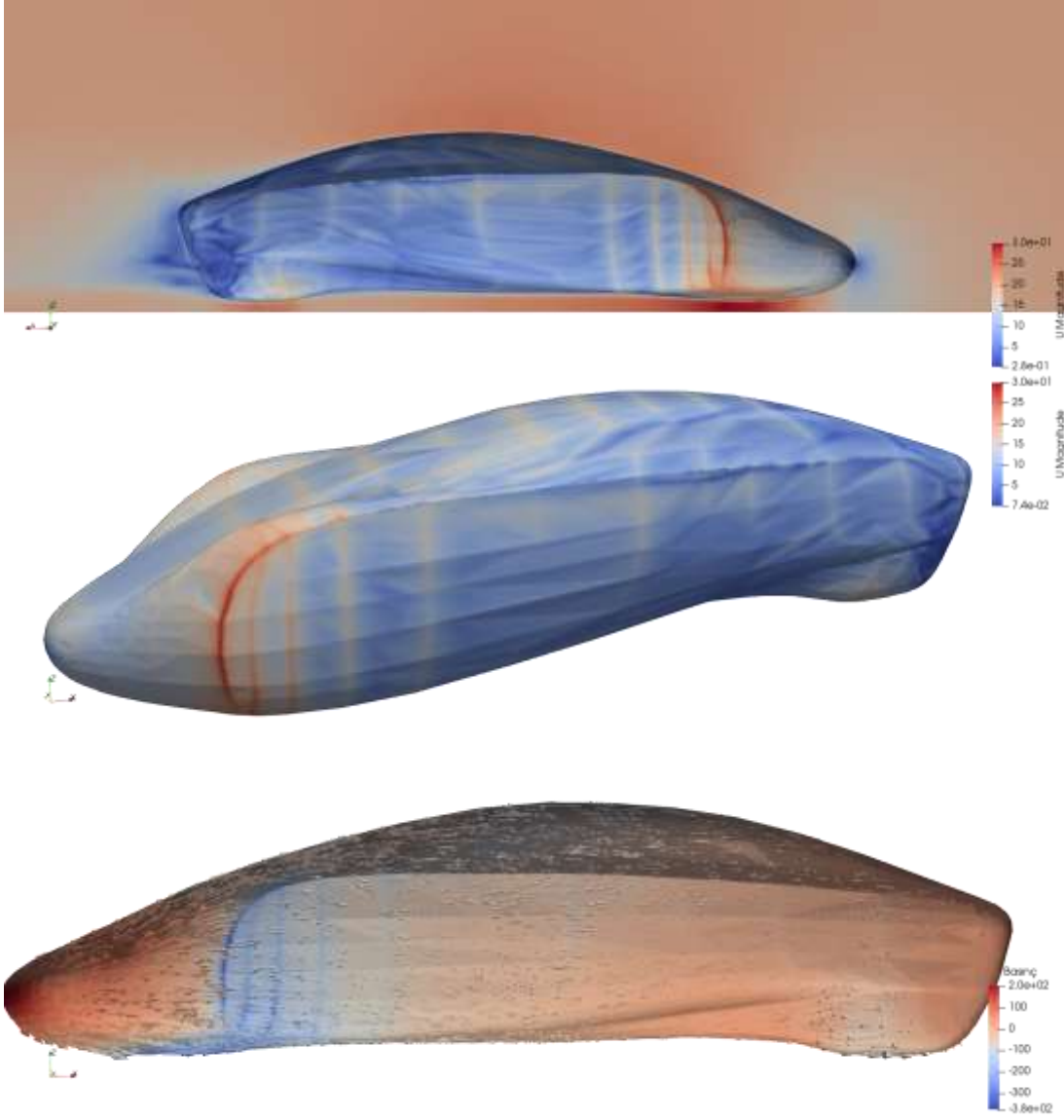
- a) An electric starter must be used during the competition. Manual hand starting is prohibited.
- b) It must be clearly established that the starter is never capable of providing any forward propulsion to the vehicle.
- c) **For Prototype vehicles only** a clearly visible red indicator light called the starter light, equivalent in its luminescence to a 21 W light bulb, must be installed on the rear of the vehicle and must be clearly visible from both sides of the track to signal any operation of the starter motor.
- d) If Track Marshals report the repeated or intensive use of the electric starter by a Team, the Organisers reserve the right to order an immediate inspection of the vehicle. If any non-compliance is observed, the Team will be penalised accordingly.
- e) At the start, the starter and the starter light must be extinguished by the time the rear wheel of the vehicle crosses the start line. Failing to comply will invalidate the run and count towards the maximum number of attempts.

**EK B.1: Malzeme polarları.**

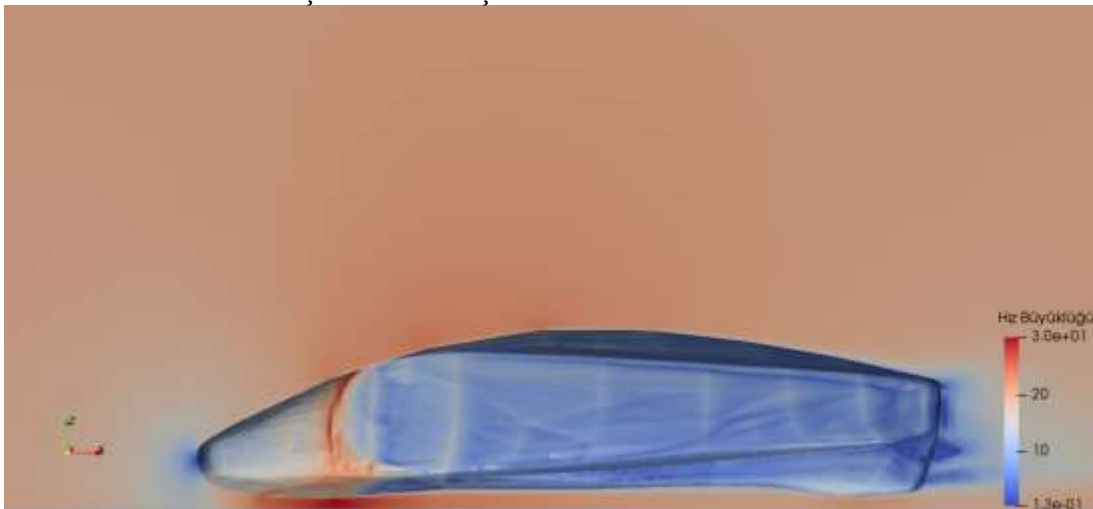




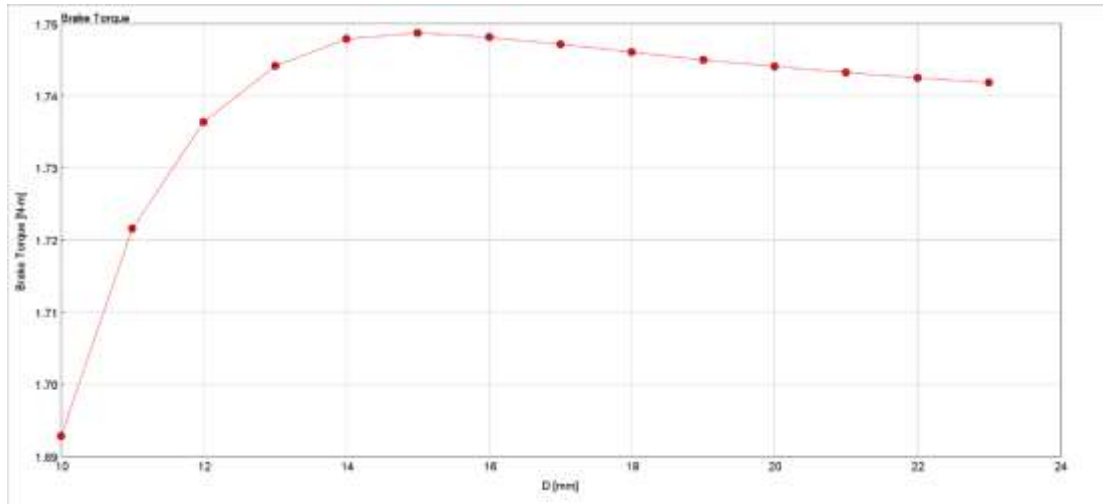
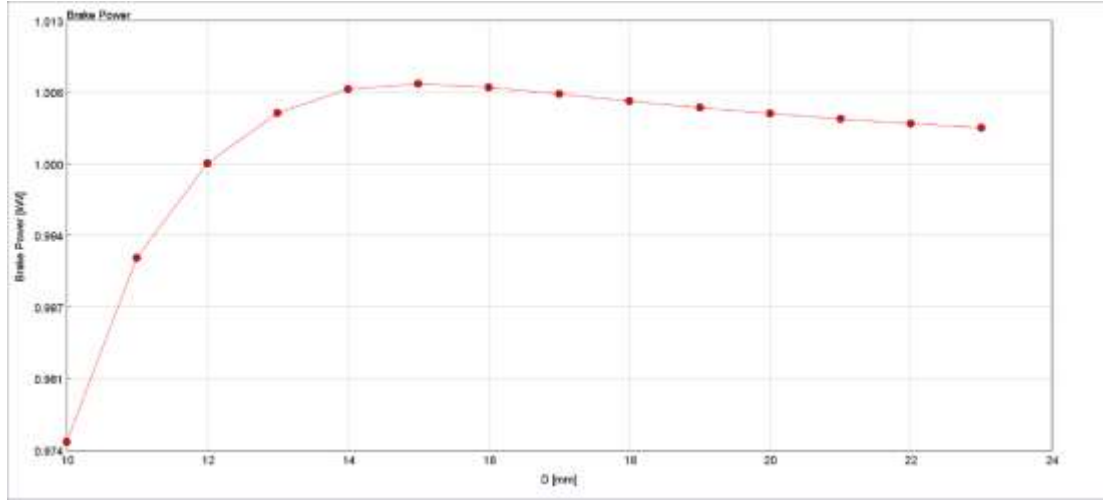
**EK C.1:** Macaw 2 akış analizi sonuçları.



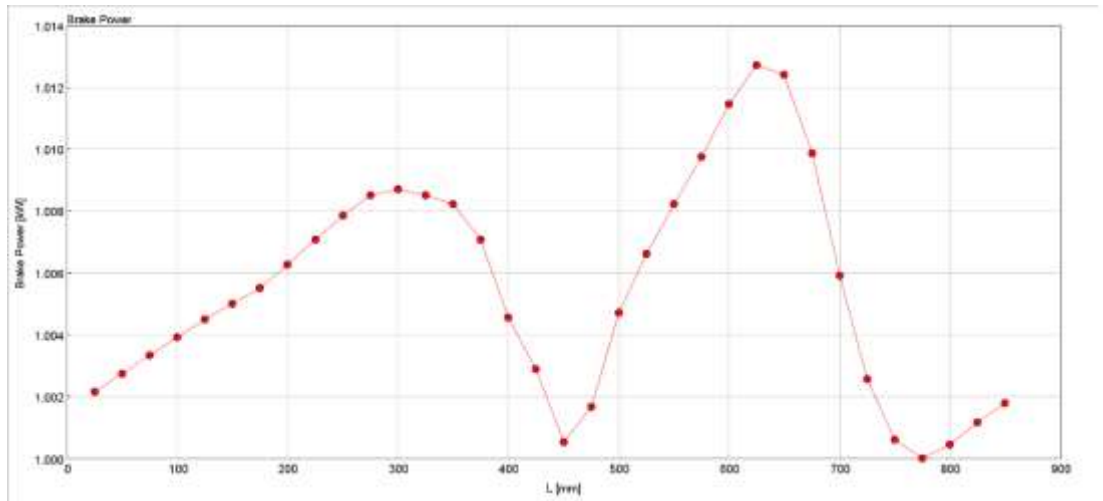
**EK C.2:** Macaw 3 akış analizi sonuçları

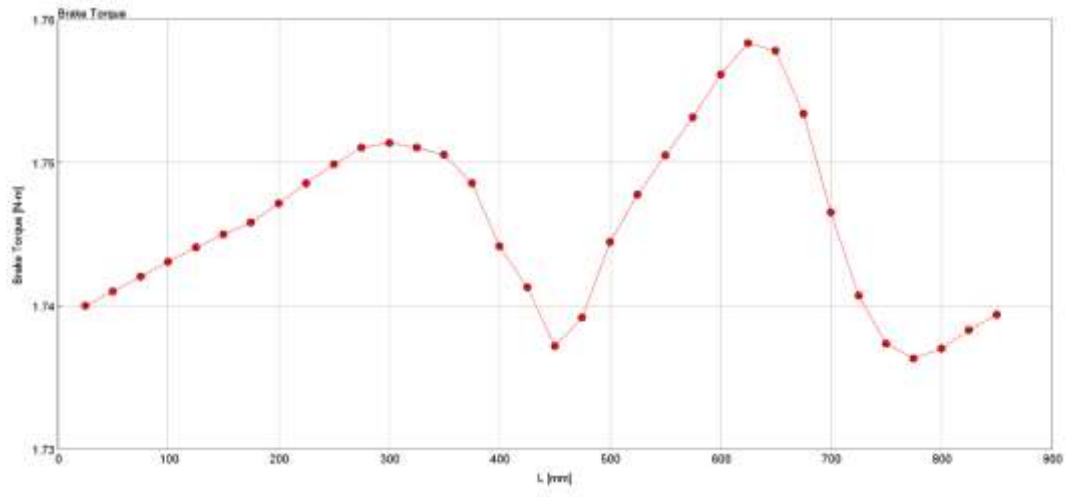


### EK D.1: Egzoz borusu çapı optimizasyonu.

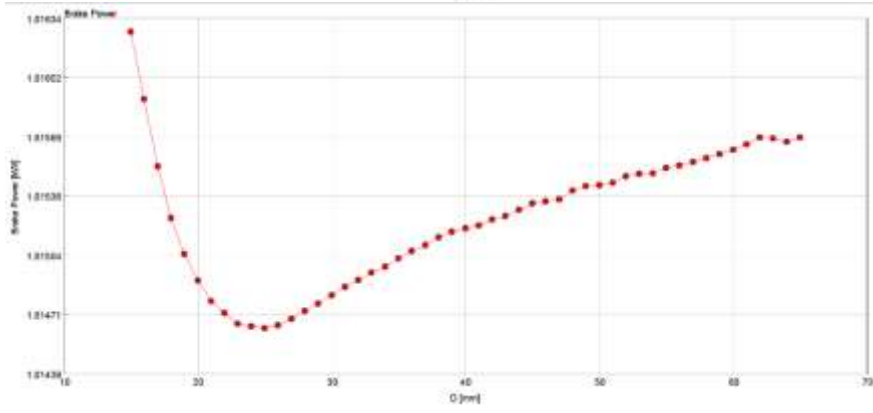
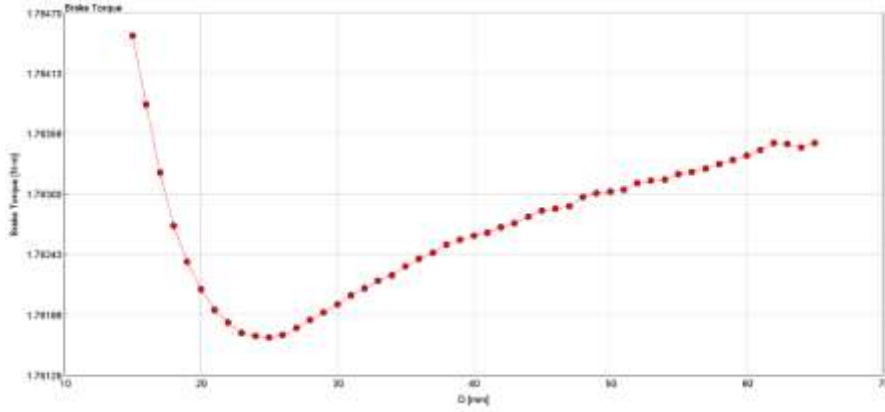


### EK D.2: Egzoz borusu uzunluğu optimizasyonu.

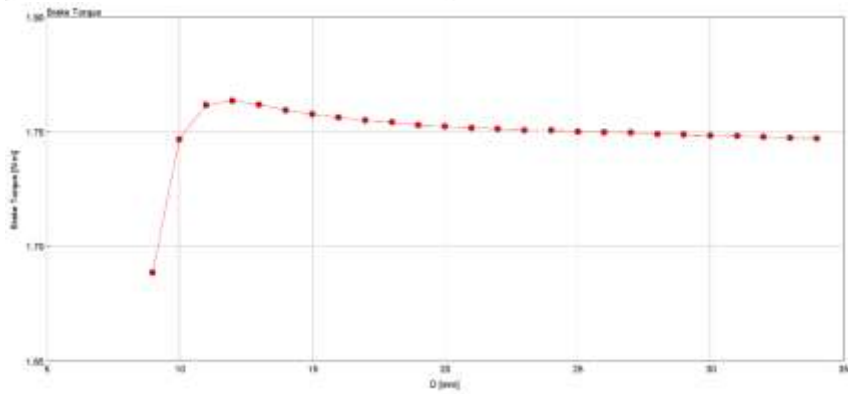
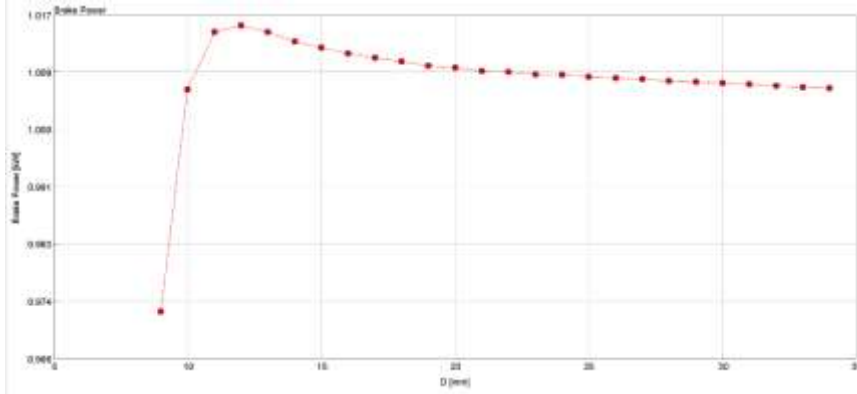




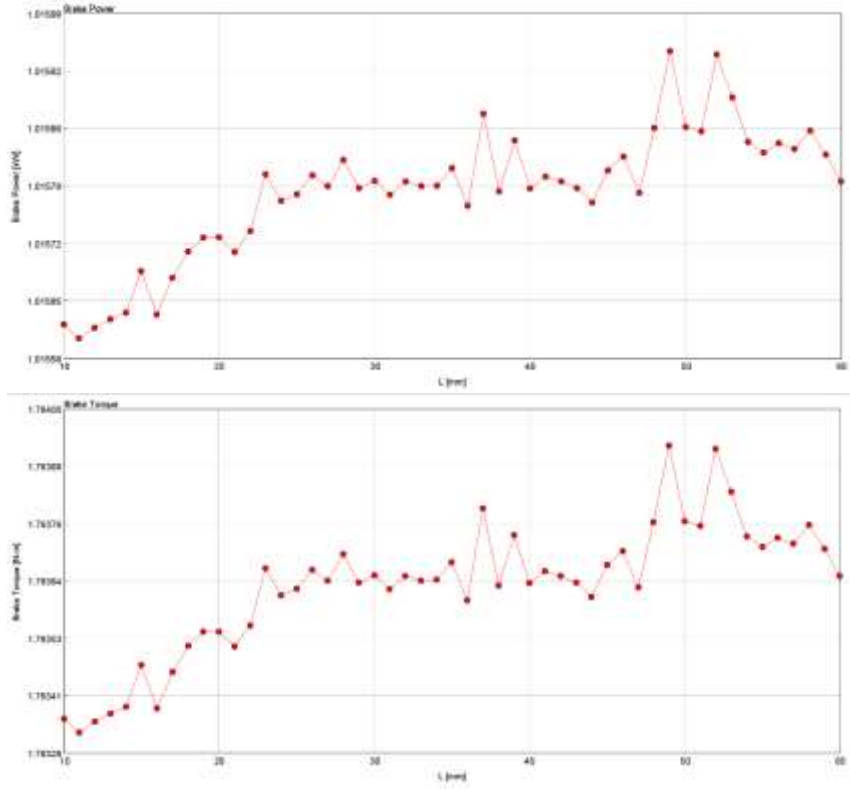
### EK D.3: Emme manifoldu giriş çapı optimizasyonu.



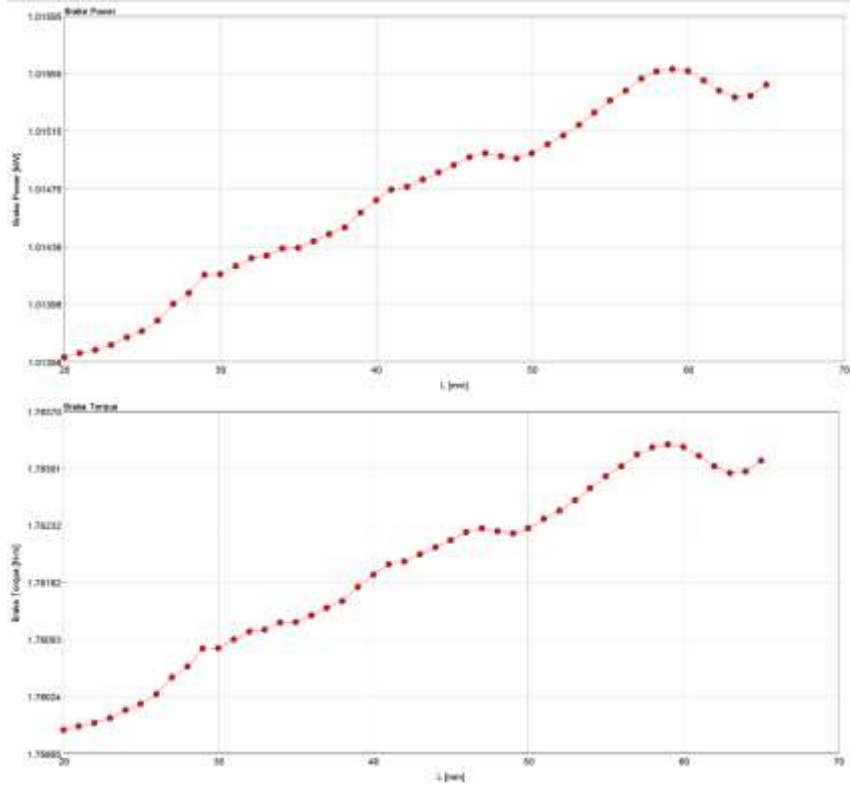
### EK D.4: Emme manifoldu çıkış çapı optimizasyonu.



### EK D.5: Emme manifoldu giriş uzunluğu optimizasyonu.

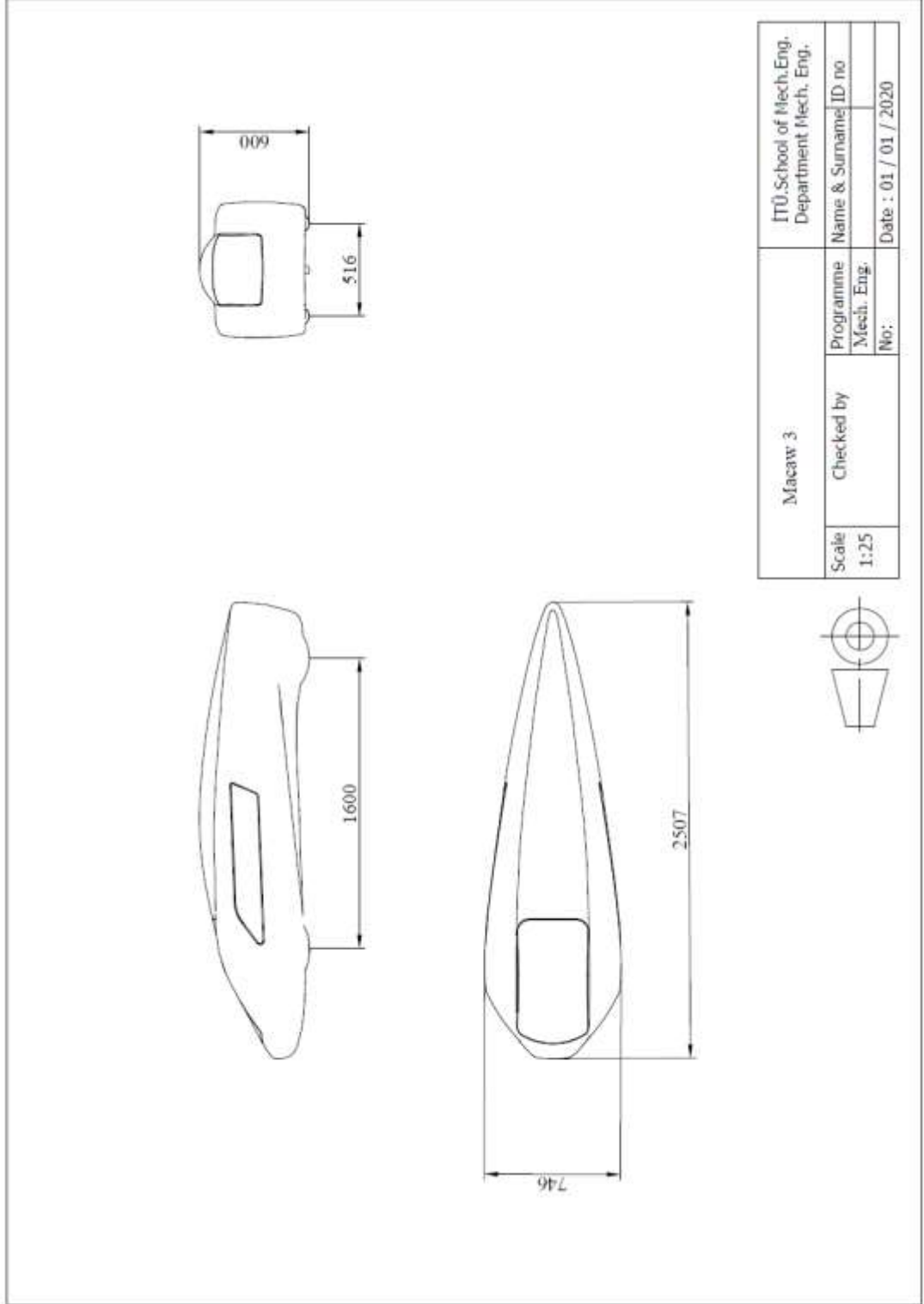


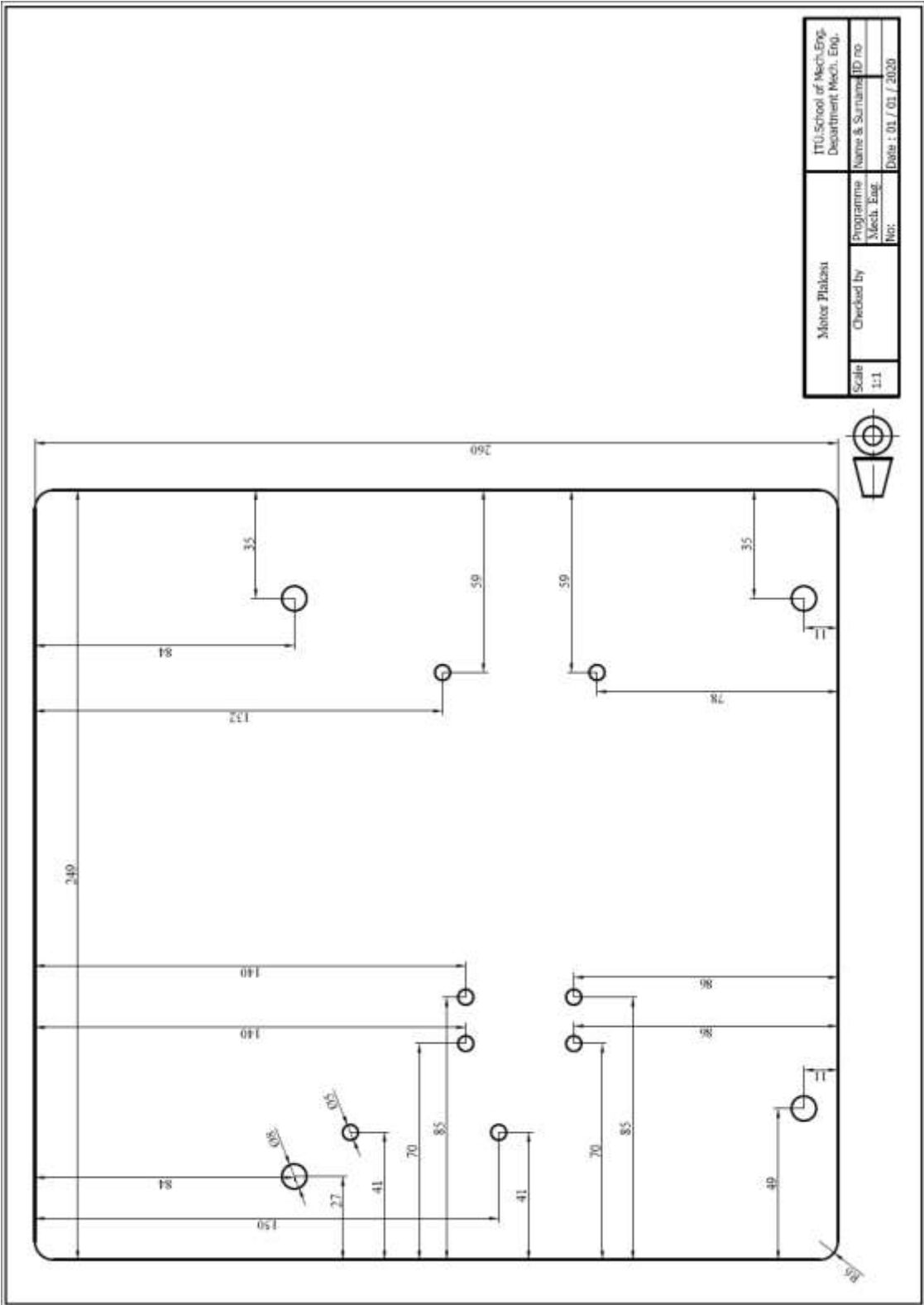
### EK D.6: Emme manifoldu çıkış uzunluğu optimizasyonu.

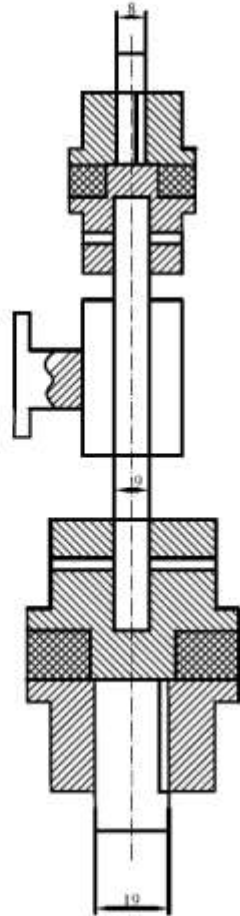




## EK E.1: Teknik Resim Çizimleri







Eren Mill		TTU, School of Mech. Eng., Department Mech. Eng.	
Scale 1:2	Checked by Mech. Eng	Programme Mech. Eng	Name & Surname ID no
			Date : 01 / 01 / 2020

**EK F.1: Parça Listesi (BoM)**

Parça Adı	Parça Açıklaması	Sorumlu Kişi	Üretim	Malzeme	Kütle (kg)	Mevcut (Adet)	Üretildiği, Alındığı Yer - Yerler
mcw3_sy.prt	macaw 3	Erdem Çalışkan			37.9		
mcw3_as_000.prt	aktarma sistemi	Ersin Candan			12.69		-
mcw3_as_002.prt	Arka Tekerlek	Ersan Şahin Kır	Hazır	Al7075-T6		1	
mcw3_as_004.prt	Arka Göbek-Jant	Ersan Şahin Kır	Hazır	Al7075-T6		1	
mcw3_as_006.prt	Fren Diski Flanş	Ersan Şahin Kır	Lazer	Al7075-T6		1	
mcw3_as_008.prt	Aktarma Dişlisi Flanş	Ersan Şahin Kır	Lazer	Al7075-T6		1	
mcw3_as_010.prt	Göbek Yatağı,Frenli	Bayram Sinan Yıldız	CNC	Al7075-T6		1	Tekno CNC
mcw3_as_012.prt	Göbek Yatağı,Sol	Bayram Sinan Yıldız	CNC	Al7075-T6		1	Tekno CNC
mcw3_as_014.prt	Şase	Bayram Sinan Yıldız	CNC	Al7075-T6	1	1	Tekno CNC
mcw3_as_016.prt	Motor Levhası Yatakları	Bayram Sinan Yıldız	CNC	Al7075-T6		1	Tekno CNC
mcw3_as_018.prt	Motor Levhası Saplamaları	Bayram Sinan Yıldız	Torna	C1010		1	Eska Makine
mcw3_as_020.prt	Motor Levhası	Bayram Sinan Yıldız	Lazer	Al-7000		1	

mcw3_as_022.prt	Aktarma Ara Mil Yatağı	Necip Affan Kılıçarslan	CNC	Al7075-T6		1	Tekno CNC
mcw3_as_024.prt	Ara Mil Kapağı Sol	Necip Affan Kılıçarslan	Lazer	Al7075-T6		1	
mcw3_as_026.prt	Ara Mil Kapağı Sağ	Necip Affan Kılıçarslan	Lazer	Al7075-T6		1	
mcw3_as_028.prt	Aktarma Ara Mil	Necip Affan Kılıçarslan	Torna	C1010	1	1	Eska Makine
mcw3_as_030.prt	Ara Mil Sol Dişli	Necip Affan Kılıçarslan	Tel erezyon	Al7075-T6		1	HNC Kalıp
mcw3_as_032.prt	Ara Mil Sağ Dişli	Necip Affan Kılıçarslan	Tel erezyon	Al7075-T6		1	HNC Kalıp
mcw3_as_034	Motor Çıkış Dişlisi	Mustafa Tağmat	Tel erezyon	Al7075-T6	1.19	1	
mcw3_as_036	Arka Tekerlek Dişlisi	Ersin Candan	Tel erezyon	Al7075-T6		1	
mcw3_as_038	Zincir Gerdirme Kolu	Ersin Candan	Lazer	Al7075-T6		1	
mcw3_as_040	Kavrama Kasesi	Mustafa Tağmat	Torna	C1010	2	1	Eska Makine
mcw3_as_042	Kavrama Kase Yatağı	Mustafa Tağmat	Torna	C1010		1	Eska Makine
mcw3_as_044	Kavrama Pabuçları	Mustafa Tağmat	Hazır			1	
mcw3_as_046	Marş Krank Flanşı	Vahid Hasanaliyev	Lazer	Al7075-T6		1	
mcw3_as_048	Marş Tek Yönlü Kavrama	Vahid Hasanaliyev	Hazır		3	1	
mcw3_as_050	Marş Büyük Dişli	Vahid Hasanaliyev	Tel erezyon	Al7075-T6		1	HNC Kalıp

mcw3_as_052	Marş Küçük Dişli	Vahid Hasanaliyev	Tel erezyon	Al7075-T6		1	HNC Kalıp
mcw3_as_054	Marş Ara Mil Yatağı	Vahid Hasanaliyev	CNC	Al7075-T6	4	1	Tekno CNC
mcw3_as_056	Marş Ara Mil	Vahid Hasanaliyev	Torna	C1010		1	Eska Makine
mcw3_as_058	Marş Ara Mil Rulmanları	Vahid Hasanaliyev	Hazır			1	
mcw3_as_060	Marş Ara Mil Kasnağı	Vahid Hasanaliyev	Hazır			1	
mcw3_as_062	Marş Motoru Kasnağı	Vahid Hasanaliyev	Hazır			1	
mcw3_as_064	Marş Kayışı	Vahid Hasanaliyev	Hazır			1	
mcw3_as_066	Marş Motoru	Vahid Hasanaliyev	Hazır			1	
mcw3_as_068	Marş Motoru Yatağı	Vahid Hasanaliyev	CNC	Al7075-T6		1	Tekno CNC
mcw3_as_070	Fren Sistemi arka	Ersan Şahin Kır	Hazır		0.5	1	
mcw3_as_072.prt	Motor (GX-35)	Ersin Candan	Hazır		3.5	2	
mcw3_ds_000.prt	direksiyon sistemi	Bayram Sinan Yıldız			10.21		
mcw3_ds_002.prt	ön teker sol	Salih Özyayla	Hazır			1	
mcw3_ds_003.prt	ön teker sağ	Salih Özyayla	Hazır			1	
mcw3_ds_004.prt	teker göbeği sol	Mustafa Tağmat	CNC	Al7075-T6		1	
mcw3_ds_005.prt	teker göbeği sağ	Mustafa Tağmat	CNC	Al7075-T6		1	
mcw3_ds_006.prt	teker mili sol	Salih Özyayla	Torna	C1010	2	1	Eska Makine
mcw3_ds_007.prt	teker mili sağ	Salih Özyayla	Torna	C1010		1	Eska Makine
mcw3_ds_008.prt	teker rulmanları sol	Salih Özyayla	Hazır			1	

mcw3_ds_009.prt	teker rulmanları sağ	Salih Özyayla	Hazır			1	
mcw3_ds_010.prt	burç sol	Mustafa Tağmat	Torna	Al7075-T6		1	Eska Makine
mcw3_ds_011.prt	burç sağ	Mustafa Tağmat	Torna	Al7075-T6		1	Eska Makine
mcw3_ds_012	kaliper tutucu sol	Bayram Sinan Yıldız	CNC	Al7075-T6	1	1	HNC Kalıp
mcw3_ds_013	kaliper tutucu sağ	Bayram Sinan Yıldız	CNC	Al7075-T6		1	HNC Kalıp
mcw3_ds_014	akson sol	Bayram Sinan Yıldız	CNC	Al7075-T6		1	HNC Kalıp
mcw3_ds_015	akson sağ	Bayram Sinan Yıldız	CNC	Al7075-T6		1	HNC Kalıp
mcw3_ds_016	akson rulmanları sol	Salih Özyayla	Hazır			1	
mcw3_ds_017	akson rulmanları sağ	Salih Özyayla	Hazır		3	1	
mcw3_ds_018	akson tutucu üst sol	Bayram Sinan Yıldız	CNC	Al7075-T6		1	HNC Kalıp
mcw3_ds_019	akson tutucu üst sağ	Bayram Sinan Yıldız	CNC	Al7075-T6		1	HNC Kalıp
mcw3_ds_020	akson tutucu alt sol	Bayram Sinan Yıldız	CNC	Al7075-T6		1	HNC Kalıp
mcw3_ds_021	akson tutucu alt sağ	Bayram Sinan Yıldız	CNC	Al7075-T6		1	HNC Kalıp
mcw3_ds_022	tahrik kolu sol	Bayram Sinan Yıldız	Lazer	Al7075-T6	2	1	
mcw3_ds_023	tahrik kolu sağ	Bayram Sinan Yıldız	Lazer	Al7075-T6		1	
mcw3_ds_024	danagöz mafsal 4 adet	Bayram Sinan Yıldız	Hazır		2.21	1	

mcw3_ds_025	rot kolu kısa	Mustafa Tağmat	Hazır			1	
mcw3_ds_026	rot kolu uzun	Mustafa Tağmat	Hazır			1	
mcw3_ds_027	tahrik parçası	Bayram Sinan Yıldız	CNC	Al7075-T6		1	HNC Kalıp
mcw3_ds_028	direksiyon simidi mili	Salih Özyayla	Torna	Al7075-T6		1	Eska Makine
mcw3_ds_030	direksiyon mili yatakları	Bayram Sinan Yıldız	Hazır	Al7075-T6		1	
mcw3_ds_032	direksiyon simidi	Mustafa Tağmat	Eklemeli İmalat	PLA		1	
mcw3_ds_034	fren sistemi ön	Bayram Sinan Yıldız	Hazır			1	
mcw3_sy.prt	gövde,camlar, aynalık vs.	Mehmet Çakmak			15		
mcw3_sy.prt	sürücü				55		



## EK G.1: Çekme Testi Grafiklerinin Çıkarılması MATLAB Kodu

```
%Çekme testi grafikleri

figure('Name','0 Derece');
scatter(stroke_0_1, force_0_1)
hold on
plot(stroke_0_2, force_0_2)
hold on
scatter(stroke_0_3, force_0_3)
hold on
plot(stroke_0_4, force_0_4)
hold on
plot(stroke_0_5, force_0_5)
hold on
xlabel('Birim uzama')
ylabel('Gerilme [Pa]')
lgd0 = legend('1');
title(lgd0,'0 derece numuneler')

figure('Name','45 Derece');
scatter(stroke_45_1, force_45_1)
hold on
plot(stroke_45_2, force_45_2)
hold on
plot(stroke_45_3, force_45_3)
hold on
scatter(stroke_45_4, force_45_4)
hold on
plot(stroke_45_5, force_45_5)
hold on
xlabel('Birim uzama')
ylabel('Gerilme [Pa]')
lgd0 = legend('1','4');
title(lgd0,'45 derece numuneler')
```

## EK G.2: Young Modülü Hesaplanması MATLAB Kodu

```
%Ornek Young modulu hesabi

p1 = 1.1628e+20
p2 = -5.0128e+18
p3 = 7.9585e+16
p4 = -5.4909e+14
p5 = 1.2308e+12
p6 = 4.656e+09
p7 = 3.0104e+05

fun = @(x) p1*x.^6 + p2*x.^5 + p3*x.^4 + p4*x.^3 + p5*x.^2 + p6*x
+ p7

u = integral(fun,0,0.014)
```

### EK G.3: Fren Haritası Çıkarılması MATLAB Kodu

```
%Fren haritası

clear;
clc;
close all;
load('histerezismap')
Vq = interp2(V',6,'spline');
RPMq = interp2(RPM,6,'spline');
Nmq = interp2(Nm',6,'spline');
kWq = interp2(kW,6,'spline');

figure(1)
surf(Vq,RPMq,Nmq,kWq)
xlabel('Voltaj [Volt]')
ylabel('Açısal hiz [d/d]')
zlabel('Tork [Nm]')
cb = colorbar;
cb.Label.String = 'Güç [kW]';

prompt = 'Voltaj= ';
volt_search = input(prompt);
% volt_search = 21;
prompt = 'RPM= ';
rpm_search = input(prompt);
% rpm_search = 1040;
if volt_search>=min(min(Vq)) && volt_search<=max(max(Vq)) && ...
    rpm_search>=min(min(RPMq)) && rpm_search<=max(max(RPMq))
for i=1:length(Vq)
    if volt_search<=Vq(i,1)
        a=i;
        break
    end
end
for j=1:length(RPMq)
    if rpm_search<=RPMq(a,j)
        b=j;
        break
    end
end
Moment=Nmq(a,b);
Guc=kWq(a,b);
sprintf('Moment=%f',Moment)
sprintf('Guc=%f',Guc)
else
    sprintf('Haritada yok!')
end
```

## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** Mehmet Çakmak

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Soma – 17.10.1994

**Lisans Üniversitesi:** İstanbul Teknik Üniversitesi



## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** Fazıl Enes Nayir

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Düzce – 19.05.1996

**Lisans Üniversite:** İstanbul Teknik Üniversitesi



## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** Erdem Çalışkan

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Adapazarı – 08.11.1997

**Lisans Üniversite:** İstanbul Teknik Üniversitesi