

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İTKİ TESTİ STANDI MEKANİK TASARIMI
VE ANALİZİ

RECEP ÖZBEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF.DR. İLYAS KANDEMİR

ARALIK 2025

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İTKİ TESTİ STANDI MEKANİK TASARIMI
VE ANALİZİ**

RECEP ÖZBEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF.DR. İLYAS KANDEMİR

ARALIK 2025

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**MECHANICAL DESIGN AND ANALYSIS OF A THRUST
TEST STAND**

RECEP ÖZBEK

A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

ADVISOR: PROF.DR. İLYAS KANDEMİR

DECEMBER 2025

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 23/12/2025 tarih ve 2025/71 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 26/12/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Recep ÖZBEK'in tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. İlyas KANDEMİR

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali KEÇEBAS

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul ÇETİNSOY

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

İnsansız hava araçlarının (İHA) operasyonel gereksinimleri günümüzde oldukça önemli hale gelmiştir. Özellikle askeri alanda kullanılan İHA'lar; uzun menzil, yüksek hız, artan faydalı yük kapasitesi ve güvenilirlik ihtiyaçları bakımından yüksek güçlü ve verimli tahrik sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu tür sistemlerin güvenilir biçimde geliştirilmesi yalnızca tasarım aşamasıyla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda güvenli ve kontrollü yer test altyapılarında doğrulanmasını da gerekli kılmaktadır. Bu doğrulama süreci, motor ve pervane sistemlerinin itki testi standlarında farklı çalışma koşullarında değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Testler sırasında sıcaklık, tork ve itki değerlerinin ölçülmesi; farklı throttle seviyelerinde motor davranışlarının incelenmesi ve çeşitli motor-pervane kombinasyonları ile elde edilen itki performanslarının karşılaştırılması, sistemin güvenilirliği ve verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma, Hava Taksi Projesinin bir alt projesi kapsamında, elektrik motorlarının ve pervanelerinin test edilebilmesi için tasarlanan bir itki testi standının mekanik tasarımını ve analizlerini sunmaktadır. Tasarlanan test standı, geniş bir itki kapasitesini karşılayabilecek boyutlarda olup, ana taşıyıcı elemanlarında çelik kutu profiller, lamalar ve köşebentler kullanılmıştır. Modüler yapısı sayesinde farklı motor tiplerine de uyarlanabilirlik sağlanmıştır. Çalışmada motor olarak MAD firmasına ait M90C60 EEE Manned Drone Motor modeli tercih edilmiştir. Bu motor yalnızca 12,7 kg ağırlığında olmasına rağmen 200 kgf'ye kadar itki üretebilmekte ve yüzde 90'ın üzerinde verimlilikle çalışabilmektedir. İtki ölçümleri için ise Zemic firmasının L6E lama tip yük hücreleri kullanılmıştır.

Tasarımın doğrulanması amacıyla ANSYS Workbench ortamında statik, termal ve modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Statik analizlerde maksimum itki altında deformasyon miktarı, tepki kuvvetleri ve emniyet katsayıları incelenmiş; yapının güvenli sınırlar içerisinde çalıştığı görülmüştür. Termal analizlerde motor kaynaklı ısı transferinin yapısal davranışa etkileri sadeleştirilmiş modeller üzerinden değerlendirilmiştir. Modal analizler sonucunda doğal frekanslar belirlenmiş, rezonans riskinin azaltıldığı ortaya konmuştur. Analiz süreçlerinde kullanılan motorun teknik verileri, üretici firma tarafından sağlanan teknik dokümanlardan alınmıştır.

Sonuç olarak, tasarlanan test standı; dayanıklılığı, modülerliği ve ölçüm hassasiyeti ile yüksek güçlü İHA itki sistemlerinin güvenilir testleri için uygun bir altyapı sunmaktadır. Bu çalışma, mekanik tasarım ile sonlu elemanlar analizlerinin bütünlendirilmesinin, gelecekteki İHA motor testlerinde yol gösterici bir yaklaşım sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Aracı(İHA), İtki Test Standı, Yüksek Güçlü Elektrik Motoru, Sonlu Elemanlar Analizi, Modal ve Termal Analiz

ABSTRACT

The operational requirements of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have become increasingly important in recent years. Especially in military applications, UAVs demand propulsion systems with higher power and efficiency due to their need for long range, high speed, increased payload capacity, and high reliability. The reliable development of such high-power propulsion systems cannot be limited to the design stage alone; it also requires verification through safe and controlled ground testing infrastructures. This verification process necessitates the evaluation of motor and propeller systems in thrust test stands under various operating conditions. During these tests, thrust, torque, and temperature values are measured, while the effects of different throttle levels on motor performance are examined. Furthermore, thrust outputs obtained from various motor–propeller combinations can be compared, providing critical insights into overall system efficiency and reliability.

This study, conducted as a sub-project of the Air Taxi project, presents the mechanical design and analyses of a thrust test stand developed for testing electric motors and propellers. The designed stand is capable of accommodating a wide thrust capacity and was constructed using steel box profiles, plates, and angle brackets as main structural elements. Its modular design also ensures adaptability to different motor types. In this study, the M90C60 EEE Manned Drone Motor, produced by MAD, was selected as the propulsion unit. Despite weighing only 12.7 kg, this motor can generate up to 200 kgf of thrust and operates with an efficiency above 90 percent. For thrust measurements, L6E beam-type load cells manufactured by Zemic were employed.

To validate the design, static, thermal, and modal analyses were carried out using ANSYS Workbench. In static analyses, deformation levels, reaction forces, and safety factors under maximum thrust were examined, and the structure was found to remain within safe limits.

In addition to the structural and thermal evaluations, special attention was given to the geometric symmetry of the test stand. Since symmetrical load transfer is essential for obtaining reliable thrust and reaction-force measurements, multiple simulations and validation studies were conducted to ensure that the stand responded symmetrically under applied loads. The outcomes of these investigations were examined in detail through reaction-force tables and ANSYS simulation results, confirming the effectiveness of the design approach.

Thermal analyses evaluated the impact of heat transfer from the motor on structural performance using simplified models. Modal analyses identified the natural frequencies of the system, showing that the risk of resonance was minimized. The technical data of the motor used in the analyses were obtained from technical documents provided by the manufacturer.

Furthermore, the modal analysis results were examined comprehensively to assess the dynamic behavior of the system. Although the numerical analyses indicated high structural rigidity, initial practical assessments revealed that certain dynamic responses required further consideration. Consequently, the modal characteristics were revisited, and the implications of these findings were evaluated to guide future improvements in the test stand design.

In conclusion, the proposed test stand combines durability, modularity, and measurement precision, offering a reliable infrastructure for testing high-power UAV propulsion systems. This study emphasizes the importance of integrating mechanical design with finite element analyses in developing dependable test environments for future UAV technologies.



Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Thrust Test Stand, High-Power Electric Motor, Mechanical Design, Finite Element Analysis (FEA), Modal and Thermal Analysis

TEŞEKKÜR

Teşekkürümün başında ilk olarak Allah’a şükretmek isterim. Her daim hayallerimin peşinden koşmamı sağladığı ve sabırla çalışmama vesile olduğu için şükürler olsun. Ardından akademik danışmanım Prof. Dr. İlyas Kandemir’e çok teşekkür etmek isterim. Gebze Teknik Üniversitesinde yüksek lisans yapma sebebim olan İlyas hocadır; beni kabul ettiği ve benimle çalıştığı için kendisine çok teşekkür ederim. Aileme, çocukluğumdan beri eğitimime verdikleri emek ve bana gösterdikleri destek için teşekkür ederim. Her koşulda gerek maddi gerek manevi olarak beni desteklediği için abim Ali Özbek’e ayrıca teşekkür etmek isterim. Dostum ve yoldaşım olarak gördüğüm çocukluk arkadaşım Alper Kurt’a ayrıca tez sürecimde verdiği destekten ötürü de teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. TASARIM VE ANALİZ	6
2.1. Test Sisteminin Mekanik Tasarımı	6
2.1.1. Kutu Profiller	8
2.1.2. Lamalar, L Köşebentler ve Plakalar	9
2.2. Test Sisteminde Kullanılan Bileşenler	13
2.2.1. Motor	13
2.2.2. Pervane	15
2.2.3. Yük Hücresi	16
2.2.4. Elektronik Hız Kontrolcü	17
2.2.5. Sigorta ve Yük Ayırıcı	19
2.3. Test Sistemine Yapılan Analizler ve Sonuçları	21
2.3.1. Test Sisteminin Yapısal Analizi	21
2.3.1.1. Mesh Kalitesinin Değerlendirilmesi	22
2.3.1.2. Toplam Deformasyon Sonuçları	24
2.3.1.3. Von Mises Gerilme Dağılımı	25
2.3.1.4. Güvenlik Katsayısı (Safety Factor)	26
2.3.1.5. Tepki Kuvvetleri	27
2.3.1.6. Tepki Kuvvetlerinde Simetriklik ve Eksantriklik	28
2.3.2. Test Sisteminin Termal Analizi	31
2.3.2.1. Sabit Sıcaklık Uygulanarak Yapılan Termal Analiz	31
2.3.2.2. Termal Analiz İçin Mesh Kalitesi Değerlendirilmesi	31
2.3.2.3. Termal Analizde Kullanılan Sınır Şartları	33
2.3.2.4. Isı Akısı Uygulanarak Yapılan Termal Analiz	37
2.3.3. Test Sisteminin Modal Analizi	41
2.3.3.1. Modal Analiz Sonuçları	42
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	46
KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	50
TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR	51

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

BLDC	: Brushless Direct Current (Fırçasız DC motoru)
ESC	: Electronic Speed Controller (Elektronik Hız Kontrol Cihazı)
FEA	: Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)
FEM	: Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi
İHA	: İnsansız Hava Aracı
KGF	: Kilogram-force (kilogram-kuvvet)
MAD	: MAD Components firması
M90C60 EEE	: MAD firmasına ait motor modeli
ODM	: On-Demand Mobility (Talebe Dayalı Ulaşım)
RPM	: Revolutions Per Minute (Dakika Başına Devir)
UAM	: Urban Air Mobility (Kentsel Hava Mobilitesi)
UAV	: Unmanned Aerial Vehicle (İnsansız Hava Aracı)
VTOL	: Vertical Take-Off and Landing (Dikey Kalkış ve İniş)
ρ	: Hava yoğunluğu [kg/m^3]
v	: Akış hızı / hava hızı [m/s]
D	: Karakteristik uzunluk [m]
A	: Alan [m^2]
Re	: Reynolds sayısı [-]
Pr	: Prandtl sayısı [-]
Nu	: Nusselt sayısı [-]
k	: Isıl iletim katsayısı [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
h	: Konveksiyon katsayısı [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$]
Q	: Isı akısı / yüzeysel ısı geçişi [W/m^2]
T	: Sıcaklık [$^\circ\text{C}$]
T_∞	: Ortam sıcaklığı [$^\circ\text{C}$]
μ	: Dinamik viskozite [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
L	: Kiriş/profil boyu [m veya mm]
I	: Atalet momenti [mm^4]
E	: Elastisite modülü [Pa]
σ	: Gerilme [MPa]
δ	: Sehim [mm]
M	: Eğilme momenti [$\text{N}\cdot\text{m}$]
W	: Mukavemet momenti [mm^3]
F	: Kuvvet [N]
N	: Newton
m	: Metre
m^2	: Metrekare
kg	: Kilogram
W	: Watt
Hz	: Hertz
$^\circ\text{C}$	: Santigrat derece
$\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$	: Konveksiyon katsayısı
$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	: Isıl iletim katsayısı
$\text{Pa}\cdot\text{s}$	: Dinamik viskozite

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: İçten rotorlu "inrunner" ve dıştan rotorlu "outrunner" BLDC motor. [13]	2
Şekil 1.2: Mad M90C60EEE BLDC motor.[14]	3
Şekil 1.3: Wing Flying LY-70KGF İtke Testi Standı.[6]	4
Şekil 1.4: Tyto Robotics Flight Stand 150 İtke Testi Standı.[5]	4
Şekil 1.5: Nasa Airvolt İtke Testi Standı.[7]	5
Şekil 1.6: Minimalaviation MTS-16 İtke Testi Standı.[8]	5
Şekil 2.1: İtke Testi Standı izometrik görünüşü.	7
Şekil 2.2: İtke Testi Standı teknik resim detayları.	7
Şekil 2.3: Kutu profillerin teknik resim detayları.	8
Şekil 2.4: Test standında kullanılan L köşebent (1) ve motor montaj plakası (2) konumları.	9
Şekil 2.5: Motor montaj plakasına eklenen lamaların (1) ve motor montaj plakasının (2) konumu (Üstten Görünüş).	10
Şekil 2.6: Motor montaj plakasına eklenen ara lamaların teknik resim detayı.	11
Şekil 2.7: Motor montaj plakasının teknik resim detayı.	12
Şekil 2.8: MAD M90C60EEE manned drone motorunun genel görünümü ve temel özellikleri.[15]	14
Şekil 2.9: MAD M90C60EEE motorunun teknik verileri.[15]	14
Şekil 2.10: MAD M90C60EEE motorunun performans özellikleri.[15]	14
Şekil 2.11: CB2 PROP 72×31" karbon fiber pervanenin genel görünümü.[15]	15
Şekil 2.12: CB2 PROP 72×31" pervanenin teknik özellikleri.[15]	15
Şekil 2.13: CB2 PROP 72×31" pervanenin boyutsal ve geometrik görünümü.[15]	16
Şekil 2.14: Zemic L6E3 serisi yük hücresi genel görünümü.[16]	17
Şekil 2.15: Zemic L6E3 yük hücresi boyutsal teknik çizimi.[16]	17
Şekil 2.16: Nidec MP350A4R boyutsal görünümü.[17]	19
Şekil 2.17: Apator RBK-1 sigortalı yük ayırıcının boyutsal görünümü.[18]	20
Şekil 2.18: Apator RBK-1 sigortalı yük ayırıcının teknik özellikleri.[18]	20
Şekil 2.19: Statik yapısal analiz için belirlenen sınır koşulları ve yükleme durumu.	22
Şekil 2.20: Mesh element quality dağılımı.	23
Şekil 2.21: Mesh skewness dağılımı.	23
Şekil 2.22: Mesh aspect ratio dağılımı.	24
Şekil 2.23: Yapının toplam deformasyon dağılımı.	24
Şekil 2.24: Statik yapısal analiz için belirlenen sınır koşulları ve yükleme durumu.	25
Şekil 2.25: Yapının eşdeğer gerilme (Von Mises) dağılımı.	26
Şekil 2.26: Yapının emniyet katsayısı (Safety Factor) dağılımı.	27
Şekil 2.27: Sistemdeki sabit mesnetlerin (Fixed Supports) konumu ve yük dağılımı.	28
Şekil 2.28: Tepki kuvvetlerinin sağ ve sol mesnetlerde simetrik dağılımını incelemek için oluşturulan model.	29

Şekil 2.29: Tepki kuvvetlerinin yalnızca Z eksenı yönünde değeriendirilmesi için oluşturulan modelin sınır şartları.	30
Şekil 2.30: Mesh element quality dağılımı.	32
Şekil 2.31: Mesh skewness dağılımı.	32
Şekil 2.32: Mesh aspect ratio dağılımı.	33
Şekil 2.33: Motor braketı bölgesine 120 °C sabit sıcaklık uygulanarak gerçekleştirilen termal analiz modelinin sınır şartları.	34
Şekil 2.34: Sabit 120 °C uygulanan termal analizde sıcaklık dağılımı.	34
Şekil 2.35: Braket–Profil arası ısı yayılımının kesit görünüşü.	35
Şekil 2.36: Braket–Profil arası ısı yayılımının kesit görünüşü.(Isıl iletkenlik katsayısı 20000 W/m ² .°C)	35
Şekil 2.37: Sabit 120 °C uygulanan termal analizde sıcaklık dağılımı. (Isıl iletkenlik katsayısı 20000 W/m ² .°C)	36
Şekil 2.38: Konveksiyon katsayısının 80 W/m ² .°C alınması durumunda sıcaklık dağılımı.	37
Şekil 2.39: Konveksiyon katsayısının 80 W/m ² .°C alınması durumunda kesit sıcaklık dağılımı.	37
Şekil 2.40: Motorun çalışma sırasında profile aktardığı kayıp gücün, motor–profil temas yüzeyine ısı akısı olarak uygulanmasıyla oluşturulan termal analiz sınır şartları.	40
Şekil 2.41: Isı akısı uygulanması sonucu braket ve profil üzerindeki sıcaklık dağılımının genel görünümü.	40
Şekil 2.42: Isı akısı uygulanması durumunda braket ve profil üzerindeki sıcaklık dağılımının üst görünüşü.	41
Şekil 2.43: Yapının 1. mod şekli. (f = 29,404 Hz)	42
Şekil 2.44: Yapının 2. mod şekli. (f = 36,45 Hz)	42
Şekil 2.45: Yapının 3. mod şekli. (f = 42,244 Hz)	43
Şekil 2.46: Yapının 4. mod şekli. (f = 63,246 Hz)	43
Şekil 2.47: Yapının 5. mod şekli. (f = 79,876 Hz)	44
Şekil 2.48: Yapının 6. mod şekli. (f = 120,76 Hz)	44

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: MP350A4R DC Motor Sürücüsünün Teknik Özellikleri[17]	18
Çizelge 2.2: Tepki kuvvetleri tablosu.	28
Çizelge 2.3: B-D mesnet çifti tepki kuvvetleri.	29
Çizelge 2.4: C-E mesnet çifti tepki kuvvetleri.	29
Çizelge 2.5: Mesnetlerdeki toplam tepki kuvvetleri.	30
Çizelge 2.6: Uygulanan 2000 N'luk kuvvetin iki mesnette yaklaşık -1000 N olarak simetrik dağıldığını gösteren tepki kuvveti değerleri.	30
Çizelge 2.7: İlk altı moda ilişkin doğal frekans değerleri.	41
Çizelge 2.8: Motor çalışma frekansları ile modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve olası rezonans bölgelerinin değerlendirilmesi.	45

1. GİRİŞ

İnsansız hava araçları dinamik ve karmaşık operasyonel ortamlarda otonom olarak hareket edebildikleri için kullanım alanları ve kullanım sıklıkları gittikçe artmaktadır. Son zamanlarda askeri olarak kullanımlarının oldukça fazla olduğunu gözlemlese de gelecekte sivil ve ticari sektörlerde yaygın bir kullanım öngörülmektedir.[1]

Aynı zamanda günümüzde oldukça tartışılan konulardan birisi de ulaşımda devrim niteliğinde bir yenilik olan yolcu taşıyan insansız hava araçları çalışmalarıdır. Ulaşımda devrim niteliğinde bir yenilik olacak olan bu çalışma Talep Üzerine Mobilite On-Demand Mobility (ODM) araştırmaları, endüstri ve akademik çevrelerce sürekli olarak tartışılmakta ve çalışılmaktadır. Elektrikli Dikey Kalkış Ve İniş "electric vertical take-off and landing" (eVTOL) yapabilen hava araçlarının kullanımının ticarileştirilmesi son zamanlarda sıkça tartışılmaktadır ve buna Kentsel Hava Mobilitesi"Urban Aerial Mobility" (UAM) adı verilmektedir.[2]

Bu noktada oldukça geniş bir alanda kullanılabilen dikey kalkış ve iniş "vertical take-off and landing" (VTOL) yapabilen araçların kullanım sıklığı ve operasyonel anlamda çeşitliliği arttıkça yer testlerinin yapılması da oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Özellikle son zamanlarda Fırçasız Doğru Akım "Brushless DC" (BLDC) motorlarının kullanımı da yaygın bir hale gelmiştir.[3]

Motor ve motor verimliliği kullanılan pil kaynaklarının sınırlı olduğu göz önüne alındığı takdirde motorun uçuşun dayanıklılığı için oldukça dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bu sebeple motorun datasheetinde gerekli bilgiler verilse dahi motor ve motorun pervane ile testleri bir test standı kullanılarak yapılırsa daha doğru sonuçlar elde edilir.[3, 4]

Bu alanda oldukça fazla çalışma vardır ve oldukça farklı test standları mevcuttur. [5–8]

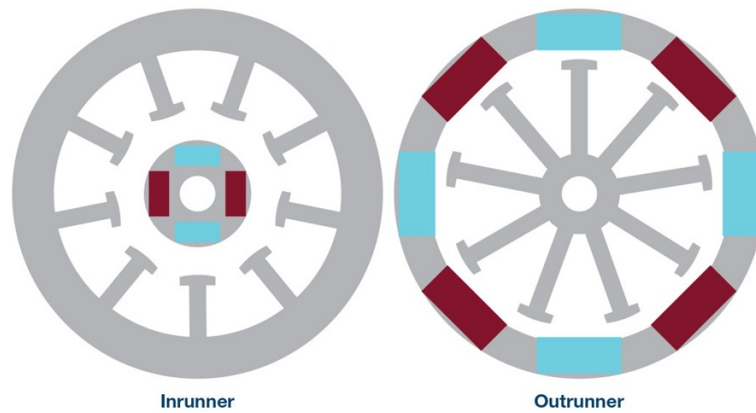
Aynı zamanda sektörel anlamda da çeşitli şirketler mevcuttur. Bunlardan en önemlilerinden birisi 2014 yılında Ottawa üniversitesinde iki yüksek lisans öğrencisi tarafından kurulan Tyto Robotics firmasıdır. Yüksek lisans tez çalışması olarak bir drone tasarlamak istemişlerdir fakat bir türlü istedikleri itki (thrust) değerini alamamışlardır. Bu sebeple bir itki test standı tasarlayarak şirketleşmişlerdir.[5]

Kalıcı mıknatıslı doğru akım senkron motorları olarak da adlandırılan BLDC motorlar, üstün karakteristik özellikleri ve yüksek performansları sayesinde son yıllarda hızla yaygınlaşan motor tiplerinden biri haline gelmiştir. Bu motorlar, sabit konumda bulunan akım taşıyıcı sargılar (stator) ve döner durumda yer alan kalıcı mıknatıslar (rotor) aracılığıyla çalışmaktadır. Bu yapı, fırça ve kollektör gibi mekanik temas elemanlarına ihtiyaç duymadığı için enerji kayıplarını azaltmakta ve motorun verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır.[9]

BLDC motorlar fırçasız yapıda olmaları sebebiyle sürtünmeden ve mekanik aksanlardan kaynaklanan kayıplar minimum düzeydedir. Bu sebeple yüzde 95'e kadar varan verimliliklerde çalışabilirler. Bu verimlilikleri sayesinde stabil bir itki kuvveti elde etmek mümkün hale gelir.[10]

Bu sebeplerden dolayı İHA'larda kullanım sıklıkları oldukça artmıştır. Aynı zamanda hafif ve güçlüdürler. Gürültüsüz çalışırlar ve Elektronik Hız Kontrolcü "electronic speed controller" (ESC) tarafından anlık olarak hız ve tork kontrolü yapmak mümkündür. [11]

Rotor tipine göre 2 tip BLDC motor vardır. Bunlar İçten rotorlu(inrunner) ve dıştan rotorlu (outrunner) olarak adlandırılır.[12] BLDC motorlar, stator kısmında yer alan elektromıknatıslar ile hareketli rotor üzerine yerleştirilmiş kalıcı mıknatıslardan oluşur. Eğer motor tasarımında mıknatıslar sargıların içinde olursa içten rotorlu 'inrunner' mıknatıslar sargıların dışında yer alırsa dıştan rotorlu 'outrunner' olarak adlandırılır.[13]



Şekil 1.1: İçten rotorlu "inrunner" ve dıştan rotorlu "outrunner" BLDC motor. [13]

Bu çalışmada M90C60 EEE motoru kullanılmıştır. Motor 45kW gücündedir ve maksimum itki kuvveti olarak 200 kgf itki elde edilmektedir. Kütlesi oldukça hafif sadece 12.7kg'dır ve verimliliği yüzde 90'nın üzerindedir.[14]



Şekil 1.2: Mad M90C60EEE BLDC motor.[14]

Günümüzde kullanılan bazı test stantları şu şekildedir;

Wing Flying tarafından geliştirilen LY-70KGF Thrust Stand 70kgf'a kadar thrust test yapılmasına olanak sağlar. Aynı zamanda itki,tork,devir,motor ve pervane verimliliğini gözlemlemeyi sağlayan bir yazılım desteği de sağlarlar.[6]

Flight Stand 150 Tyto Robotics tarafından geliştirilmiş büyük drone ve eVTOL testleri yapılmak üzere tasarlanmış bir Test Standıdır. 150kgf a kadar itki testleri yapabilmektedir. Ayrıca itki, devir, balans, titreşim, motor ve pervane verimliliği verilerinin takip edilebileceği bir yazılım desteği de sunar.[5]

NASA tarafından tasarlanan Airvolt adlı itki test standı 100kW motor ve 1,8 metreye kadar pervane çaplarında testler yapılabilecek şekilde tasarlanmıştır. İtki, tork, güç kaynakları, invertörler ve motorlar arasındaki akımları ve voltajları ayrıca sistemin titreşimlerini, sıcaklıklarını ve akustik seviyelerini izleyebilmektedir.



Şekil 1.3: Wing Flying LY-70KGF İtki Testi Standı.[6]

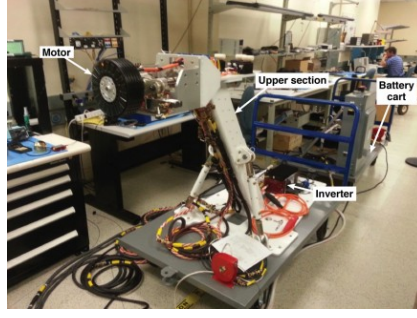


Şekil 1.4: Tyto Robotics Flight Stand 150 İtki Testi Standı.[5]

Stand verimlilikleri doğru bir şekilde hesaplamak ve alt sistemler arasındaki bilinmeyen bağımlılıkları ortaya çıkarmak üzere yeni elektrikli tahrik teknolojileri için doğrulama ve geçerlilik yöntemleri geliştirmek amacıyla tasarlanmıştır.[7]

Airvolt'u diğer test standlarından ayıran özgün bir özelliği vardır. Bu özelliği mobil yani hareketli olmasıdır. Özel olarak tasarlanan tekerlekleri sayesinde kolayca taşınabilir.[7]

Minimal Havacılığın geliştirdiği MTS16 itki test standı 16 kgf itki kuvvetine kadar test edilebilir. Motor çapı olarak 30-99mm aralığında motorların testleri yapılabilir ve yüzde 95 doğruluk oranında sonuçlar alınabilir. Aynı zaman da yazılım desteği de sunmaktadır.[8]



Şekil 1.5: Nasa Airvolt İtki Testi Standı.[7]



Şekil 1.6: Minimalaviation MTS-16 İtki Testi Standı.[8]

Bu çalışmada, Gebze Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi tarafından yürütülmekte olan “Hava Taksi” projesinde kullanılacak motorların testlerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla dayanıklı bir itki testi standı tasarlanmıştır. Ayrıca tasarlanan test standı üzerinde çeşitli mühendislik analizleri yapılmıştır. Tasarım ve analiz başlığı altında; mekanik tasarım, yapısal analiz, ısı (thermal) analiz ve modal analiz alt başlıkları kapsamında yapının davranışı detaylı şekilde incelenmiştir.

2. TASARIM VE ANALİZ

Bu bölümde, Gebze Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi tarafından yürütülen “Hava Taksi” projesi kapsamında tasarlanan İtki Testi Standı’nın tasarım süreci ve bu tasarım üzerinde gerçekleştirilen mühendislik analizleri sunulmuştur. Bu kapsamda test sisteminin mekanik tasarımı ile yapısal, termal ve modal analizlerine ait sonuçlar ilgili alt başlıklar altında verilmiştir.

2.1. Test Sisteminin Mekanik Tasarımı

Testi yapılacak motorlardan yaklaşık 200 kgf seviyesinde itki elde edilmektedir. Bu büyüklükteki itkinin karşılanabilmesi için oldukça dayanıklı bir mekanik sistem gereklidir. Bu nedenle, yapısal güvenliği artırmak amacıyla aşırı güvenli bir tasarım yaklaşımı benimsenmiştir. Tasarım sürecinde, aynı anda iki motorun birlikte test edilebilmesi ve gelecekte daha yüksek itki üretebilen motorların da bu sistemde test edilebilmesi hedeflenmiştir.

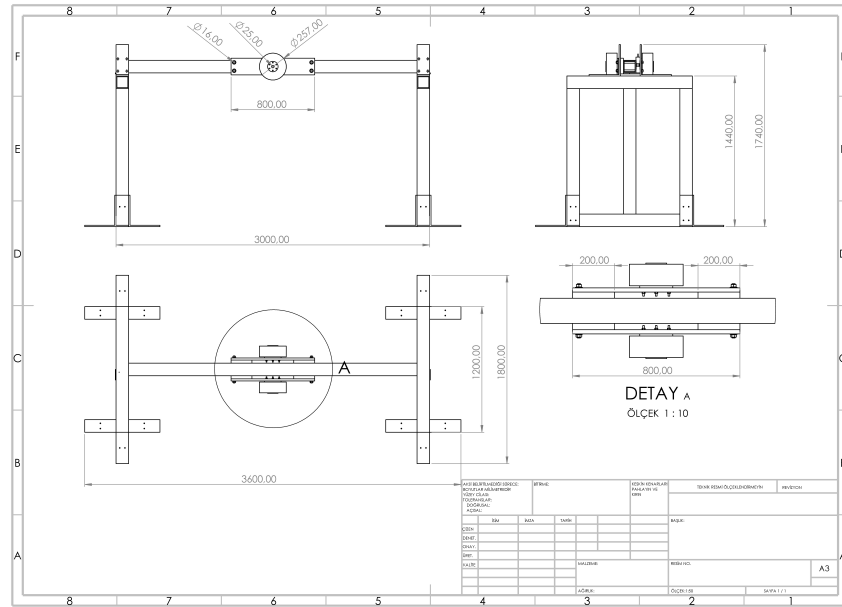
Tasarım aşamasında öncelikli kriter mukavemet olmuştur. Hem gereksiz ağırlıktan kaçınmak hem de yüksek dayanım elde etmek amacıyla taşıyıcı eleman olarak kutu profiller tercih edilmiştir. Test standını oluşturan temel bileşenler; kutu profiller, köşebentler ve kaynaklı bağlantı elemanlarıdır.

Yapısal sistemde kullanılan orta taşıyıcı profilin boyu 3 metre olarak belirlenmiştir. Bu seçimin nedeni, kullanılan pervanenin yaklaşık 1,8 metre uzunluğunda olmasıdır. Ayrıca motorun çalışması sırasında oluşabilecek ısınma ve titreşim etkileri dikkate alınarak bu uzunluğunun uygun olacağına karar verilmiştir. Kesit olarak, yüksek mukavemet sağlaması nedeniyle $120 \times 120 \times 8$ mm ölçülerinde çelik kutu profil kullanılmıştır.

Malzeme seçiminde, yapısal çeliğin yüksek akma dayanımı, rijitliği ve kaynaklanabilirliği göz önünde bulundurulmuştur. Bu malzeme, test standının hem yük taşıma kapasitesini artırmakta hem de uzun süreli testlerde oluşabilecek yorulma etkilerine karşı yüksek dayanıklılık sağlamaktadır. Böylece sistem, yüksek itki değerlerinde dahi deformasyon ve kalıcı şekil değişimi oluşturmada güvenli biçimde çalışabilmektedir.



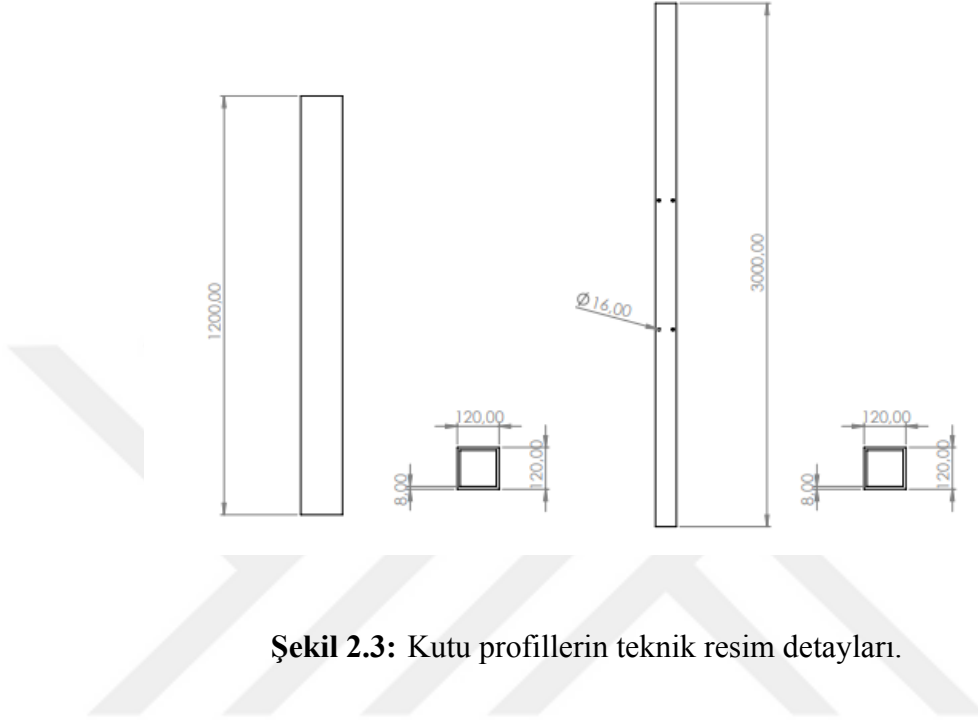
Şekil 2.1: İtki Testi Standı izometrik görünüşü.



Şekil 2.2: İtki Testi Standı teknik resim detayları.

2.1.1. Kutu Profiller

Test standının ana taşıyıcı elemanları kutu profilleridir. Bu profiller 120x120x8mm ölçülerinde yapı çeliğinden (S235) imal edilmiştir.



Şekil 2.3: Kutu profillerin teknik resim detayları.

Bu boyutlarda bir kesite sahip olması yüksek rijitlik ve mukavemet sağlaması açısından uygun bir yapısal elemandır. Bu bölümde kutu profillerin eğilme dayanımı, klasik mukavemet bağıntıları kullanılarak hesaplanmış ve ilerleyen bölümlerde elde edilen analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

$$I = \frac{BH^3 - bh^3}{12} \quad (2.1)$$

$$W = \frac{2I}{H} \quad (2.2)$$

120x120x8 mm kesit için bu değerler:

$$I = 7.53 \times 10^6 \text{ mm}^4 \quad (2.3)$$

$$W = 1.25 \times 10^5 \text{ mm}^3 \quad (2.4)$$

Maksimum itki kuvveti göz önünde bulundurularak, motorun monte edildiği profilin iki uçtan mesnetli olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımlar göz önüne alındığı vakit maksimum eğilme gerilmesi şu şekilde hesaplanabilir:

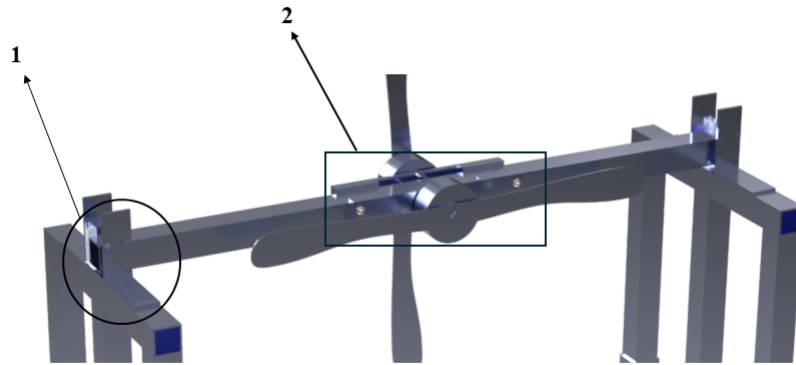
$$M = \frac{F \cdot L}{4} \quad (2.5)$$

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (2.6)$$

F=2000N ve L=3000mm olarak hesaplandığında $M=1.5 \times 10^6 \text{ N.mm}$ olarak hesaplanır ve $\sigma= 12 \text{ MPa}$ olarak bulunur. Yapılan teorik hesaplamalar sonucunda profil üzerinde oluşan maksimum eğilme gerilmesi 12 MPa olarak bulunmuştur. Sonlu elemanlar analizinde elde edilen maksimum eşdeğer (von Mises) gerilme değeri bu sonuçla yaklaşık olarak benzerdir. Aradaki fark, bağlantı noktalarındaki yerel gerilme yığılmaları ve çok eksenli gerilme etkilerinden kaynaklanmaktadır.

2.1.2. Lamalar, L Köşebentler ve Plakalar

Test standının bağlantı ve destek elemanlarını oluşturan ”L köşebentler, lamalar ve montaj plakaları” sistemin genel rijitliğini arttırmak ve yapısal bütünlüğü sağlamak amacıyla tasarlanmıştır.



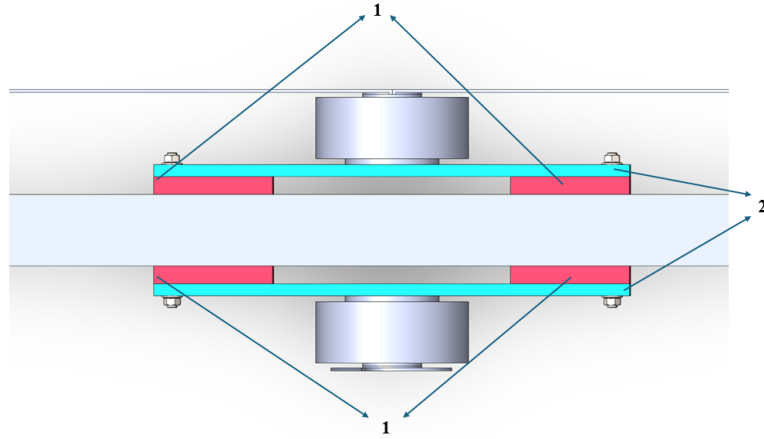
Şekil 2.4: Test standında kullanılan L köşebent (1) ve motor montaj plakası (2) konumları.

L köşebentlerin temel amacı yapıyı bir bütün haline getirmek ve zemine sabitlemektir. Kutu profillerin birbirine bağlanmasını sağlayan bu elemanların bir kısmı kaynaklı bağlantı yöntemi ile montajlanırken bir kısmı da civata somun bağlantı yöntemi ile montajlanmıştır. Bu sayede sistem hem bakım ve montaj açısından kolaylık sağlamakta hem de gerektiği vakit sökülüp revize edilebilme imkanı sağlamaktadır.

Köşebentlerin zemine bağlanması hem sistemin rijit bir şekilde konumunu koruması bakımından hem de titreşimi azaltması açısından önemlidir. Ayrıca L köşebentlerin sağladığı rijitlik yük aktarımını dengeli hale getirerek kutu profiller üzerindeki gerilmeleri de azaltmaktadır. Motorun doğrudan profile montajlanması yerine araya üç adet bağlantı elemanı (plaka ve lamalar) yerleştirilmiştir. Bu sayede yalnızca ana plaka değiştirilerek farklı motorların da testinin yapılabilmesi mümkün hale getirilmiştir.

Motorun montajlandığı ana plaka ile taşıyıcı profil arasına yerleştirilen iki adet küçük lama titreşimi sönmölemek ve motorun çalışması sırasında oluşan ısının doğrudan yapıya iletilmesini engellemek amacıyla tasarlanmıştır.

Oluşturulan bu ara parçalar sayesinde hem ısınma hem de titreşim etkilerinin azaltılması amaçlanmıştır.



Şekil 2.5: Motor montaj plakasına eklenen lamaların (1) ve motor montaj plakasının (2) konumu (Üstten Görünüş).



Şekil 2.6: Motor montaj plakasına eklenen ara lamaların teknik resim detayı.

2.2. Test Sisteminde Kullanılan Bileşenler

Bu bölümde sistemin hem mekanik hem de elektriksel elemanları tanıtılmaktadır. Test standının çalışmasını sağlamak ve üzerinden veri elde edebilmek amacıyla, mekanik kısımda motor, pervane ve yük hücresi; elektriksel kısımda ise elektronik hız kontrolcü (ESC) ve sigorta yer almaktadır.

2.2.1. Motor

Giriş bölümünde seçilen motorun temel özelliklerinden kısaca bahsedilmiştir. Bu alt bölümde ise motorun teknik özellikleri ve seçim gerekçesi açıklanmıştır.

Test standında testlerinin yapılması için MAD Components firmasına ait M90C60 EEE Manned Drone Motor modeli seçilmiştir. Bunun sebebi Gebze Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Fakültesi tarafından çalışılmakta olan "Hava-Taksi" projesinde bu motorların kullanılmasına karar verilmiş olmasıdır. Motor 45 kW seviyesinde bir güç çıkışı sağlayabilmektedir ki bu oldukça yüksektir. Ayrıca hafif uçaklarda kullanılan motorlarla yaklaşık olarak aynı güçtedir. Bu sebeple yüksek güçlü elektrikli İHA motorlarının testlerini yapabilen bir test standı için oldukça uygundur.

Bu motor, yüksek tork üretimi ve verimliliği sayesinde elektrikli hava araçlarında ve multikopter sistemlerinde sıkça tercih edilen bir modeldir.

BLDC yapıda olması sürtünmeden kaynaklanan kayıpları azaltmakta ve verimliliği arttırmaktadır. Yaklaşık 12.7 kg ağırlığındaki M90C60 EEE motorunun üretebildiği maksimum itki kuvveti 200kgf değerlerindedir. Motor, sabit stator sargıları ve dönen kalıcı mıknatıslı rotor yapısına sahiptir. Bu sayede yüksek tork yoğunluğu elde edilmekte, titreşim seviyeleri düşmekte ve çalışma kararlılığı artmaktadır. Motorun devri, akımı ve gerilimi ESC aracılığıyla ayarlanmaktadır. Bu sayede itki-devir ilişkisinin incelenebilmesi sağlanmıştır.

M90C60

ENERGY EFFICIENT 9KV
ENTHUSIASTS EXTREME EDITION

70~100 kgf

RECOMMENDED
HOVER THRUST

200.1 kgf



MAXIMUM
THRUST

MAXIMUM THRUST MAY DEPEND ON
BATTERY LEVEL, PROPELLER TYPE,
AIR PRESSURE AND OTHER CONDITIONS

OPTIMIZED
WEIGHT 12.7 kg

EFFICIENCY >90%



Şekil 2.8: MAD M90C60EEE manned drone motorunun genel görünümü ve temel özellikleri.[15]

Motor Data			
Motor Model	MAD M90C60 EEE V1.0	Number of pole pairs	21
Stator	TAIWAN / Anticorrosive	Varnished wire Degree	220°C
Motor Size	D:257 × 123 mm	Magnet Degree	180°C
Degree of Protection	Rain protection	Cable Length	250 mm (extended Enameled wires)
Centrifugal Heat Dissipation	Independent	Rotor Balance	≤20 mg
Propeller Mounting Holes	D:75 M8×6	Motor Balance	≤30 mg
Shaft Diameter	IN: 35 mm	Motor Mounting Holes	D:140 M8×6
Bearing	SKF 6007ZZ *2	Disruptive test	1000 V
Additional Accessories	Propeller Plate *1, Locate Pin *1, M8*30mm *6 Motor Screws, M8*90mm *6 / M8*55mm *6 Propeller Screws, Sticker*2		

Şekil 2.9: MAD M90C60EEE motorunun teknik verileri.[15]

Specifications			
RPM/V	9 KV	Nominal Voltage	354~400V
No Load Current	1.44A / 40V	Internal resistance	40.5mΩ
Motor Weight	12.7 kg	Product Boxed Weight	14 kg
Maximum Current	150.8 A	Maximum Power	55.6 KW
Maximum thrust	200.1 kg	Maximum Torque	178.9 Nm
Recommended ESC	SineSic Pro 160A 30KW (150V~435V)	Recommended Propellers	72x31
UAV take-off weight	1005-72"/ 360kg--Quadcopter 540kg--Hexacopter 720kg--Octocopter	Single rotor take-off weight	70kg ~ 100kg

Şekil 2.10: MAD M90C60EEE motorunun performans özellikleri.[15]

2.2.2. Pervane

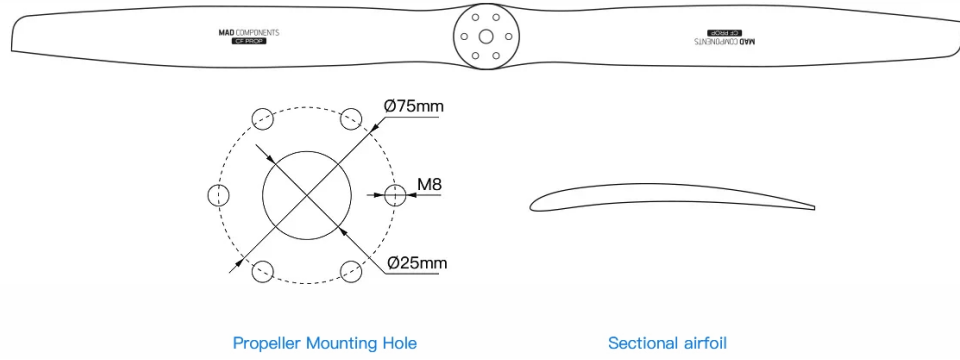
Motor satın alınırken üreticinin tavsiye ettiği pervane modeli olan CB2 PROP 72×31” karbon fiber pervane modeli satın alınmıştır. Bu modelde ultra hafif karbon fiber malzeme kullanılmış ve dayanıklılığı arttırarak yeni nesil bir tasarıma sahiptir. Üretici tarafından yapılan testlerde pervane ağırlığının önceki modellerine göre yaklaşık yüzde 20 ile 30 oranında azaldığı ve uçuş süresinin uzadığı belirtilmiştir. İtke değerlerinde yüzde 3 ile 7 aralığında verimlilikte ise yüzde 2 ile 6 oranında artış sağlandığı üretici tarafından bildirilmiştir. Pervane üretim sürecinde üç aşamalı dengeleme (balancing) işlemi uygulanmış ve bu sayede titreşimsiz çalışma elde edilmiştir.[15]



Şekil 2.11: CB2 PROP 72×31” karbon fiber pervanenin genel görünümü.[15]

FLUXER Carbon Fiber 72X31" inch PROP Propeller			
Basic Paramater			
Size	1828.8 x 787.4 mm	Single Weight	1080 g
Material	High quality carbon fiber+Resin	Surface Treatment	MATT
Working Temp	-40°C-65°C	Storage Temp	-10°C-50°C
Storage Humidity	< 85%	Optimum RPM	1900-2400 RPM/min
Single Thrust Limitation	160 kg	Package	Cowhide cardboard box
Other Accessories	12X 6*55 Mounting screws、 2X 90mm Dia X 5mm Propeller Plate		

Şekil 2.12: CB2 PROP 72×31” pervanenin teknik özellikleri.[15]



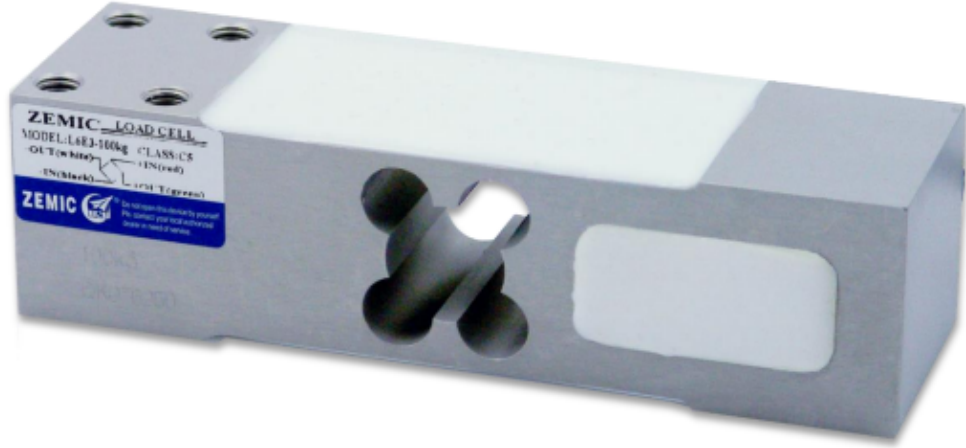
Şekil 2.13: CB2 PROP 72×31” pervanenin boyutsal ve geometrik görünümü.[15]

2.2.3. Yük Hücresi

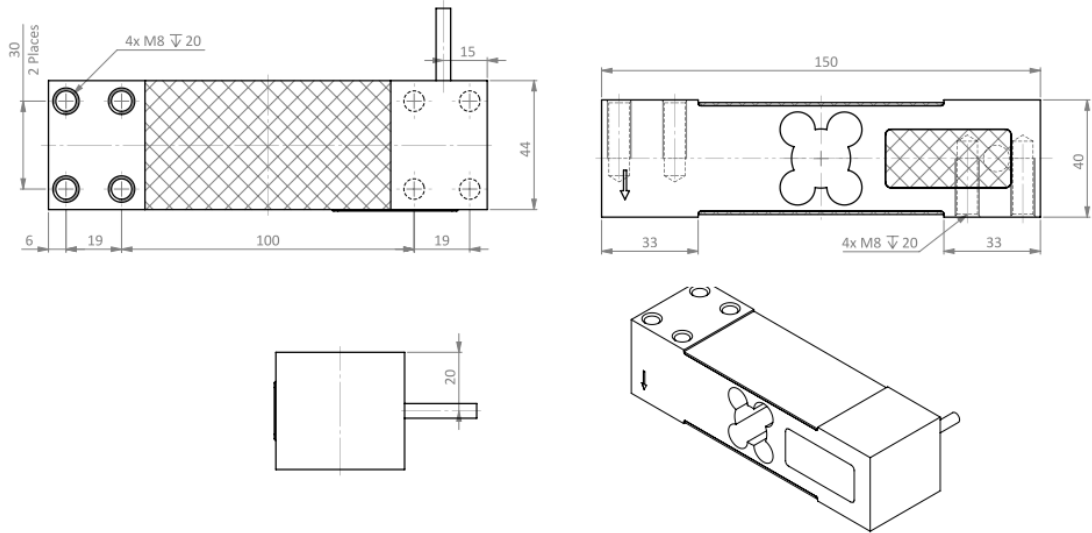
Test standında motorun oluşturduğu itki kuvvetlerinin doğru şekilde ölçülebilmesi için Zemic L6E serisi yük hücreleri kullanılmıştır. Toplamda iki farklı kapasitede, 100 kg ve 200 kg ölçüm aralıklarına sahip dört adet yük hücresi test sistemine entegre edilmiştir. Bu yük hücreleri, üreticinin sağladığı teknik dokümana göre yüzde $\pm 0,02$ doğruluk oranına sahiptir ve yüksek tekrarlanabilirlik özelliği sayesinde uzun süreli testlerde güvenilir sonuçlar vermektedir.[16]

Motorun çalışması sırasında oluşan itki kuvveti, ana taşıyıcı profilin L köşebente doğru hareket etmesiyle yük hücrelerine aktarılmaktadır. Yük hücreleri, L köşebent üzerine montajlanmış olup, profilin ileri yönlü hareketi sonucu meydana gelen itki kuvvetini doğrudan ölçmektedir. Bu yerleşim biçimi, motorun oluşturduğu kuvvetin doğrusal olarak ölçülmesini sağlar ve sistemdeki moment etkilerini minimuma indirir. Yük hücrelerinden alınan analog sinyaller, sistemin veri toplama birimine iletilmiş ve sayısal kuvvet verisine dönüştürülmüştür. Bu veriler, motorun farklı devir aralıklarındaki itki karakteristiğinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

Zemic L6E serisi, özellikle endüstriyel tartım sistemleri için tasarlanmış olmasına rağmen, yüksek hassasiyeti ve kompakt boyutları sayesinde bu çalışmadaki itki ölçümleri için uygun bulunmuştur.



Şekil 2.14: Zemic L6E3 serisi yük hücresi genel görünümü.[16]



Şekil 2.15: Zemic L6E3 yük hücresi boyutsal teknik çizimi.[16]

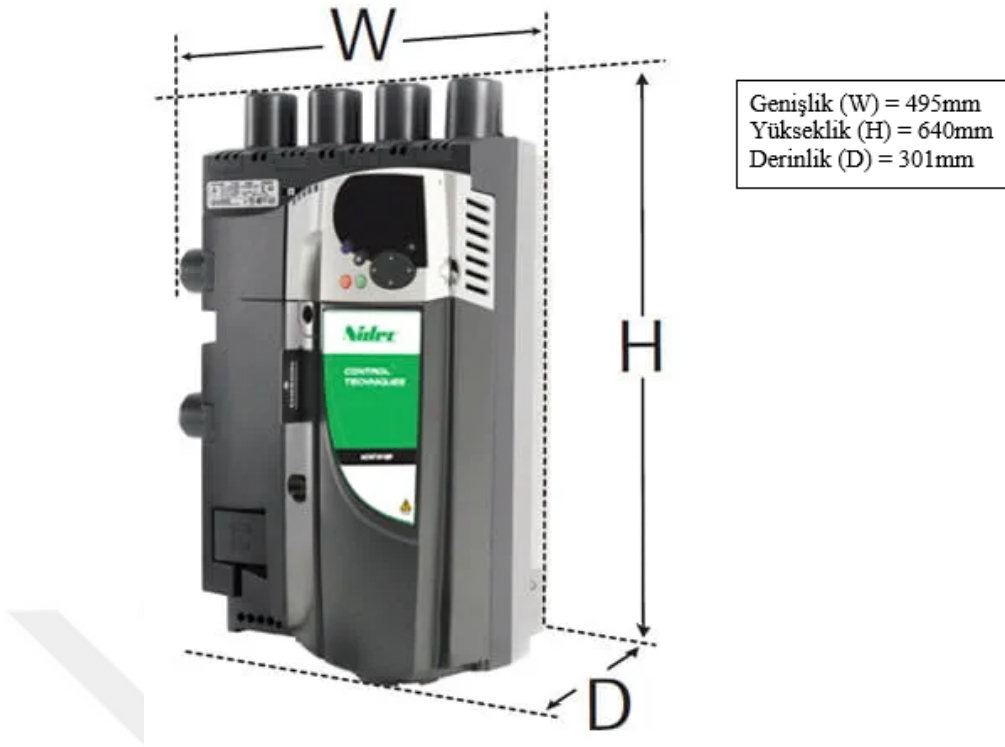
2.2.4. Elektronik Hız Kontrolcü

Test standında, motor ile birlikte üretici tarafından tavsiye edilen elektronik hız kontrolcü kullanılmıştır. Elektronik hız kontrolcünün güvenli ve kontrollü bir şekilde çalıştırılabilmesi amacıyla, motor ve elektronik hız kontrolcü sisteminin güç gereksinimini karşılayabilecek harici bir besleme ünitesine ihtiyaç duyulmuştur.

Çizelge 2.1: MP350A4R DC Motor Sürücüsünün Teknik Özellikleri[17]

Özellik	Değer
Üretici	Nidec Control Techniques
Model	MP350A4R
Sürücü Tipi	DC Motor Sürücü (4 Quadrant – Rejeneratif)
Nominal Armature Akımı	350 A
Nominal Motor Gücü	125 kW
Besleme Gerilimi	24 – 480 V DC
Çerçeve Boyutu	Frame 2A
Maksimum Alan Akımı	20 A
Aşırı Yük Kapasitesi	%150 (30 s)
Çalışma Sıcaklığı	0 – 40 °C
Koruma Sınıfı	IP10
Çalışma Özelliği	İleri/Geri yön ve rejeneratif frenleme

Bu amaçla, Nidec MP350A4R model sürücü, ayarlanabilir bir DC güç kaynağı olarak sisteme entegre edilmiştir. Sistem, motorun yüksek akım gereksinimini güvenli şekilde karşılayarak farklı devir–itki testlerinin gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Üretici verilerine göre bu modelin maksimum güç çıkışı 125 kW seviyesindedir ve kontrol hassasiyeti endüstriyel standartlara uygundur. Bu sistem test sırasında gerilim, akım ve devir parametrelerinin hassas biçimde izlenmesini sağlamakta, ayrıca aşırı akım koruması ve sıcaklık sınırlama devreleri içermektedir. [17]



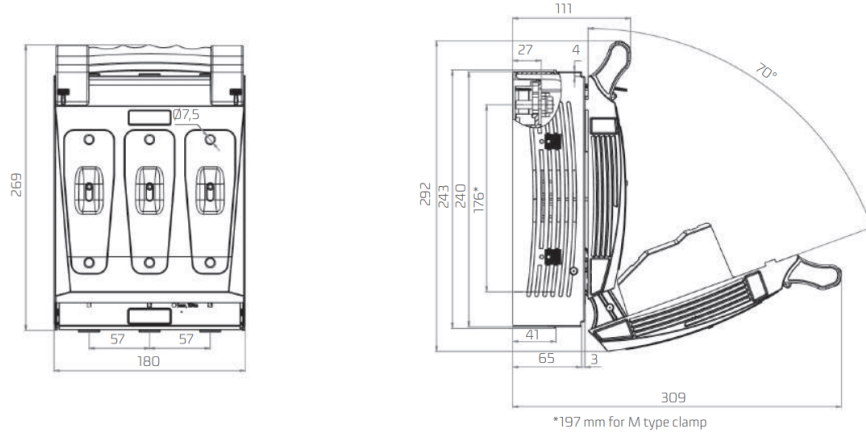
Şekil 2.16: Nidec MP350A4R boyutsal görünümü.[17]

2.2.5. Sigorta ve Yük Ayırıcı

Test sisteminin elektriksel güvenliğini sağlayabilmek amacıyla Apator RBK-1 model sigortalı yük ayırıcı (fuse switch disconnecter) yerleştirilmiştir. Bu ekipman sayesinde hem sistemin enerjisini manuel olarak izole etmek hem de aşırı akım veya kısa devre durumlarında sigorta aracılığıyla devreyi kesme işlevini yerine getirilmektedir. RBK-1 modeli, test sisteminde kullanılan Nidec MP350A4R motor sürücüsünün giriş hattına bağlanarak hem ESC'yi hem de diğer elektronik bileşenleri olası arızalara karşı korumaktadır.

Üretici teknik verilerine göre bu modelin anma termal akımı (I_{th}) 250 A, anma gerilimi (U_n) 690 V, yalıtım gerilimi (U_i) 1000 V ve darbelere karşı dayanım gerilimi (U_{imp}) 8 kV'dır. Ayrıca cihaz, 80–100 kA kısa devre dayanımı, AC-22B kullanım kategorisi, IP20 koruma sınıfı, ve yaklaşık 2 kg ağırlığıyla endüstriyel standartlara uygundur. RBK-1, yüksek akım kapasiteli DC sistemlerde güvenli güç kesme ve izolasyon işlemleri için tasarlanmış olup, test ortamında sistem güvenliğinin sürdürülebilirliğini

sağlamaktadır.[18]



Şekil 2.17: Apator RBK-1 sigortalı yük ayırıcının boyutsal görünümü.[18]

Parameter		RBK 1
Rated thermal current $I_{th}^{1)}$	A	250
Rated voltage U_n	V	690
Utilization category	-	AC-22B
Rated switching current I_e	A	250
Rated switching voltage U_e	V	690
Rated short circuit making current	690 V	80
	500 V	-
	400 V	100
	690 V	80
Rated short circuit withstand current	500 V	-
	400 V	100
Rated insulation voltage U_i	V	1000
Rated impulse withstand voltage $U_{imp.}$	kV	8
Rated frequency	Hz	50-60
Mechanical durability	Number of cycles	1600
Electrical durability	Number of cycles	200
IP degree of protection	IP	IP20
Weight	kg	~2
Size of fuse links	-	1

Şekil 2.18: Apator RBK-1 sigortalı yük ayırıcının teknik özellikleri.[18]

2.3. Test Sistemine Yapılan Analizler ve Sonuçları

Bu bölümde test standının yapısal bütünlüğü, sıcaklık etkileri, titreşim davranışı ve akış özellikleri incelenmiştir. Tasarımın doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve sayısal akış çözümleri kullanılmıştır. FEM, karmaşık geometrilerin modellenmesi, farklı sınır koşullarının tanımlanması ve kısmi diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümlerinin elde edilmesi açısından mühendislik analizlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. [19]

Gerçekleştirilen analizler; yapısal (statik), termal, modal ve akış analizleri olmak üzere dört ana başlık altında ele alınmıştır. Yapısal analizlerle sistemin maksimum itki altında oluşan deformasyon, gerilme dağılımları ve emniyet katsayıları belirlenmiştir. Termal analiz kapsamında motorun çalışması sırasında oluşan ısıнын yapısal elemanlara etkisi ve sıcaklık dağılımları değerlendirilmiştir. Ayrıca motor çevresindeki hava akımı ve soğutma performansı modellenmiştir. Son olarak Modal analiz ile doğal frekanslar ve titreşim modları tespit edilerek rezonans riskleri incelenmiştir. Elde edilen veriler görsel olarak sunulmuştur. Analiz girdileri ve sonuçları, ilgili alt başlıklar altında detaylı biçimde incelenmiştir.

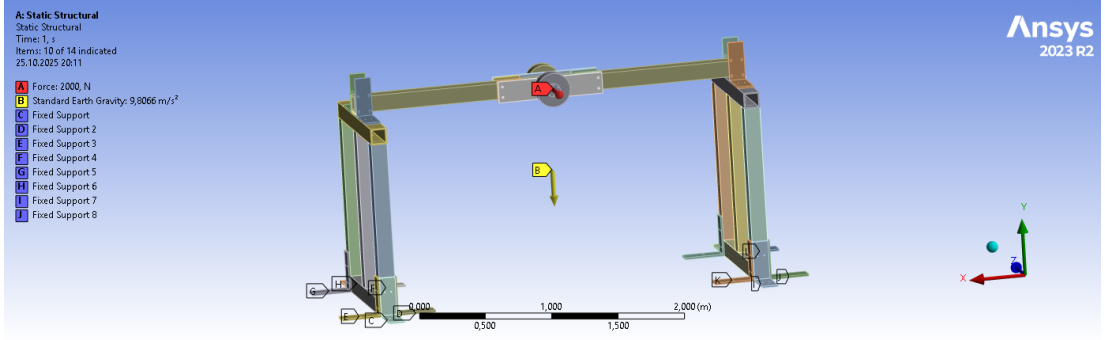
2.3.1. Test Sisteminin Yapısal Analizi

Test standının maksimum itki altındaki dayanımı sonlu elemanlar yöntemiyle statik yapısal analiz yapılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizde motorun uygulayabileceği maksimum itki kuvveti 200kgf dikkate alınmıştır. Sistemin toplam deformasyonu, gerilme dağılımı, tepki(reaksiyon) kuvvetleri ve emniyet katsayısı incelenmiştir. Malzeme olarak S235 çeliği kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar sistemin güvenli çalışma sınırları içinde olup olmadığını değerlendirmek amacıyla görsel ve sayısal olarak alt başlıklar altında sunulmuştur.

Analiz modeli S235 sınıfı yapısal çelikten yapılmıştır (akma dayanımı $\approx 235\text{--}250$ MPa civarı). Sisteme uygulanan statik yük yaklaşık 2000 N büyüklüğündedir ve üst bağlantı bölgesinden (merkezde) aşağı doğru verilmiştir. Yapı dört adet ankastre destek (ayar noktaları) ile zemine sabitlenmiş olup, model ve yükleme koşulları simetriktir.

Yapısal analiz için uygulanan yük ve sınır koşulları analizde, motordan kaynaklanan

2000 N'luk itki kuvveti (A) sistemin orta noktasına uygulanmıştır. Test standının yere sabitlenen ayakları, toplam sekiz farklı noktadan “Fixed Support” koşulu ile tanımlanmıştır (C–J). Ayrıca sistemin kendi ağırlığını hesaba katmak amacıyla standart yerçekimi ivmesi (B) de analize dahil edilmiştir.



Şekil 2.19: Statik yapısal analiz için belirlenen sınır koşulları ve yükleme durumu.

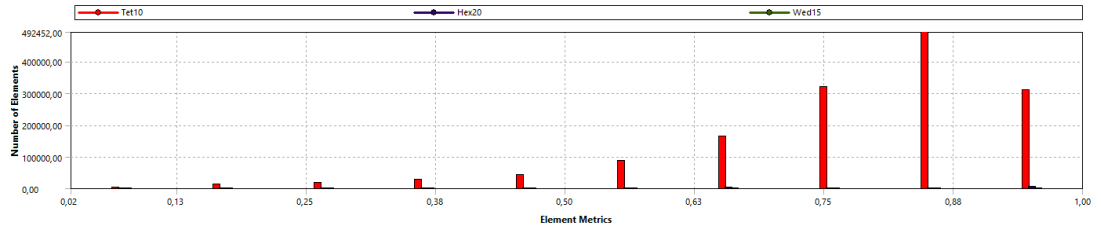
2.3.1.1. Mesh Kalitesinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, analizlerde kullanılan mesh elemanlarının kalitesi üç kriter ile değerlendirilmiştir. Kriterler sırasıyla element quality, skewness ve aspect ratio olarak seçilmiştir.

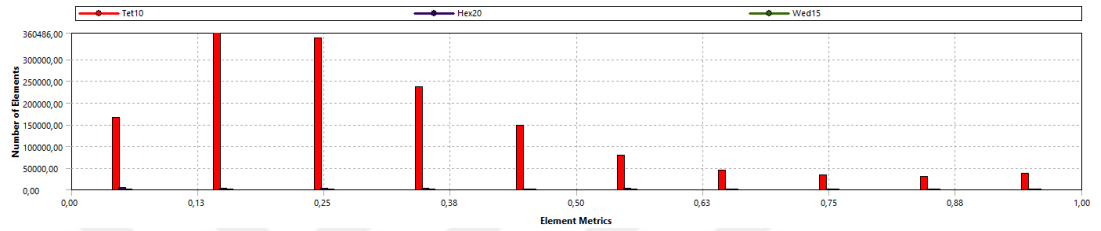
Literatürde ve Ansys gibi programların kendi eğitim dokümanlarında, element quality değerinin 0.5'in üzerinde olması gerektiği, skewness değerinin 0.9'un altında olması gerektiği ve aspect ratio değerinin ise 10'un altında olması gerektiği kabul edilebilir sınırlar olarak verilmektedir.

Mesh modelinin element quality tablosu incelendiğinde, elemanların büyük çoğunluğunun 0.75–1.0 aralığında yer aldığı görülmektedir. Element quality değerinin 0.5'in altında kalan az sayıdaki eleman ise toplam eleman sayısına oranla oldukça düşük seviyede kalmaktadır. Bu dağılım, element quality bağlamında değerlendirildiğinde, elde edilen gerilme sonuçlarının güvenilir bir şekilde yorumlanabileceğini göstermektedir.

Skewness dağılımı incelendiğinde, değerlerin büyük çoğunluğunun 0.1–0.4 aralığında



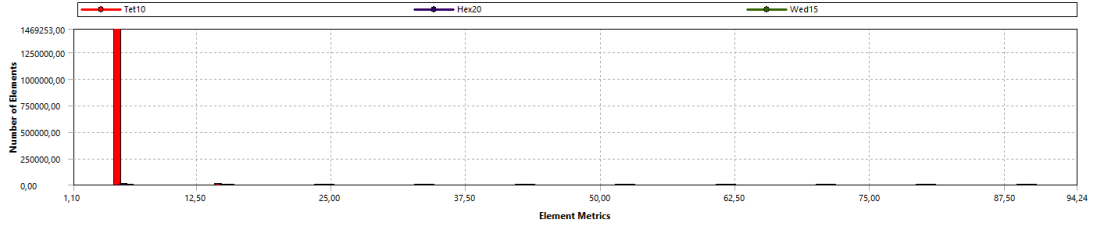
Şekil 2.20: Mesh element quality dağılımı.



Şekil 2.21: Mesh skewness dağılımı.

yoğunlaştığı görülmektedir. Ortalama skewness değeri ise 0.306 olarak belirlenmiştir. Dağılımın son kısmında 0.88 - 1.0 aralığında az sayıda kötü elemana sahip olduğu görülmektedir fakat toplam eleman sayısına oranla oldukça düşüktür ve karmaşık geometrilerin çevresinde oluşan lokal bozulmalardan kaynaklanmaktadır. Sayıca oldukça sınırlı olması sebebiyle analiz sonuçlarının doğruluğuna olumsuz bir etki oluşturmamaktadır. Bu değerler, oluşturulan mesh modelinin iyi kalite tet elemanı aralığında olduğunu ve eleman şekil bozulmasının düşük seviyede gerçekleştiğini göstermektedir.

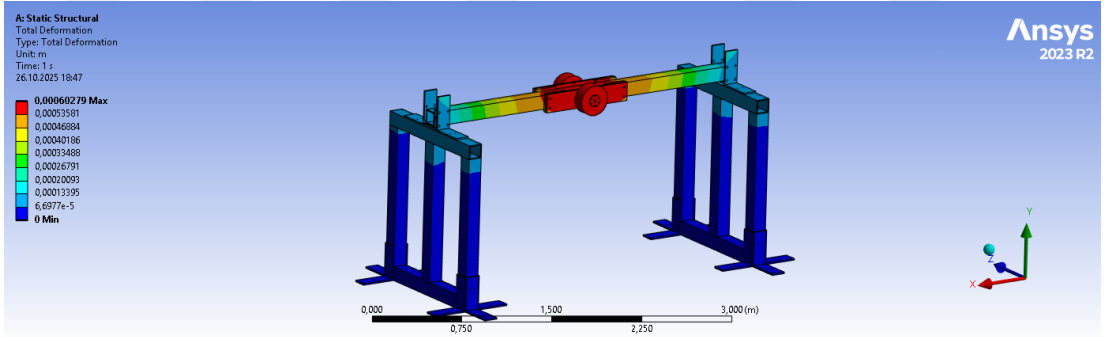
Elemanların büyük bir çoğunluğunun 1–2 aralığında toplandığı görülmektedir. Ortalama aspect ratio değeri ise 2.130 olarak belirlenmiştir. Bu değer, aspect ratio açısından oldukça uygun kabul edilmektedir. Dağılımın son bölümünde yaklaşık 94 değerinde sayıca oldukça az miktarda elemanlar olduğu görülmektedir. Bu elemanlar toplam eleman sayısına oranla değerlendirildiğinde ihmal edilebilir düzeydedir. Bu durum, elemanların geometrik olarak düzgün şekillendirildiğini ve çözüm doğruluğunu olumsuz etkileyecek bir bozulmanın bulunmadığını göstermektedir.



Şekil 2.22: Mesh aspect ratio dağılımı.

2.3.1.2. Toplam Deformasyon Sonuçları

Yapılan statik yapısal analiz sonucunda sistem üzerindeki deformasyon dağılımı detaylı biçimde incelenmiştir. Yapının genelinde maksimum deformasyonun motor kuvvetinin uygulandığı taşıyıcı profil bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir. Sonlu elemanlar çözümü sonucunda elde edilen maksimum toplam deformasyon değeri yaklaşık 0,6 mm olarak bulunmuştur. Bu sonuç sistemin rijitlik bakımından oldukça yeterli olduğunu göstermektedir.

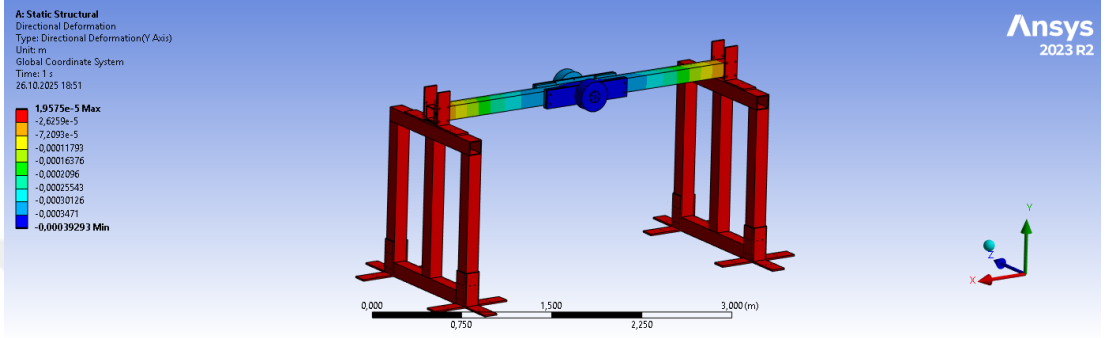


Şekil 2.23: Yapının toplam deformasyon dağılımı.

$$\delta_P = \frac{PL^3}{48EI} \quad (2.7)$$

$$\delta_q = \frac{5wL^4}{384EI} \quad (2.8)$$

Uzunluk: $L = 300\text{mm}$, Elastisite Modülü: $E = 210\text{GPa}$, Atalet Momenti: $I = 7531179\text{mm}^4$, Yayılı Yük (profilin ağırlığı): $w = 0.2757\text{N/mm}$, Motorların Ağırlıkları Toplamı: $P = 249.2\text{N}$. Yayılı yükten dolayı oluşan sehim miktarı 0.1839mm 'dir. Orta noktadaki motorların oluşturduğu sehim miktarı 0.08863mm olarak hesaplanmıştır. Toplam sehim miktarı ise 0.272mm olarak hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen maksimum sehim ise 0.0196 mm 'dir.



Şekil 2.24: Statik yapısal analiz için belirlenen sınır koşulları ve yükleme durumu.

Aradaki farkın, modelleme sırasında kullanılan sınır koşulları ve yapının üç boyutlu detaylı davranışlarının etkilerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

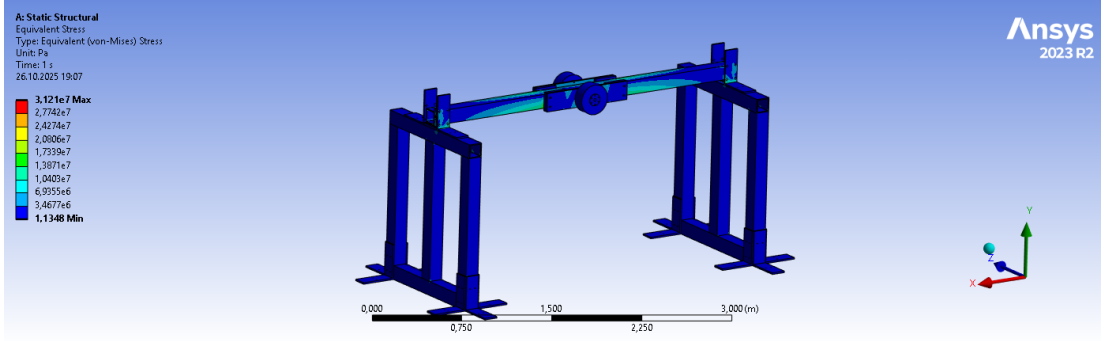
2.3.1.3. Von Mises Gerilme Dağılımı

Eşdeğer Von Mises gerilme analizi sonucunda, yapıda maksimum $3.12 \times 10^7\text{ Pa}$ ($\approx 31.2\text{ MPa}$) civarında bir gerilme tespit edilmiştir. Bu değer, kullanılan yapısal çeliğin (S235) yaklaşık 235 MPa seviyesindeki akma dayanımının oldukça altındadır.

Bu sonuç, sistemin tamamen elastik sınırlar içerisinde çalıştığını ve herhangi bir plastik deformasyon riski taşımadığını göstermektedir. Gerilmelerin en yüksek olduğu bölge, kuvvetin uygulandığı motor bağlantı noktası civarında yoğunlaşmıştır. Buna karşılık profil uçları ve alt taşıyıcı çerçeve elemanlarında gerilme değerlerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Yapının genel davranışı incelendiğinde, 2000 N 'luk yatay kuvvet altında dahi önemli bir deformasyon veya yerel zayıflama oluşmadığı, sistemin yüksek rijitlik, mukavemet

ve stabilite özelliklerini koruduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, yapının tasarım açısından emniyetli ve dayanıklı bir performans sergilediğini doğrulamaktadır.

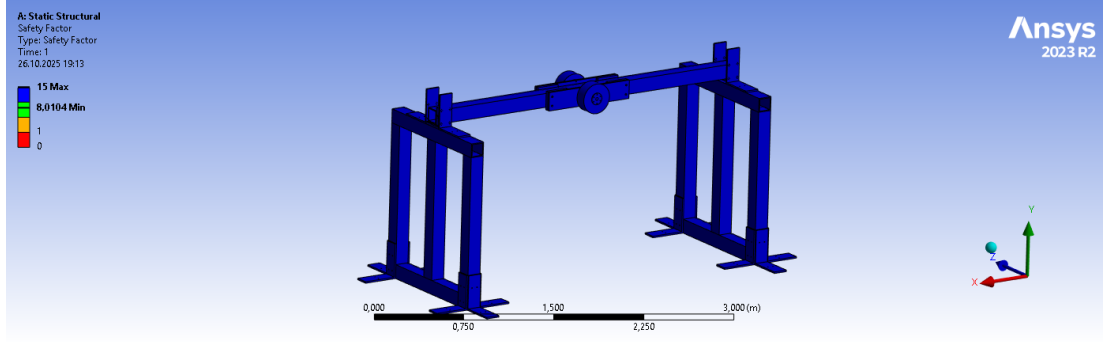


Şekil 2.25: Yapının eşdeğer gerilme (Von Mises) dağılımı.

Yapılan statik yapısal analizler sonucunda, sistemin uygulanan 2000 N'luk yatay itki kuvveti altında oldukça yüksek rijitliğe sahip olduğu görülmüştür. Analiz çıktılarında elde edilen maksimum toplam deformasyon değeri 0.60 mm, düşey yöndeki sehim miktarı ise yalnızca 0.0196 mm olarak belirlenmiştir. Bu düşük deformasyon değerleri, yapının yatay yükler altında bile stabil ve kararlı bir davranış sergilediğini göstermektedir. Sonuç olarak; analiz bulguları, tasarlanan test standının yüksek rijitlik, yeterli mukavemet ve yük aktarımında etkin performans gösterdiğini kanıtlamaktadır. Sistem, motorun oluşturduğu yatay itki kuvvetini güvenli biçimde taşıyabilmekte ve deformasyon açısından tasarım kriterlerini fazlasıyla karşılamaktadır.

2.3.1.4. Güvenlik Katsayısı (Safety Factor)

Analiz sonuçlarında emniyet katsayısı alanında yerel olarak yaklaşık 8 seviyesine inen bir bölge sensör bağlantısı civarında gözlenmiştir. Bu bölge, modelde sensör alt- bileşenlerinin malzeme/bağlantı tanımlarının sınırlı oluşu nedeniyle sonuçları doğrudan temsil etmeyebilir. Taşıyıcı ana yapı elemanlarında ise emniyet katsayısı değerleri ANSYS çıktılarında üst sınır olan yaklaşık 15 seviyesinde seyretmektedir.



Şekil 2.26: Yapının emniyet katsayısı (Safety Factor) dağılımı.

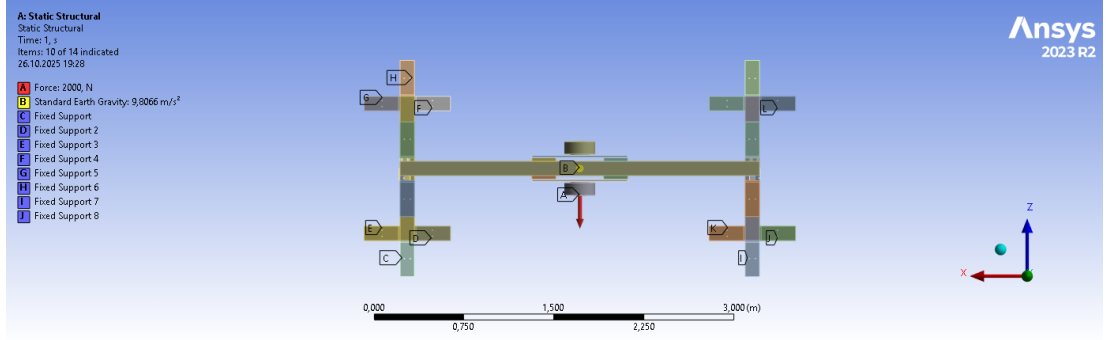
Bu nedenle sistemin gerçekçi ve tasarım açısından belirleyici güvenlik payı yaklaşık 15 olarak değerlendirilmektedir. Bu yüksek güvenlik payı, test standının iki motorun eşzamanlı çalışması (≈ 4000 N toplam itki) dahil, ileri seviyedeki test senaryolarını da güvenle karşılayabileceğini göstermektedir. Bu durum, sistemin yalnızca mevcut motor için değil, ilerleyen süreçte daha yüksek itki kapasiteli motorların testlerine de uygun olduğunu ortaya koymaktadır.

2.3.1.5. Tepki Kuvvetleri

Yapının sabit mesnetlerinde oluşan tepki kuvvetleri (Reaction Forces) tablo halinde verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, her bir mesnetin taşıdığı kuvvet değerleri birebir aynı olmamakla birlikte, karşılıklı mesnet çiftlerinin (C–I, D–K, E–J, F–M, G–L ve H–N) birbirine oldukça yakın kuvvetler taşıdığı gözlenmiştir.

Bu durum, sistemin geometrik olarak simetrik olduğunu ve uygulanan 2000 N yatay itki kuvvetinin yapıya dengeli bir biçimde dağıldığını göstermektedir.

Çizelge 2.1’de her bir mesnete ait kuvvet bileşenleri ve toplam reaksiyon değerleri verilmiştir. Değerler incelendiğinde, sağ ve sol tarafta yer alan karşılıklı mesnet çiftlerinin birbirine oldukça yakın reaksiyon kuvvetleri oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 2.27: Sistemdeki sabit mesnetlerin (Fixed Supports) konumu ve yük dağılımı.

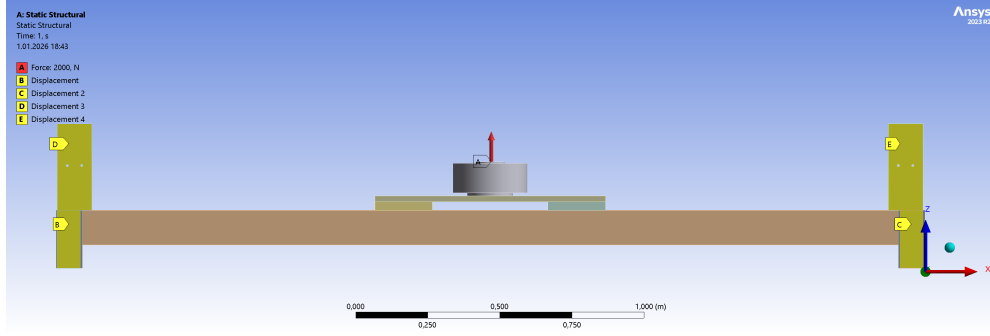
Çizelge 2.2: Tepki kuvvetleri tablosu.

		Force Reaction (X) [N]	Force Reaction (Y) [N]	Force Reaction (Z) [N]	Force Reaction (Total) [N]
C	1	-47,547	1955	516,53	2022,6
D	2	190,05	-686,39	67,311	715,39
E	3	-314,09	1462,2	299,35	1525,3
F	4	42,174	306,41	211,39	374,64
G	5	-148,98	2134,6	-37,382	2140,1
H	6	-35,772	-1735,1	-57,109	1736,4
I	7	49,372	1946,1	527,25	2016,8
J	8	318,55	1435,2	293,66	1499,1
K	9	-196,89	-649,84	76,062	683,26
L	10	154,04	2122,4	-38,385	2128,4
M	11	-48,408	347,04	210,24	408,64
N	12	37,508	-1758,4	-68,919	1760,2

2.3.1.6. Tepki Kuvvetlerinde Simetriklik ve Eksantriklik

Bu model, tasarlanan itki testi standının basit bir temsildir ve tepki kuvvetlerinin simetrik dağılımını göstermek amacıyla oluşturulmuştur.

Motor milinin konumu profilin tam ortasına gelecek şekilde tasarlanmış olsa da, sensör yüzeylerinin aynı eksen de yer almaması nedeniyle sistemde eksantriklik oluşmaktadır. Bu durum iki uçtaki mesnetlerde zıt yönlü fakat aynı büyüklükte 583,3 N’luk kuvvet çiftlerinin ortaya çıkmasına neden olmakta ve yapıda bir moment etkisi yaratmaktadır. Benzer şekilde Y ekseninde de 0,29 N büyüklüğünde zıt yönlü bir kuvvet çifti gözlenmiştir.



Şekil 2.28: Tepki kuvvetlerinin sağ ve sol mesnetlerde simetrik dağılımını incelemek için oluşturulan model.

Çizelge 2.3: B-D mesnet çifti tepki kuvvetleri.

Mesnet	F _x [N]	F _y [N]	F _z [N]
B	-3127,5	-257,98	-412,93
D	2544,2	257,69	-587,24
Toplam	-583,3	-0,29	-1000,17

Buna karşılık Z ekseninde uygulanan 2000 N’luk kuvvet, iki uçtaki mesnetlerde -1000 N olarak dağılmakta ve bu sonuç sistemin yük altında beklenen simetrik davranışı sergilediğini göstermektedir. Bu bulgu, modelin temel varsayımlarını doğrulayan önemli bir göstergedir.

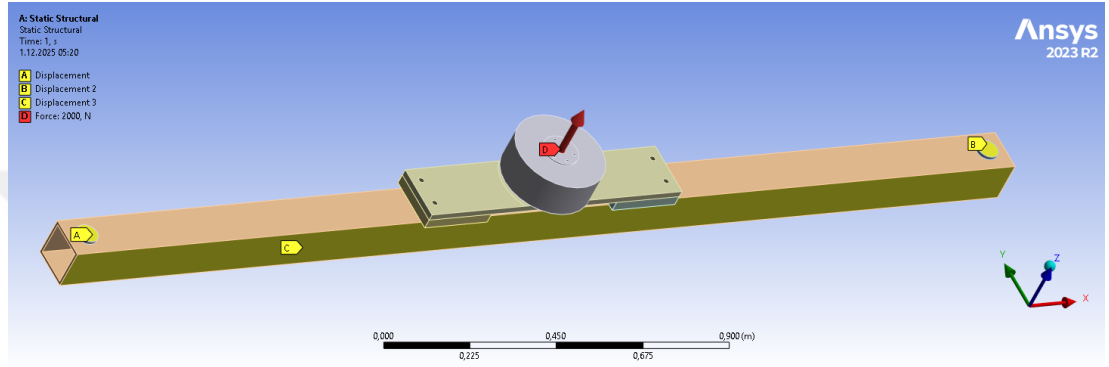
Çizelge 2.4: C-E mesnet çifti tepki kuvvetleri.

Mesnet	F _x [N]	F _y [N]	F _z [N]
C	3117	-265,39	-385,25
E	-2533,7	265,68	-614,58
Toplam	583,3	0,29	-999,83

Çizelge 2.5: Mesnetlerdeki toplam tepki kuvvetleri.

F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
0	0	-2000

Başka bir modelleme daha yapılarak kuvvet sadece Z ekseninde incelenmiştir.



Şekil 2.29: Tepki kuvvetlerinin yalnızca Z ekseninde değerlendirilmesi için oluşturulan modelin sınır şartları.

Bu incelemenin sebebi, kuvvetin Z ekseninde simetrik olduğunu göstermek amacıyla yapılmış olmasıdır. Tam ortadan uygulanan 2000 N’luk itki kuvveti, iki uçta oluşan yaklaşık –1000 N’luk tepki kuvvetleriyle birlikte sistemin Z ekseninde simetrik olduğunu göstermiştir.

Çizelge 2.6: Uygulanan 2000 N’luk kuvvetin iki mesnette yaklaşık -1000 N olarak simetrik dağıldığını gösteren tepki kuvveti değerleri.

Mesnet	F_x	F_y	F_z
A	0	0	-1000,2
B	0	0	-999,8

2.3.2. Test Sisteminin Termal Analizi

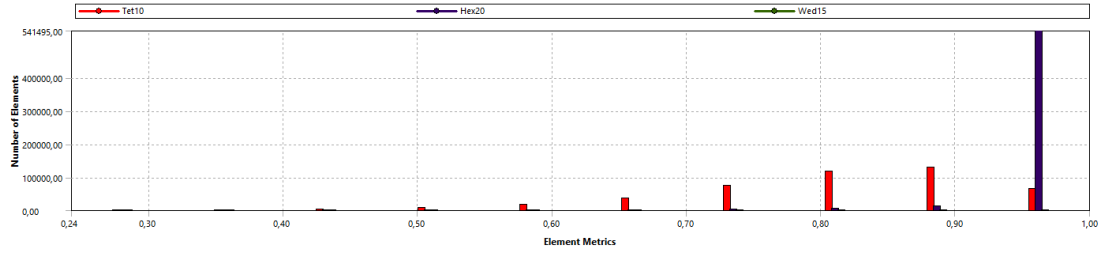
2.3.2.1. Sabit Sıcaklık Uygulanarak Yapılan Termal Analiz

MAD Motor'dan alınan teknik dokümanlara göre motor sargı sıcaklığı maksimum 220 °C ve mıknatıs sıcaklığı ise maksimum 180 °C olarak belirtilmiştir. Bu analiz yapılırken motordan profile iletilecek sıcaklık, kayıplar dikkate alınarak tahmini 120 °C sabit sıcaklık değeri kabul edilmiş ve motor braketine uygulanmıştır. hesaplama verimliliğini artırmak amacıyla yapısal model sadeleştirilmiş ve yalnızca ısı iletimine etki eden bileşenler modele dahil edilmiştir.

Analiz modelinde ısı iletim katsayısı (thermal conductance) ve konveksiyon katsayısı (film coefficient) parametrelerinin sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Isı iletim katsayısı için kullanılan 20 000 W/m²·°C ve 2 000 W/m²·°C değerlerinin sıcaklık dağılımı üzerinde ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Ancak konveksiyon katsayısı için kullanılan 25–80 W/m²·°C aralığındaki değerlerin sıcaklık dağılımını belirgin şekilde etkilediği tespit edilmiştir. Bu nedenle konveksiyon katsayısının hesaplanması gerektiğine karar verilmiştir. Tüm analizlerde ortam sıcaklığı 25 °C olarak alınmıştır.

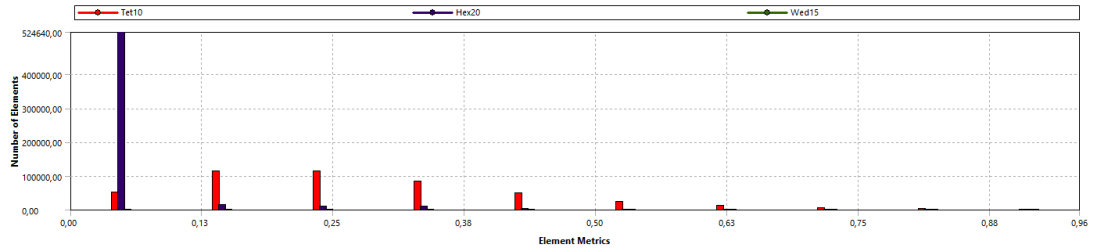
2.3.2.2. Termal Analiz İçin Mesh Kalitesi Değerlendirilmesi

Mesh model incelenirken element quality, skewness ve aspect ratio olmak üzere üç ana mesh kriterine dikkat edilmiştir. Element quality değerleri 0,24–1,00 arasında değişmekte olup ortalama değer 0,91 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca element quality grafiğinde elemanların büyük bir çoğunluğunun 0,70–1,00 aralığında olduğu göz önünde bulundurulduğunda, mesh kalitesinin yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.



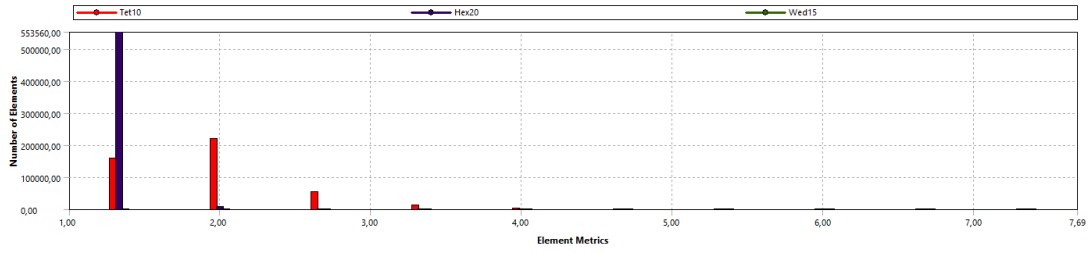
Şekil 2.30: Mesh element quality dağılımı.

Skewness değerleri incelendiğinde, çok küçük bir kısmın 0,90 üzerinde olduğu, maksimum skewness değerinin ise 0,96 olduğu görülmüştür. Ortalama skewness değeri 0,13 olup mesh yoğunluğunun büyük bir kısmının 0,00–0,38 aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle skewness kriterinin sağlandığı değerlendirilmektedir.



Şekil 2.31: Mesh skewness dağılımı.

Son olarak aspect ratio değerleri incelenmiştir. Minimum 1,00, maksimum 7,68 olarak gözlemlenen aspect ratio dağılımında ortalama değer 1,43 olarak tespit edilmiştir. Elemanların çoğunluğunun 1,00–3,00 aralığında bulunması, mesh modelinin aspect ratio açısından da yeterli olduğunu göstermektedir.



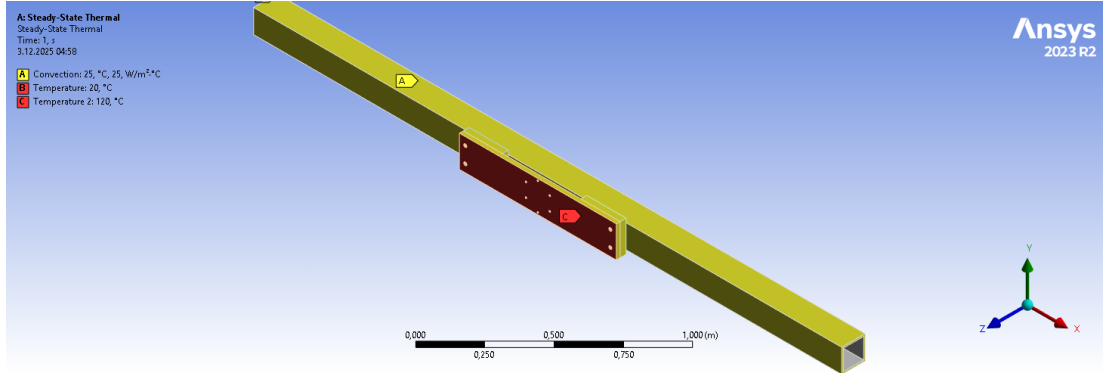
Şekil 2.32: Mesh aspect ratio dağılımı.

Oluşturulan mesh yapısının sonlu elemanlar analizine uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

2.3.2.3. Termal Analizde Kullanılan Sınır Şartları

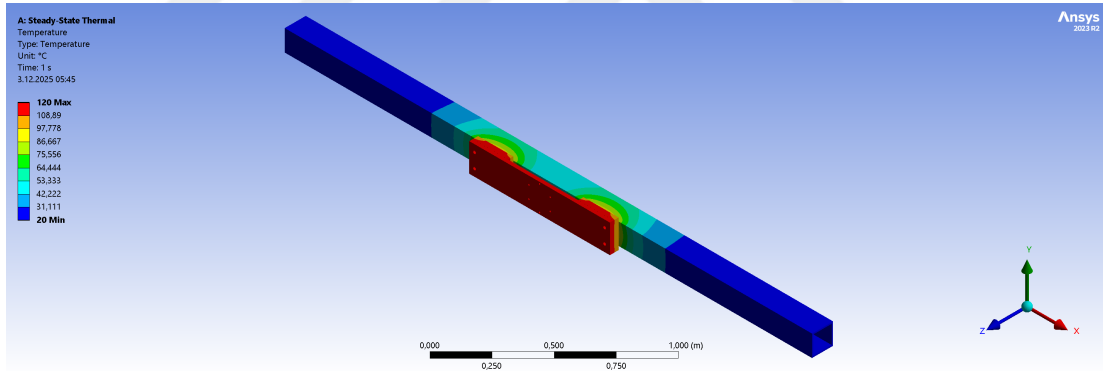
Bu bölümde sınır şartları açıklanmıştır. İki farklı analiz üzerinde durulmuştur. İlk olarak sıcaklık motor braketine uygulanarak sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Ardından ısı akısı (heat flux) uygulanarak sıcaklık dağılımı değerlendirilmiştir. Ek olarak ısı iletim katsayısı (thermal conductance) farkı ve konveksiyon katsayısı (film coefficient) etkisi incelenmiştir. Tüm analizlerde ortam sıcaklığı 25 °C olarak kabul edilmiştir.

Sınır şartları oluşturulurken motor braketine doğrudan 120 °C sabit sıcaklık uygulanmış, profilin bir ucuna ise 20 °C sabit sıcaklık atanmıştır. Ayrıca çevresel soğutmayı modellemek amacıyla 25 W/m²·°C konveksiyon katsayısı ve ortam sıcaklığı olarak 25 °C kullanılmıştır. Isıl iletkenlik katsayısı 2000 W/m²·°C alınmıştır.

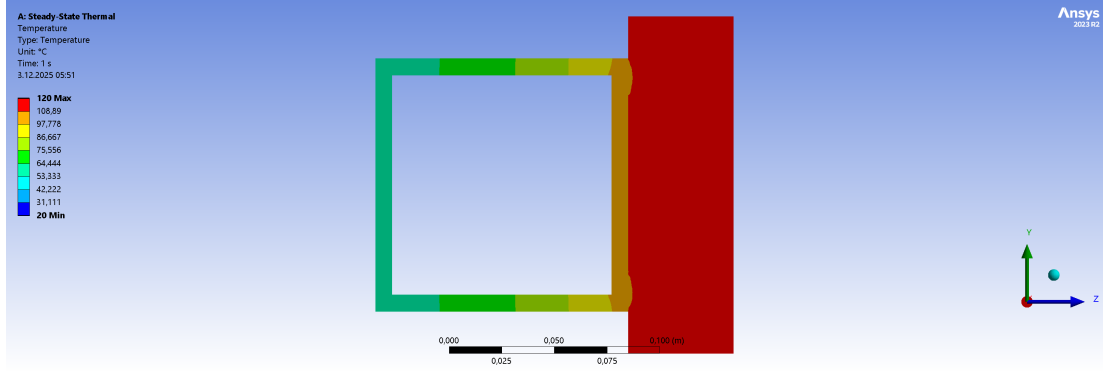


Şekil 2.33: Motor braketı bölgesine 120 °C sabit sıcaklık uygulanarak gerçekleştirilen termal analiz modelinin sınır şartları.

Bu sınır şartları altında motorun çalışma sırasında profile aktardığı ısıнын yayılımı ve sıcaklık dağılımı incelenmiştir.

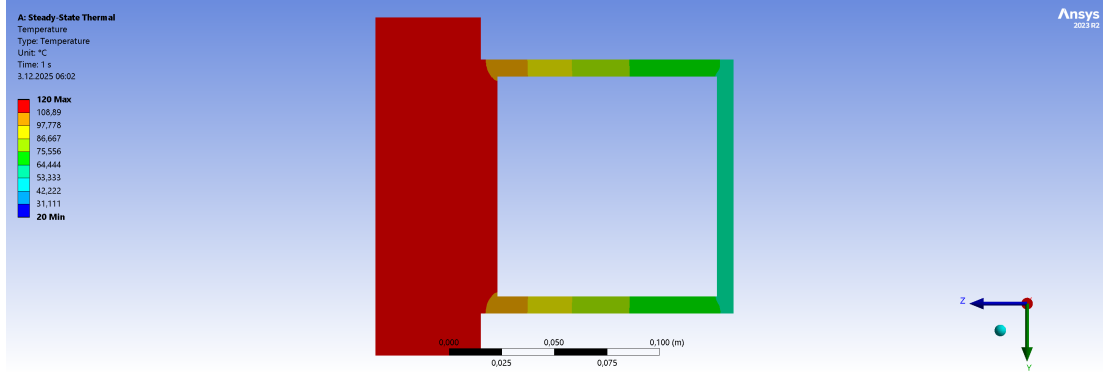


Şekil 2.34: Sabit 120 °C uygulanan termal analizde sıcaklık dağılımı.



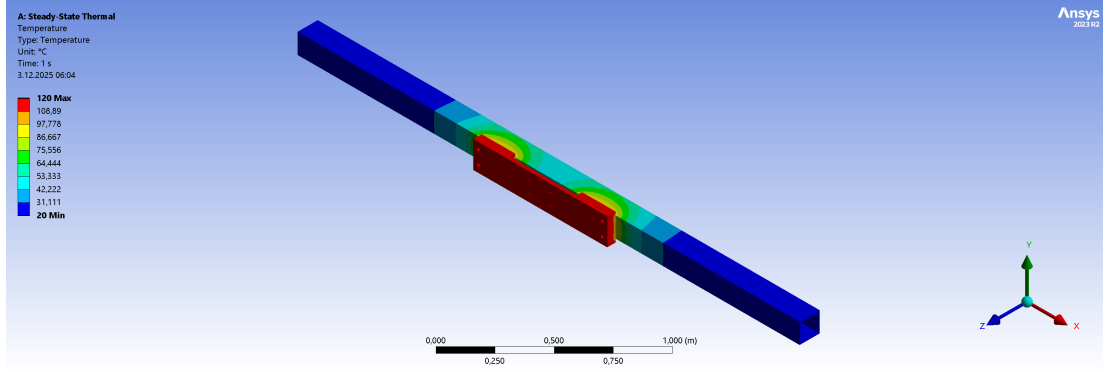
Şekil 2.35: Braket–Profil arası ısı yayılımının kesit görünüşü.

Isıl iletkenlik katsayısının sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, analizde kullanılan tüm diğer sınır şartları ve malzeme parametreleri sabit tutulmuş, yalnızca temas yüzeyine ait ısıl iletkenlik katsayısı $20\,000\text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ değerine çıkarılmıştır.



Şekil 2.36: Braket–Profil arası ısı yayılımının kesit görünüşü.(Isıl iletkenlik katsayısı $20000\text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$)

Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, elde edilen sıcaklık dağılımlarında önemli bir değişim gözlenmemiştir. Bu durum, temas yüzeyindeki ısı iletiminin analiz edilen yapı üzerinde belirleyici olmadığını ve sıcaklık alanının şekillenmesinde baskın mekanizmanın konveksiyon ile sabit sıcaklık sınır şartı olduğunu göstermektedir.



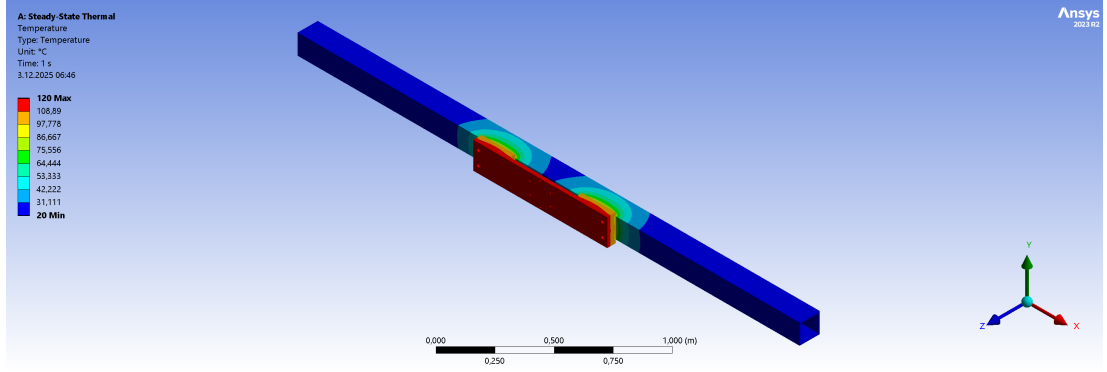
Şekil 2.37: Sabit 120 °C uygulanan termal analizde sıcaklık dağılımı. (Isıl iletkenlik katsayısı 20000 W/m².°C)

Analiz sonuçları incelendiğinde profilden uzak bölgelerde sıcaklık 20–30 °C aralığında sabit olduğu görülmektedir. Bu durum, ısı geçişinin büyük ölçüde lokal olduğunu ve profil boyunca ciddi bir sıcaklık yükselmesi meydana gelmediğini göstermektedir.

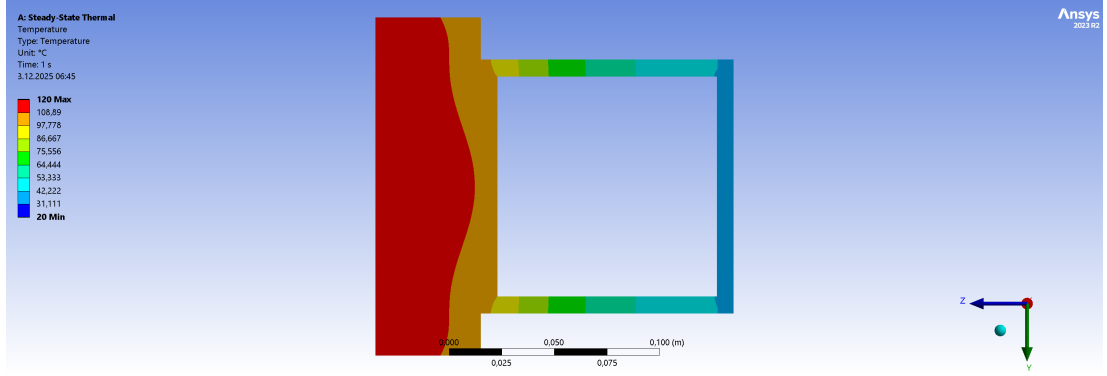
Konveksiyon katsayısının (film coefficient) sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla ikinci bir analiz gerçekleştirilmiştir. İlk analizde 25 W/m².°C olarak uygulanan konveksiyon katsayısı değeri, bu aşamada 80 W/m².°C olarak uygulanmıştır. Bu değer, motorun pervane rüzgârı altında çalıştığı durumda oluşabilecek daha kuvvetli zorlanmış konveksiyon koşullarını temsil etmektedir. Böylece dış ortamla gerçekleşen ısı transferinin sıcaklık alanı üzerindeki duyarlılığı daha gerçekçi çalışma koşulları altında değerlendirilmiştir.

Konveksiyon katsayısının artırılması sonucunda profile aktarılan ısıнын daha etkin bir şekilde azaldığı sonucu analiz sonuçlarından görülmektedir. Profil üzerindeki sıcaklık değerleri konveksiyon katsayısı 80 W/m².°C olarak değiştirildiğinde 25 W/m².°C durumuna kıyasla düşük değerlere gerilemiştir. Özellikle kesit görünümünde net bir şekilde incelenebilmektedir.

Bu sonuçlara dayanarak konveksiyon katsayısının hassas olduğu ve gerçek çalışma koşullarına göre hesaplanması gerektiğine karar verilmiştir.



Şekil 2.38: Konveksiyon katsayısının $80 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ alınması durumunda sıcaklık dağılımı.



Şekil 2.39: Konveksiyon katsayısının $80 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ alınması durumunda kesit sıcaklık dağılımı.

2.3.2.4. Isı Akısı Uygulanarak Yapılan Termal Analiz

Konveksiyon katsayısının hesaplanabilmesi için motorun çalışma esnasında pervane tarafından oluşturulan havanın hızının hesaplanması gerekir. Momentum teorisine göre indüklenmiş hız aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$v_i = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}} \quad (2.9)$$

Bu denklemde motorun itki kuvveti $T = 2000$ N, hava yoğunluğu $\rho = 1.225$ kg/m³ ve pervane disk alanı $A = \pi r^2 = 2.63$ m² olarak alınmıştır. Bu değerlerle indüklenmiş hız yaklaşık $v_i = 17.6$ m/s olarak hesaplanmıştır.

Akım izi(Wake) bölgesinde hızın yaklaşık iki kat arttığı bilindiğinden karakteristik hız:

$$v_{wake} \approx 2v_i \approx 35 \text{ m/s} \quad (2.10)$$

olarak belirlenmiş ve konveksiyon hesabında 20–35 m/s aralığı kullanılmıştır.

Bu hız aralığına karşılık gelen Reynolds sayısı aşağıdaki ifade ile hesaplanmıştır:

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.11)$$

Hesaplamalarda motor gövdesi çapı $D = 0.257$ m ve havanın 25°C sıcaklıktaki dinamik viskozitesi $\mu = 1.81 \times 10^{-5}$ Pa·s kullanılmıştır. Bu durumda hesaplanan Reynolds sayısı değerleri:

$$Re_{20} \approx 3.5 \times 10^5, \quad Re_{35} \approx 6.1 \times 10^5$$

olarak elde edilmiştir. Bu değerler, akışın tamamen türbülanslı olduğunu göstermektedir.

Türbülanslı rejim için ortalama Nusselt sayısı Churchill–Bernstein korelasyonu kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\overline{Nu_D} = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{(1 + (0.4/Pr)^{2/3})^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (2.12)$$

Bu denklemde havanın 25°C sıcaklıktaki Prandtl sayısı $Pr = 0.71$ olarak kullanılmıştır.

Son olarak konveksiyon katsayısı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır:

$$h = \frac{\overline{Nu_D} k}{D} \quad (2.13)$$

Burada k , havanın 25°C'deki ısı iletim katsayısı olup $k = 0.0262$ W/m·K olarak alınmıştır.

Bu bağıntı ile konveksiyon katsayısının $54\text{--}83 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ aralığında olduğu belirlenmiş; termal analizlerde güvenli tarafta kalmak amacıyla $h = 80 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ değeri kullanılmıştır.

Isı akısı (heat flux) hesaplanırken motorun gücü ve verimi kullanılmıştır. Motorun dökümantasyonundan alınan bilgilere göre motorun gücü $P_{\text{out}} = 45 \text{ kW}$ ve verimi $\eta = 0,8$ civarındadır. Buna göre motorun kayıp gücü hesaplanmıştır:

$$P_{\text{kayıp}} = P_{\text{out}}(1 - \eta) \quad (2.14)$$

$$P_{\text{kayıp}} = 45\,000 \times (1 - 0.80) = 9\,000 \text{ W} \quad (2.15)$$

Hesaplamalara göre 9 kW ısı kayıp oluşmaktadır. Bu kaybın yarısının çevreye diğer yarısının ise motor braket ve arka plakaya iletiildiği varsayılarak ısı gücü $Q = 4\,500 \text{ W}$ olarak hesaplamaya katılmıştır. Braket ile profil arasındaki temas alanının tamamının bu ısıyı almadığı göz önünde bulundurularak, bu gücün yaklaşık onda biri ($Q = 450 \text{ W}$) analizde kullanılmıştır.

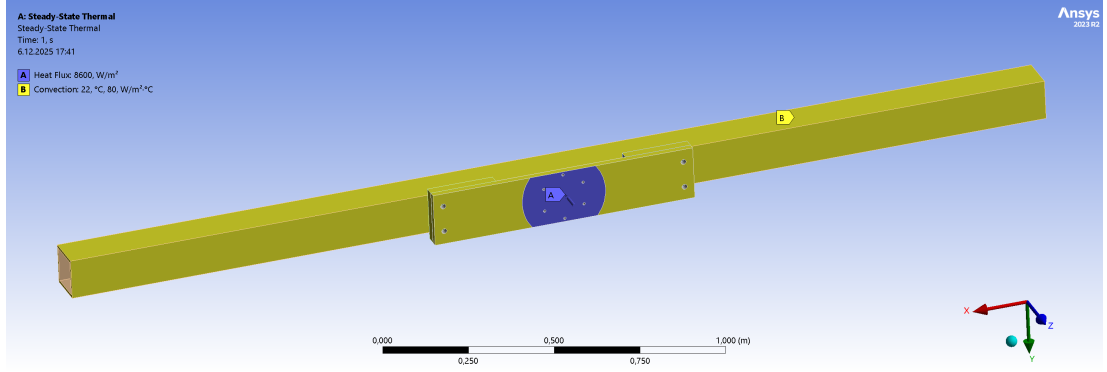
Motorun arka yüzeyinin dairesel alanı, motor gövde çapı $D = 0,257 \text{ m}$ kullanılarak hesaplanmıştır.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \approx 0,052 \text{ m}^2 \quad (2.16)$$

Isı akısı bu verilere göre hesaplanmıştır.

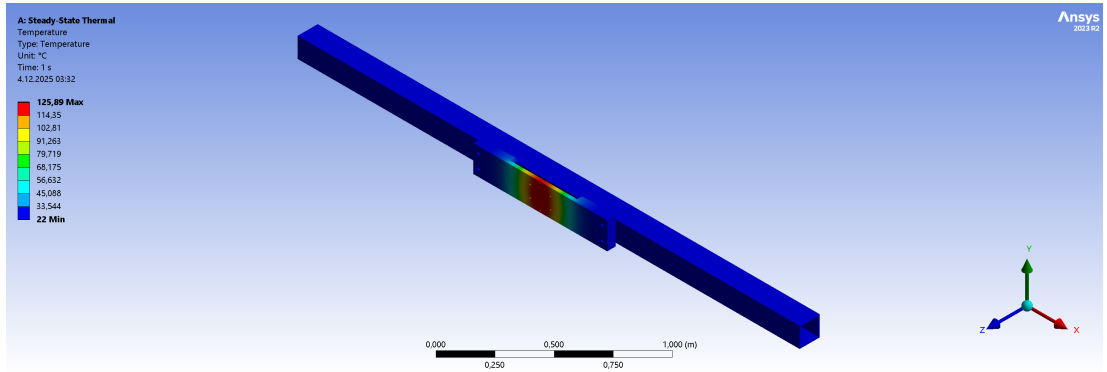
$$q'' = \frac{Q}{A} \approx \frac{450}{0,052} \simeq 8,65 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \quad (2.17)$$

Bu değer, sonlu elemanlar analizinde motor braketinin ilgili yüzeyine sabit ısı akısı sınır şartı olarak uygulanmıştır. Önceki bölümde hesaplanan konveksiyon katsayısı $h = 80 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ korunmuş ve profil ile braketin dış yüzeylerine $T_\infty = 22 ^\circ\text{C}$ ortam sıcaklığında zorlanmış taşınım sınır şartı tanımlanmıştır. Böylece motorun yüzeye aktardığı ısı akısı ile hava arasındaki ısı alışverişinin birlikte etkilediği sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Hesaplanan ısı akısı motor braketinde motorun kesit kısmına uygulanmıştır.



Şekil 2.40: Motorun çalışma sırasında profile aktardığı kayıp gücün, motor–profil temas yüzeyine ısı akısı olarak uygulanmasıyla oluşturulan termal analiz sınır şartları.

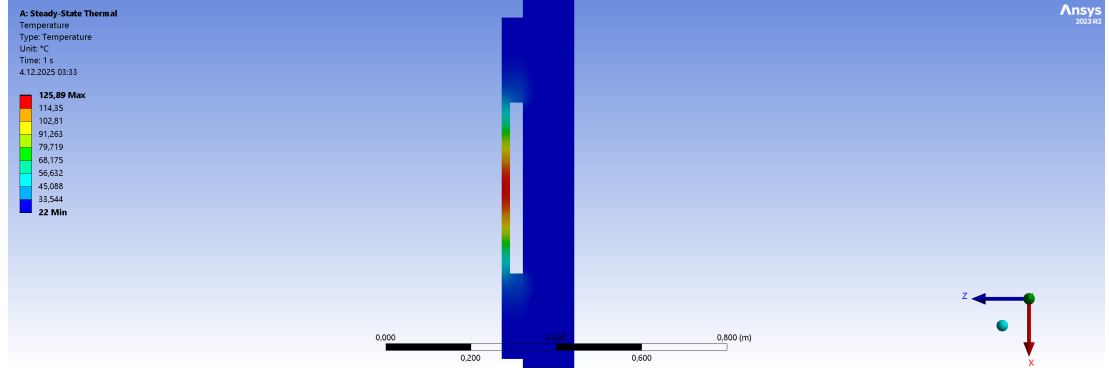
Analiz sonuçlarına göre braket bölgesinde oluşan maksimum sıcaklık yaklaşık 126 °C seviyelerine ulaşmıştır. Isı, braket yüzeyinde hızla azalmış ve profil yüzeyine ulaşmadan ortam sıcaklığı olan 22 °C’ye kısa mesafe içinde düşmüştür. Bu sonuç, ısıyın yapının diğer bölgelerine anlamlı bir şekilde yayılmadığını ve termal etkinin büyük ölçüde motor braketini çevresinde lokalize olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.41: Isı akısı uygulanması sonucu braket ve profil üzerindeki sıcaklık dağılımının genel görünümü.

Sonuçlara göre ısı akısı yaklaşımının daha gerçekçi bir sıcaklık dağılımı sunduğu

görülmektedir. Motor çalışması sırasında yalnızca braket bölgesinde sıcaklığın kritik seviyelere yaklaştığı görülmektedir. Ancak profil boyunca sıcaklığın oldukça güvenli olduğu net bir şekilde doğrulanmıştır.



Şekil 2.42: Isı akısı uygulanması durumunda braket ve profil üzerindeki sıcaklık dağılımının üst görünüşü.

2.3.3. Test Sisteminin Modal Analizi

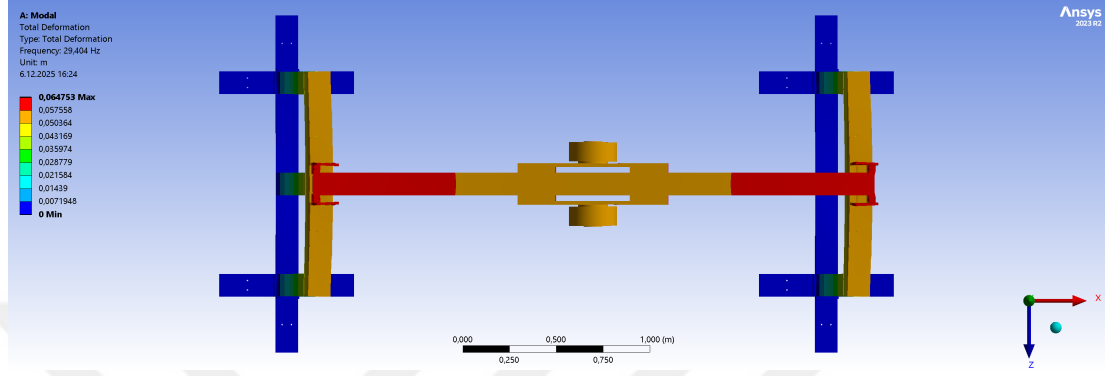
Bu bölümde, itki testi standının maruz kalabileceği titreşim modları incelenmiştir. Test standının yapısal elemanlarının doğal frekanslarının motor çalışma frekanslarıyla etkileşime girerek rezonansa girip girmeyeceği değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, ilk altı moda ait doğal frekanslar ve şekil modları incelenmiştir.

Çizelge 2.7: İlk altı moda ilişkin doğal frekans değerleri.

Mode	Frekans [Hz]
1	29,404
2	36,45
3	42,244
4	63,246
5	79,876
6	120,76

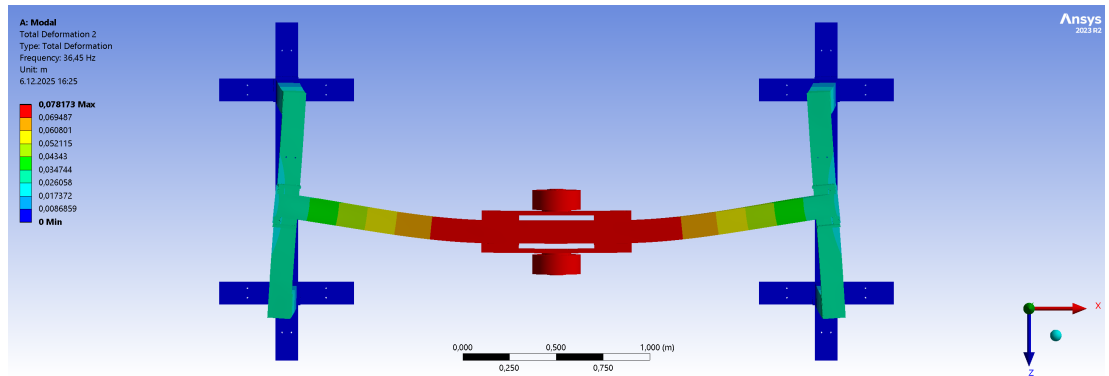
2.3.3.1. Modal Analiz Sonuçları

Modal analiz sonuçları incelendiğinde, ilk altı doğal frekansın 29,4 Hz ile 120,7 Hz aralığında olduğu görülmektedir. Birinci mod, yapının yatay yönde global bir salınım hareketi yaptığını göstermektedir.



Şekil 2.43: Yapının 1. mod şekli. ($f = 29,404$ Hz)

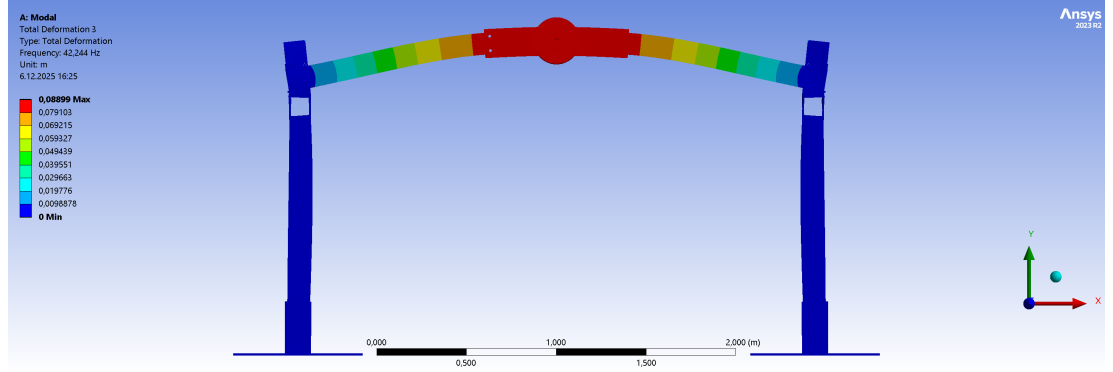
İkinci modda motoru taşıyan orta profilin Z eksenine doğrultusunda ileri-geri salındığı gözlenmektedir.



Şekil 2.44: Yapının 2. mod şekli. ($f = 36,45$ Hz)

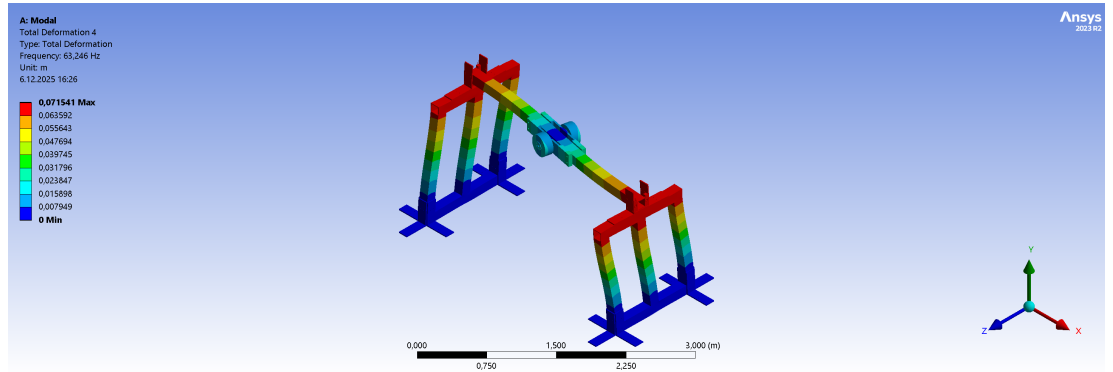
Üçüncü mod ise üst profilin simetrik bir şekilde düşey yönde yukarı-aşağı hareket ettiği ikinci dereceden bir global eğilme modu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu üç mod, yapının

düşük frekanslı genel davranışını temsil etmekte olup, destek ayaklarının bu modlarda minimum deplasmana sahip olduğu görülmüştür.



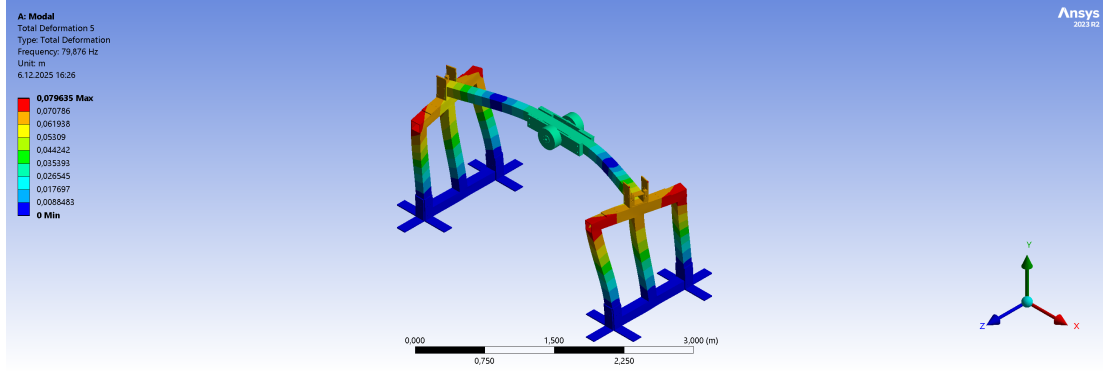
Şekil 2.45: Yapının 3. mod şekli. ($f = 42,244$ Hz)

Dördüncü moddan itibaren sistemde daha karmaşık eğilme ve burulma modları ortaya çıkmaktadır. Dördüncü mod yapının hafif torsiyonel hareketler yaptığı karma bir mod şeklinde gerçekleşmiştir.



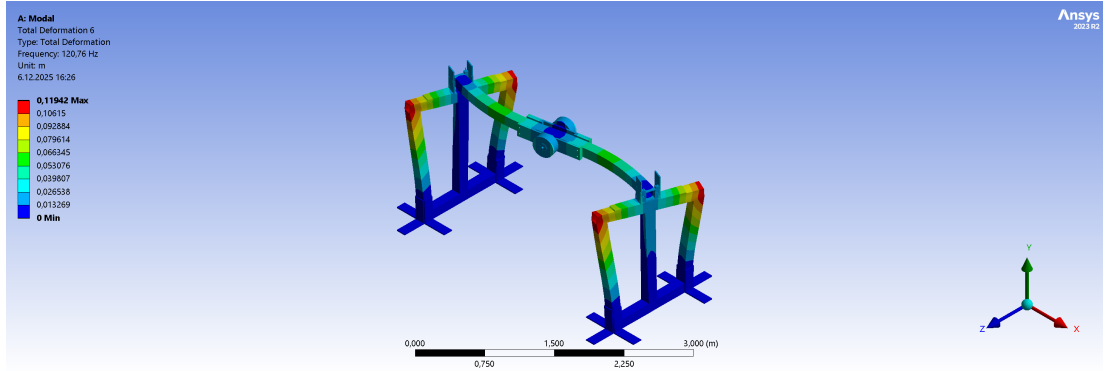
Şekil 2.46: Yapının 4. mod şekli. ($f = 63,246$ Hz)

Beşinci modda yan çerçeve ayaklarının belirgin bir torsiyonel hareket sergilediği görülmektedir.



Şekil 2.47: Yapının 5. mod şekli. ($f = 79,876$ Hz)

Altıncı modda burulma ve eğilme bileşenleri birlikte görülmekte olup, yüksek frekanslı karma bir mod karakteri oluşturulmuştur. Motorun çalışma frekansının 18,43–39,67 Hz aralığında olduğu görülmektedir. Yapının ilk üç doğal frekansının (29,4 Hz, 36,45 Hz ve 42,24 Hz) bu çalışma aralığına oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Özellikle 29–37 Hz aralığında motor frekansları ile yapının ilk iki modu neredeyse çakışmaktadır. Bu durum, motor çalışırken yapıda rezonans oluşma potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir. Üst modlarda ise harmonik etkiler nedeniyle yaklaşık 80 Hz ve 120 Hz civarında rezonans riski ortaya çıkabilmektedir.



Şekil 2.48: Yapının 6. mod şekli. ($f = 120,76$ Hz)

Çizelge 2.8: Motor çalışma frekansları ile modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve olası rezonans bölgelerinin değerlendirilmesi.

Throttle (%)	RPM	Frekans	Modal Analiz Sonuçları
30	1106	18,43	29,404
35	1249	20,82	36,45
40	1395	23,25	42,244
45	1528	25,47	63,246
50	1652	27,54	79,876
55	1769	29,48	120,76
60	1873	31,22	
65	1957	32,62	
70	2052	34,2	
75	2127	35,45	
80	2206	36,77	
85	2272	37,87	
90	2348	39,13	
95	2360	39,33	
100	2380	39,67	

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek güçlü elektrik motorlarının kullanımı son zamanlarda önemli ölçüde artmıştır. Bu nedenle, özellikle insansız hava araçlarının gelişmesi ve yaygınlaşması sebebiyle bu motorların yer testlerinin yapılması son derece önemli hale gelmiştir. Gebze Teknik Üniversitesi tarafından yürütülen bu çalışmada, yüksek taşıma kapasitesine sahip, güvenli ve rijit bir itki testi standı tasarlanmış ve analizleri yapılmıştır. Statik analiz sonuçlarına göre yapının maksimum itki kuvveti altında oldukça güvenli bir noktada olduğu görülmektedir. Ayrıca deformasyonların çok düşük olduğu ve sistemin güvenilir olduğu görülmüştür (Bkz. Şekil 2.23–2.26). Tepki kuvvetlerinin incelendiği bölümde, kuvvet dağılımının sağ ve sol destekler arasında simetrik ve dengeli olduğu doğrulanmıştır (Bkz. Şekil 2.28–2.29). Ayrıca reaksiyon kuvvetleri, toplam kuvvet ve bileşen kuvvetlerinin yer aldığı analiz sonuçları, sistemin kuvvet dengesi açısından beklenen davranışı göstermediğini, kuvvetin uygulandığı bölge ile sensör yüzeyleri aynı doğrultuda olmaması sebebiyle eksantriklikten kaynaklı moment oluşumu görülmüştür fakat kuvvet ve moment dengesi sağlanmıştır. (Bkz. Çizelge 2.3–2.6). Termal analizler, motorun çalışma sıcaklığının yapı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Sıcaklığın en kötü şartlarda yapılan analizde motor braket bölgesinde kaldığı ve profil boyunca çok az iletildiği görülmektedir. Daha gerçekçi bir yaklaşım olan ısı akısı uygulamasında sıcaklığın yalnızca braket yüzeyinde olduğu ve braketin dışına dahi yayılmadığı hızlı bir soğuma gerçekleştiği görülmektedir. (Bkz. Şekil 2.34–2.42). Bu durum, yapısal dayanım açısından önemli bir risk teşkil etmemektedir. Modal analiz sonuçları incelenirken ilk altı adet açısız doğal frekanslar dikkate alınmıştır. Doğal frekansların motor çalışma frekanslarına yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple özellikle düşük frekans modlarına dikkat edilmesi gerektiği belirtilmiştir. (Bkz. Çizelge 2.8). Fakat sistemin oldukça rijit olması sebebiyle herhangi bir rezonans pratik denemelerde beklenmemektedir. Fakat çalışma sırasında olası rezonans etkilerini azaltmak amacıyla test standının altına viskoelastik tabanlı bir rezonans sönümleyici plaka yerleştirilmesi önerilmektedir. Tasarımın oldukça rijit yapılmasının temel amacı, gelecekte daha yüksek itki sağlayan motorların aynı düzenekte test edilebilmesini sağlamaktır. Motor braketini değiştirilerek veya ara bağlantı elemanları eklenerek farklı motor tiplerinin test edilmesi mümkündür.

Bu sayede sistem, yalnızca MAD M90C60 EEE motoruna değil, geniş bir motor yelpazesine hizmet edebilecek modüler bir test platformu niteliği kazanmıştır. Test sisteminin imalatından sonra yapılacak motor testleri ile sanal bir veri kütüp hanesi oluşturulması önerilmektedir. GTÜ bünyesinde oluşturulacak sanal bir motor veri kütüphanesi hem akademik araştırmalar açısından hem de endüstriyel projeler için oldukça faydalı olacaktır. Ayrıca düzeneğe bir rüzgâr kanalı eklenerek motorun farklı hava şartları altındaki performansları da incelenebilir. Sonuç olarak, bu çalışma ile Gebze Teknik Üniversitesi; yüksek güçlü drone motorlarının itki, sıcaklık ve titreşim karakteristiklerini güvenli, hassas ve kontrollü bir ortamda test edebileceği dayanıklı, modüler ve bilimsel bir test altyapısına sahip olmuştur.



KAYNAKLAR

- [1] Doherty P., Rudol P., (2007), A uav search and rescue scenario with human body detection and geolocalization, in “Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence”, Springer, 1–13.
- [2] Goodrich K., Moore M., (2015), On-demand mobility (odm) technical pathway: enabling ease of use and safety, Technical report.
- [3] Herwerth C., Ofoma U., Wu C., Matsuyama S., Clark S., (2006), Development of a fuel cell powered uav for environmental research, in “44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit”, 237.
- [4] Islami Z., Hartono F., (2019), Development of small propeller test bench system, in “IOP Conference Series: Materials Science and Engineering”, Vol. 645, IOP Publishing, 012017.
- [5] Robotics T., (n.d.), “Thrust stand systems”, <https://www.tytorobotics.com>, [Eriřim: 13.10.2025].
- [6] Tech W., (n.d.), “Ly-70 kgf thrust stand information page”, <https://www.wingflyingtech.com/motor-test/ly-70kgf-thrust-stand.html>, [Eriřim: 13.10.2025].
- [7] Samuel A., Lin Y., (2015), Airvolt aircraft electric propulsion test stand, in “51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference”, 4108.
- [8] Aviation M., (n.d.), “Propulsion and test equipment”, <https://minimalaviation.com/>, [Eriřim: 13.10.2025].
- [9] Becerra R. C., Ehsani M., (2002), “High-speed torque control of brushless permanent magnet motors”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 35(3), 402–406.
- [10] Karthikeyan J., Sekaran R. D., (2011), “Current control of brushless dc motor based on a common dc signal for space operated vehicles”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 33(10), 1721–1727.
- [11] Gabriel D. L., Meyer J., Du Plessis F., (2011), Brushless dc motor characterisation and selection for a fixed wing uav, in “IEEE Africon’11”, IEEE, 1–6.
- [12] Yeadon W. H., Yeadon A. W., (2001), “Handbook of Small Electric Motors”, McGraw-Hill.
- [13] Frick C., (2018), “Brushless dc motors introduction for next-generation missile actuation systems outline”, Analog Devices, Inc.
- [14] RC U., (n.d.), “M90c60 eee manned drone motor technical page”, <https://www.unmannedrc.com/products/m90c60-eee-manned-drone-motor?variant=43741111025861>, [Eriřim: 13.10.2025].
- [15] Components M., (n.d.), “Motor technical specifications”, <https://mad-motor.com/>, [Eriřim: 21.10.2025].

- [16] Europe Z., (n.d.), “L6e series load cell technical datasheet”, <https://www.zemic.com/product/16e>, [Eriřim: 21.10.2025].
- [17] Motors N. A., (n.d.), “Brushless motor catalog”, <https://acim.nidec.com/tr-TR/motors/>, [Eriřim: 21.10.2025].
- [18] Group A., (n.d.), “Industrial electrical equipment overview”, <https://www.apator.com/en/>, [Eriřim: 21.10.2025].
- [19] Cook R. D., et al. (2007), “Concepts and applications of finite element analysis”, John wiley & sons.



ÖZGEÇMİŞ

Recep Özbek, Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümündeki lisans eğitimini 2022 yılında tamamlamıştır. Bitirme tezi olarak “*Effect of Radius on Deep Drawing Stress Analysis*” çalışmasını gerçekleştirmiş ve bu çalışma bir konferansta yayımlanmıştır. Mezuniyetinin ardından Mekanik Tasarım Mühendisi olarak Keramik Makine firmasında altı ay görev yapmış, daha sonra Gebze Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır. Halen yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.



TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

Özbek R., Kandemir İ., (2025), “Yüksek Güçlü İHA İtki Sistemleri İçin İtki Test Standı Tasarımı”, GTÜ 9. Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu.

