İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İTÜ-HTH TORK TÜP TASARIMI VE TESTLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muzaffer KUZUBAŞOĞLU

Disiplinlerarası Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Disiplinlerarası Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İTÜ-HTH TORK TÜP TASARIMI VE TESTLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muzaffer KUZUBAŞOĞLU
(511101120)

Disiplinlerarası Uçak ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Disiplinlerarası Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Alim Rüstem Aslan

HAZİRAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511101120 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Muzaffer KUZUBAŞOĞLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"İTÜ-HTH TORK TÜPÜ TASARIMI VE TESTLERİ "** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Alim Rüstem ASLAN** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Kenan Yüce ŞANLITÜRK** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Halit Süleyman TÜRKMEN .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **4 Mayıs 2012**

Savunma Tarihi : **14 Haziran 2012**

Aileme ve Burcu Arman'a,

ÖNSÖZ

Öncelikle hayatım boyunca yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.
Yüksek lisans öğrenimim boyunca bana yol gösteren, tez danışmanın sayın Prof. Dr. Alim Rüstem Aslan'a özellikle teşekkür ederim. Tez çalışmam sırasında yorumlarını esirgemeyen sayın Prof. Dr. Halit Temel Belek'e de desteğinden dolayı teşekkür ederim.
Tez çalışmalarım boyunca desteğini esirgemeyen, başta Hasan İbaçoğlu olmak üzere; tüm ROTAM çalışanlarına ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.
Üniversite boyunca, her zaman yanımda olan ve hiç bir zaman desteğini esirgemeyen sevgili Burcu Arman'a da sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2012

Muzaffer Kuzubaşoğlu
(Uçak Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Literatür Çalışması 2
1.2 Tezin Amacı 5
2. İTÜ HAFİF TİCARİ HELİKOPTER (İTÜ-HTH) **7**
2.1 Genel Bilgiler 8
2.1.1 Genel görünüm 8
2.1.2 Kabin içi konfigürasyonu 9
2.1.3 Performans 9
2.1.4 Menzil 10
2.1.5 Ağırlık bilgileri 11
2.2 Helikopter Bileşenleri ve Sistemleri 11
2.2.1 Gövde 11
2.2.2 İniş takımı 13
2.2.3 Uçuş kontrol sistemi 13
2.2.4 İtki sistemi 14
2.2.5 Güç aktarma sistemi 14
2.2.6 Yakıt sistemi 15
2.2.7 Elektrik sistemi 16
2.2.8 Ana rotor sistemi 16
3. TORK TÜP TASARIMI **19**
3.1 Tasarım İsterleri 19
3.2 Tork Tüp Parçaları 19
3.2.1 Pala kök mili 19
3.2.2 Boru giriş parçası 20
3.2.3 Tork boruları 22
3.2.4 Boru ayakları 23
3.2.5 Esnek kaplinler 23
3.2.6 Pala kesit parçası 24
4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ **25**
4.1 Sonlu Elemanlar Modeli 25
4.2 Malzeme Özellikleri 28
4.3 Sonlu Elemanlar Sınır Şartları Ve Kuvvetler 29

4.3.1 Sınır şartları 29
4.3.2 Kuvvetler 30
4.4 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları 31
4.5 Değerlendirme 34
5. ÜRETİM VE MONTAJ 35
5.1 Maliyet ve Üretim 35
5.2 Montaj 36
6. TESTLER 39
6.1 Deney Sistemleri 39
6.2 Deney Düzeneği 40
6.3 Standart Uçuş Şartları Testleri 44
6.3.1 Sınır şartlarının belirlenmesi testleri 44
6.3.2 Çelik kiriş boyutlandırması ve testi 44
6.3.3 Yorulma testleri 47
6.3.4 Merkezkaç testi 51
6.4 Ekstrem Uçuş Şartları Testleri 55
6.4.1 Çelik kiriş boyutlandırma 55
6.4.2 Statik testler 56
6.4.3 Yorulma testi 57
6.5 Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi 58
7. SONUÇLAR 61
KAYNAKLAR 63
EKLER 65
ÖZGEÇMİŞ 71

KISALTMALAR

DPT	**:** Devlet Planlama Teşkilatı
HTH	**:** Hafif Ticari Helikopter
Mpa	**:** Megapascal
ROTAM	**:** Rotorlu Hava Araçları Mükemmeliyet Merkezi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: İTÜ-HTH kullanım alanları..... 7
Çizelge 2.2: İTÜ-HTH özgörev profili açıklamaları ve tanımları 9
Çizelge 2.3: İTÜ-HTH genel ağırlıklar 11
Çizelge 3.1: Farklı uçuş şartlarında pala üzerine etkiyen aerodinamik momentler ve palanın hücum açısı değişimi 19
Çizelge 4.1: Malzeme özellikleri 28
Çizelge 5.1: Tork tüp malzeme bilgisi ve miktarı.....35
Çizelge 6.1: Deney sonuçları 47
Çizelge 6.2: Yorulma testi sırasından alınan maksimum gerinim değerleri 1 50
Çizelge 6.3: Yorulma testi sırasından alınan maksimum gerinim değerleri 2 51
Çizelge 6.4: Kuvvetin etkisiyle oluşan maksimum yer değiştirme.....53
Çizelge 6.5: Merkezkaç testleri sırasında oluşan maksimum gerinim ve gerilme.....54
Çizelge 6.6: Statik testlerde tork tüp üzerinde oluşan gerinim değerleri (hücum açısını 12° artırmak için yapılan testler) 57
Çizelge 6.7: Statik testlerde tork tüp üzerinde oluşan gerinim değerleri (hücum açısını 2° azaltmak için yapılan testler) 57

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Helikopter ve alt sistemleri 1
Şekil 1.2: Helikopterin yana ve öne doğru hareketi 2
Şekil 1.3: Helikopterlerde kuyruk rotoru 2
Şekil 1.4: Tork tüpü ilk modeli 3
Şekil 1.5: Tork tüp ön tasarımı [6] 3
Şekil 1.6: Tek borulu tork tüp tasarımı [7] 4
Şekil 1.7: Kompozit tork tüp tasarımı [9] 4
Şekil 1.8: Menteşesiz rotor tork tüp tasarımı [8] 4
Şekil 1.9: Bossler kaplini [10] 5
Şekil 1.10: Hanson modeli esnek bağlantı bölgesi 5
Şekil 2.1: İTÜ-HTH genel görünümü [12] 8
Şekil 2.2: İTÜ-HTH [12] 8
Şekil 2.3: İTÜ-HTH kabin içi konfigürasyonu 9
Şekil 2.4: İTÜ-HTH özgörev profili 9
Şekil 2.5: İTÜ-HTH menzil-ağırlıklar ilişkisi 10
Şekil 2.6: İTÜ-HTH maksimum menzil 10
Şekil 2.7: İTÜ-HTH genel gövde yapısı 12
Şekil 2.8: İTÜ-HTH kuyruk konisi 12
Şekil 2.9: İTÜ-HTH iniş takımları 13
Şekil 2.10: İTÜ-HTH uçuş kontrol sistemi 13
Şekil 2.11: İTÜ-HTH uçuş hidrolik sistemi 14
Şekil 2.12: İTÜ-HTH Arrius 2T motoru 14
Şekil 2.13: İTÜ-HTH transmisyon sistemi ve çevrim oranları 15
Şekil 2.14: İTÜ-HTH yakıt sistemi görünümü 15
Şekil 2.15: İTÜ-HTH ana rotor göbeği 17
Şekil 2.16: Ana rotor palası 18
Şekil 2.17: İTÜ-HTH yalpa çemberi ve tork tüp bağlantısı 18
Şekil 3.1: GE 17 C 20
Şekil 3.2: : Boru giriş parçası ve kesit görünümü 20
Şekil 3.3: Pala kök mili 21
Şekil 3.4: Tork tüp $(-+15°)$ 21
Şekil 3.5: Ana rotor göbeği üzerinde tork tüp görünümü 21
Şekil 3.6: Tork boruları 22
Şekil 3.7: Tork borusu ve adaptör parçası kesit görünümü 22
Şekil 3.8: Boru ayakları ve boru içi burç görünümü 22
Şekil 3.9: Boru ayakları 23
Şekil 3.10: Esnek kaplinler ve pala kesit parçası 23
Şekil 4.1: C3D4 [16] 25
Şekil 4.2: B31 [16] 25

Şekil 4.3: R3D4 [16] 26
Şekil 4.4: C3D8R [16] 26
Şekil 4.5: Sonlu elemanlar modeli 26
Şekil 4.6: Sonlu elemanlar modeli (yakın görünüm) 27
Şekil 4.7: Beam model ve sonlu elemanlar modeli bağlantısı 27
Şekil 4.8: Cıvata modellemesi 28
Şekil 4.9: Boru ucu burçsuz ve burçlu 28
Şekil 4.10: Boru giriş parçası sınır şartı 29
Şekil 4.11: Beam sınır şartı 29
Şekil 4.12: Ön yükleme kuvvetleri 30
Şekil 4.13: Kontrol kuvveti 31
Şekil 4.14: Beam modeli açısal dönme sonucu 31
Şekil 4.15: Tork tüp analiz sonucu (maksimum gerilme:235 mpa) 32
Şekil 4.16: Boru giriş parçası analiz sonucu (maksimum gerilme:138 mpa) 32
Şekil 4.17: Tork boruları analiz sonucu (maksimum gerilme:198 mpa) 32
Şekil 4.18: Tork boruları analiz sonucu (yakın görünüm) 33
Şekil 4.19: Boru adaptörleri analiz sonucu (maksimum gerilme 48 mpa) 33
Şekil 4.20: Boru ayakları analiz sonucu (maksimum gerilme: 235 mpa) 33
Şekil 5.1: Tork tüp montaj (alttan ve üstten görünüm) 36
Şekil 5.2: Pala kesit parçası ve esnek kaplinler yakın görünüm 36
Şekil 5.3: Boru giriş parçası ve pala giriş mili yakından görünüm 37
Şekil 6.1: MTS test cihazı 39
Şekil 6.2: Straingage ölçümü şematik gösterim 40
Şekil 6.3: Veri toplama sistemi (data acquisition system) 40
Şekil 6.4: Tork tüpü yorulma testi deney düzeneği- Mts bağlantısı 41
Şekil 6.5: Tork tüpü yorulma testi deney düzeneği- Çelik yay bağlantısı 41
Şekil 6.6: Merkezkaç testi deney düzeneği 42
Şekil 6.7: Straingage 1-Straingage 28-Straingage 29 42
Şekil 6.8: Straingage 35-Straingage 45 42
Şekil 6.9: Straingage 27 43
Şekil 6.10: Straingage 25 43
Şekil 6.11: Straingage 5 43
Şekil 6.12: Çelik kiriş mukavemet hesabı 45
Şekil 6.13: Test düzeneği ve çelik kiriş 46
Şekil 6.14: Kuvvet(N)/Yer Değiştirme (mm) Değerleri 46
Şekil 6.15: Hıza bağlı olarak yer değiştirmenin değişimi 47
Şekil 6.16: 100000 Çevrim sonrası alınan straingage ölçüm sonuçları 48
Şekil 6.17: 250000 Çevrim sonrası alınan straingage ölçüm sonuçları 48
Şekil 6.18: 480000 Çevrim sonrası alınan straingage ölçüm sonuçları 49
Şekil 6.19: 720000 Çevrim sonrası alınan straingage ölçüm sonuçları 49
Şekil 6.20: 970000 Çevrim sonrası alınan straingage ölçüm sonuçları 49
Şekil 6.21: 1500000 Çevrim sonrası alınan straingage ölçüm sonuçları 50
Şekil 6.22: Zamana bağlı kuvvetin değişimi 52
Şekil 6.23: Kuvvet etkisi altında oluşan test sisteminde yer değiştirme miktarı 53
Şekil 6.24: Deney 1-zamana bağlı gerinim değerleri 53
Şekil 6.25: Statik testlerde zamana bağlı olarak kuvvetin değişimi (hucum açısını 12° artırmak için yapılan testler) 56
Şekil 6.26: Ekstrem uçuş şartları - zamana bağlı olarak kuvvetin değişimi 58
Şekil 6.27: Test sonrası: Tork tüpde oluşan hasarlar 59

Şekil 6.28: Test sonrası: Boru adaptörü yakından görünüm.....60
Şekil 6.29: Boru giriş parçası –Tasarım geliştirme.....60
Şekil A.1: 0-100000 Çevrim arası kuvvetin değişimi.....66
Şekil A.2: 100000-250000 Çevrim arası kuvvetin değişimi.....66
Şekil A.3: 250000-480000 Çevrim arası kuvvetin değişimi.....67
Şekil A.4: 480000-620000 Çevrim arası kuvvetin değişimi.....67
Şekil A.5: 620000-720000 Çevrim arası kuvvetin değişimi.....68
Şekil A.6: 720000-970000 Çevrim arası kuvvetin değişimi.....68
Şekil A.7: 970000-1500000 Çevrim arası kuvvetin değişimi.....69

İTÜ-HTH TORK TÜP TASARIMI VE TESTLERİ

ÖZET

Bu çalışmada İTÜ Hafif Ticari Helikopterinin tork tüpü yapılması amaçlanmıştır. Helikopterlerde bulunan ve daha önce İTÜ-ROTAM'da tasarımı ve testleri yapılmış tork tüpleri incelenmiştir.

İTÜ-HTH'ı hakkında genel bilgiler verilmiştir. İTÜ-HTH, altı yolcu ,iki pilot kapasiteli tek motorlu helikopterdir. İTÜ-HTH'ın en önemli özellikleri güvenirliği, kullanım kolaylığı ,düşük ses seviyesi, maliyetidir.Yataksız hub sistemine ve kompozit palalara sahip olması, yüksek Anadolu platosunda yüksek irtifa görevlerini rahatlıkla yerine getirebilecek olması , düşük ana rotor dönüş devrinin sonucu olarak düşük uç hızına ve düşük ses seviyesine sahip olması İTU-HTH'ı rakiplerinden ayıran özelliklerdir.

İTÜ-HTH havada asılı kalma, düşük hızda seyir uçuşu, uzun mesafe uçuşu gibi farklı görevleri yapabilmek için tasarlanmıştır. İTÜ-HTH ticari uygulamalar, kamu uygulamaları ve kişisel uygulamalar için kullanılabilir.

İTÜ-HTH'ı oluşturan gövde, iniş takımı, uçuş kontrol sistemi ,itki sistemi, güç aktarma sistemi, yakıt sistemi, elektrik sistemi ve ana rotor sistemi hakkında bilgiler verilmiştir.

İTÜ-HTH'ın farklı uçuş şartları altında performans analizleri yapılmıştır. Tasarım isterleri doğrultusunda, farklı uçuş şartları altında çalışabilecek tork tüp tasarımı yapılmıştır.

Tork tüpünün sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modeline uygun sınır şartları ve kuvvetlerin uygulanması ile sonlu elemanlar analizleri tamamlanmıştır. Analiz sonucu oluşan gerilme değerleri incelenmiştir.

Tork tüpünün üretimi için teknik resimleri hazırlanmıştır. Pala kesiti üzerine tork tüp montajı yapılmıştır.

İTÜ-ROTAM'da bulunan yapı laboratuvarında MTS Test cihazı ve yardımcı ekipmanlar yardımıyla tork tüpünün yapısal testleri standart ve ekstrem uçuş şartları olmak üzere iki farklı durum için yapılmıştır.

Yapısal testlerde, aerodinamik momentleri modellemek amacıyla çelik kiriş kullanılmıştır. Standart uçuş şartları etkisinde, tork tüpünün 75 uçuş saati (1500000 çevrim) süresince kırıma uğramaması için yorulma testi yapılmıştır. Merkezkaç testi standart uçuş şartları yorulma testleri sonrasında yapılmıştır. Tork tüpe merkezkaç kuvvetin iki ve üç katı kuvvet uygulanarak çekilmiştir. Standart uçuş şartları testlerinde elde edilen gerilme değerleri, emniyetli akma gerilmesi değerinden düşüktür. Ekstrem uçuş şartlar etkisinde tork tüpün statik ve yorulma testleri

yapılmıştır. Ekstrem uçuş testlerinde elde edilen gerilme değerleri, emniyetli akma gerilmesi değerinden düşüktür.

Testler sırasında tork tüp üzerinde tasarım problemleri görülmüştür. Tasarım probleminin giderilmesi için tork tüp tasarımı üzerinde değişiklik yapılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda tasarımda yapılan değişikliklerden dolayı, yapılan sonlu elemanlar analizlerinin tekrarlanması gerekmektedir. Sonlu elemanlar analizlerin tamamlanması ile beraber, üretim için teknik resimler güncellenerek, üretim gerçekleştirilmelidir. Tork tüpünün üretiminin tamamlanması ile tasarım üzerinde yapılan değişikliklerden dolayı, bazı yapısal testler yapılarak tork tüp tasarımının güvenilirliği sağlanmalıdır.

DESIGN AND TEST OF ITU-HTH'S TORQUE TUBE

SUMMARY

The aim of the project is designing of a torque tube of the helicopter. Firstly, Torque tupe systems were investigated and also torque tubes that were tested in İTU-ROTAM, were examined.

General informations of ITU-LCH were explained. ITU-LCH is designed as a six passenger, two pilot, single engine conventional helicopter. Critical attritubes of the ITU-LCH have been identified as; safety,affordability,ease of use,lower noise levels, high reliability, low cost maintainability. Main features of the ITU-LCH have been identified as; high altitude operation capability over the high Anatolian Plateau, beaeringless hub system design, composite rotor blades, lower rotor RPM with lower tip speed and hence lower noise levels, lower disc loading with relatively lower power requirement.

ITU-LCH designed to be versatile in its ability to perform operations such as hover,low speed loiter and long range cruise for a variety of mission profiles such as; personal travel applications, commercial applications, corporate applications and government applications.

General informations about components and systems of ITU-LCH were given such as ; fuselage, landing gear, flight control system, propulsion system, transmission system,fuel system, electrical system and rotor system.

The performance analysis of ITU-LCH was taken in different flight conditions. As the criteria of torque tupe design, attact angle of rotor blade conversion and effect of aerodynamic moments on rotor blade were investigated due to the performance analysis. Torque tube angle change must be around ±15°. In spite of the results of design criteria, torque tube design that easily assemblied to the rotor blade were completed.

ITU-LCH has four blades so there are four torque tubes on rotor system. During the helicopter works, torque tubes should not crash.Torque tube included some parts such as; blade root shaft, tube input part, tubes, tubes' stand, flexible couplins and blade cutaway part.

Spherical bearing is on the blade root shaft. Displacements in the axial direction are restricted and freedom of the rotation provided.Tube input part and tubes transfer the force from swashplate mechanisim to blade. Tube input part rotates ±15°. Tubes' stand connects tubes and flexible couplings.

Flexible coupling, is rigid in the direction of torsion, is flexible in the direction of bending.Flexible couplings works as a multi-tier spring system.Blade cutaway part connects flexible couplings and blade. Material of blade root shaft, tube input part,

tubes, tubes stand is aluminium. Material of flexible couplings and blade cutaway part is steel.

Finite element model of torque tube were prepared. Appropriate boundary conditions of finite element model and finite element analysis with force application were carried out. The tensile strength values of torque tube parts obtained by finite element analysis lower than the safe yield stress value. Therefore, It can be said that structural design of torque tube is safe.

In order to produce torque tube , technical drawings were prepared. 5 ABM prepared list of the necessary materials for production of torque tube.After the production, torque tube were assemblied on the test blade.

Structural tests of torque tube were done by MTS tests equipment and other test equipments in ITU-ROTAM Structural Laboratory. Structural tests of torque tube were done for standard flight conditions and extreme flight conditions.

During the standard flight conditions tests, force applied to torque tube which is assembled to blade. Blade angle of attack changed because of force. Boundary conditions were seen during this test. Steel beam's dimension was calculated for the model of aerodynamic moment. Steel beam were tested in the MTS test equipments. Test results are as same as calculation of beam.

Strain gages were glued high stress value point on torque tube parts using finite element analysis. Torque tube should work during minimum 75 hours (1500000 cycles) on helicopters. Torque tube on test blade connected steel beam with shaft.

Helicopter rotation speed is 5.2 Hz. However, fatigue test were done at 1.5 Hz because of the MTS test equipments condition so fatigue test finished after 300 hours. Fatigue test were stopped after some cycles and strain values were evaluated using strain gages because any changing on torque tube parts have been seen. After the fatigue tests, stress values on the torque tube is lower than reliable yield stress.

After the fatigue test of standard flight conditions, centrifugal test were done. Axial force, is two and three times centrifugal force, applied to torque tube. After the tests, stress on the torque tube is low. Stress on the torque tube is lower than reliable yield stress.

For extreme flight conditions, steel beam's dimensions were calculated again for model of the high aerodynamic moments. Static structural tests and fatigue test were done. During the static tests, torque tube with high aerodynamic moments effects were done so strain values were read by strain gages. Fatigue tests continued during 2000 cycles. After the static tests and fatigue test, there is any broken part. After these tests, torque tube is reliable for flight

During the tests, design problems have been noticed. As a result of the force which applied to the torque tube, the angular variation of the torque pipe input part is not the same as angular variation of the angle of attack. However, angular variation of the angle of attack will be enough if the torque tube works like this.

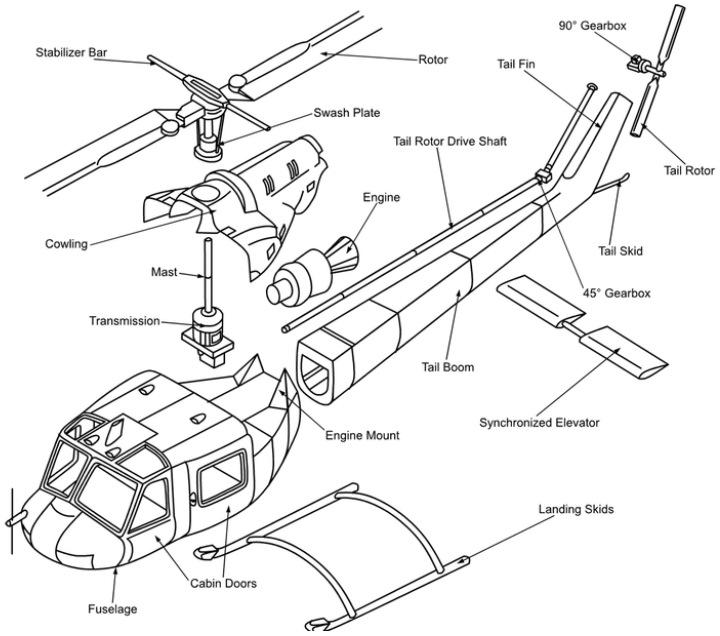
The other design problem is related to adaptor which is between torque tube's tubes and tube input part. Torsion occurred on the torque tube's tube because of the angular variation, Thus corrosion and erosion on the thread, is between tube input part and adaptor, occurred. Design of tube input part and adaptor changed because of design problem. The joint between this two parts is done shape instead of thread

Finally, the finite element analysis will be repeated for the new design of torque tube. If the analysis results are suitable, the technical drawings will be updated and the torque tube will be produced. After the production, new torque tube design will be tested because of the modifications.

1. GİRİŞ

Helikopterler dikey iniş-kalkış yapabilen ve havada asılı konumda durabilenşekil 1.1'de görülen hava araçlarıdır. Uçaklar sabit kanatlı hava araçları olarak kabul edilirler, helikopterler ise döner kanatlı hava araçlarıdır. Geleneksel helikopter konfigürasyonlarında en az iki adet pala bulunur[1].

Şekil 1.1'de görüldüğü üzere helikopterler çok sayıda bileşenden oluşmaktadır. Helikoptere gerekli enerjiyi sağlayan sistemler; motordan elde edilen gücü ana rotorlara ileten dişli kutusu ve güç aktarma sistemleri; rotor göbeği ve palaları; iniş takımları, helikopterin hareketini kontrol etmeyi sağlayan kontrol sistemi, helikopterlerin en önemli alt sistemleri olarak listelenebilir[2].



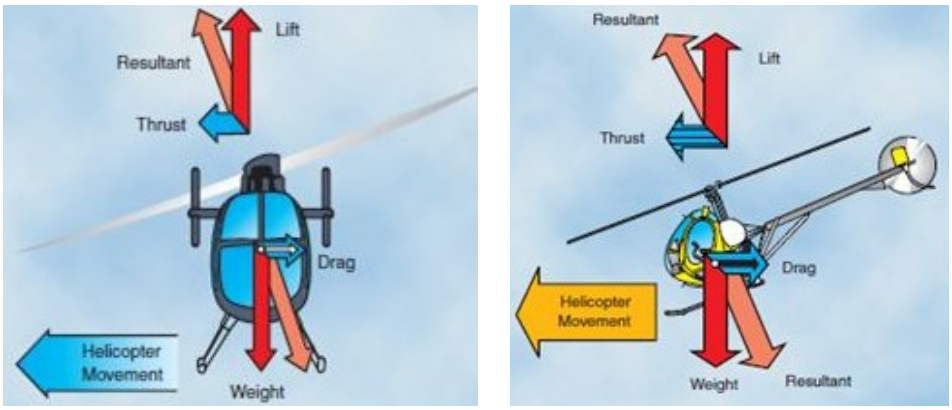
Şekil 1.1: Helikopter ve alt sistemleri

Helikopterin motoru tarafından döndürülen palaların, alt ve üst yüzeyleri arasında basınç farkı oluşur. Oluşan basınç farkı palalar üzerinde taşıma kuvvetini meydana getirir. Palalar üzerinde oluşan taşıma kuvveti;

- Helikopter ağırlığına eşit ise, helikopter havada asılır kalır,
- Helikopter ağırlığından az olması durumunda ise, helikopter iniş yapmaya başlar,

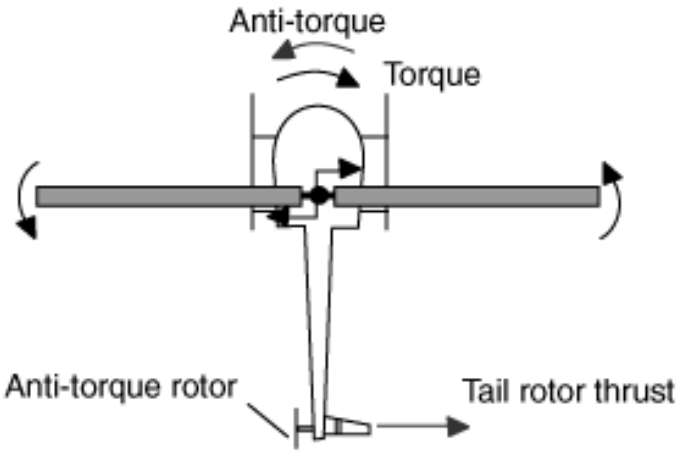
- Helikopter ağırlığından fazla olması durumunda ise, helikopter yükselmeye başlar[2].

Helikopter palalarının üzerinde oluşan taşıma kuvvetinin yönü değiştirildiğinde, Şekil 1.2'deki gibi helikopter ileri-geri ve sağa-sola doğru hareket eder[3].



Şekil 1.2: Helikopterin yana ve öne doğru hareketi

Palaların dönmesi sonucunda, helikopter gövdesi üzerinde oluşan moment, helikopter gövdesini de döndürmeye çalışır. Helikopter gövdesinin dönmesini engellemek için, helikopterin kuyruk kısmında şekil 1.3'te görülen kuyruk rotor sistemi kullanılır. Kuyruktaki pala, gövde üzerinde oluşan dönme momentini sönümler. Ayrıca kuyruk kontrol sistemi yardımıyla, sönümleme miktarı değiştirilerek, gövdenin dönüşü sağlanabilir[4].



Şekil 1.3: Helikopterlerde kuyruk rotoru

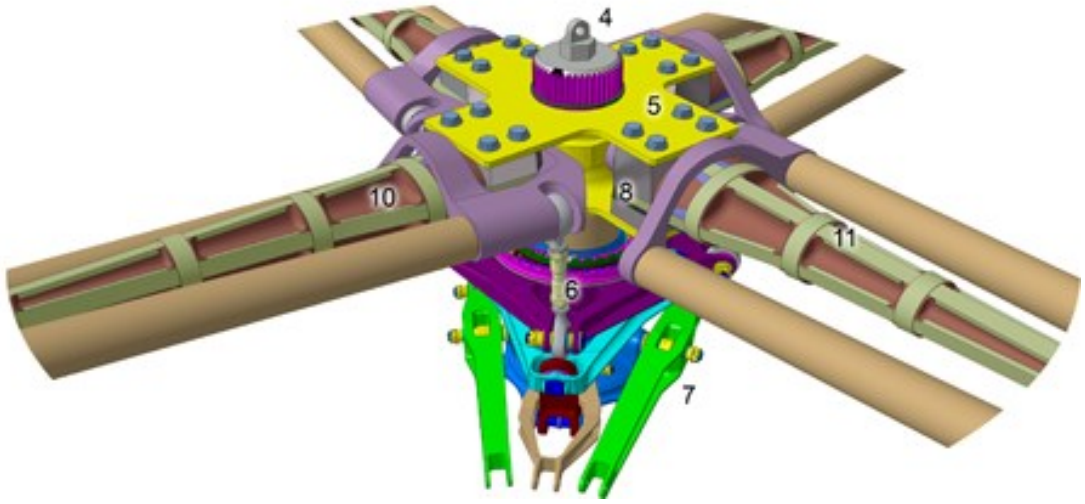
1.1 Literatür Çalışması

Hanson tarafından tasarımı yapılan İTÜ-HTH'a ait tork tüpünün, testler sonucunda kırıma uğraması sonucunda; yeni bir tork tüp tasarımı ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Hanson'ın tasarladığı tork tüpü Şekil 1.4'te gösterilmiştir[5].



Şekil 1.4: Tork tüpü ilk modeli

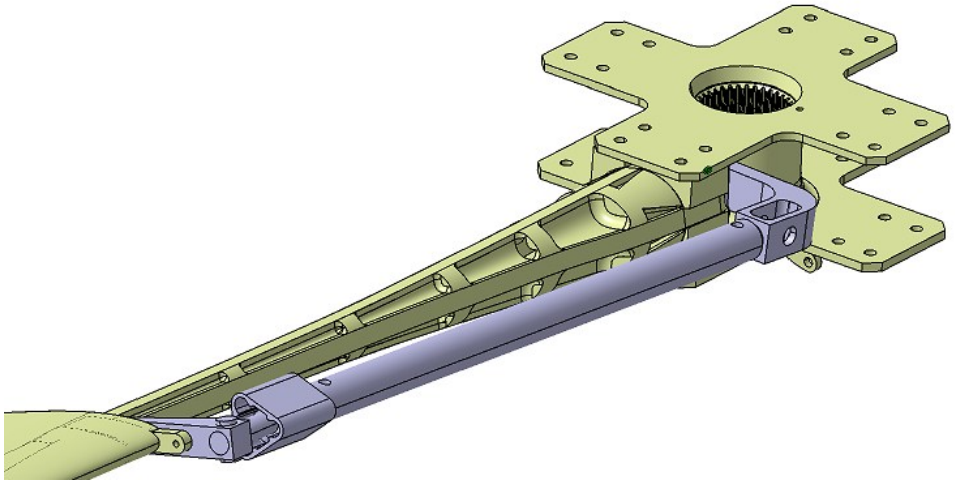
İbaçoğlu tarafından yapılan tork tüp tasarımında, ana rotor göbeği üzerinde tork tüplerinin birbirleri ile çarpışma durumu olmaması için , Şekil 1.5'teki tasarım yapılmıştır. Ancak bu tasarımın, ana rotor palaları üzerine takılması düşünülen lead-leg damper ile çakışması üzerine; tasarımdan vazgeçilmiştir[6].



Şekil 1.5: Tork tüp ön tasarımı [6]

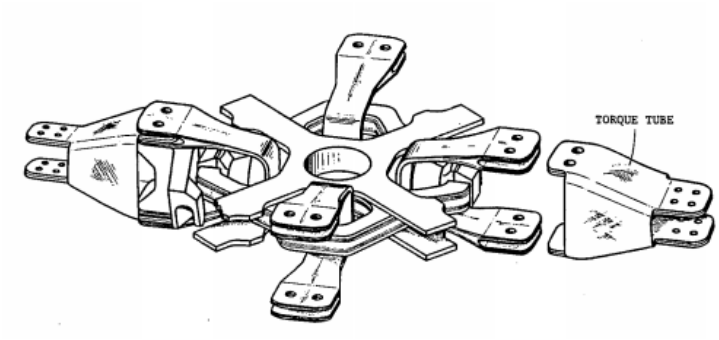
İbaçoğlu, Sevgen ve Emingil tarafından yapılan tork tüp tasarımında, Hanson modelinden farklı olarak yalpa çemberi üzerinden gelen kontrol inputu, tek bir boru yardımı ile ana rotor palasına iletilmektedir(Şekil 1.6). Ancak yapılan yapısal analizlerde parçaların malzemesinin çelik olması durumunda kırım olmamıştır. Tek

borulu tork tüpünün üretiminin tamamlanması ile ağırlığının aşırı fazla olduğu gözükmüştür ve bu tasarımdan vazgeçilmiştir[7].

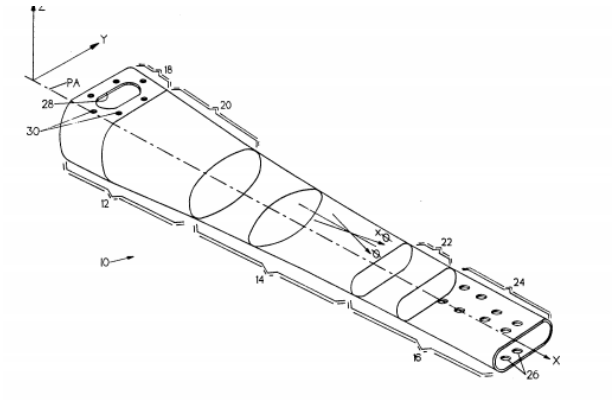


Şekil 1.6: Tek borulu tork tüp tasarımı[7]

Sibyan ve Brynes'ın tasarımlarında, ana rotor palasının pala kesitinin başladığı alt ve üst kısımda bağlantı bölgeleri mevcuttur (Şekil 1.7 ve Şekil 1.8). İTÜ-HTH'ın ana rotor palalarında bu şekilde bağlantı kısımı olmadığı için, bu tasarım uygun değildir[8][9].

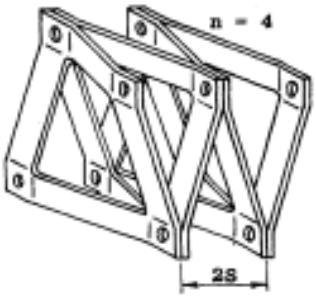


Şekil 1.7: Kompozit tork tüp tasarımı[9]



Şekil 1.8: Menteşesiz rotor tork tüp tasarımı[8]

Majeryak ve Bossler tarafından yapılan çalışmada, eğilme yönünde esnek, burulma yönünde ise rijit bir kaplin tasarımı yapılmıştır (Şekil 1.9). Bossler kaplininin şekli göz önüne alınarak, Şekil 1.10'deki görülen İTÜ-HTH ana rotor palası üzerinde bulunan esnek kaplin bağlantı kısmı küçük olmasına rağmen, daha büyük bir kaplin bağlantısı yapılabilecektir[10].



Şekil 1.9: Bossler kaplini [10]



Şekil 1.10: Hanson modeli esnek bağlantı bölgesi

Sevgen ve Emingil tarafından, tork tüp yapısal analizlerinde ana rotor palası beam olarak modellenmiştir. Ana rotor palasının bu şekilde modellenmesi, sonlu elemanlar analizinin süresini kısaltmaktadır[11].

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı;

- Helikopterlerde bulunan tork tüplerin incelenmesi
- İTÜ-ROTAM'da yapılan önceki tork tüp çalışmalarının incelenmesi
- İTÜ-HTH'a ait tork tüpün tasarımının yapılması,
- Tasarım sonrası, sonlu elemanlar metodu ile yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi ve tork tüpün güvenirliğinin sağlanması,
- Sonlu elemanlar analizlerinin tamamlanması ile üretim için teknik resimlerinin hazırlanması,

- Tork tüpün üretimi sonrasında, montaj çalışması yaparak, montajda karşılaşılan problemlerin gözlemlenmesi ve çözülmesi,
- Tork tüpe yapısal testleri gerçekleştirmek için uygun deney düzeneği tasarımının yapılması ve deneyler gerçekleştirilmesi,
- Deney sonuçların kapsamlı olarak değerlendirilmesi ve gerekiyorsa tork tüp sistemi tasarımında gerekli modifikasyonların yapılması
- Helikoptere takılmaya uygun şekilde tork tüp sistemlerinin üretilmesidir.

2. İTÜ HAFİF TİCARİ HELİKOPTER (İTÜ-HTH)

İTÜ Havacılık Araştırma Geliştirme ve Uygulama (HAGU) projesi 2002 yılından itibaren Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) , 2011 yılından itibaren ise Kalkınma Bakanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje kapsamında, İTÜ-Hafif Ticari Helikopteri prototipinin tamamlanması ve üretilmesi beklenmektedir.

Proje hedefleri;

- Rotorlu hava araçları mühendisliği alanında uygulama kabiliyetini geliştirmek,
- Yerel helikopter endüstrisine bilgi birikiminde katkıda bulunacak seviyede "bilgi ve teknoloji transferi" sağlamak,
- Yerel havacılık endüstrisinin kabiliyetleri üzerine veri tabanı geliştirmek,
- Daha gelişmiş teknolojilere doğru yerel endüstriye destek ve cesaret sağlamak,
- Maksimum yerel iştirak ile bir hafif ticari prototip helikopter tasarlamak ve imal etmek,
- "Rotorlu Hava Araçları Mükemmeliyet Merkezi" kurulmasını ve "Helikopter Tasarımı ve İmalatı" yüksek lisans programı geliştirilmesini sağlamak,
- "Rotorlu Hava Araçları Bileşenleri Test Merkezi" kurmaktır [12].

İTÜ-HTH çizelge 2.1 de görülen çok yönlü işlevleri gerçekleştirebilecek şekilde tasarlanmıştır[12].

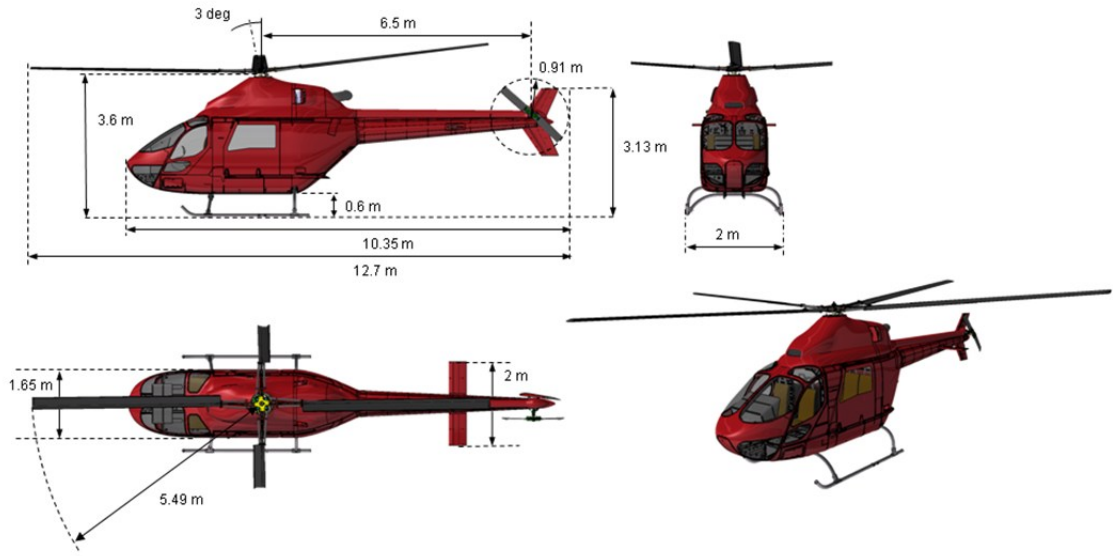
Çizelge 2.1: İTÜ-HTH kullanım alanları

Özel Seyahat Uygulamaları	Ticari Uygulamalar	Kamu uygulamaları
Şehiriçi taşımacılığı	Medya / trafik	Hava Ambülans
İş seyahatleri	Hava taksi	Kanun uygulamaları
Uzun mesafe taşımacılık	Tarım-çiftçilik-hayvancılık	Yangın / kurtarma
Eğlence, spor ve hobi	Keşif turları	Çok amaçlı askeri / keşif

2.1 Genel Bilgiler

2.1.1 Genel görünüm

İTÜ-HTH'ın genel görünümü ve genel boyutları Şekil 2.1'de gösterilmiştir. İTÜ-HTH'ın prototip üretimi büyük ölçüde tamamlanmış olup, Şekil 2.2'de gösterilmiştir[12].



Şekil 2.1: İTÜ-HTH genel görünümü (12)

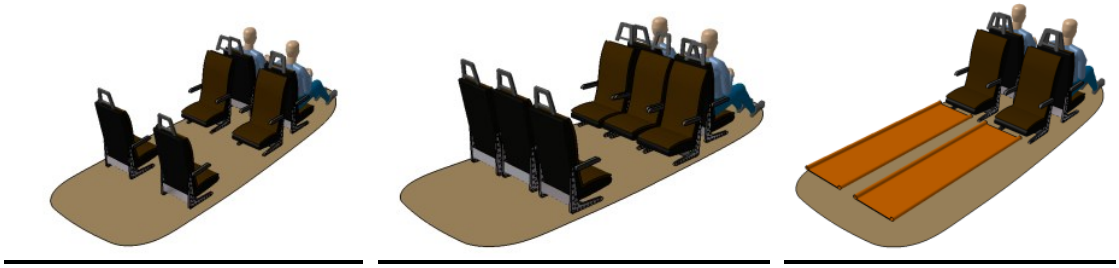


Şekil 2.2: İTÜ-HTH (12)

2.1.2 Kabin içi konfigürasyonu

İTÜ-HTH'ın farklı görevleri gerçekleştirebilmesi amacıyla Şekil 2.3'te görülen farklı kabin seçenekli tasarımlar yapılmıştır[12].

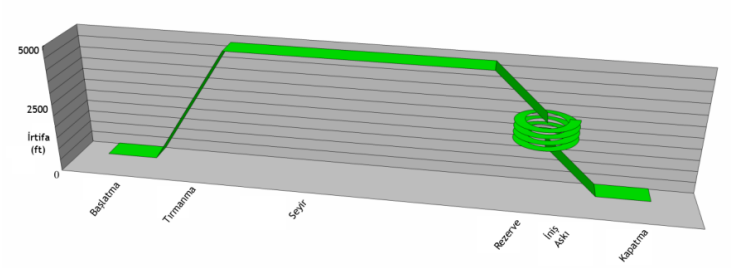
Vip Mekik Ambülans



Şekil 2.3: İTÜ-HTH kabin içi konfigürasyonu

2.1.3 Performans

İTÜ-HTH'a ait öz görev profili Şekil 2.4'de görülmektedir. Öz görev profilinin bölümleri Çizelge 2.2'de açıklanmıştır[12].



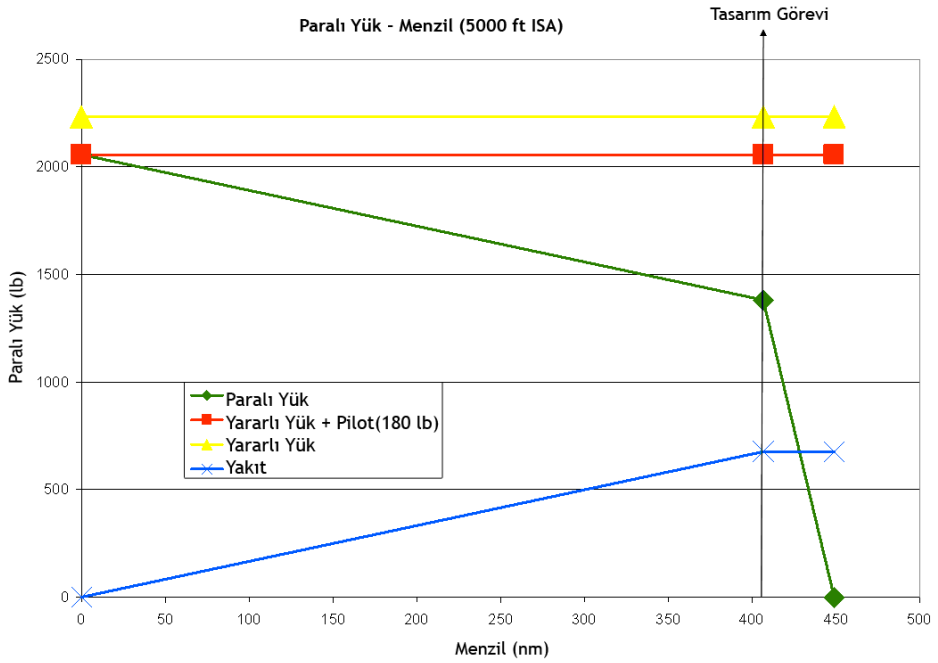
Şekil 2.4: İTÜ-HTH özgörev profili

Çizelge 2.2: İTÜ-HTH özgörev profili açıklamaları ve tanımları

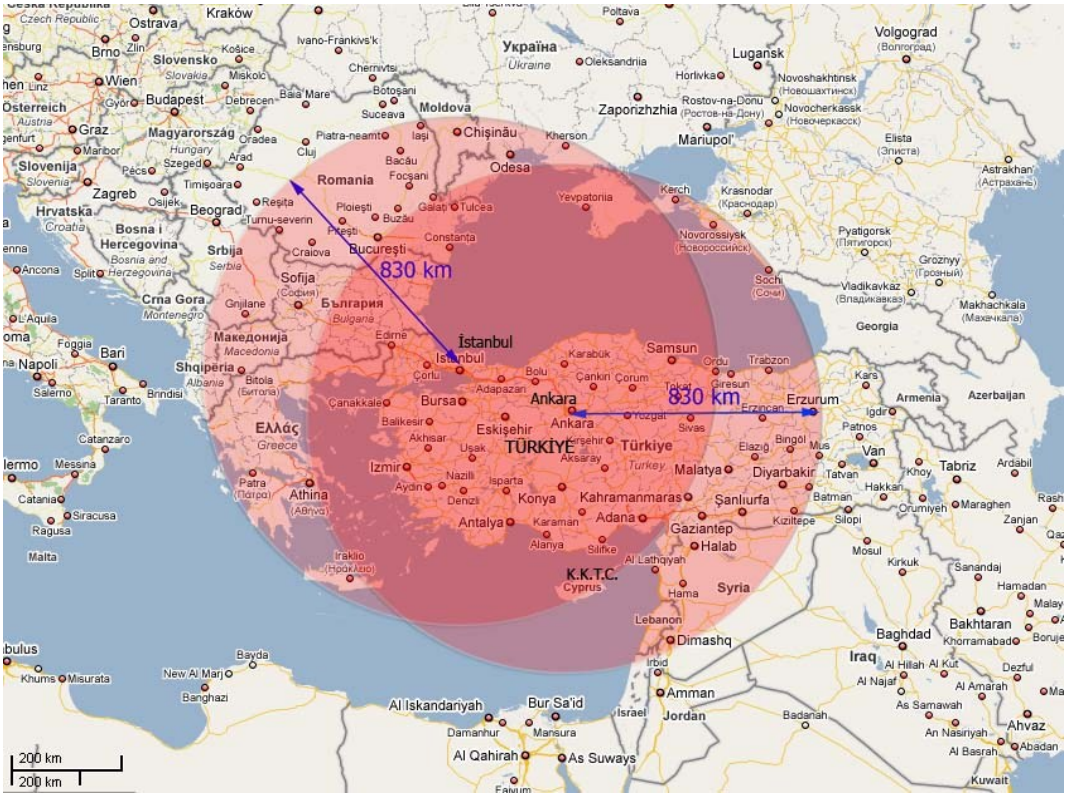
Bölüm	Açıklama	Özgörev Tanımı	Zaman	İrtifa	Sıcaklık
			(dakika)	(ft – m)	(^{0}F – ^{0}C)
1	Isınma - Taksi	Isınma	3	0	95 – 35
2	Kalkış / Askı	Kalkış - Tırmanma	2	2500 - 762	86 – 30
3	Seyir	Seyir	200	5000 - 1524	77 – 25
4	İniş / Askı	Alçalma	2	2500 - 762	86 – 30
5	Taksi / Kapatma	İniş - Kapatma	3	0	95 - 35

2.1.4 Menzil

Şekil 2.5'te İTÜ-HTH'ın menzilinin, ağırlığa bağlı olarak değişimi görülmektedir. Şekil 2.6'te ise İTÜ-HTH'ın maksimum menzili gösterilmiştir[12].



Şekil 2.5: İTÜ-HTH menzil-ağırlıklar ilişkisi



Şekil 2.6: İTÜ-HTH maksimum menzil

2.1.5 Ağırlık bilgileri

İTÜ-HTH yaklaşık 2000 kg ağırlığında bir sivil helikopterdir. İTÜ-HTH'a ait genel ağırlıklar Çizelge 2.3'te verilmiştir[12].

Çizelge 2.3: İTÜ-HTH genel ağırlıklar

Tanımlar	Ağırlık (N)
Boş Ağırlık	9908
Mürettebat	883
Yolcular	3531
Bagaj	2260
Kullanılabilir Yakıt	3302
Maksimum Kalkış Ağırlığı	19885

2.2 Helikopter Bileşenleri ve Sistemleri

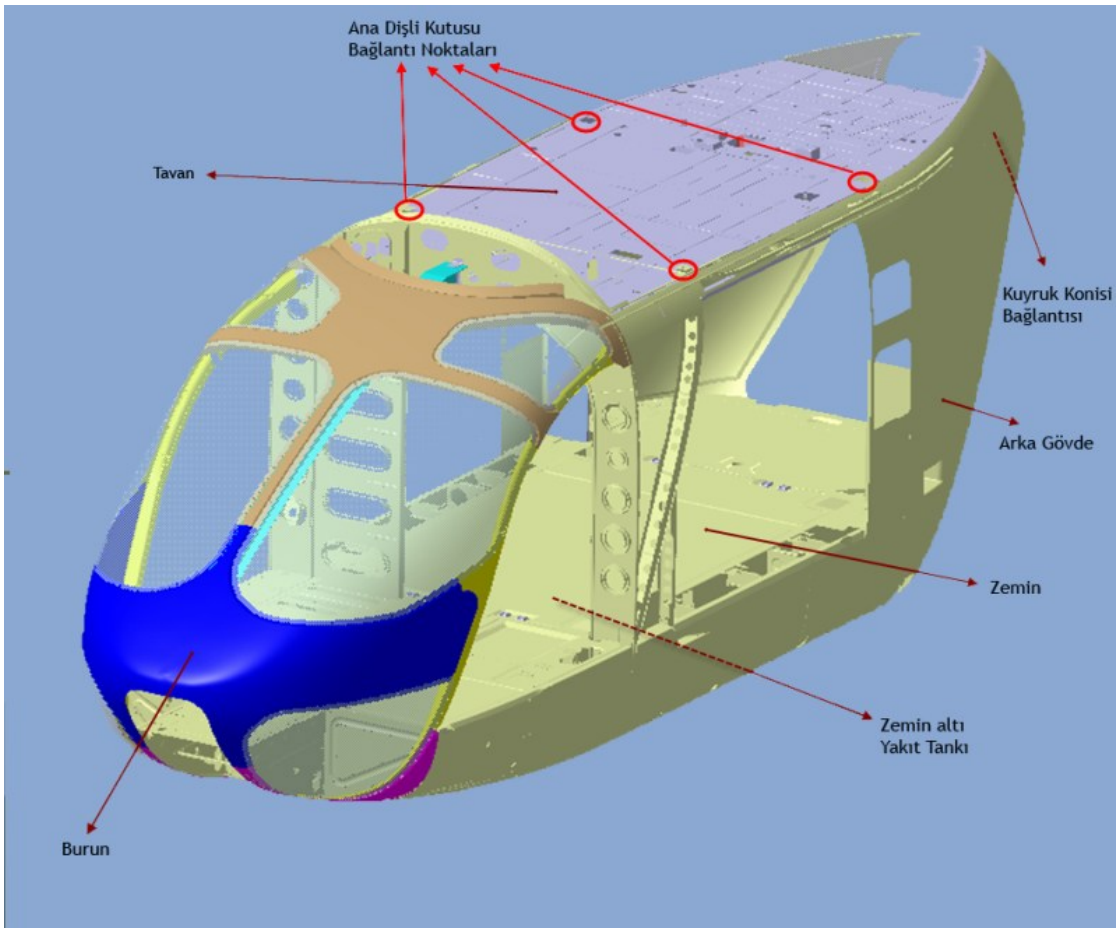
2.2.1 Gövde

Genel olarak, Şekil 2.7'da gösterilen gövde yapısı kiriş ve sac yapılarından oluşmaktadır. Bu yapısal elemanların birbirleriyle bağlantılarında perçinler yoğun olarak kullanılmış, bunun dışında önemli bağlantı noktalarında bağlantı elemanı olarak cıvatalar tercih edilmiştir.

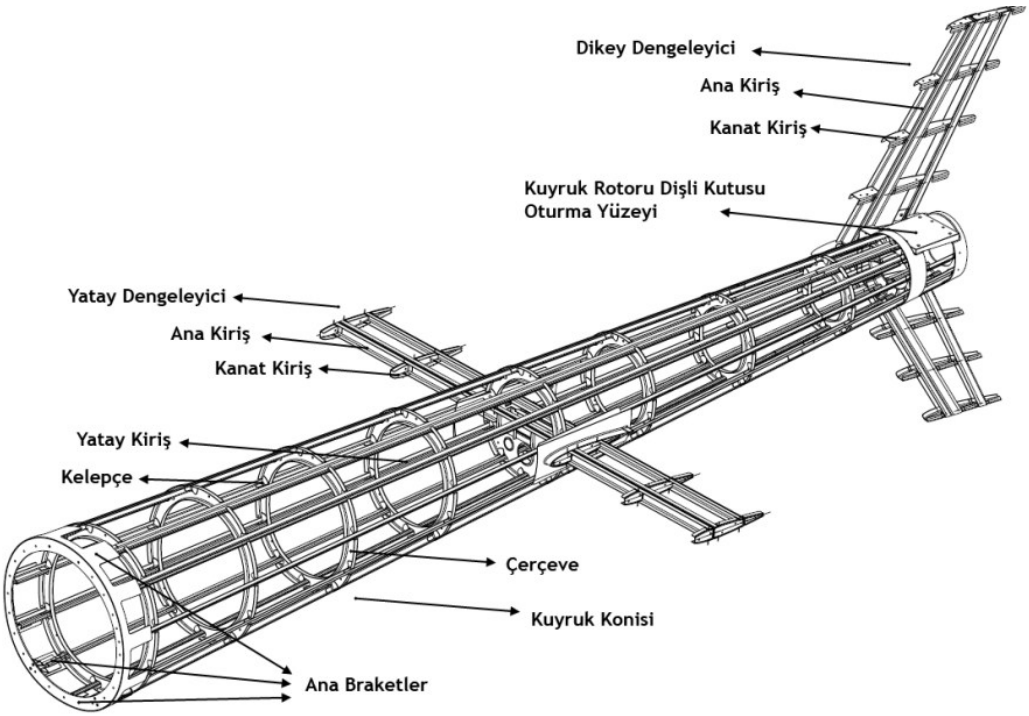
Helikopter gövdesi;

- Burun ve ön camlar
- Alt ve çekirdek gövde
- Üst ve arka gövde
- Kapılardan oluşmaktadır.

Gövdenin genel olarak büyük kısmında alüminyum alaşım malzeme kullanılmıştır. Arka gövdenin yan kısımları ile arka gövdenin kuyruk konisi bağlantı kısımlarında karbon fiber kompozit katmanları ile güçlendirme yapılmıştır[12].



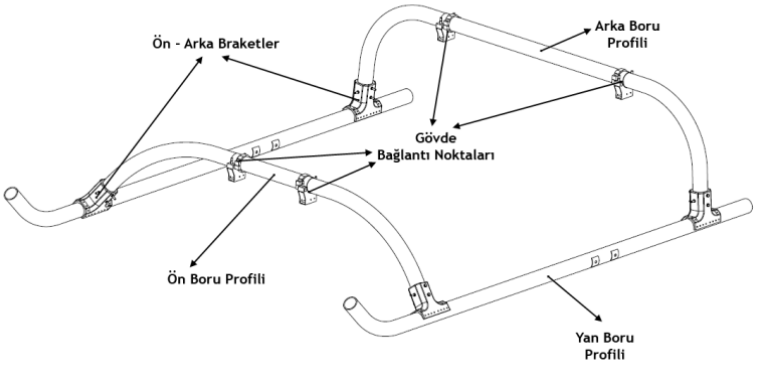
Şekil 2.7: İTÜ-HTH genel gövde yapısı



Şekil 2.8: İTÜ-HTH kuyruk konisi

2.2.2 İniş takımı

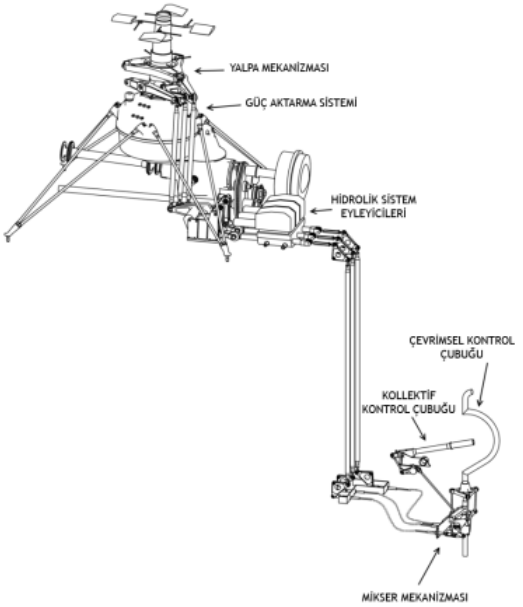
İTÜ-HTH helikopterinde iniş takımı olarak kızak tipi kullanılmaktadır(Şekil 2.9). Helikopterin kızaklarının malzemesi alüminyum alaşımlarıdır[12].



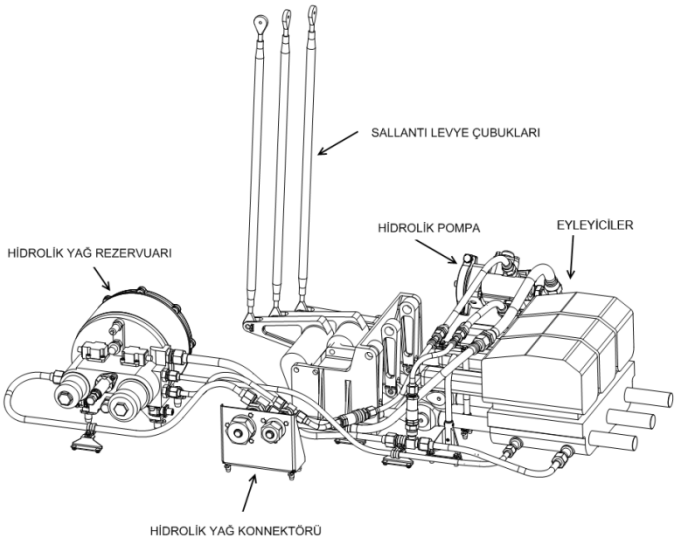
Şekil 2.9: İTÜ-HTH iniş takımları

2.2.3 Uçuş kontrol sistemi

Helikopterin uçuş sırasında kontrolü için kollektif çubuk, çevrimsel çubuk ve pedallar kullanılır. Kollektif çubuk ve çevrimsel çubuk, pala düzleminin açısının değiştirilmesini, pedallar ise kuyruk rotorunun itkisinin değiştirilmesini sağlar. Mikser mekanizması, kabinin alt kısmında yer alır ve yalpa mekanizması ile girişini birbirinden ayırır. Hidrolik sistem yardımıyla yalpa mekanizmasının ihtiyacı olan kuvvet sağlanır. Yalpa mekanizmasından ise tork tüp sistemi yardımıyla helikopter palalarının hücum açısı değiştirilir. Uçuş kontrol sistemi ve hidrolik sistemi Şekil 2.10 ve Şekil 2.11'da gösterilmiştir[12].



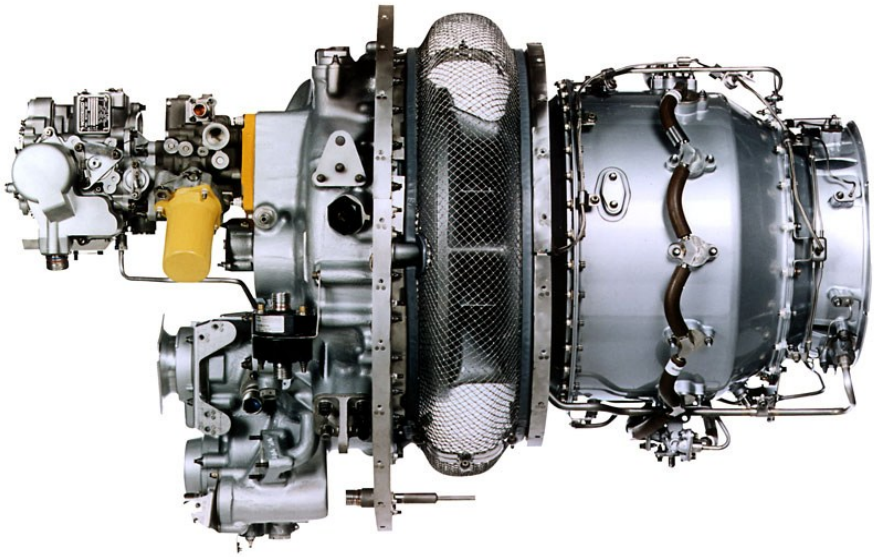
Şekil 2.10: İTÜ-HTH uçuş kontrol sistemi



Şekil 2.11: İTÜ-HTH uçuş hidrolik sistemi

2.2.4 İtki sistemi

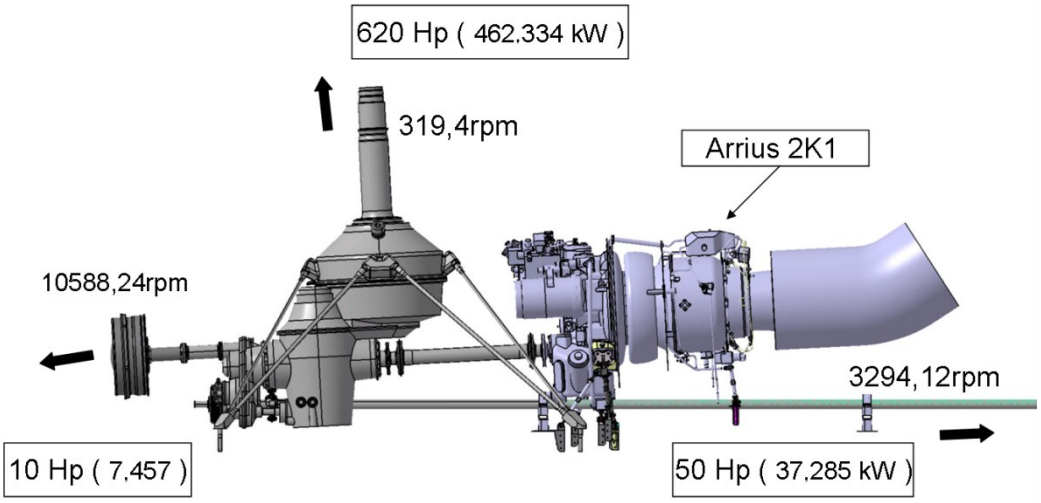
İTÜ-HTH tek motorlu bir helikopterdir. İTÜ-HTH'ın güç gereksinimi Şekil 2.12'de gösterilen Turbomeca Arrius 2T gaz türbin motoru tarafından sağlanmaktadır. Helikopter üzerinde motor, transmisyon sisteminin arkasına yerleştirilmiştir[12].



Şekil 2.12: İTÜ-HTH Arrius 2T motoru

2.2.5 Güç aktarma sistemi

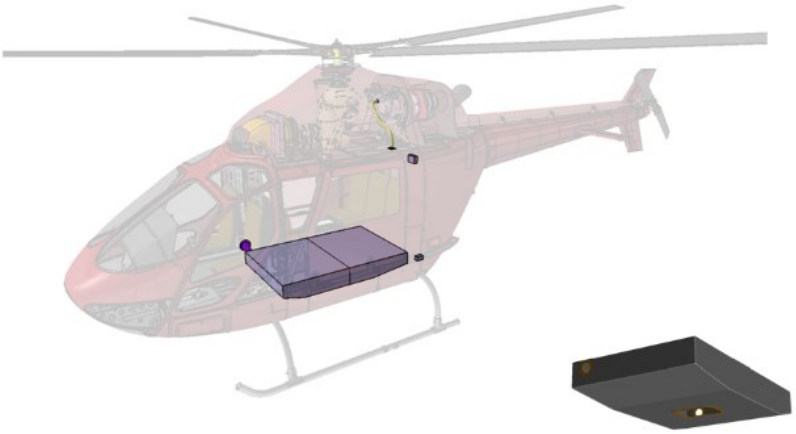
İTÜ-HTH'a ait güç aktarma sistemi Şekil 2.13'de görülmektedir. Ana transmisyon sisteminin ana rotor palası, kuyruk palası ve fan için üç ayrı çıkışı bulunmaktadır. Motordan çekilen güç Şekil 2.13'de gösterilen şekilde dağıtılmaktadır[12].



Şekil 2.13: İTÜ-HTH transmisyon sistemi ve çevrim oranları

2.2.6 Yakıt sistemi

İTÜ-HTH yakıt sistemi Şekil 2.14'te gösterilmiştir[12].



Şekil 2.14: İTÜ-HTH yakıt sistemi görünümü

Yakıt sistemi aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır;

- Yakıt tankı:
  - Tek hücreli esnek torba tipli
  - Çarpmalara dayanıklı
  - Kurşungeçirmezlik özelliği olmayan
  - Yaklaşık yakıt hacmi 417 litre
  - Kabin döşemesi altında, köpük yapılarla destekli karbon kompozit bölme içerisine yerleşik şekilde
- Yakıt tankı havalandırması ve drenajları

- Yakıt ikmal girişi (yerçekimi etkisi ile doluma izin veren)
- Santrifüj yakıt pompası
- Yakıt boruları
- Yakıt seviye probları
- Yakıt kapama vanası
- Konektörler, kablolar, vanalar, kaplamalar [13].

2.2.7 Elektrik sistemi

Elektrik sistemi, helikopter sistemlerinin çalıştırılması ve kontrolü için ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin üretimini ve dağıtımını gerçekleştirir. İTÜ-HTH sistemleri 28VDC elektrik ile çalışır ve AC elektrik gücüne ihtiyaç duymaz[12]. Elektrik sistemi aşağıdaki alt sistemleri kapsamaktadır:

- Elektrik gücü üretim alt sistemi
- Elektrik gücü dağıtım alt sistemi

2.2.7.1 Elektrik gücü üretim alt sistemi

Güç üretim alt sistemi elektrikli ekipmanın elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. İTÜ-HTH'nin güç ihtiyacı üç kaynaktan sağlanmaktadır:

- Harici güç
- Batarya gücü
- Jeneratör gücü [12].

2.2.7.2 Güç dağıtım sistemi

DC güç dağıtım sistemi jeneratör tarafından üretilen elektrik gücünü ana bara ve acil durum barası yoluyla cihazlara iletir[12].

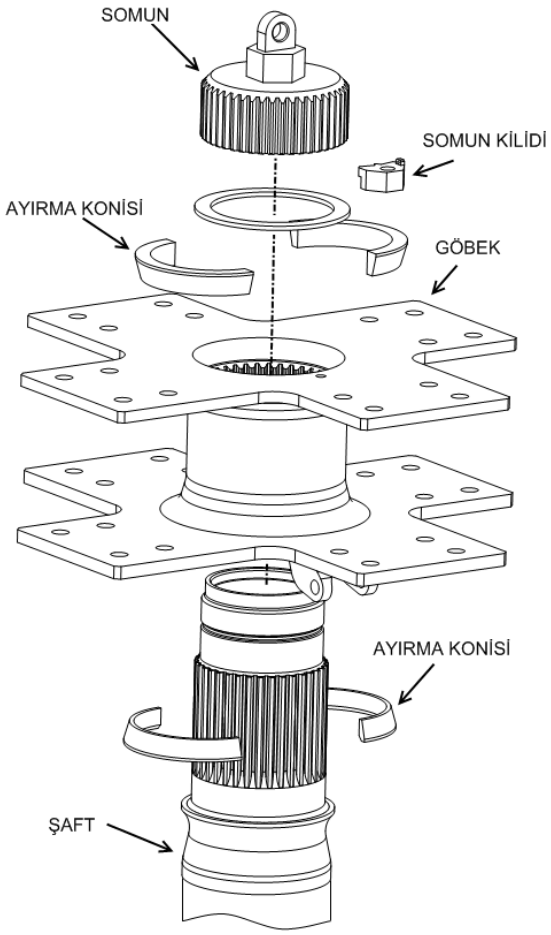
2.2.8 Ana rotor sistemi

Ana rotor, helikopterin hareketi için gerekli itki ve taşımayı üretir. Ayrıca helikopterin kontrolü için bu kuvvetlerin yönünü değiştirir. Ana rotor sistemi, yalpa çemberi, rotor göbeği, palalar ve tork tüplerden oluşur. Transmisyona bağlı olan ana mil, palaların ve tork tüplerin kendisine bağlandığı rotor göbeğini tutar. Yalpa çemberi mekanizması şaftı çevreler ve pilottan gelen kontrol girdilerini tork tüpler vasıtasıyla palalara iletir[12].

2.2.8.3 Ana rotor göbeği

Şekil 2.15'te detaylı olarak gösterilen ana rotor göbeği, talaşlı imalat yöntemiyle üretilmiş alüminyum bir parçadır ve palalar göbeğe 4'er adet cıvata ile bağlanır.

Göbek, şaft üzerinde iki ayırma konisi çiftiyle merkezlenir ve sistemin tepesinde bulunan somun belirli bir torkta sıkılır. Bu somun bir kilit vasıtasıyla, gevşemeye karşı emniyete alınır[12].



Şekil 2.15: İTÜ-HTH ana rotor göbeği

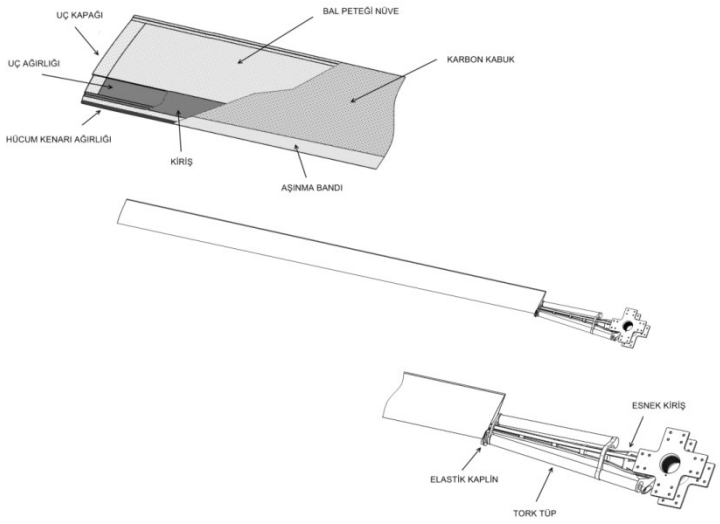
2.2.8.4 Pala

Şekil 2.16'te detaylı olarak gösterilen ana rotor palaları, esnek bir kiriş ve gecikme düzleminde nispeten rijit pala kesitinden oluşur. Rotorun yataksız tertibi bütün menteşeleri ve yatakları ortadan kaldırmaktadır. İki adet tork tüp, göbekte pivotlanır ve palaya elastik bir kaplinle bağlanır[12].

Dört adet cam elyaf ve epoksiden imal edilmiş kiriş yapı pala boyunca uzanır ve kök ile uçtan dönerek, karşısında bulunan kirişle birleşir. Bu kirişler merkezkaç kuvvetten dolayı oluşan çekme kuvveti ile aerodinamik yükleme neticesinde oluşan eğilme momentlerini taşır. Pala içerisinde bulunan bal peteği yapı bu eğilme esnasında oluşan kesme kuvvetlerini alır[12].

Palanın kütle merkezi, hücum kenarında bulunan denge kütlesi ile veter boyunca yüzde 24'te konumlandırılmıştır. İyi bir "flare faktörü" elde etmek için, palaların

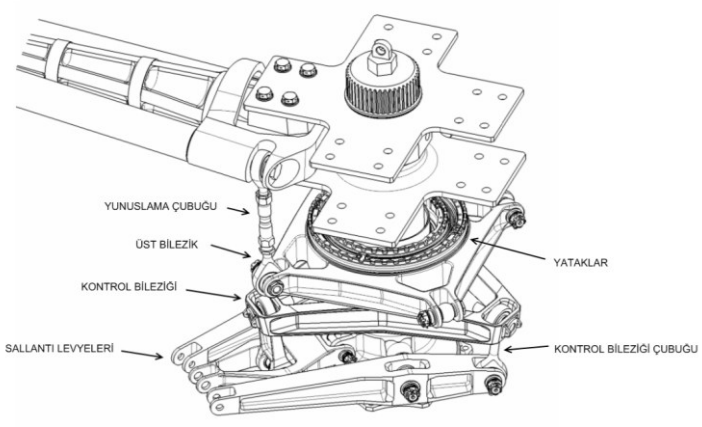
ucuna çelik uç ağırlıkları eklenmiştir. Palanın hücum kenarı, aşınmalara karşı özel koruyucu bir bantla kaplanmıştır[12].



Şekil 2.16: Ana rotor palası

2.2.8.5 Yalpa çemberi

Yalpa çemberi mekanizması, kontrol girdilerini dönmeyen sistemden, rotordaki dönen parçalara aktarır. Yalpa çemberinin eğikliği ve yüksekliği Şekil 2.17'da görüldüğü üzere destek motoruna bağlı üç adet çubuk tarafından belirlenir. Yalpa çemberinin yüksekliği müşterek kontrolü, eğimi ise çevrimsel kontrolü verir. Üst bilezik her bir tork tüpe birer çubukla bağlıdır. Göbekte bulunan 16 mm'lik pala kaçıklığı ve öne doğru 1.6 derecelik süpürme açısı, gerekli kontrol kuvveti ihtiyacını azaltır[12].



Şekil 2.17: İTÜ-HTH yalpa çemberi ve tork tüp bağlantısı

3. TORK TÜP TASARIMI

3.1 Tasarım İsterleri

İTÜ-HTH'ın Flightlab paket programı ile çeşitli uçuş durumları için yapılan performans analizleri sonucunda palanın açısal değişimleri ve pala üzerine etkiyen aerodinamik moment değerleri hesaplanmıştır ve Çizelge 3.1'de verilmiştir[14].

Çizelge 3.1: Farklı uçuş şartlarında pala üzerine etkiyen aerodinamik momentler ve palanın hücum açısı değişimi

Yükseklik	Uçuş Hızı	Aerodinamik Momentler				Toplam Açı	
		Pala 1	Pala 2	Pala 3	Pala 4	Maks.	Min.
[m]	[km/h]	[Nm]	[Nm]	[Nm]	[Nm]	[deg]	[deg]
27,432	0	-29,7224	-29,6484	-29,6454	-29,7195	2,57831	2,005352
1524	0	-26,8596	-26,7079	-26,5897	-26,7418	5,443099	4,870141
3048	0	-27,8027	-27,6524	-27,5357	-27,6859	8,938142	8,365184
27,432	222,24	-18,0998	-31,4665	-48,7798	-18,6774	9,625691	-1,26051
1524	222,24	-14,921	-29,9032	-59,4431	-62,8084	11,00079	-0,45837
3048	222,24	-13,2337	-27,9609	-35,6125	-18,7695	11,86023	-1,3178

Yapılan performans analizleri sonucunda normal uçuş şartlarında pala üzerine etkiyen maksimum aerodinamik moment 63 Nm'dir. Uçuş seyri boyunca palanın hücum açısı değişimi 12° ile -2° arasında olmaktadır.

Ayrıca helikopterin zorlu uçuş şartları için yapılmış olan performans analizinde pala üzerine etkiyen aerodinamik momentin 122 Nm olduğu görülmüştür.

Tork tüpünün, emniyetli şekilde çalışabilmesi için 15°'lik hücum açısı değişimine izin verecek şekilde tasarlanması gerekmektedir.

3.2 Tork Tüp Parçaları

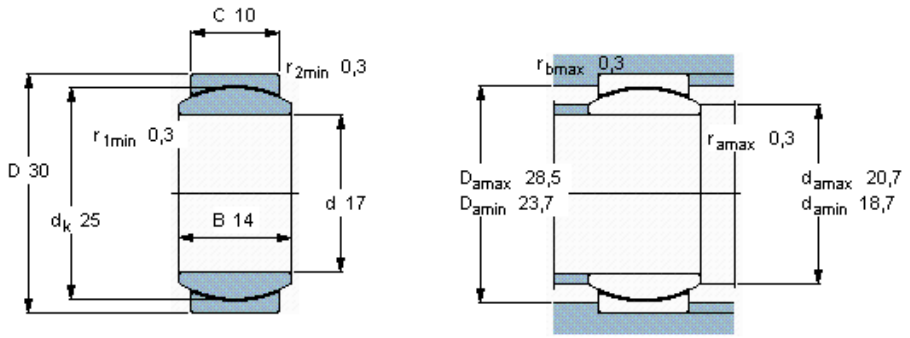
3.2.1 Pala kök mili

Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te görülen parça, tork tüpünün küresel mafsal ile palaya bağlantısında kullanılır.

Kök kısmında küresel mafsal kullanılarak, eksenel yönde yer değiştirmeler kısıtlanmış olup, burulma yönünde ise dönme serbestliği sağlanmıştır. Şekil 3.1'de görülen küresel mafsal olarak SKF GE 17 C seçilmiştir[15]. Küresel mafsalın bir

tarafı faturalı mile dayandırılarak, diğer tarafı ise mil üzerinde bulunan segman ile eksenel olarak hareketi kısıtlanmıştır(Şekil 3.2).

Principal dimensions				Angle of tilt	Basic load ratings dynamic	static	Mass	Designation
d	D	B	C	±	C	C_0		
mm				degrees	kN		kg	-
17	30	14	10	10	22,4	56	0,050	**GE 17 C**



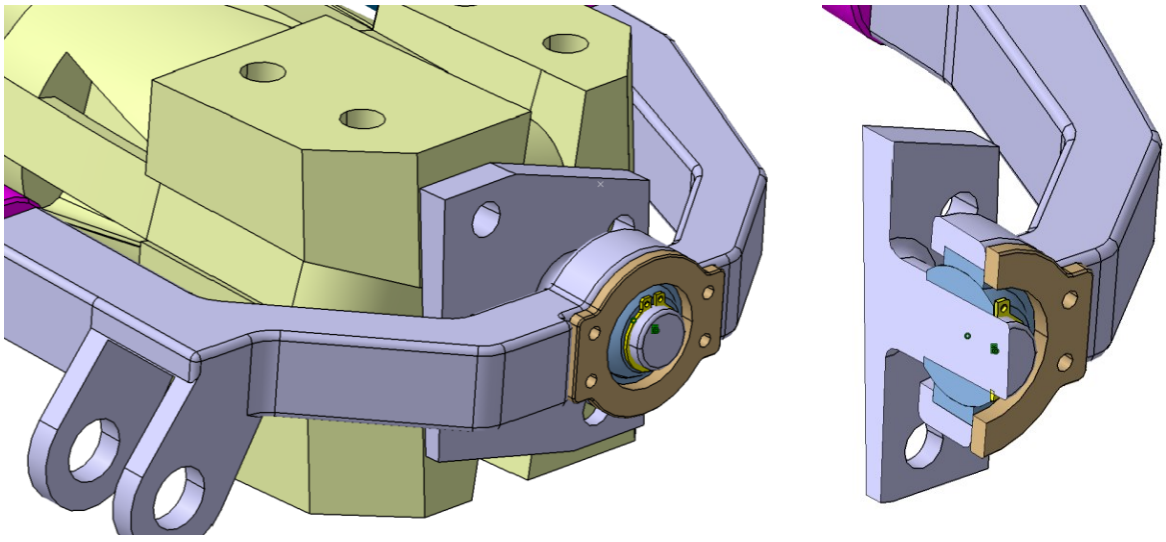
Şekil 3.1: GE 17 C

Pala kök yüzeyinin 3,5° açılı olmasından dolayı, pala kök milinin arka yüzeyi açılıdır. Pala kök milinin malzemesi alüminyum 7075-T6 alaşımıdır.

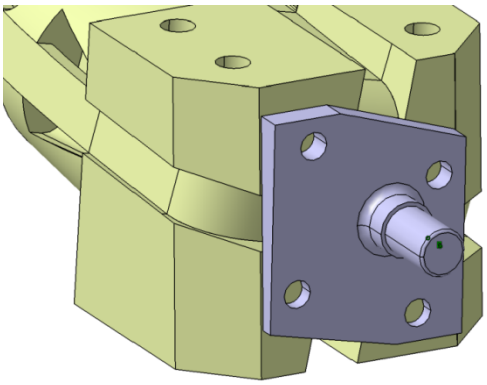
3.2.2 Boru giriş parçası

Yalpa çemberi ile gelen pilot kontrolü, tork tüp yardımı ile palalara aktarılır. Yalpa çemberinden gelen iki ucu mafsallı bir çubuk boru giriş parçasına bağlanır(Şekil 2.17).

Pala giriş mili üzerinde bulunan küresel mafsalın yuvası boru giriş parçası üzerindedir. Boru giriş parçasının bir tarafı faturalandırılarak, diğer tarafından ise kapak yardımıyla küresel mafsalın eksenel hareketi kısıtlanır(Şekil 3.2).

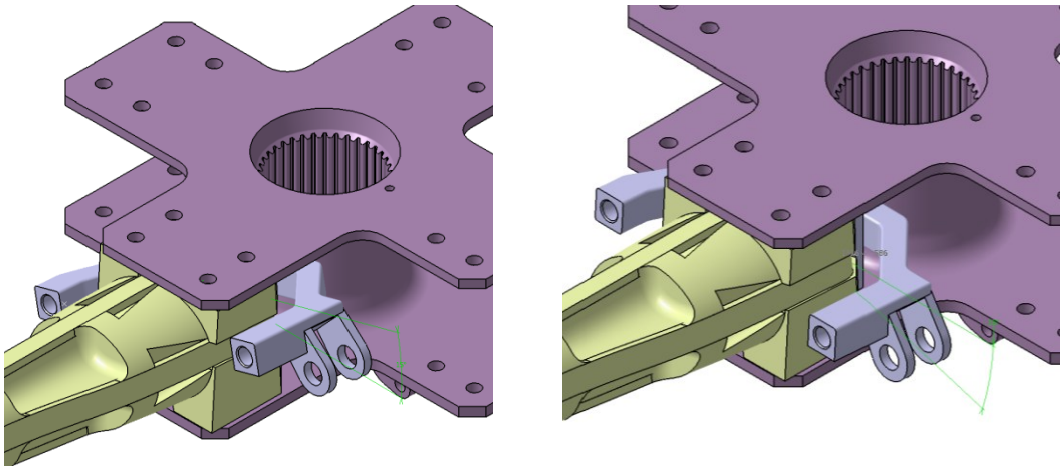


Şekil 3.2: : Boru giriş parçası ve kesit görünümü



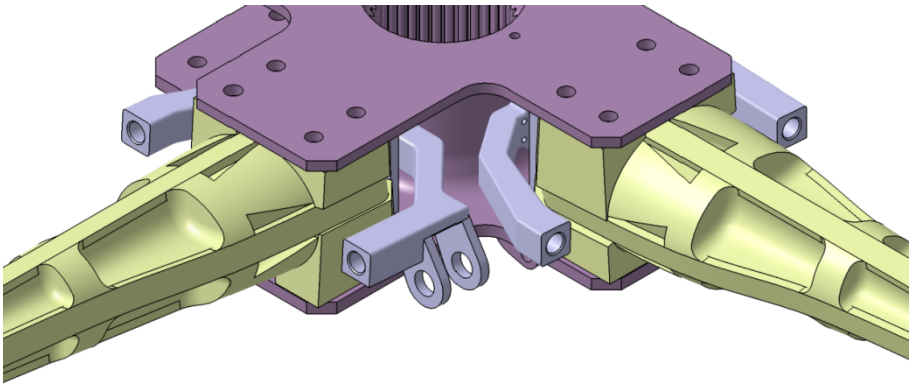
Şekil 3.3: Pala kök mili

Ana rotor palası, uçuş esnasında $^{-}_{+}15°$ dönebilir. Tork tüpün, ana rotor palasının hareketine izin vermesi gerekmektedir(Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Tork tüp ($^{-}_{+}15°$)

İTÜ-HTH dört adet palaya sahiptir. Helikopterin çalışması sırasında havada asılı kalma uçuşu haricinde, palaların her biri farklı açılarda olacaktır. Bu yüzden tork tüplerin palalar üzerine takılı durumda birbirleri ile çarpışmadan çalışabilmesi gerekmektedir(Şekil 3.5).

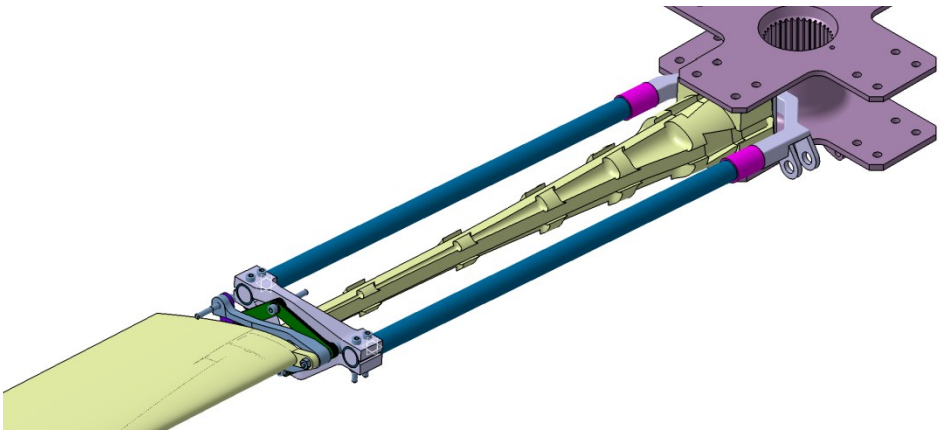


Şekil 3.5: Ana rotor göbeği üzerinde tork tüp görünümü

Boru giriş parçasının malzemesi alüminyum 7075-T6 alaşımıdır.

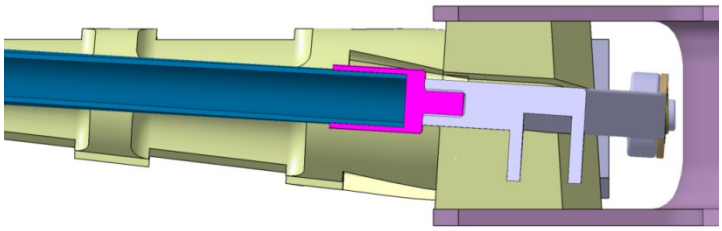
3.2.3 Tork boruları

Tork tüpünde, palanın hücum ve firar kenarlarına paralel konumda birer adet tork borusu bulunur(Şekil 3.6).



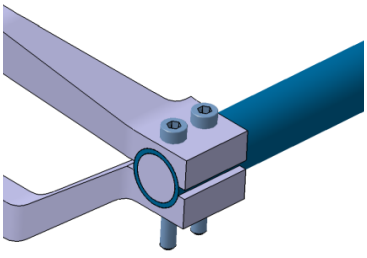
Şekil 3.6: Tork boruları

Tork boruları, boru giriş parçası ile boru ayakları arasında bulunur. Boru ucuna perçin ile sabitlenmiş boru adaptörlerinin, boru giriş parçasına M16 diş ile bağlanır(Şekil 3.7).



Şekil 3.7: Tork borusu ve adaptör parçası kesit görünümü

Boru ayakları ile olan kısımda M8 cıvatalarla bağlanmıştır. Cıvata bağlantısı ile borunun ezilmesini engellemek amacıyla, tork boruları içine burç eklenmiştir(Şekil 3.8).

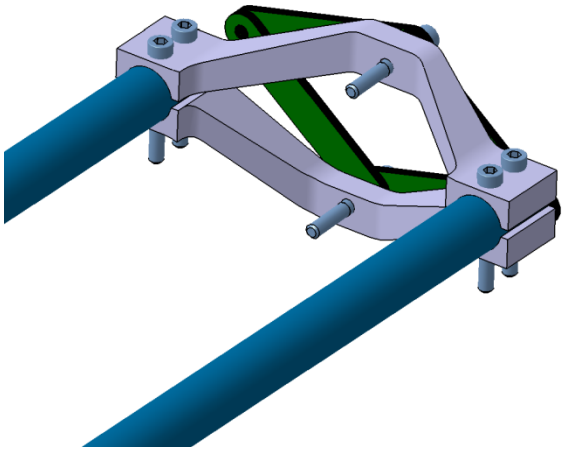


Şekil 3.8: Boru ayakları ve boru içi burç görünümü

Tork borularının ve burçların malzemesi alüminyum 7075-T6 alaşımıdır. Boru ucu adaptörlerin malzemesi ise çeliktir.

3.2.4 Boru ayakları

Şekil 3.9'da görülen, tork boruları ile esnek kaplinler arasında M8 cıvatalar ile bağlayıcı görevi gören parçadır.

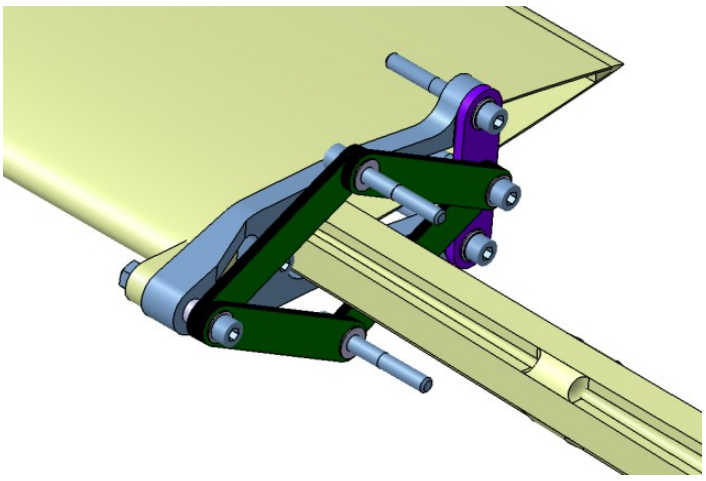


Şekil 3.9: Boru ayakları

Boru ayakları parçalarının malzemesi aliminyum 7075-T6 alaşımıdır.

3.2.5 Esnek kaplinler

Şekil 3.10'da görülen, burulma yönünde rijit, eğilme yönünde esnek parçalardır. Tork tüpünün, palanın lead-leg, feathering ve flapping hareketlerine uyumlu olmasını sağlar. Çok katmanlı yay sistemi gibi çalışır. Her bir kenarda 0,5 mm'lik 10 katman bulunur. Eski tork tüp modellerinden farklı olarak, esnek kaplinler büyütülmüştür. Boru ayakları ile pala kesit parçası arasında M8 cıvatalar ile bağlantıyı sağlar. Esnek kaplinlerin malzemesi silisyum içerikli çeliktir.



Şekil 3.10: Esnek kaplinler ve pala kesit parçası

3.2.6 Pala kesit parçası

Tork tüpü kanat profilinin hücum açısını değiştirmesi amacıyla, pala kesitinin başladığı noktaya kadar uzanır. Tork tüp boru ayakları, pala başlangıç kesitinde bulunan pala kesit parçasına esnek kaplinler tarafından bağlanır. Pala kesit parçası ise palaya, pala kesitinin başladığı kısımda bulunan bağlantı yüzeyinden M8 cıvatalar ile bağlanır(Şekil 3.10).Pala kesit parçasının malzemesi çeliktir.

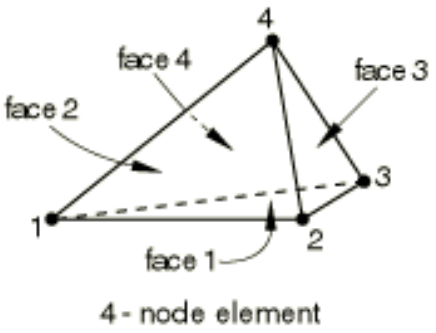
4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Tasarımı tamamlanan tork tüpünün, sonlu elemanlar metodu ile yapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Yapısal analizler ABAQUS sonlu elemanlar programı ile yapılmıştır[16].

4.1 Sonlu Elemanlar Modeli

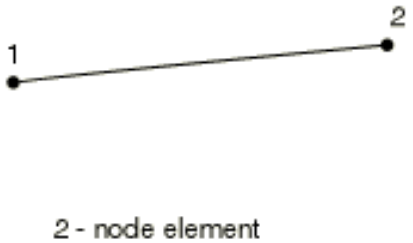
ABAQUS sonlu elemanlar programı ile tork tüpün sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır(Şekil 4.5 ve Şekil 4.6). Sonlu elemanlar modelinde 327155 bağlantı noktası, 334100 eleman bulunmaktadır.

Eleman tipi olarak boru giriş parçasında Şekil 4.1'de görülen 32648 adet lineer dörtyüzlü C3D4 elemanı kullanılmıştır[16].



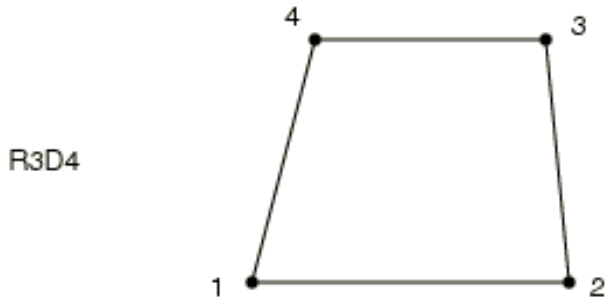
Şekil 4.1: C3D4 [16]

Palayı modellemede kullanılan beam kısmında 100 kiriş elemandan oluşmuştur. Kirişlerin modellemesinde şekil 4.2'de görülen B31 lineer çizgi elemanları kullanılmıştır[16].



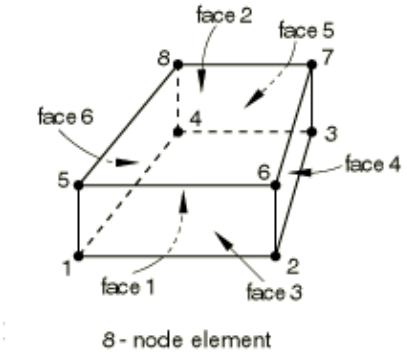
Şekil 4.2: B31 [16]

Ön yükleme kuvveeti uygulanan civatalar rijit olarak modellenmiştir. Çözüm ağını oluştururken rijit parçalarda, şekil 4.3'te görülen lineer dörtkenarlı dört düğüm noktalı R3D4 elemanı kullanılmıştır[16].

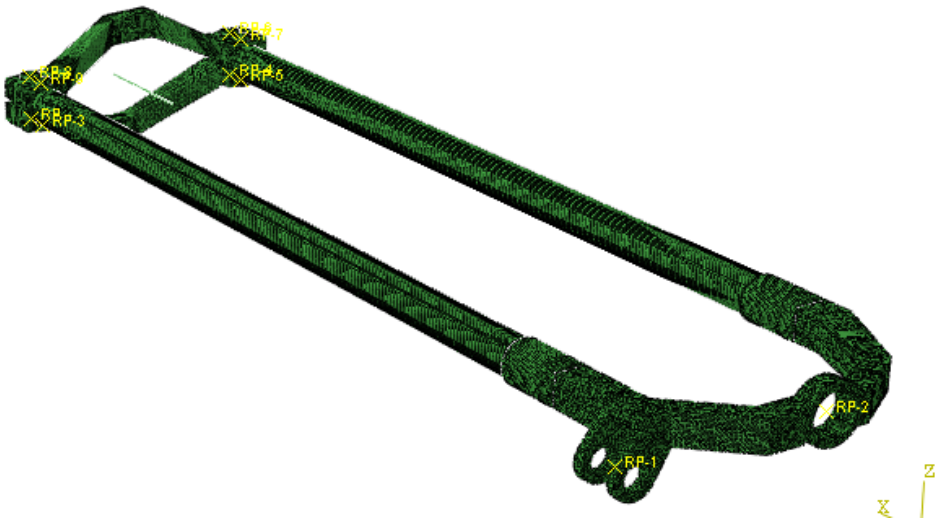


Şekil 4.3: R3D4 [16]

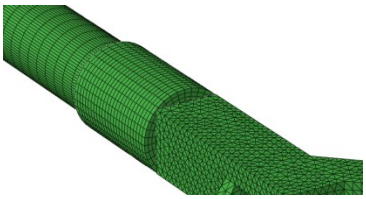
Tork tüp sisteminin geri kalan tüm parçalarında şekil 4.4'te görülen lineer altı yüzeyli sekiz düğüm noktalı elemanlardan oluşturulmuştur[16].



Şekil 4.4: C3D8R [16]



Şekil 4.5: Sonlu elemanlar modeli



Şekil 4.6: Sonlu elemanlar modeli (yakın görünüm)

İTÜ-HTH tork tüpünde, tork tüp üzerine gelecek maksimum moment 240 Nm'dir. Bu momentin 120 Nm'si esnek pala sisteminden, 120 Nm'si ise aerodinamik momentlerden oluşmaktadır.

İTÜ-HTH'ın palalarının kök kısmında 15° dönebilen flex bulunmaktadır. Pala üzerine gelen moment, sonlu elemanlar analizinde beam olarak modellenmiştir(Şekil 4.7).

$$l = 100\ mm \tag{4.1}$$

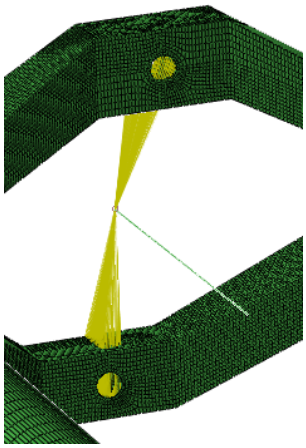
$$\theta_{max} = 15° = 0.2617^{r} \tag{4.2}$$

$$M_b = 240\ Mm \tag{4.3}$$

$$G = 80\ GPa \tag{4.4}$$

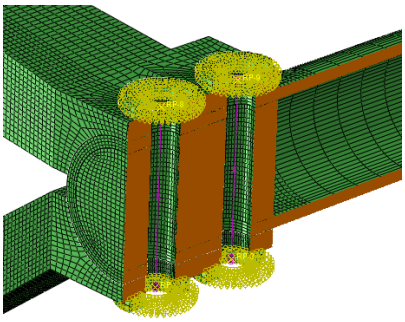
$$r = \frac{M_b \times L \times 32}{G \times \pi \times \theta_{max}} \tag{4.5}$$

$$r = 5.197\ mm \tag{4.6}$$



Şekil 4.7: Beam model ve sonlu elemanlar modeli bağlantısı

Tork tüp sonlu elemanlar modelinde borular ile boru ayaklarını birbirine bağlayan cıvataların basitleştirilmiş olarak modellemesi yapılmıştır(Şekil 4.8). Tork tüpün çalışması için, cıvatalara ön yükleme uygulanmıştır. Ayrıca analizlerde cıvatalara uygulanan ön yüklemeden dolayı, borularda ezilme yaşandığı görülmüştür. Bunun sonucunda boruların delik bölgesindeki iç kısmında burç konulmuştur(Şekil 4.9).



Şekil 4.8: Cıvata modellemesi



Şekil 4.9: Boru ucu burçsuz ve burçlu

4.2 Malzeme Özellikleri

Tork tüp tasarımında aliminyum ve çelik alaşımları kullanılmıştır. Aliminyum ve çelik malzemenin özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir[17].

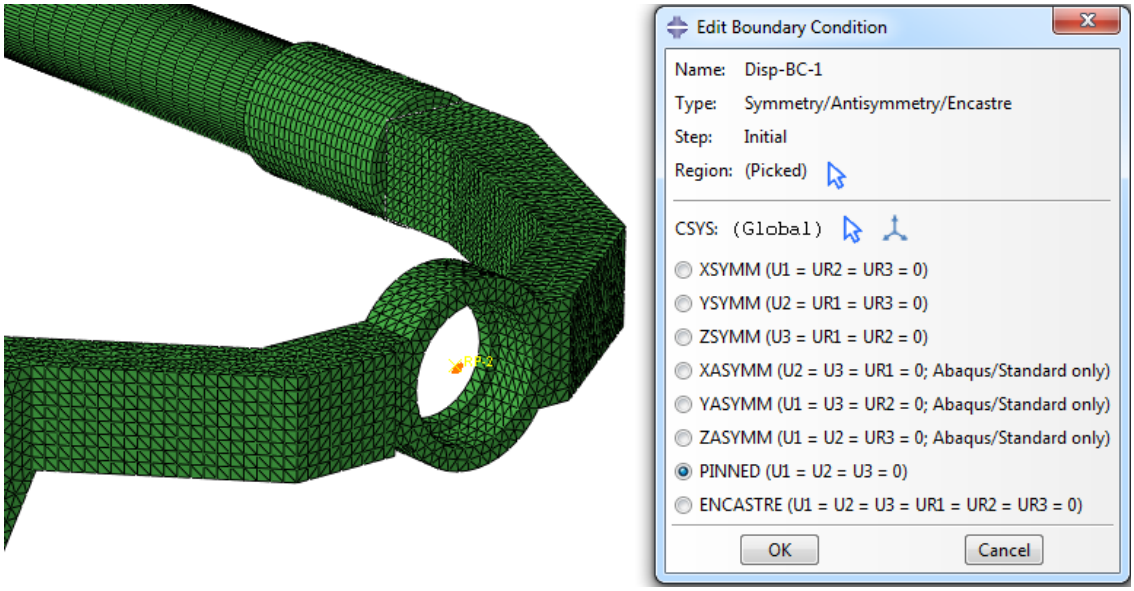
Çizelge 4.1: Malzeme özellikleri

	Yoğunluk	Elastisite Modülü	Poisson Oranı	Akma Mukavemeti
		MPa		MPa
Aliminyum 7075-T6	2,7 gr/cm^3	72000	0.33	460
Çelik	7,85 gr/cm^3	210000	0.3	

4.3 Sonlu Elemanlar Sınır Şartları Ve Kuvvetler

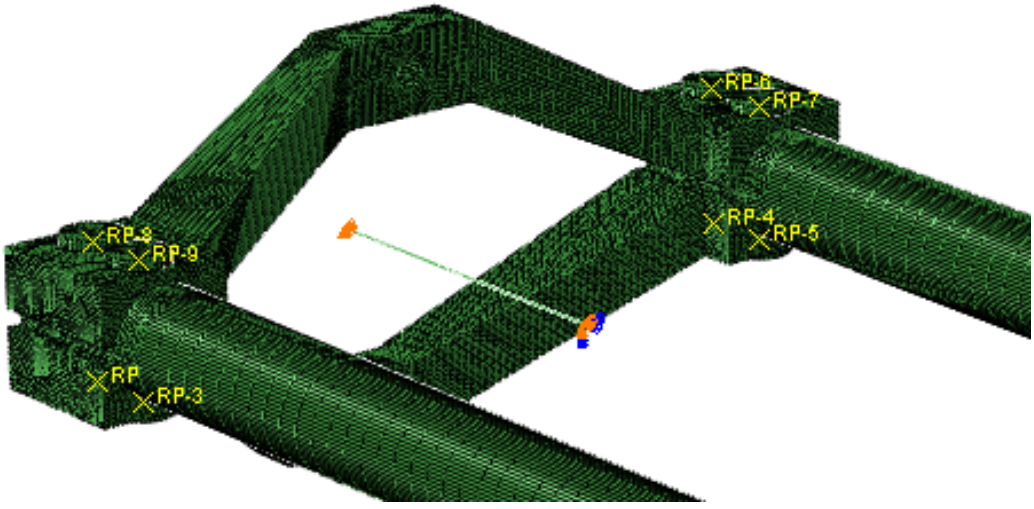
4.3.1 Sınır şartları

Boru giriş parçasında bulunan, küresel mafsal; sonlu elemanlar modelindeki sınır şartlarından biridir. Bu noktadaki sınır şartı olarak; yer değişmeler sabit kalacak şekilde, dönmelere (pinned) izin verilmiştir(Şekil 4.10).



Şekil 4.10: Boru giriş parçası sınır şartı

Sonlu elemanlar modelinde ana rotoru modellemek için kullanılan beam modelinin bir ucu dönmeler ve yer değiştirmeler sabit olacak şekilde (ankastre), tork tüpüne bağlanacak kısım ise sadece yer değiştirmeler sabit olacak şekilde (pinned) modellenmiştir(Şekil 4.11).



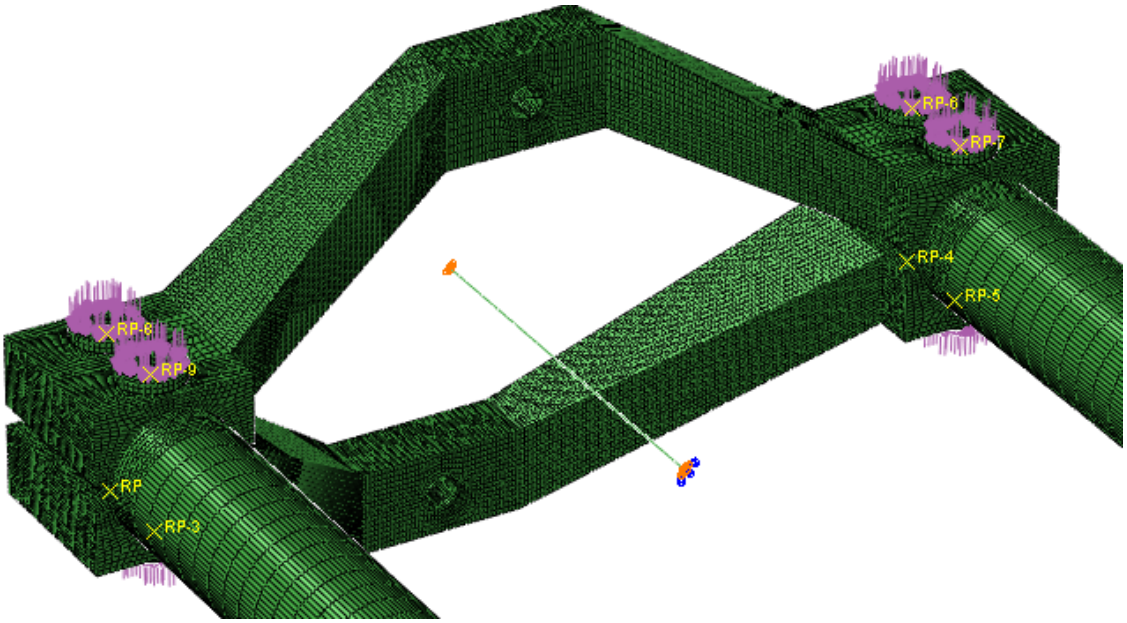
Şekil 4.11: Beam sınır şartı

4.3.2 Kuvvetler

İTÜ-HTH'ın tork tüpüne gelen kuvvetler cıvataların ön yükleme kuvveti, merkezkaç kuvveti ve yalpa mekanizması üzerinden gelen kontrol kuvvetleridir.

4.3.2.1 Ön yükleme kuvveti

Boru ucu ile boru ayaklarını birbirine bağlayan cıvatalara, belli değerlerde basınç uygulanmıştır. 40 MPa'dan daha az bir basınç uygulandığında cıvata bölgesinde ayrılma gerçekleşmektedir. Bu yüzden analizlerde 50 MPa basınç uygulanmıştır(Şekil 4.12).



Şekil 4.12: Ön yükleme kuvvetleri

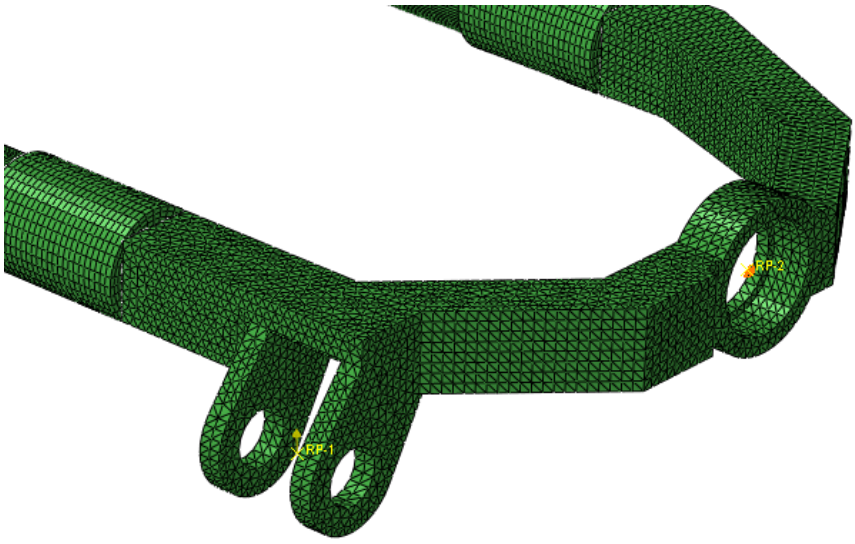
4.3.2.2 Merkezkaç kuvveti

Helikopter ana rotor sisteminin dönmesi ile ana rotor sistemi üzerinde bulunan alt sistemlere merkezkaç kuvveti etki etmektedir.

ABAQUS programında, sonlu elemanlar modelinde dönme ekseninin belirtilmesi ve dönüş hızı değerinin girilmesi ile sonlu elemanlar modeline merkezkaç kuvvetinin de etkimesi sağlanmıştır.

4.3.2.3 Kontrol kuvveti

Yalpa çemberi ile tork tüp arasında her iki ucunda mafsal bulunan bir çubuk yardımıyla kuvvet iletimi olmaktadır. Palanın 15° dönmesini sağlayacak olan kuvvet yaklaşık olarak 2100 N'dur. Bu kuvvet, helikopterde olduğu gibi, sonlu elemanlar analizinde de tork tüpün boru giriş parçasının mafsal bağlantı noktasına etki ettirilmiştir.

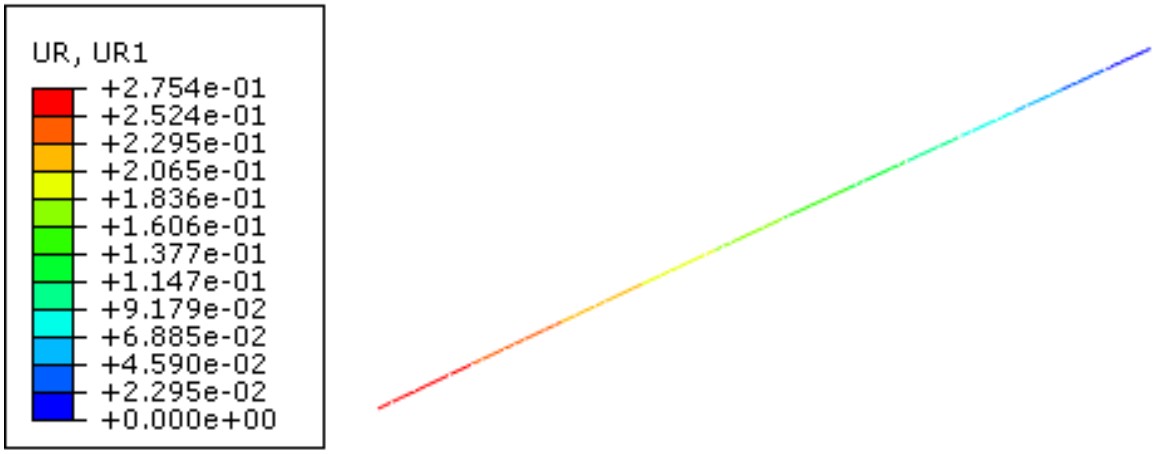


Şekil 4.13: Kontrol kuvveti

4.4 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

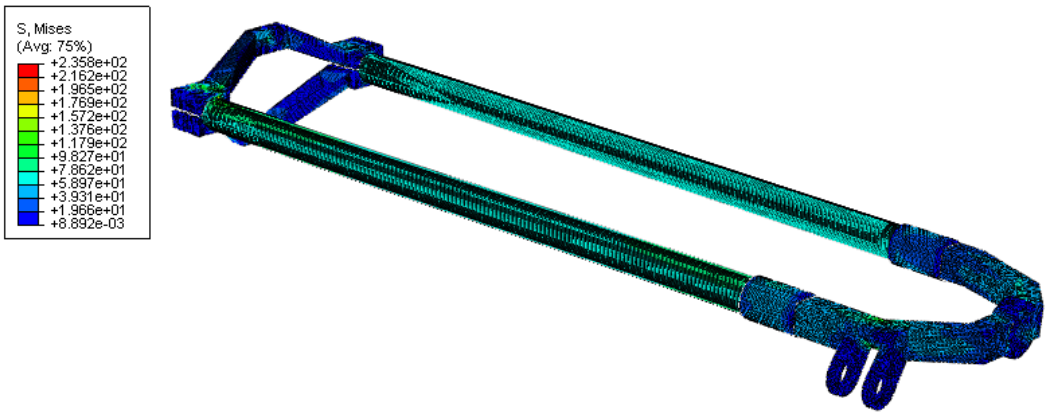
İTÜ-HTH tork tüp sisteminin sonlu elemanlar analizleri tamamlanmıştır.

Sonlu elemanlar analizinde pala üzerinde oluşan toplam momenti modellemek amacı ile oluşturulan beam, tork tüpüne uygulanan kuvvet neticesinde 15° dönmesi gerekmektedir. Şekil 4.14'te görüldüğü üzere, analiz sonucunda elde edilen dönme değeri 0,2754 radyandır(15,8°). Tork tüp sonlu elemanlar modeline uygulanan kuvvet değerinin doğru olduğu görülmüştür.



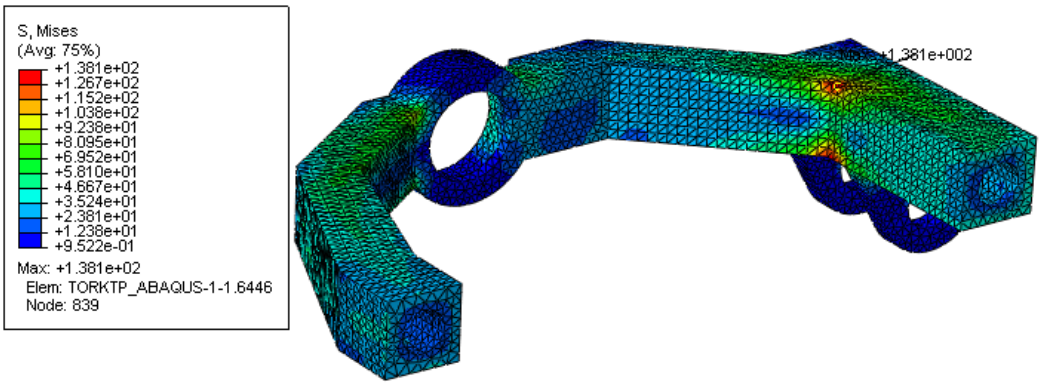
Şekil 4.14: Beam modeli açısal dönme sonucu

Analizler sonucunda elde edilen gerilme değeri 235 MPa'dır(Şekil 4.15). Analiz sonucunda elde edilen gerilme değerinin emniyetli akma gerilmesinden daha düşük olduğu için tasarımın emniyetli olduğu söylenebilir.



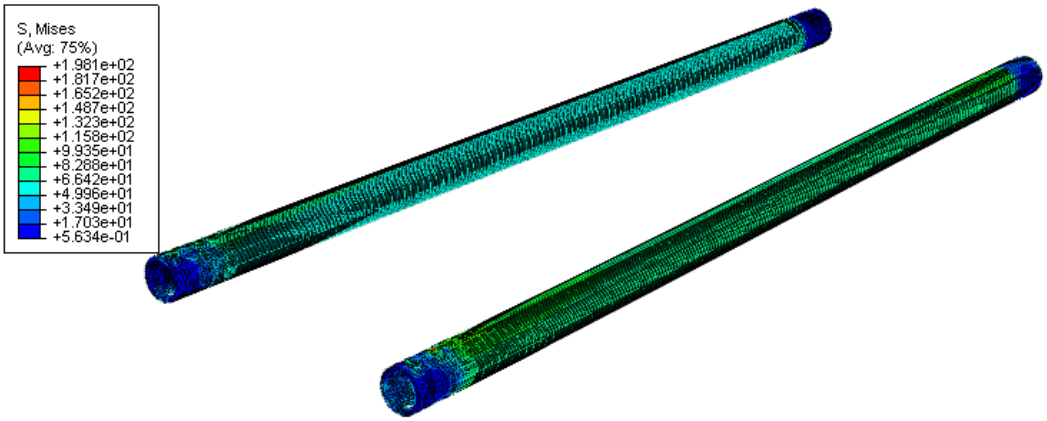
Şekil 4.15: Tork tüp analiz sonucu (maksimum gerilme:235 mpa)

Boru giriş parçası üzerinde oluşan maksimum gerilme 138 MPa'dır. Parça üzerinde oluşan gerilme değeri, emniyetli akma gerilmesinden düşük olduğu için parça emniyetlidir(Şekil 4.16).

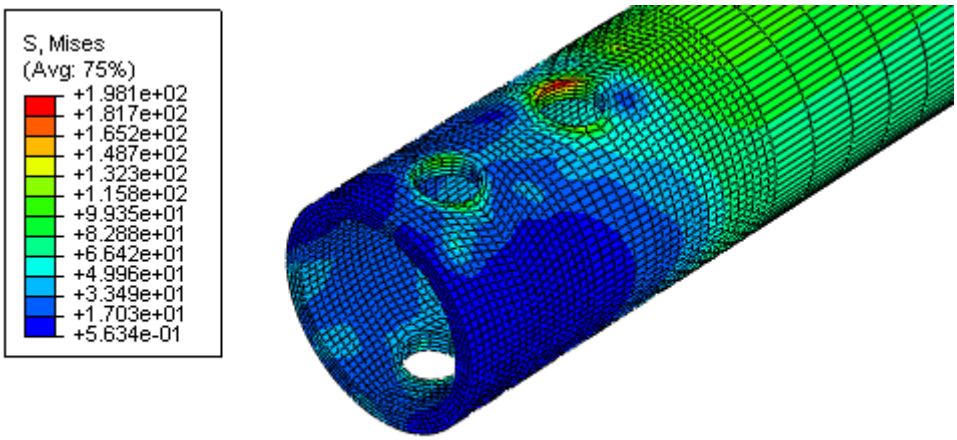


Şekil 4.16: Boru giriş parçası analiz sonucu (maksimum gerilme:138 mpa)

Tork tüp boruları üzerinde oluşan maksimum gerilme 198 MPa'dır(Şekil 4.17 ve Şekil 4.18). Parça üzerinde oluşan gerilme değeri, emniyetli akma gerilmesinden düşük olduğu için parça emniyetlidir.

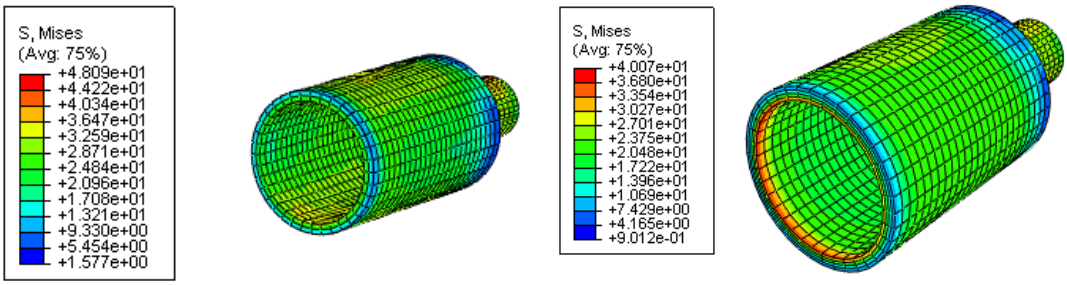


Şekil 4.17: Tork boruları analiz sonucu (maksimum gerilme:198 mpa)



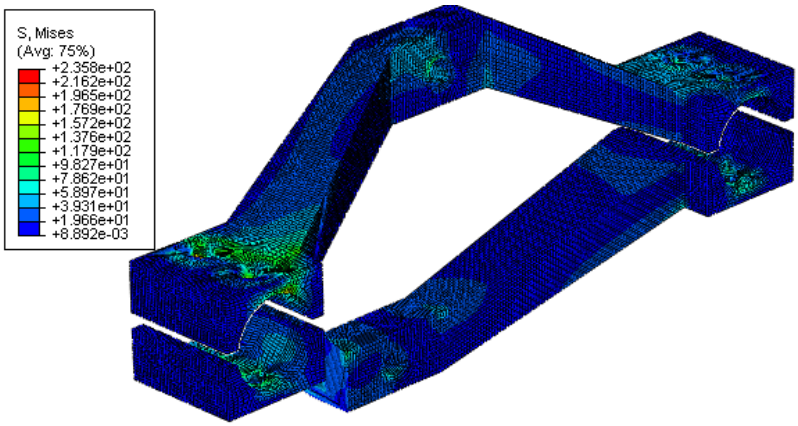
Şekil 4.18: Tork boruları analiz sonucu (yakın görünüm)

Tork tüp borularına perçin ile birleştirilen adaptörler üzerinde oluşan maksimum gerilme 48 MPa'dır(Şekil 4.19). Parça üzerinde oluşan gerilme değeri, emniyetli akma gerilmesinden düşük olduğu için parça emniyetlidir.



Şekil 4.19: Boru adaptörleri analiz sonucu (maksimum gerilme 48 mpa)

Boru ayakları üzerinde oluşan maksimum gerilme 235 MPa'dır(Şekil 4.20). Tork tüp sisteminde en fazla gerilme bu bölgede oluşmaktadır. Parça üzerinde oluşan gerilme değeri, emniyetli akma gerilmesinden düşük olduğu için parça emniyetlidir.



Şekil 4.20: Boru ayakları analiz sonucu (maksimum gerilme: 235 mpa)

4.5 Değerlendirme

İTÜ-HTH'a ait tork tüpünün sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Daha sonra uygun sınır şartları ve kuvvetlerin uygulanması ile sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir.

Analiz sonucunda elde edilen değerleri, emniyetli akma değerlerinin altındadır. Bu durumda tork tüp sistemi yapısal olarak emniyetlidir.

5. ÜRETİM VE MONTAJ

5.1 Maliyet ve Üretim

Yapısal analizleri tamamlanan tork tüpün, üretim için teknik resimleri hazırlanmıştır.

Tork tüpün üretimi için gerekli olacak malzeme bilgileri ve miktarı Çizelge 5.1'de verilmiştir. Toplamda 5 adet üretim yapılması gerekmektedir. İlk üretilecek olan tork tüpü testlerde kullanılacaktır. Daha sonra üretimi yapılacak olan 4 adet tork tüpü ise ana rotor palalarına bağlanacaktır[18].

Çizelge 5.1: Tork tüp malzeme bilgisi ve miktarı

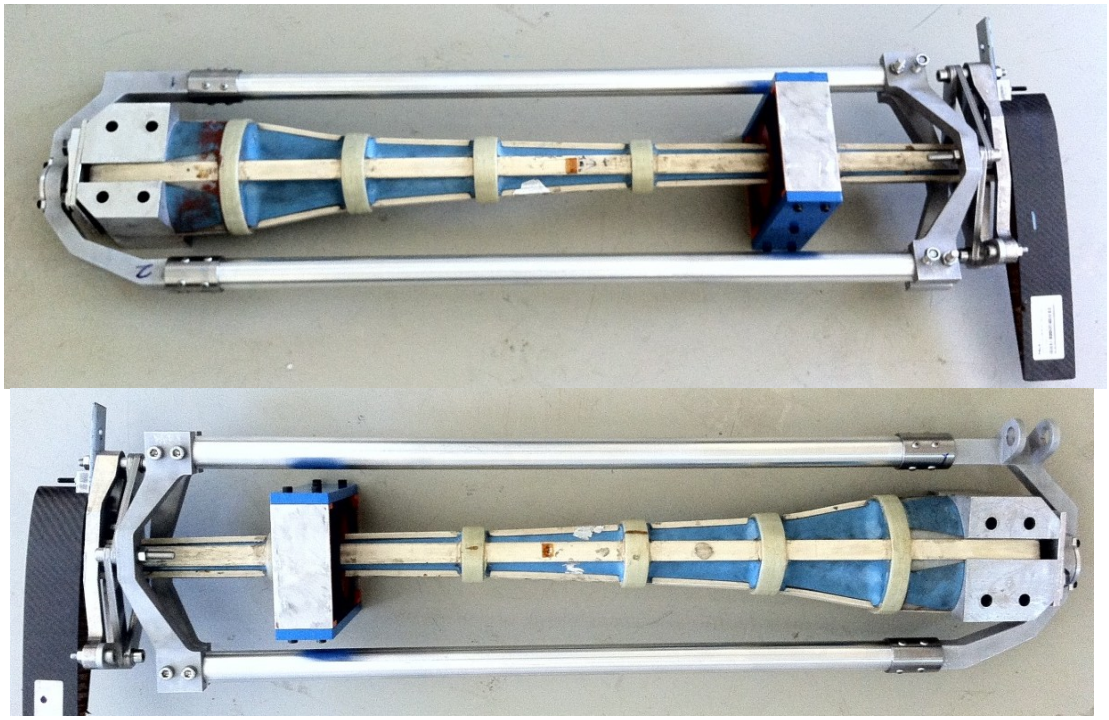
Parça No	Malzeme cinsi	Üretim miktarı	Malzeme ölçüsü	Malzeme miktarı
1	7075-T6 Al Boru	2 adet	Dış çap: Ø30 mm İç çap: Ø25mm	20 metre
2	7075-T6 Al Lama	1 adet	1,25"x4"x17"	1,25"x4"x90"
3	7075-T6 Al Lama	1 adet	2"x3"x4"	2"x3"x25"
4	7075-T6 Al Çubuk	2 adet	Ø1,125"x4"	Ø1,125"x45"
5	7075-T6 Al Çubuk	1 adet	Ø5/8"x0,5"	Ø5/8"x5"
6	7075-T6 Al Çubuk	2 adet	Ø1,5"x6"	Ø1,5"x70"
7 ve 9	7075-T6 Al Sac	1+1 adet	4x100x100 mm	4*100*700 mm
8	Silise Çelik Sac	60 adet	0,5x1200x250 mm	0,5x1200x1200 mm
10	7075-T6 Al Lama	1 adet	3"x6"x10"	3"x6"x60"
11 ve 12	7075-T6 Al Lama	1 ve 1 adet	2,5"x5"x10"	60" inç

Test için üretilecek olan bir adet tork tüpünün üretimi 410 adam-saat, HTH'a takılacak 4 adet tork tüpünün imalatı ise 550 adam saat sürecektir. Ayrıca bunların yanında 100 adam-saat mühendislik ve idari işler sürecektir. Döner sermaye işçilik fiyatı 70.40 TL/saattir. Toplam 1060 adam-saatlik üretim sürecinin maliyeti yaklaşık olarak 75000 TL'dir[18].

5.2 Montaj

Tork tüp sisteminine ait parçaların üretimi 5. Ana Bakım Merkezinde tamamlanmıştır. Üretim sonrası parçalar, İTÜ-HTH'a ait pala kesitine montaj yapılarak kontrol edilmiştir. Şekil 5.1'te pala kesiti üzerine montajı yapılmış tork tüpü görülmektedir. Şekil 5.2'de tork tüpünün kaplin kısmı,

Şekil **5.3**'te tork tüpünün pala kökünde bağlandığı kısmı gösterilmektedir.



Şekil 5.1: Tork tüp montaj (alttan ve üstten görünüm)



Şekil 5.2: Pala kesit parçası ve esnek kaplinler yakın görünüm



Şekil 5.3: Boru giriş parçası ve pala giriş mili yakından görünüm

6. TESTLER

Montajın tamamlanmasının ardından, tork tüpünün standart uçuş şartları ve ekstrem uçuş şartları için testleri yapılmıştır. Testler sonucunda elde edilen veriler ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca testlerin sonucuna göre tork tüp tasarımında değişiklikler yapılması gerekmektedir.

6.1 Deney Sistemleri

Tork tüpünün yapısal testlerini gerçekleştirmek için, İTÜ-ROTAM'da bulunan MTS Test Cihazı ve strain gage sistemi kullanılmıştır(Şekil 6.1). Testler sırasında iki farklı sistemden veri alınmıştır. Bunlar;

- MTS test cihazından elde edilen veriler

  Zaman(s), Eksenel Yer Değiştirme (mm), Kuvvet (N)

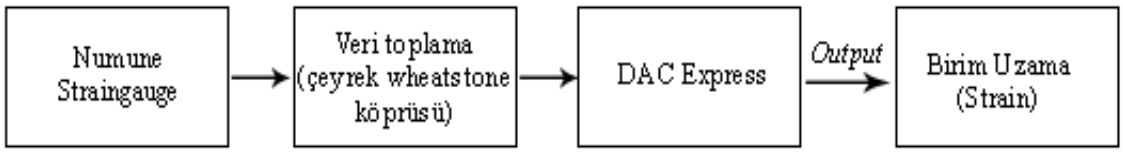
- Straingage ile yapılan ölçümler

  Zaman(s), Gerinim

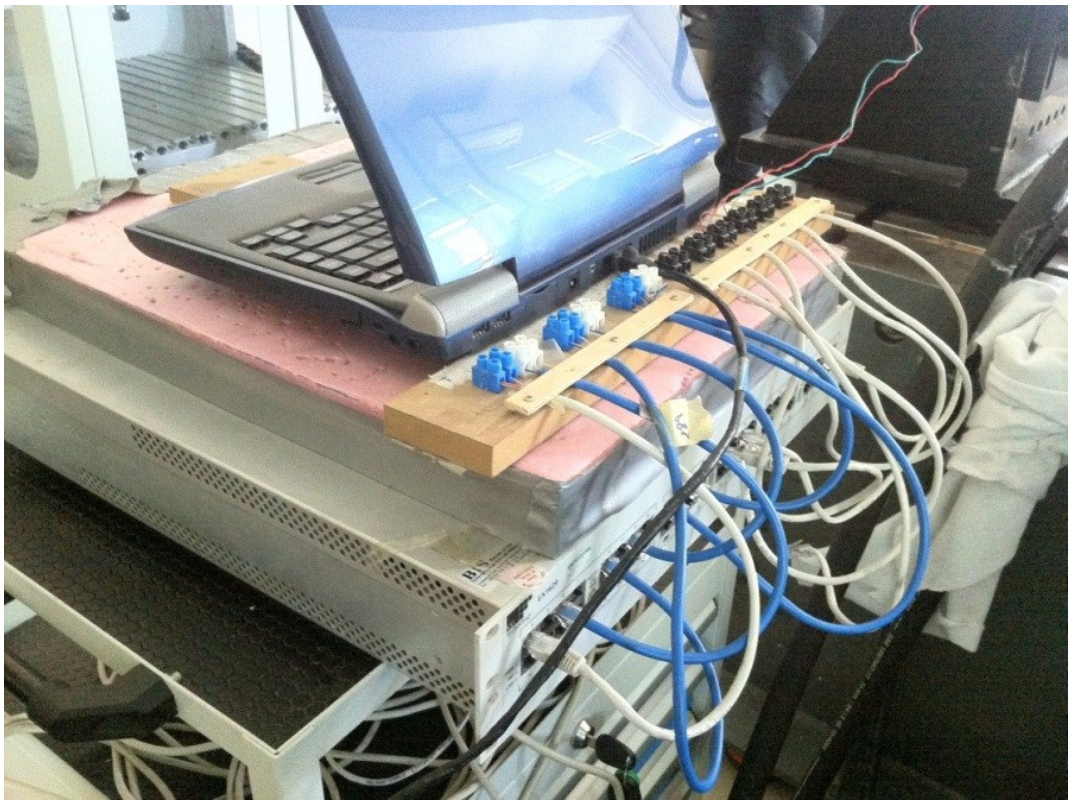


Şekil 6.1: MTS test cihazı

Veri Toplama Sistemi (Data Acquisition System): Gerinim değerleri, 120 ohm'luk strain gage'den aktarılan voltaj bilgisi, wheatstone köprüsüne sahip 48 kanaldan veri toplayabilen cihaza aktarılır (Şekil 6.2 ve Şekil 6.3). Çıktı bilgisi DAC Express yazılımı ile mikro birim uzama cinsinden elde edilir[19].



Şekil 6.2: Straingage ölçümü şematik gösterim

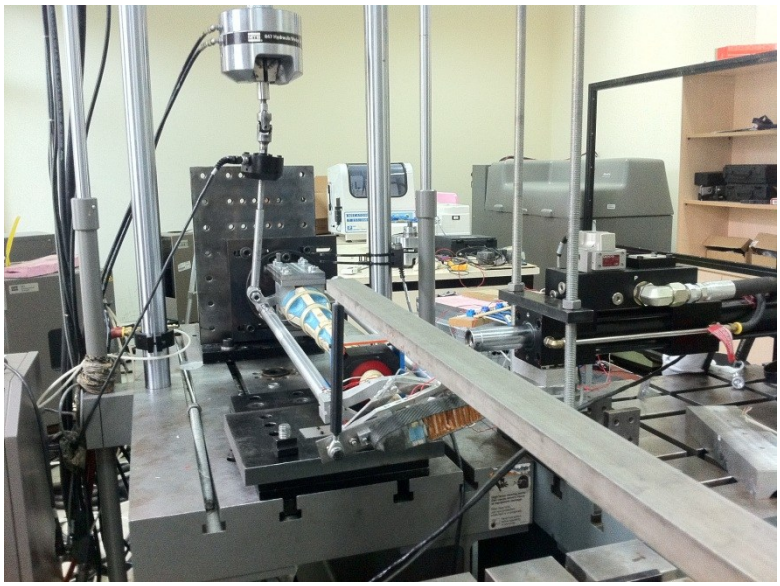


Şekil 6.3: Veri toplama sistemi (data acquisition system)

6.2 Deney Düzeneği

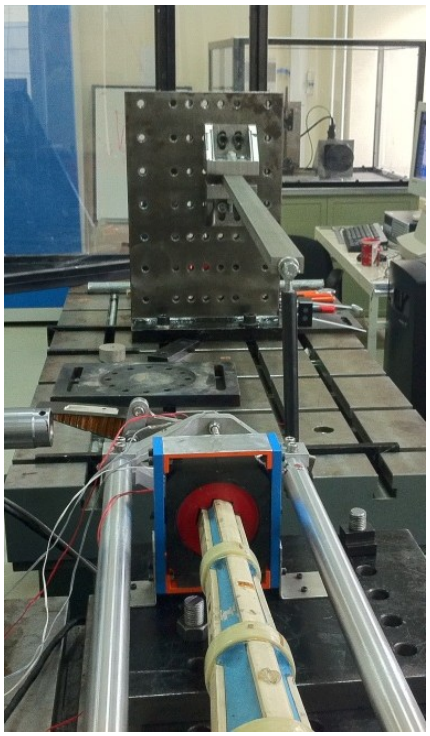
Statik testler ve sınır şartlarının belirlenmesi için yapılan testler, tork tüpe çelik kiriş yay sistemi bağlı olmadan yapılmıştır.

Yorulma testinde, Şekil 6.4'te görülen tork tüpü, MTS test cihazına bir ucunda küresel mafsal bulunan 20mm çapa sahip çelik profil ile boru giriş parçasından bağlanmıştır. Yük hücresine yanal yük gelmesini engellemek amacıyla, MTS test cihazı ile yük hücresi arasında kardan mili kullanılmıştır.



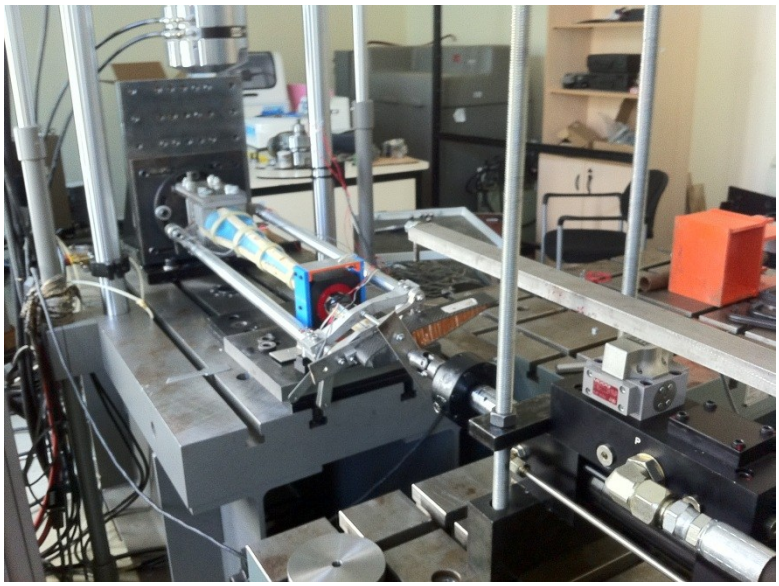
Şekil 6.4: Tork tüpü yorulma testi deney düzeneği- Mts bağlantısı

Yorulma testlerinde, tork tüp üzerine gelen aerodinamik kuvvetleri modellemek amacıyla çelik kiriş kullanılmıştır. Şekil 6.5'te görülen tork tüpü, çelik kirişe iki ucunda küresel mafsal bulunan 20mm çapa sahip çelik boru ile pala kesit parçasından bağlanmıştır.



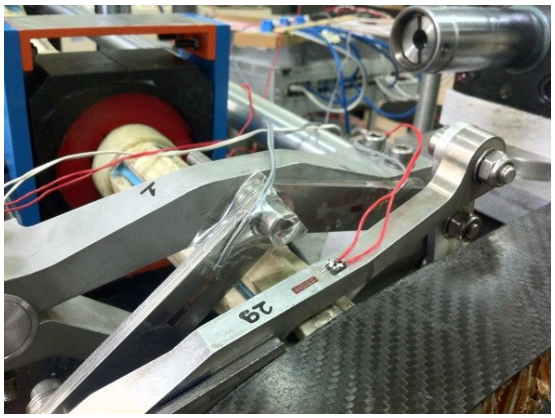
Şekil 6.5: Tork tüpü yorulma testi deney düzeneği- Çelik yay bağlantısı

Merkezkaç testlerinde tork tüpün eksenel olarak çekilmesi için yük hücresi pala kesitinin olduğu kısımdan kardan mili yardımıyla bağlanmıştır ve sistem Şekil 6.6'da gösterilmiştir.

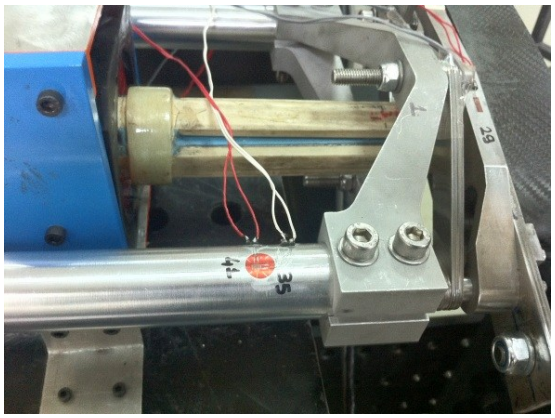


Şekil 6.6: Merkezkaç testi deney düzeneği

Sonlu elemanlar analizi sonucunda, gerilmelerin yoğun olduğu kısımlara straingageler yapıştırılmıştır (Şekil 6.7,Şekil 6.8,Şekil 6.9,Şekil 6.10 ve Şekil 6.11). Bu bölgelerden elde edilen gerinim değerleri yardımıyla gerilme değerleri elde edilmiştir.



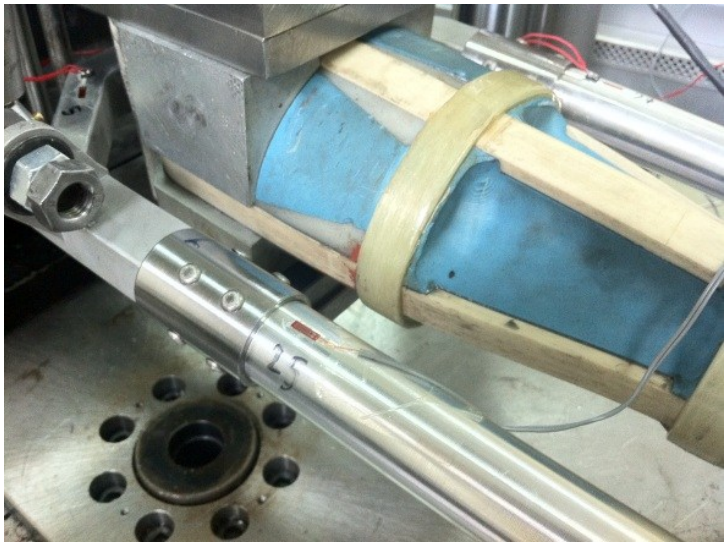
Şekil 6.7: Straingage 1-Straingage 28-Straingage 29



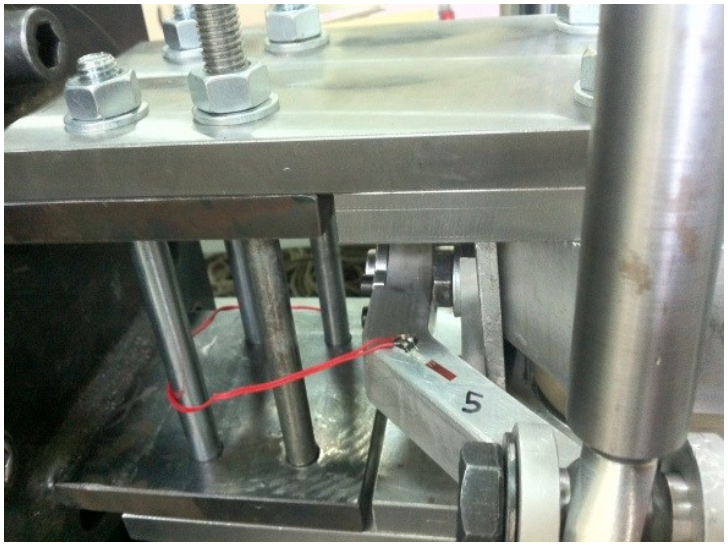
Şekil 6.8: Straingage 35-Straingage 45



Şekil 6.9: Straingage 27



Şekil 6.10: Straingage 25



Şekil 6.11: Straingage 5

6.3 Standart Uçuş Şartları Testleri

Tork tüpünün, esnek pala sisteminden dolayı oluşan 120 Nm'lik momenti ve uçuş sırasında palalara etkiyen 63 Nm'lik aerodinamik momenti yenmesi gerekmektedir. Tork tüpünün yapısal olarak standart uçuş şartlarında çalışabilmesi gerekmektedir.

Standart uçuş şartlarında etkiyen aerodinamik momentler, çelik kirişin yardımı ile tork tüpe uygulanmıştır. Standart uçuş şartlarında yorulma testleri ve merkezkaç testleri yapılmıştır. Ana rotor palasının hücum açısını 12° artırmak için 41 mm yer değiştirme uygulanmış ve hücum açısını 2° azaltmak için ise 9 mm yer değiştirme uygulanmıştır.

6.3.1 Sınır şartlarının belirlenmesi testleri

Test düzeneğine, çelik kiriş yay sistemi bağlı olmadan tork tüp ile deney şartlarını belirlemek için deneyler yapılmıştır.

Hücum açısını artırmak için verilen 45.5 mm yer değiştirmede, tork tüp üzerinde 2435 N'luk kuvvet oluşmuştur, ayrıca bu yer değiştirmede pala kesitinde meydana gelen toplam açısal değişim ise 14°'dir. Ancak boru giriş parçasında meydana gelen toplam açısal değişim 20.8°'dir.

Hücum açısını azaltmak için verilen 35.5 mm yer değiştirmede, tork tüp üzerine etkiyen 2187 N'luk kuvvet oluşmuştur.

Uçuş şartlarına göre helikopter palasının açısal değişimi +12° hücum açısını artırmaya yönelik,-2° ise hücum açısını azaltma yönündedir(Çizelge 3.1). Hücum açısını +12° artırmak için boru giriş parçasına 41 mm yer değiştirme verilmesi gerekmektedir. Hücum açısını -2° azaltmak için 9 mm yer değiştirme gereklidir. Yorulma testlerinde boru giriş parçasına hücum açısını artırmaya yönelik 41mm ve hücum açısını azaltmaya yönelik 9 mm yer değiştirme uygulanacaktır.

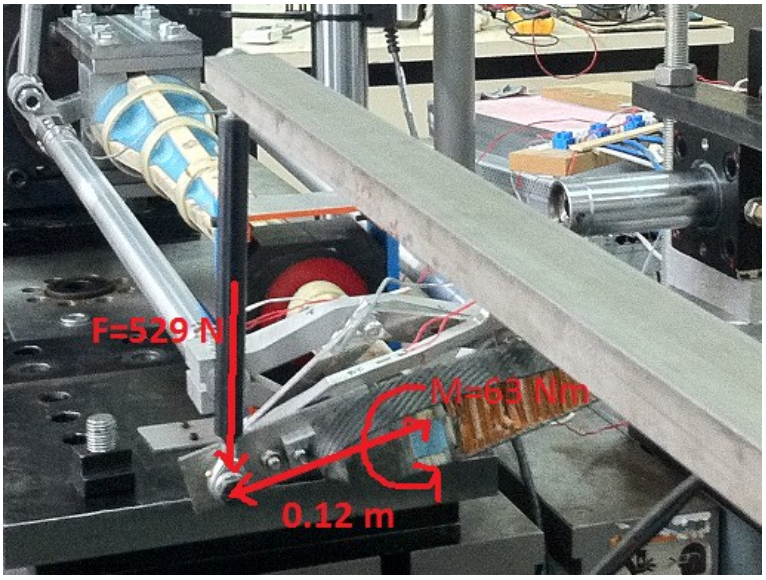
6.3.2 Çelik Kiriş Boyutlandırması ve Testi

HTH tork tüpü testinde yay özelliği kullanılacak olan çelik kirişin yer değiştirme kontrollü testi yapılmıştır. 19x40mm kesite ve 1 metre uzunluğa sahip olan çelik kiriş uygun boyutlarda kesilerek kullanılmıştır.

Standart uçuş şartlarında oluşan 63 Nmlik aerodinamik moment, kirişin 529 Nluk kuvvet olarak etki etmektedir(Şekil 6.12).

$$M = F * l \qquad \textbf{(6.1)}$$

$$F = \frac{63}{0.12}\frac{Nm}{m} = 529\ N \tag{6.2}$$



Şekil 6.12: Çelik kiriş mukavemet hesabı

Palanın 15° açısal değişimi, çelik kirişin ucunda 31 mm yer değiştirmeye neden olur. Uç kısımdan etkiyen kuvvet sonucunda, kirişin 31 mm yer değiştirmesi için kirişin boyunun 945 mm olması gerekmektedir.

$$\delta = \frac{F\ x\ l^3}{3\ x\ E\ x\ I} \tag{6.3}$$

$$\text{E=210000 Nmm} \tag{6.4}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{0.4\ x\ 0.019^3}{12} = 2{,}286\ x\ 10^{-8}\ mm^4 \tag{6.5}$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{\delta\ x\ 3\ x\ E\ x\ I}{F}} = 945\ mm \tag{6.6}$$

Ayrıca kiriş üzerine etkiyen kuvvet sonucu kiriş kökünde meydana gelen maksimum moment 500 Nm'dir. Kuvvetin etkisi ile kirişin ankastre kısımında meydana gelen maksimum gerilme 208 MPa'dır.

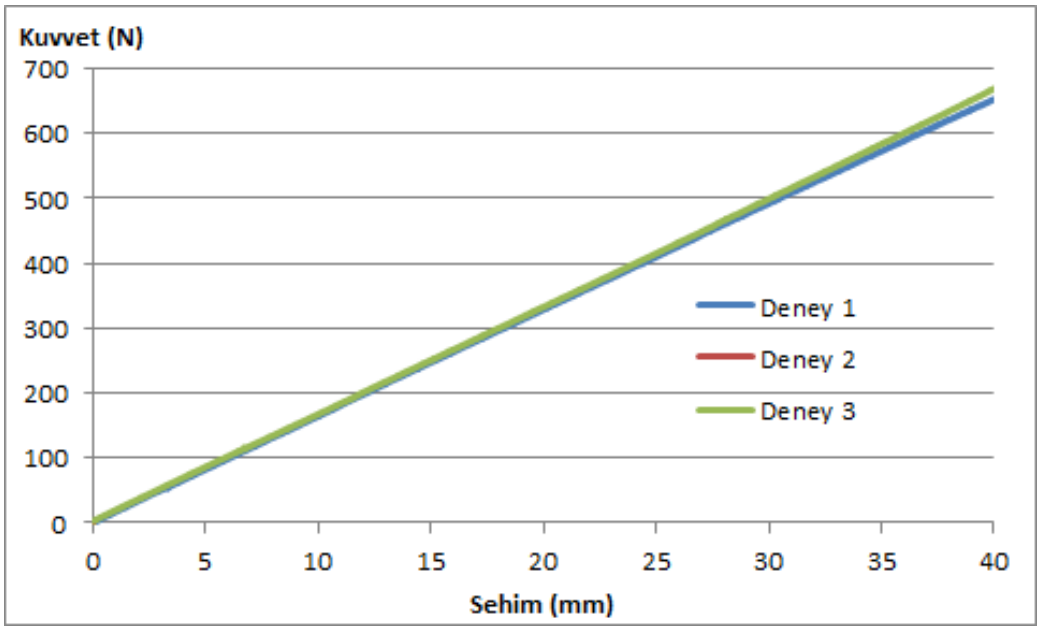
Yapılan hesaplamaların doğrulanması için tork tüpü testinde yay özelliği kullanılacak olan çelik kirişin yer değiştirme kontrollü olarak testi yapılmıştır. 19x40mm kesite ve 1 metre uzunluğa sahip olan kiriş, boyu 945 mm kalacak şekilde mesnetle

sabitlenmiş ve diğer ucundan mafsal ile MTS makinesinde yük hücresine bağlanmıştır(Şekil 6.13). Uç kısımda 40 mm yer değiştirme olacak şekilde yer değiştirme uygulanıp kuvvet değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6.13: Test düzeneği ve çelik kiriş

Deney 3 kez tekrarlanmış ve elde edilen değerler Şekil 6.14'de gösterilmiştir.



Şekil 6.14: Kuvvet(N)/Yer Değiştirme (mm) Değerleri

Her deneyde 40 mm yer değiştirmede elde edilen kuvvet değerleri ise Çizelge 6.1'de gösterilmiştir. Deney sonucu elde edilen sonuçlar, yapılan hesaplamalar ile eşdeğer çıkmıştır.

Çizelge 6.1: Deney sonuçları

Yer Değiştirme (mm)	Kuvvet (N)
39,99846	653,1303
39,99895	656,7332
39,99852	668,8608
Ort: 39,9986434	**Ort:** 659,574767

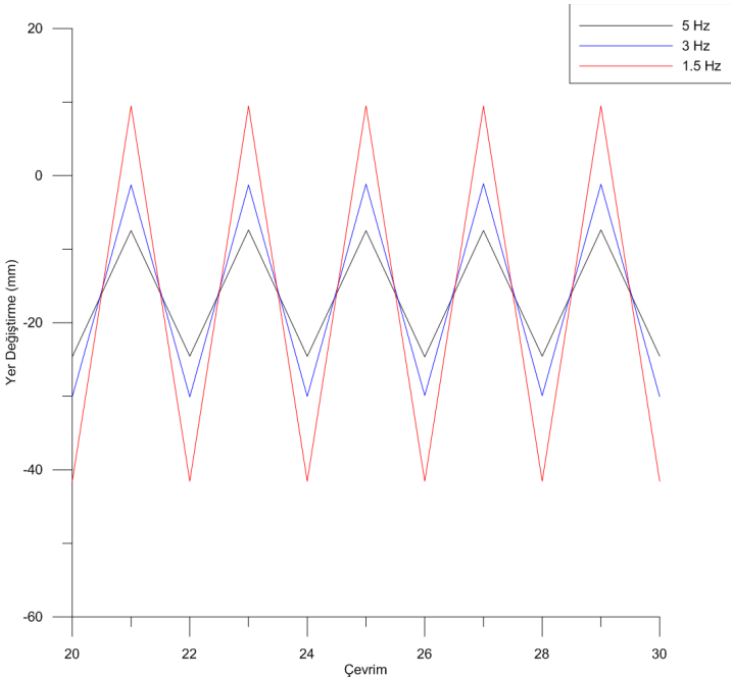
6.3.3 Yorulma testleri

İTÜ-HTH tork tüpünün, 75 uçuş saatlik süre boyunca çalışması istenmiştir.

$$Çevrim\ Sayısı = 75 * 3600 * 5.2\ Hz \cong 1500000\ çevrim \quad \textbf{(6.7)}$$

6.3.3.1 Deneyin yapılışı

İTÜ-HTH ana rotor palasının dönüş devri 5.2 Hz'dir. Testlerin bu hızda yapılması uygun olacaktır. Ancak MTS test cihazının 5.2 Hz'de 50 mm yer değiştirmeyi vermesi mümkün olmamaktadır. Bu yüzden 50 mm yer değiştirmeye MTS cihazı için en uygun olan 1.5 Hz'de yapılmıştır. Şekil 6.15'te hıza bağlı olarak yer değiştirmenin değişimi gösterilmiştir.

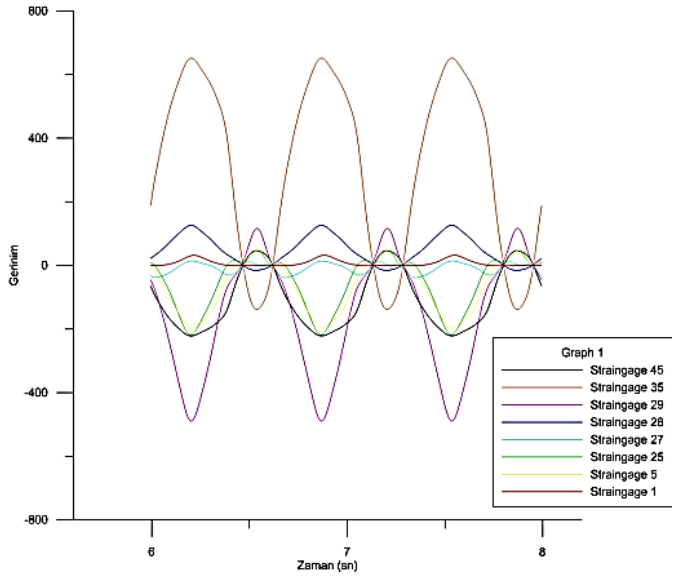


Şekil 6.15: Hıza bağlı olarak yer değiştirmenin değişimi

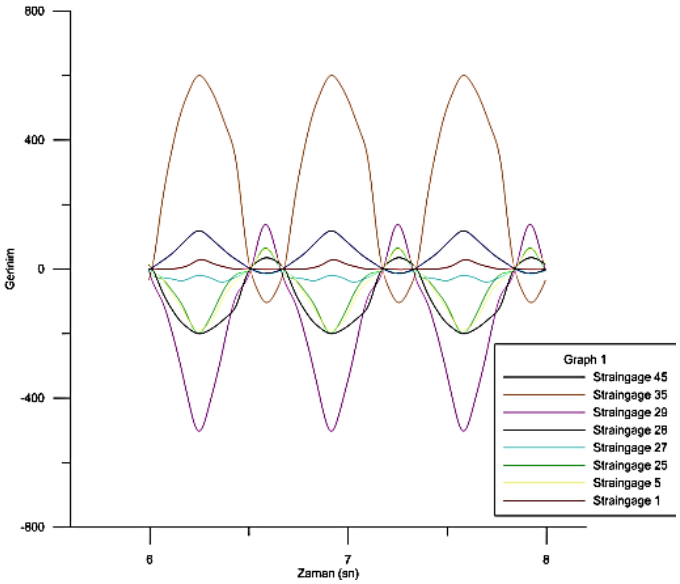
Yorulma testi süresinde her bir çevrimde tork tüp üzerine etkiyen kuvvet değerleri, EK-A'da verilmiştir.

6.3.3.2 Sonuçlar

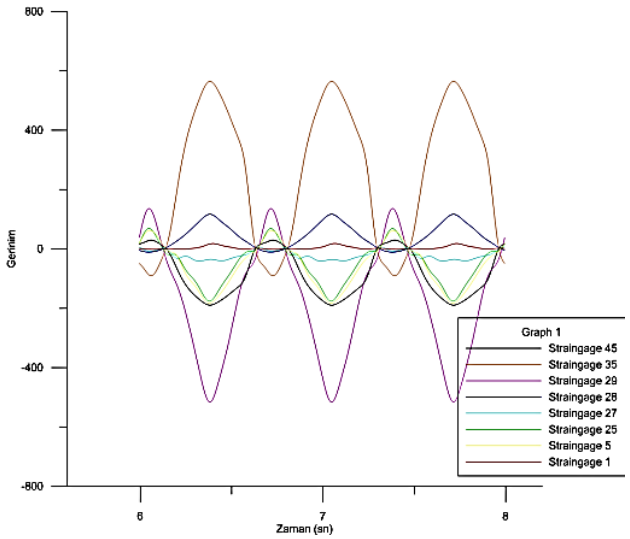
Yorulma testi süresince belli çevrim oranlarının tamamlanmasının ardından, straingageler ile ölçümler alınmıştır. Farklı çevrimlerden sonra ölçümlerin alınmasının nedeni, çevrim sayısının artmasıyla parça üzerinde meydana gelen değişikliklerin gözlenmesi içindir. Şekil 6.16'ten Şekil 6.21'e kadar çevrim sayıları sonrasında alınan gerinim değerleri verilmiştir. Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'te ise straingagelerden alınan maksimum gerinim değerleri verilmiştir.



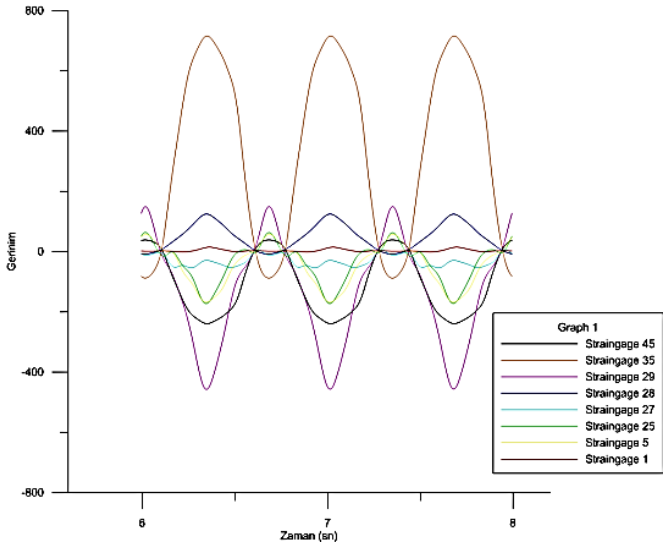
Şekil 6.16: 100000 Çevrim sonrası alınan straingage ölçüm sonuçları



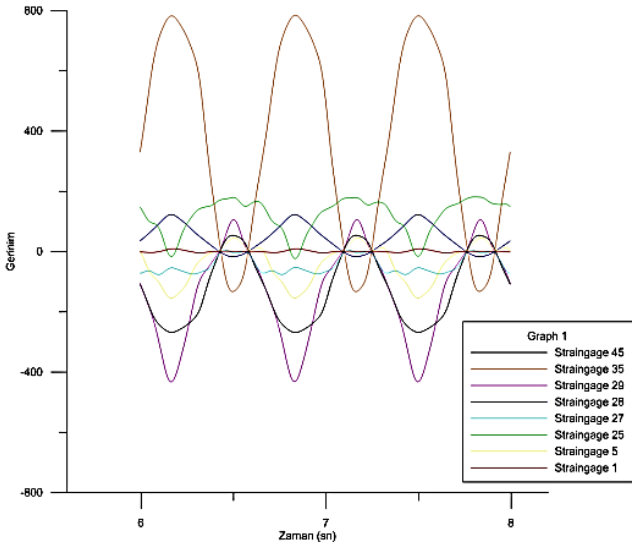
Şekil 6.17: 250000 Çevrim sonrası alınan straingage ölçüm sonuçları



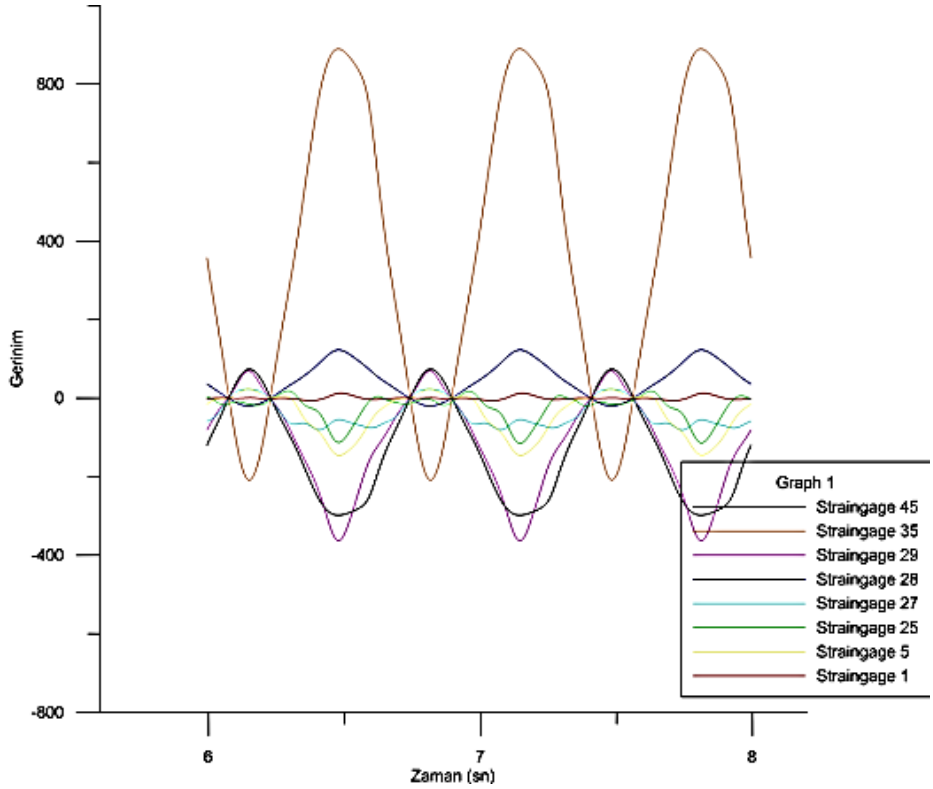
Şekil 6.18: 480000 Çevrim sonrası alınan straingage ölçüm sonuçları



Şekil 6.19: 720000 Çevrim sonrası alınan straingage ölçüm sonuçları



Şekil 6.20: 970000 Çevrim sonrası alınan straingage ölçüm sonuçları



Şekil 6.21: 1500000 Çevrim sonrası alınan straingage ölçüm sonuçları

Çizelge 6.2: Yorulma testi sırasından alınan maksimum gerinim değerleri 1

Çevrim	100 000		250 000		480 000	
Hareket	41 mm	9 mm	41 mm	9 mm	41 mm	9 mm
Straingage						
1	33.864	-0.677	30.110	-3.247	20.034	-1.047
5	-198.486	49.566	-190.999	63.314	-183.789	63.260
25	-218.688	50.301	-199.150	65.682	-178.429	71.366
27	-39.496	14.535	-44.097	-1.054	-42.222	9.984
28	127.887	-16.308	119.041	-15.915	117.966	-11.056
29	-493.047	117.269	-507.306	138.966	-521.428	137.203
35	654.078	-138.479	601.895	-106.099	571.828	-95.531
45	-222.002	48.868	-201.803	36.329	-191.576	32.396

Çizelge 6.3: Yorulma testi sırasından alınan maksimum gerinim değerleri 2

	720 000		970 000		1 500 000	
Hareket	41 mm	9 mm	41 mm	9 mm	41 mm	9 mm
Straingage						
1	15,425	-2,280	10,399	-4,780	13,580	-6,063
5	-169,776	58,095	-155,082	46,428	-147,143	23,805
25	-190,365	69,965	333,044	-43,964	-196,083	81,827
27	-55,486	7,593	-78,902	5,443	-84,933	23,444
28	125,711	-10,044	123,750	-17,964	123,234	-20,352
29	-461,741	149,932	-433,177	107,935	-363,823	70,267
35	717,423	-92,509	799,488	-134,377	893,127	-210,700
45	-340,419	39,714	-269,804	54,693	-298,787	74,337

Tork tüp parçalarında oluşan gerinim değerinden, parçaların üzerinde oluşan gerilme değerleri hesaplanmıştır.

Esnek kaplinler üzerindeki 1 ve 28 numaralı straingagelerden alınan ölçümlerde; 8 MPa ve 28 MPa gerilme oluşmuştur. Boru giriş parçası üzerindeki 5 numaralı straingageden alınan ölçümlerde; 15 Mpa gerilme oluşmuştur. Tork borusu üzerindeki 25,27,35 ve 45 numaralı straingagelerden alınan ölçümlerde maksimum 188 MPa gerilme oluşmuştur. Elde edilen gerilme değerleri, emniyetli akma gerilmesinden küçük olduğu için test sonuçlarında parçalar emniyetlidir.

6.3.4 Merkezkaç testi

Ana rotor sisteminin dönmesi ile tork tüp üzerine merkezkaç kuvveti de etkimektedir.

6.3.4.3 Deneyin yapılışı

Merkezkaç testini gerçekleştirmek amacı ile deney düzeneğine tork tüpün

- Boru Giriş Mili ve Küresel Mafsal
- Boru Giriş Parçası

- Tork Boruları ve Adaptörleri ve Burç
- Boru Ayakları parçaları bağlanmıştır.

Tork Tüp Ağırlığı: 2.441 gr

Tork Tüp Ağırlık Merkezi: 526 mm

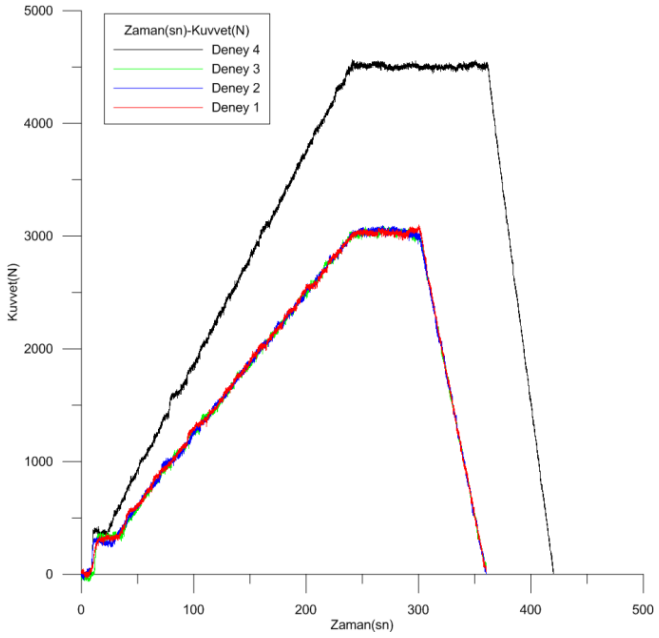
Dönüş Hızı: 320 rpm = 33.51 rad/sn [12].

$$F_{merkezkac} = m \times w^2 \times r = 1440\ N \cong 1500\ N \qquad \textbf{(6.8)}$$

Deney 3 aşamalı olarak kuvvet kontrollü olarak gerçekleşmiştir. Deney sırasında merkezkaç kuvveti emniyetli olması amacı ile iki ve üç kat olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

İki kat emniyetli olarak gerçekleştirilen deneylerde; ilk olarak 240 sn içinde uygulanan 3000 N değerine çıkılmış, 60 sn boyunca 3000 N etkisinde beklenmiş ve daha sonra 60 sn içinde 0 N'a dönüş yapılmıştır(Şekil 6.22).

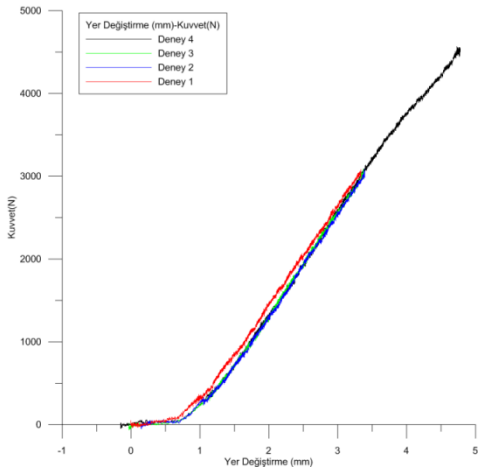
Üç kat emniyetli olarak gerçekleştirilen deneylerde; ilk olarak 240 sn içinde uygulanan 4500 N değerine çıkılmış, 120 sn boyunca 4500 N etkisinde beklenmiş ve daha sonra 60 sn içinde 0 N'a dönüş yapılmıştır(Şekil 6.22).



Şekil 6.22: Zamana bağlı kuvvetin değişimi

6.3.4.4 Sonuçlar

Şekil 6.23'te, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle, tork tüp merkezkaç deney düzeneği üzerinde oluşan yer değiştirme değerleri görülmektedir. Çizelge 6.4'de merkezkaç kuvveti altında oluşan maksimum yer değiştirme değerleri verilmiştir.

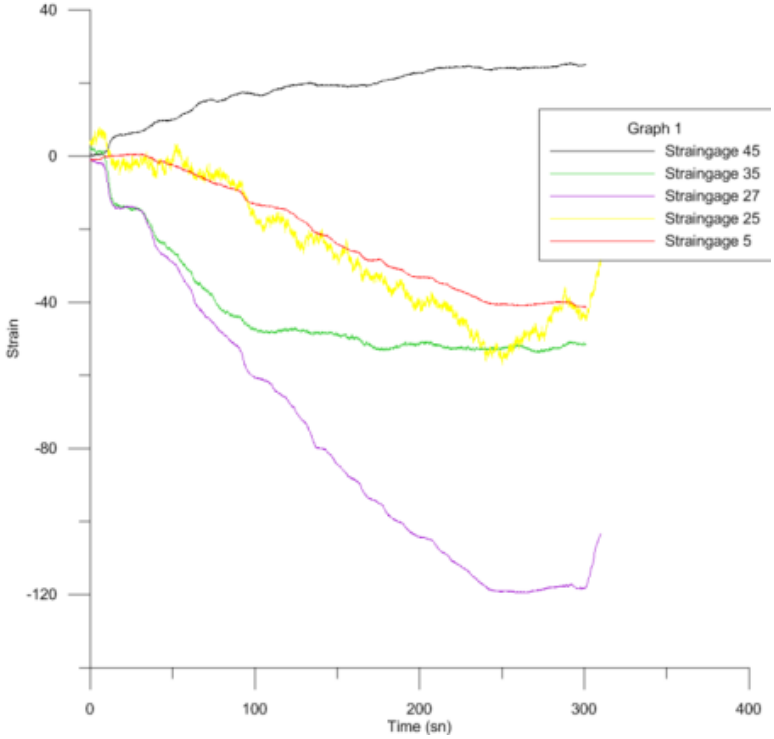


Şekil 6.23: Kuvvet etkisi altında oluşan test sisteminde yer değiştirme miktarı

Çizelge 6.4: Kuvvetin etkisiyle oluşan maksimum yer değiştirme

		Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4
Kuvvet	N	3029.88	3050.76	3030.63	4505.89
Maksimum Yer Değiştirme	mm	3.337	3.395	3.374	4.777

Şekil 6.24'te, 3000Nluk merkezkaç kuvveti etkimesiyle, tork tüp üzerinde oluşan gerinim değerleri görülmektedir.



Şekil 6.24: Deney 1-zamana bağlı gerinim değerleri

Çizelge 6.5: Merkezkaç testleri sırasında oluşan maksimum gerinim ve gerilme

			Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4
	Merkezkaç Kuvveti		3000 N	3000 N	3000 N	4500 N
Straingage 5	Maksimum Gerinim	(mikrogerinim)	-41.75	-47.28	-48.26	-71.99
Boru Giriş Parçası	Maksimum Gerilme	MPa	3.066	3.404	3.474	5.18
Straingage 25	Maksimum Gerinim	(mikrogerinim)	-57.29	-91.15	-109.80	-142.33
Tork Boru 1	Maksimum Gerilme	MPa	4.124	6.570	7.905	10.25
Straingage 27	Maksimum Gerinim	(mikrogerinim)	-119.62	-117.20	-125.17	-165.96
Tork Boru 2	Maksimum Gerilme	MPa	8.613	8.438	9.012	11.95
Straingage 35	Maksimum Gerinim	(mikrogerinim)	-53.93	-66.70	-71.38	81.23
Tork Boru 1	Maksimum Gerilme	MPa	3.883	4.802	5.139	5,85
Straingage 45	Maksimum Gerinim	(mikrogerinim)	25.48	28.65	27.38	-15.38
Tork Boru 1	Maksimum Gerilme	MPa	1.834	2.063	1.971	1.11

Tork tüp parçalarında oluşan gerinim değerinden, parçaların üzerinde oluşan gerilme değerleri hesaplanmıştır. Tork tüp parçalarında merkezkaç kuvveti etkisinde oluşan gerilme değerleri, emniyetli akma değerinden küçüktür. Test sonucunda elde edilen gerilme sonuçlarına göre tork tüp sistemi merkezkaç kuvveti açısından emniyetlidir.

6.4 Ekstrem Uçuş Şartları Testleri

İTÜ-HTH'ın palasına zorlu manevra şartlarında yüksek aerodinamik moment etki etmektedir. Tork tüpünün yapısal olarak zorlu manevra şartlarında çalışabilmesi gerekmektedir.

Zorlu manevra şartlarında etkiyen aerodinamik momentler, çelik kirişin geometrik özellikleri ile değiştirilerek tork tüpe uygulanmıştır.

Ekstrem uçuş şartları altında statik ve yorulma testleri yapılmıştır. Ana rotor palasının hücum açısını 12° artırmak için 41 mm yer değiştirme ve hücum açısını 2° azaltmak için ise 9 mm yer değiştirme uygulanmıştır.

6.4.1 Çelik kiriş boyutlandırma

Ekstrem uçuş şartlarında oluşan 120 Nmlik aerodinamik moment, kirişin 1000 Nluk kuvvet olarak etki etmektedir(Şekil 6.12).

$$M = F * l \tag{6.9}$$

$$F = \frac{120}{0.12}\frac{Nm}{m} = 1000\ N \tag{6.10}$$

Palanın 15° açısal değişimi, çelik kirişin ucunda 31 mm yer değiştirmeye neden olur. Uç kısımdan etkiyen kuvvet sonucunda, kirişin 31 mm yer değiştirmesi için kirişin boyunun 765 mm olması gerekmektedir.

$$\delta = \frac{F\ x\ l^3}{3\ x\ E\ x\ I} \tag{6.11}$$

$$\text{E=210000 Nmm} \tag{6.12}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{0.4\ x\ 0.019^3}{12} = 2{,}286\ x\ 10^{-8}\ mm^4 \tag{6.13}$$

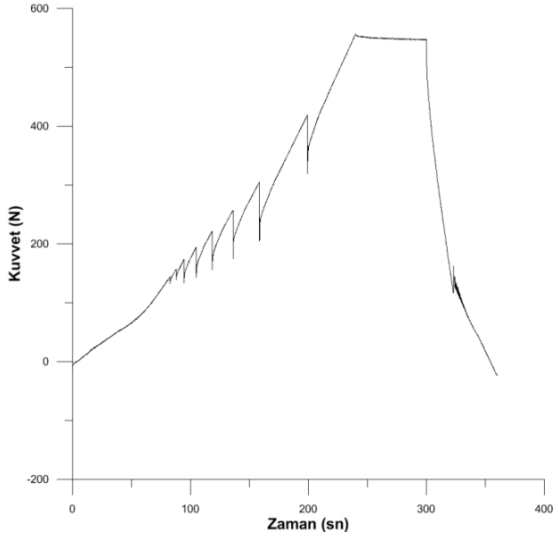
$$l = \sqrt[3]{\frac{\delta\ x\ 3\ x\ E\ x\ I}{F}} = 765\ mm \tag{6.14}$$

Ayrıca kiriş üzerine etkiyen kuvvet sonucu kiriş kökünde meydana gelen maksimum moment 764 Nm'dir. Kuvvetin etkisi ile kirişin ankastre kısımında meydana gelen maksimum gerilme 317 MPa'dır.

6.4.2 Statik testler

6.4.2.1 Deneyin yapılışı

Tork tüpü 240 saniyede ana rotor palasına 12° açı verecek şekilde 41 mm yer değiştirme uygulanıp, 60 saniye bu durumda beklenilmiştir.Şekil 6.25'te zamana bağlı olarak kuvvetin değişimi verilmiştir.



Şekil 6.25: Statik testlerde zamana bağlı olarak kuvvetin değişimi (hucum açısını 12° artırmak için yapılan testler)

6.4.2.2 Sonuçlar

Çizelge 6.6'da ana rotor palasının hücum açısının 12° artması durumunda straingagelerden okunan gerinim değerleri ve

Çizelge **6.7**'de ise ana rotor palasının hücum açısının 2° azalması durumunda straingagelerden okunan gerinim değerleri verilmiştir. Ayrıca Çizelge 6.6 ve

Çizelge **6.7**'de tork tüp parçaları üzerinde oluşan maksimum gerilme değerleri verilmiştir.

Esnek kaplinler üzerindeki 28 numaralı straingageden alınan ölçümde; 18.5 MPa gerilme oluşmuştur.

Boru giriş parçası üzerindeki 5 numaralı straingageden alınan ölçümlerde; 15.5 Mpa gerilme oluşmuştur. Tork borusu üzerindeki 25,27 ve 35 numaralı straingagelerden alınan ölçümlerde maksimum 90 MPa gerilme oluşmuştur. Pala kesit parçası üzerindeki 29 numaralı straingageden alınan ölçümde; 91 MPa gerilme oluşmuştur.

Elde edilen gerilme değerleri, emniyetli akma gerilmesinden küçük olduğu için test sonuçlarında parçalar emniyetlidir.

Çizelge 6.6: Statik testlerde tork tüp üzerinde oluşan gerinim değerleri (hücum açısını 12° artırmak için yapılan testler)

Straingage No	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Maksimum Gerilme
	mikro gerinim						MPa
5	-	-	-	215	207	202	15.5
25	173	184	185	-	-	-	13.3
27	-	-	-	81	62	73	5.8
28	69	88	83	-	-	-	18.5
29	432	416	422	401	396	393	90.7
35	981	1030	1009	1066	1068	1069	76.9

Çizelge 6.7: Statik testlerde tork tüp üzerinde oluşan gerinim değerleri (hücum açısını 2° azaltmak için yapılan testler)

Straingage No	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Maksimum Gerilme
	mikro gerinim						MPa
5	-	-	-	40	30	30	2.9
25	33	30	30	-	-	-	2.4
27	-	-	-	19	31	30	2.2
28	20	20	20	-	-	-	4.2
29	105	101	103	124	118	121	25.4
35	216	216	220	161	209	206	15.84

6.4.3 Yorulma testi

İTÜ-HTH tork tüpünün, kısa süreli olarak ekstrem uçuş şartlarında çalışması gerekmektedir. Tork tüpüne, yüksek aerodinamik momentler etkisinde ekstrem uçuş şartları altında 2000 çevrim boyunca yorulma testi yapılmıştır.

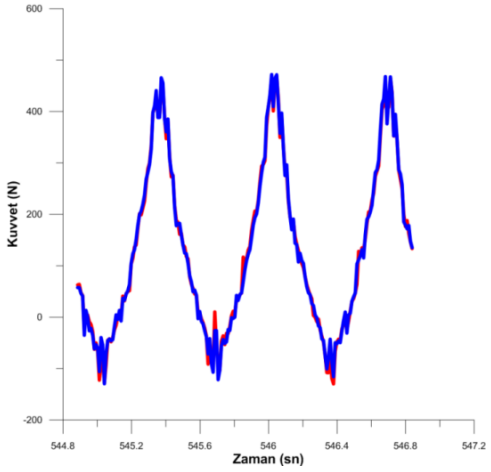
$$Çevrim\ Sayısı = 2000\ çevrim = 6.5\ dk \quad \textbf{(6.15)}$$

6.4.3.1 Deneyin yapılışı

MTS test cihazı ile tork tüpünün ekstrem uçuş şartları testinin 5.2 Hz'te yapılması mümkün değildir. Bu yüzden MTS test cihazının uygun olarak çalıştığı 1.5 Hz ile tork tüpünün ekstrem şartlar altındaki testleri yapılmıştır.

6.4.3.2 Sonuçlar

Ekstrem uçuş şartlarında yapılan testler sonucu çelik kiriş yardımı ile tork tüp üzerine etkiyen yüksek aerodinamik momentler tork tüpünde kırıma yol açmamıştır. 2000 çevrimlik süre boyunca tork tüp güvenilir şekilde çalışmıştır. 2000 çevrim boyunca MTS cihazında oluşan kuvvet değerleri Şekil 6.26'da verilmiştir. Veri toplama sisteminde yaşanan sorunlardan dolayı , ekstrem uçuş şartları altında yapılan yorulma testinde gerinim değerleri elde edilememiştir.



Şekil 6.26: Ekstrem uçuş şartları - zamana bağlı olarak kuvvetin değişimi

6.5 Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

İTÜ-HTH'a ait tork tüp için standart uçuş şartlarında ve ekstrem uçuş şartlarında testler tamamlanmıştır. Standart uçuş şartları için yorulma ve merkezkaç testleri yapılmıştır. Tork tüp üzerine esnek pala sisteminden kaynaklanan moment ve aerodinamik momentler etki etmektedir. Standart uçuş şartları testler için ilk olarak tork tüpe uygulanan kuvvet sonucunda ana rotor palası üzerinde meydana gelen açısal değişim ölçülerek, tork tüpün sınır şartları belirlenmiştir. Ayrıca aerodinamik momentleri modellemek amacıyla çelik kiriş kullanılmıştır. Yorulma testleri ise 1.5 Hz'te 1500000 çevrim olarak yapılmıştır. Testler sonucunda tork tüp üzerinden straingageler ile gerinim değerleri elde edilmiştir. Merkezkaç testi için tork tüpü

üzerine eksenel olarak merkezkaç kuvvetinin iki ve üç katı kuvvet uygulanmıştır ve straingageler ile gerinim değerleri ölçülmüştür. Straingageler üzerinden elde edilen gerinim değerleri sonucu, tork tüp üzerinde meydana gelene gerilmeler hesaplanmıştır. Tork tüp üzerindeki gerilme değerleri, emniyetli akma gerilmesinden azdır. Bu durumda yapısal olarak tork tüp emniyetlidir. Ekstrem uçuş şartları için yüksek aerodinamik momentleri modellemek için çelik kiriş tekrar boyutlandırılmıştır. Statik test ve yorulma testleri yapılmıştır. Statik testler sonucunda elde edilen gerilme değerleri emniyetli akma gerilmesinden küçüktür. Yorulma testi 2000 çevrim boyunca devam etmiştir. Testler sonucunda gözle görülür bir kırım görülmemiştir.

Ancak testler sırasında karşılaşılan tasarım problemleri ortaya çıkmıştır. İlk olarak boru giriş parçasının, ana rotor palası ile eşdeğer açıda dönmediği görülmüştür. Boru giriş parçası 20.8° dönmesine rağmen, palanın hücum açısı değişimi 14° olmaktadır. Bu durumda tork tüp borularında burulma meydana gelmektedir. Boru giriş parçasının daha fazla dönmesi durumunda ana rotor palasının kök metaline çarptığı görülmüştür. Boru giriş parçası daha fazla dönmediği için, ana rotor palasında tasarım isteri olan 15°lik hücum açısı değişimi mümkün değildir. Tasarım sırasında bu sorun görülmemiştir, çünkü boru giriş parçasının açısal değişimi ile ana rotor palasının açısal değişiminin aynı olması beklenmiştir. Bu şartların uygun olmadığı düşünülürse, tork tüp tasarımının geliştirilmesinde daha rijit bir tasarım ortaya konması gerekebilir. Ancak ana rotor palasının uçuş süresince açısal değişimi 12° olduğu için, tork tüpünün gerçekleştirebildiği 14° hücum açısı yeterli olacaktır ve tasarımda değişiklik yapılmasına gerek yoktur.

Testler sırasında görülen diğer bir problem ise tork tüp borularının bağlantısı ile ilgilidir. Boru giriş parçası ile ana rotor palası arasındaki açısal değişim farkından dolayı, tork tüp borularında burulma meydana gelmektedir. Bu burulma sonucunda, boru kesit parçasına, boru adaptörleri ile dişler ile bağlanan tork tüp borularının, dişlerinde gevşeme gözlenmiştir. Testler sonunda, boru giriş parçası ve adaptörün dişlerinde ezilmeler ve aşınmalar oluşmuştur(Şekil 6.27 ve Şekil 6.28).

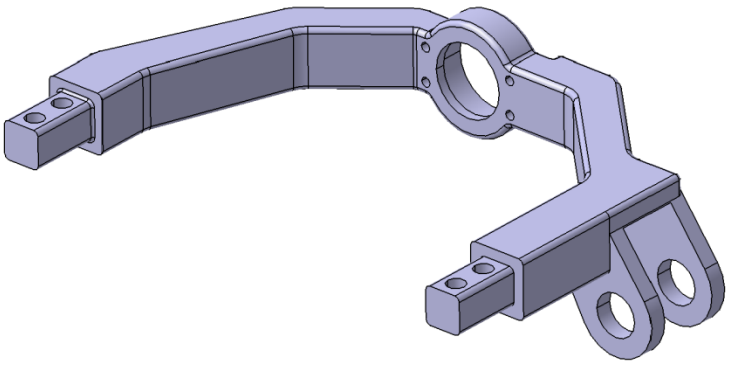


Şekil 6.27: Test sonrası: Tork tüpde oluşan hasarlar



Şekil 6.28: Test sonrası: Boru adaptörü yakından görünüm

Aşınmaların gerçekleşmesi ile beraber, tork tüp üzerine aynı hareketi verirken MTS test cihazının uyguladığı kuvvetin azaldığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı, boru giriş parçasına boru adaptörleri ile bağlanan tork tüp borularının bağlantı şeklinin değiştirilmesi gerekmektedir(Şekil 3.7). Bağlantı şekli olarak dişler yerine, şekil bağlı bağlantı yapılmıştır(Şekil 6.29). Boru giriş parçasının tasarımının değişmesi ile beraber, tork boruları ile boru giriş parçası arasındaki boru adaptörlerininde tasarımında değişiklik yapılmıştır.



Şekil 6.29: Boru giriş parçası –Tasarım geliştirme

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, İTÜ-HTH'a ait tork tüpünün yapılması amaçlanmıştır. İlk olarak helikopterlerde bulunan tork tüp sistemleri araştırılmıştır. İTÜ-ROTAM'da testleri ve tasarımları yapılmış tork tüpleri incelenmiştir. Ayrıca İTÜ-HTH'ın genel özellikleri anlatılmış ve İTÜ-HTH'ı oluşturan bileşenler ve sistemler hakkında bilgi verilmiştir.

İTÜ-HTH'a ait farklı uçuş şartları altında performans analizleri yapılmıştır. Tork tüp tasarım isteri olarak, performans analizleri sonucunda ana rotor palasının hücum açısı değişimi ve ana rotor palası üzerine etkiyen aerodinamik momentler kullanılmıştır. Tork tüpün $\mp 15°$ hücum açısı değişiminde çalışması istenmektedir. Tasarım isterleri sonucunda ana rotor palası üzerine rahat montajlanabilen tork tüp tasarımı tamamlanmıştır.

Tork tüpünün sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Sonlu elemanlar modeline uygun sınır şartları ve kuvvetlerin uygulanması ile sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri sonucunda tork tüpü parçalarında oluşan gerilme değerleri, emniyetli akma değerinin altında olduğu için tork tüp yapısal tasarımı emniyetlidir.

Tork tüpün üretilmesi için teknik resimler hazırlanmıştır. 5ABM tarafından üretim için gerekli malzeme listesi ve maliyet bilgisi hazırlanmıştır. Üretimin tamamlanması ile tork tüp, pala kesiti üzerine montaj edilmiştir.

Tork tüpünün yapısal testleri İTÜ-ROTAM yapı laboratuvarında bulunan MTS test cihazı ve yardımcı ekipmanları ile yapılmıştır. Tork tüp yapısal testleri standart uçuş şartları testleri ve ekstrem uçuş şartları testleri olmak üzere iki farklı durum için yapılmıştır.

Standart uçuş şartları testlerinde; ilk olarak ana rotor palası üzerine montajlanmış tork tüpüne kuvvet uygulanmış ve ana rotor palası üzerindeki hücum açısı değişimi gözlenmiştir. Tork tüp testlerinde palalar üzerine etkiyen aerodinamik momentleri modellemek için kullanılan çelik kirişin boyutlandırması yapılmıştır. Yapılan boyutlandırmaya göre, çelik kiriş MTS test cihazında test edilmiştir. MTS test cihazında elde edilen sonuçlar ile mukavemet hesapları sonucunda elde edilen sonuçlar uyumludur. Sonlu elemanlar analizleri sonucunda, tork tüp üzerinde gerilmelerin yüksek olduğu kısımlara straingageler yapıştırılmıştır. Tork tüpünün helikopter üzerinde 75 saat (1500000 çevrim) uçuş süresince kırıma uğramaması

gerekmektedir. Yorulma testinde pala kesitine montajı yapılmış tork tüp, çelik kirişe iki ucu mafsallı boru ile bağlanmıştır. Tork tüpe yapılan yorulma testi MTS test cihazının çalışma koşullarından dolayı ana rotor palasının dönüş devri olan 5.2 Hz yerine, 1.5 Hz ile yapılabilmiştir. Standart uçuş şartları yorulma testi 1.5 Hz ile yapıldığından yaklaşık olarak 300 saat (12,5 gün) sürmüştür. Yorulma testleri belli aralıklarda durdurularak, straingageler üzerinden ölçümler alınmıştır. Farklı çevrimlerden sonra ölçümlerin durdurularak straingagelerden ölçüm alınmasının sebebi çevrim sayısının artması ile parça üzerinde meydana gelen değişikliklerin gözlenmesi için yapılmıştır. Tork tüp parçaları üzerinde yorulma testleri sırasında meydana gelen gerilmeler, emniyetli akma değerinin altındadır. Standart uçuş şartları yorulma testleri sonrasında, tork tüp üzerine merkezkaç testi yapılmıştır. Tork tüp, eksenel olarak üzerine etkiyen merkezkaç kuvvetin iki ve üç katı kuvvet uygulanarak çekilmiştir. Merkezkaç testleri sonucunda tork tüp üzerinde oluşan gerilme değeleri küçüktür.

Ekstrem uçuş şartları testi için, pala üzerinde oluşan yüksek aerodinamik momentleri modellemek amacıyla, çelik kiriş tekrar boyutlandırılmıştır. Ekstrem uçuş şartları testi statik ve yorulma testleri olarak yapılmıştır. Statik testler ile tork tüp, maksimum aerodinamik moment etkisinde belli süre beklenilmiş ve bu sürede straingagelerden değerler okunmuştur. Ekstrem uçuş şartları yorulma testi ise 2000 çevrim yapılmıştır.

Testler sonucunda, tork tüp tasarım problemleri görülmüştür. Tork tüp üzerine uygulanan kuvvet sonucunda, boru giriş parçası üzerinde oluşan açısal değişim ile pala üzerinde meydana gelen hücum açısı değişimi aynı değildir. Ancak tork tüpün bu şekilde çalışması durumunda ana rotor palası üzerinde meydana gelen hücum açısı değişimi yeterlidir.

Testler sırasında görülen diğer bir tasarım problemi ise tork tüp borularının, boru giriş parçasına bağlantısını sağlayan adaptör kısmı ile ilgilidir. Boru giriş parçası ile pala arasında oluşan açısal farktan dolayı, tork tüp borularında meydana gelen burulma, boru giriş parçası ile boru adaptörleri arasındaki dişlerde ezilme ve aşınmalar oluşturmuştur. Bu tasarım probleminin giderilmesi için boru giriş parçası ve boru adaptör parçalarının tasarımının değiştirilmiştir. Bu iki parça arasında bağlantı dişler yerine, şekil bağlı olarak yapılmıştır.

Bundan sonraki çalışmalarda, yapılan yeni tasarım için sonlu elemanlar analizleri tekrarlanmalıdır. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarının uygun olması durumunda, teknik resimler güncelleştirilerek üretim gerçekleştirilmelidir. Üretim sonunda, tasarım değişikliğinden dolayı, boru giriş parçası üzerinde bazı testler yapılarak, tasarımın güvenilirliği sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

[1] **Leishman, G.** (2006). *Principles of Helicopter Aerodynamics.* Newyork : Cambridge University Press.

[2] **Watkinson, J.** (2004). *The Art of the Helicopter.* s.l. : Elsevier.

[3] **Newman, S.** (2006). *Foundations of Helicopter Flight.* Londra : Arnold.

[4] **Johnson, W.** (1980). *Helicopter Theory.* Princeton : Princeton University Press.

[5] **İbaçoğlu, H.** *Hanson Modeli Tork Tüp Testi.* İstanbul : ROTAM, 2007.

[6] **İbaçoğlu, H**. *İTÜ-HTH Tork Tüp Ön Tasarımı.* İstanbul : ROTAM, 2008.

[7] **İbaçoğlu, H., Sevgen, E. ve Emingil, A.** (2010). *İTÜ-HTH Tek Borulu Tork Tüp Tasarımı.* İstanbul : ROTAM.

[8] **Brynes, F. E.** (1993). *Bearingless Main Rotor Assembly Torque Tube. 5242267* ABD.

[9] **Sibyan, E. S.** (1986). *Fiber Reinforced/Epoxy Matrix Composite Helicopter Rotor Torque Tube. 4568246* ABD.

[10] **Majeryak, R. J. ve Bossler, R. B.** (1969). *The Bossler Coupling.* Washington D.C. : NASA.

[11] **Sevgen, E. ve Emingil, A.** (2010). *Tek Borulu Tork Tüpün Yapısal Analizi.* İstanbul : ROTAM.

[12] **ROTAM.** (2008). İTÜ-HTH Tanıtım Kataloğu. İstanbul : ROTAM.

[13] **Türkyılmaz, U.** (2008). *Yakıt Sistemi Karakteristiklerinin Ve Yerleşimi Belirlenmesi Ön Çalışmaları.* İstanbul : ROTAM.

[14] **Ölçer, F. E. ve İbaçoğlu, H.** (2008). *İTÜ-HTH Kontrol Yükleri.* İstanbul : ROTAM.

[15] **SKF.** (2012). SKF-Maintenance-free radial spherical plain bearings, steel/sinter bronze composite.

[16] ABAQUS Help Files.

[17] **Seykoç Aliminyum.** (2012) Alaşımlı Aliminyumlar-Al 7075.

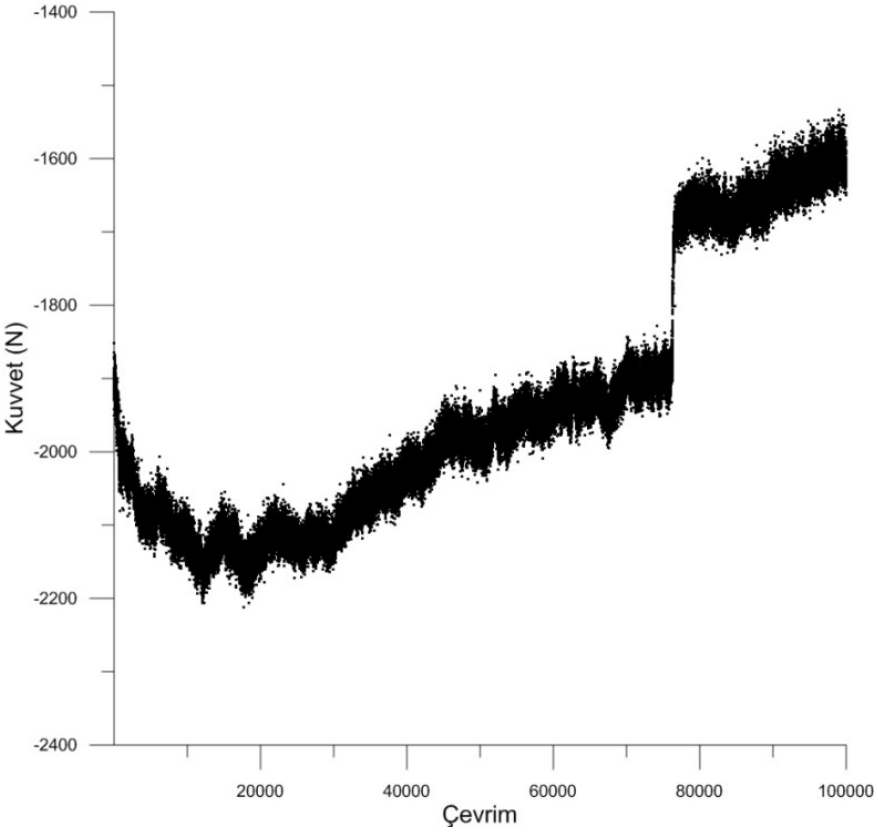
[18] **5ABM.** (2011). *İTÜ-ROTAM Malzeme Talepleri.* İstanbul : ROTAM.

[19] DAC Express Help Files.

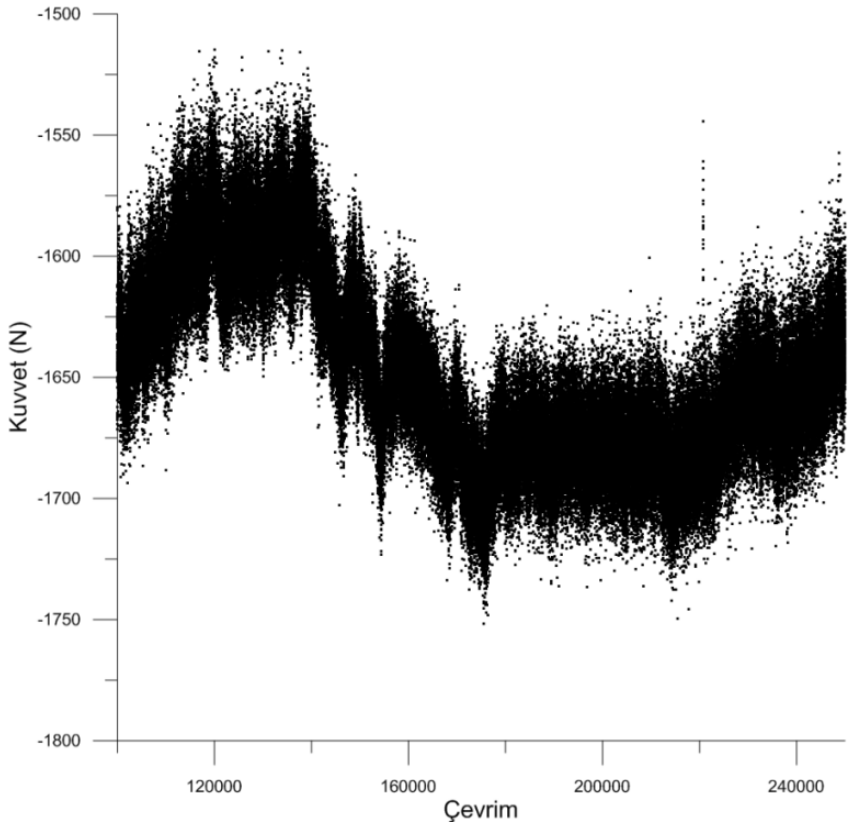
EKLER

EK A: GRAFIKLER

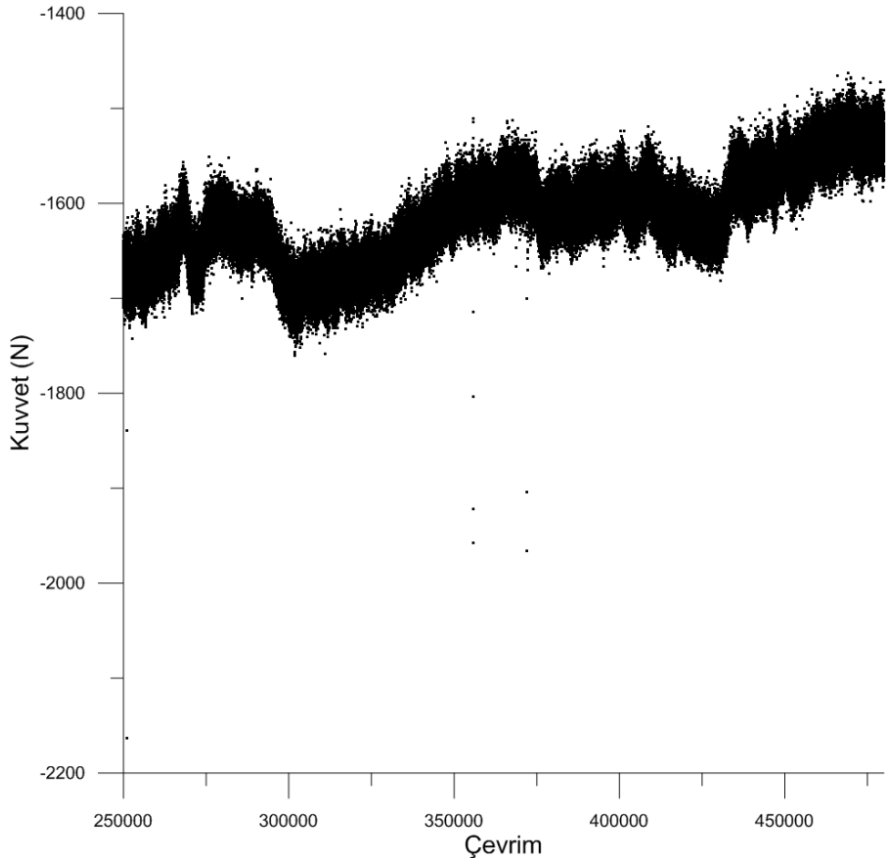
EK A



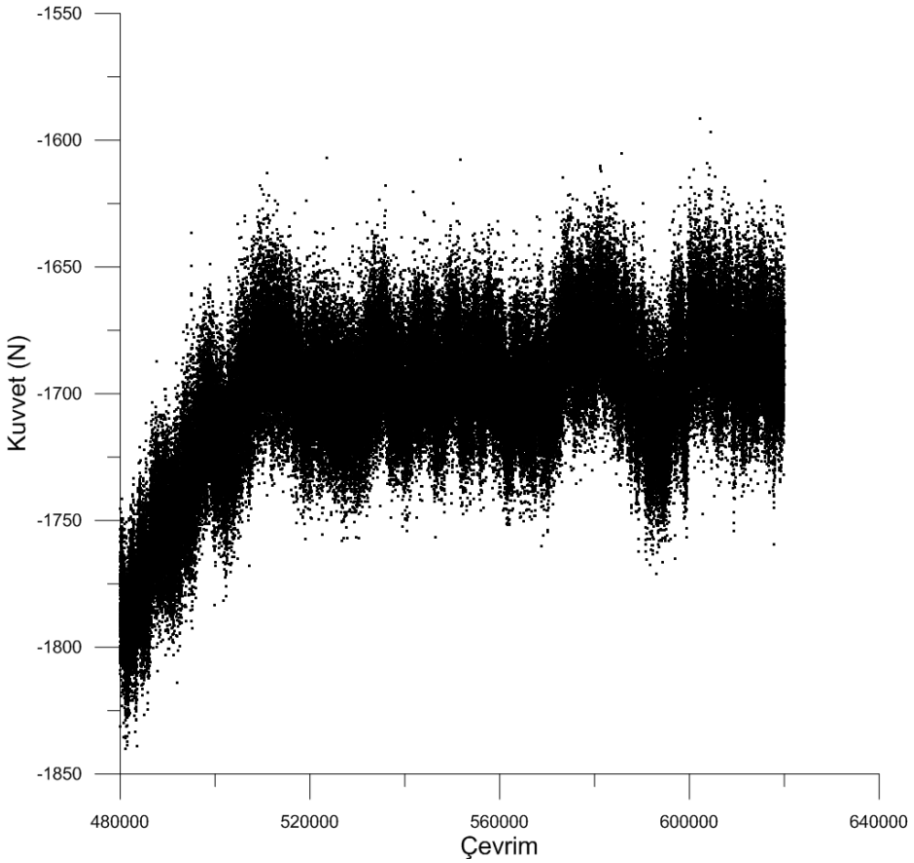
Şekil A.1: 0-100000 Çevrim arası kuvvetin değişimi



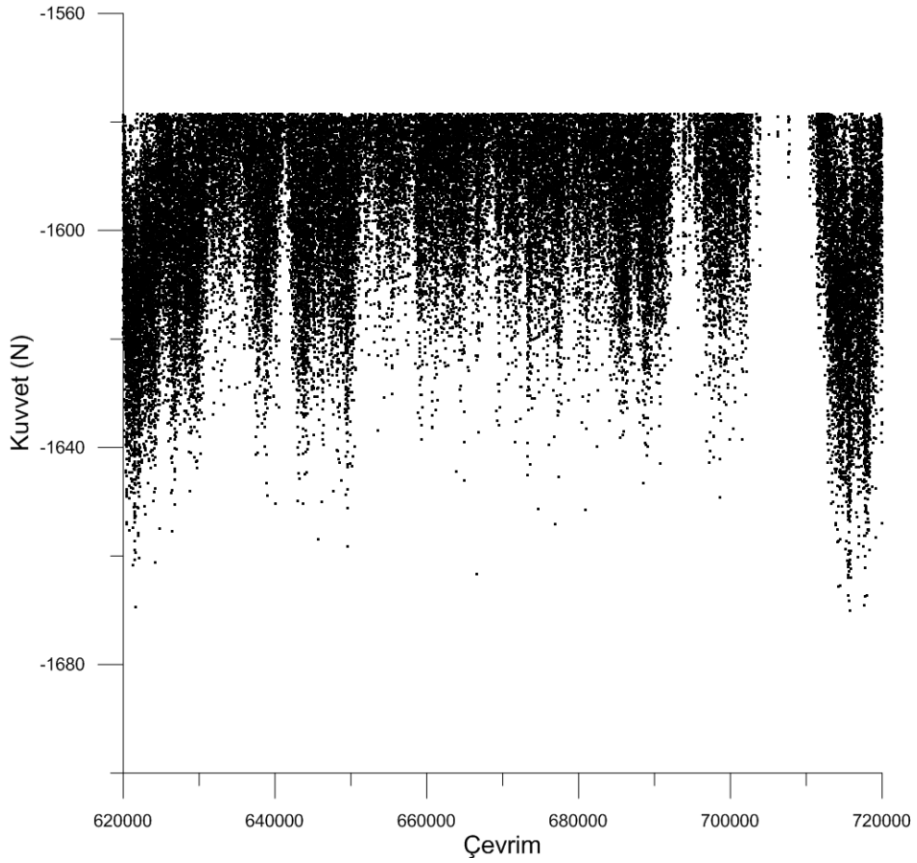
Şekil A.2: 100000-250000 Çevrim arası kuvvetin değişimi



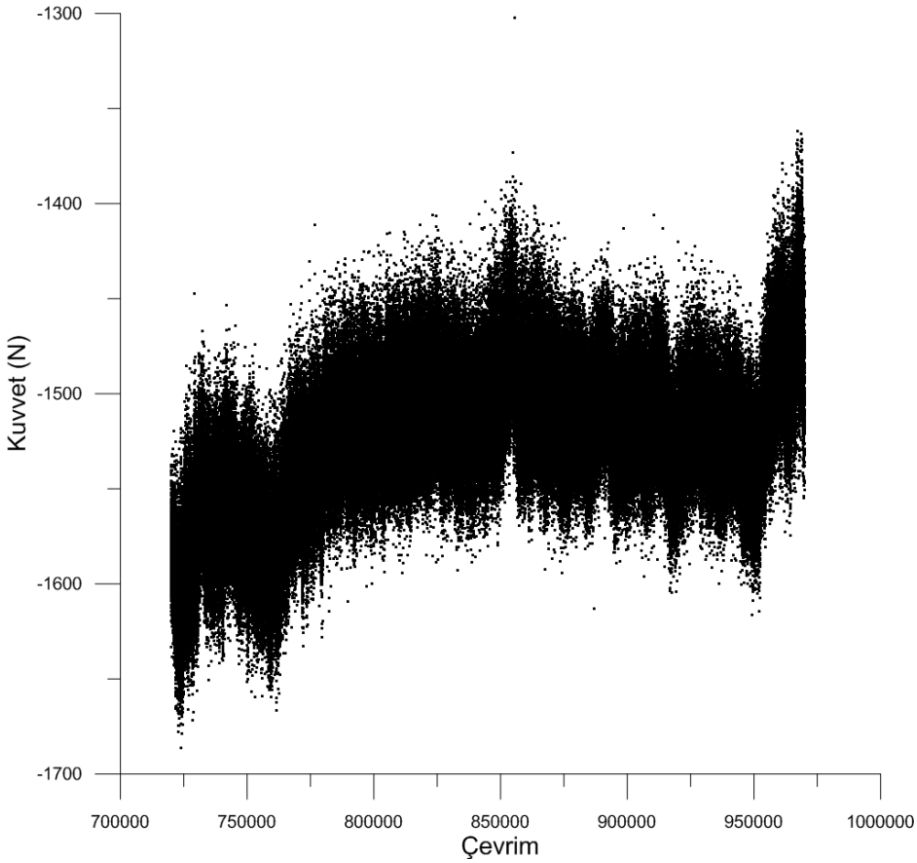
Şekil A.3: 250000-480000 Çevrim arası kuvvetin değişimi



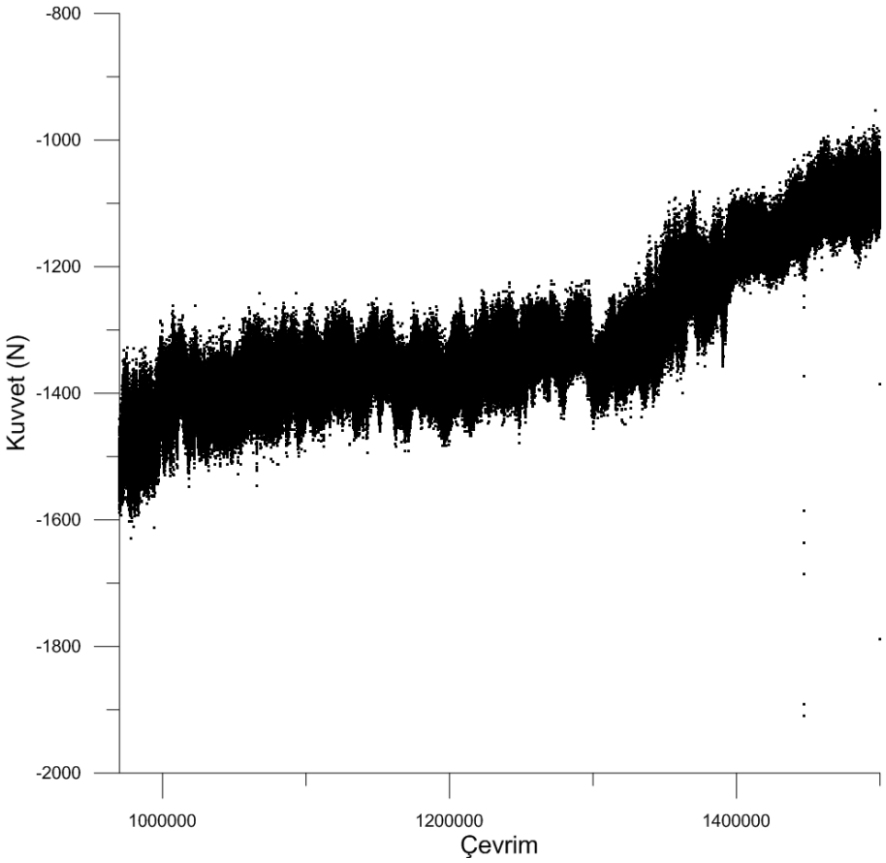
Şekil A.4: 480000-620000 Çevrim arası kuvvetin değişimi



Şekil A.5: 620000-720000 Çevrim arası kuvvetin değişimi



Şekil A.6: 720000-970000 Çevrim arası kuvvetin değişimi



Şekil A.7: 970000-1500000 Çevrim arası kuvvetin değişimi

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı: Muzaffer Kuzubaşoğlu

Doğum Yeri ve Tarihi: Kadiköy-17.04.1987

Adres: Kadiköy-İstanbul

E-posta: kuzubasoglu@itü.edu.tr

Lisans.: İstanbul Teknik Üniversitesi- Uçak Mühendisliği (2010)

Yüksek Lisans.: İstanbul Teknik Üniversitesi- Disiplinlerarası Uçak ve Uzay Bilimleri Ana Bilim Dalı (2012)