



**HELİKOPTER HÜCUM AÇISI DEĞİŞTİRİCİSİNİN TEMAS
KUVVETLERİ ETKİSİ ALTINDAKİ YORULMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

Sadık KARADUGAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sadık KARADUGAN

29/07/2024

HELİKOPTER HÜCUM AÇISI DEĞİŞTİRİCİSİNİN TEMAS KUVVETLERİ ETKİSİ ALTINDAKİ YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Sadık KARADUGAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Dinamik olarak yüklenen hücum açısı değiştirici çubuk ucu parçası ve küresel rulman dış kısım arasında makro ilişkili hareket sürtünme yorulması ve sürtünme düz yorulma açısından oldukça tehlikeli olabilmektedir. Bu çalışmada helikopter rotor sistemlerinin en önemli parçalarından hücum açısı değiştirici çubuk ucu parçasının temas kuvveti etkisi ile sürtünme yorulması incelenmiştir. Çalışmanın ana amacı sürtünme yorulmasına yol açan temas eden yüzeyler arasında nispeten küçük kayma hareketi durumunda sürtünme yorulması ve temas kuvveti ortaya çıkmaktadır. Yapılan çalışmada farklı sıklıklar, malzeme özellikleri ve sürtünme katsayıları ile sürtünme yorulmasına etkisi incelenerek temas kuvvetinin parçaya etkisi çalışılmıştır. Temas kuvveti için literatürde en fazla incelenen ve en doğru sonuçların verildiği Hertzian temas teorisinden yararlanılmıştır. İncelemede sürtünme teması tanımlamak için, ticari sonlu elemanlar model programlarından ABAQUS programı tercih edilmiştir. Yapılan incelemeler sonrasında deneysel çalışmalar ile sonuçlar kıyaslanmıştır. Çalışmanın sonuçları olarak çelik malzeme ile sürtünme yorulmasının alüminyum parçaya göre sürtünme yorulması açısından daha fazla ömrünü azalttığı ve temas sıklığının artmasının parçanın temas kuvvetini artırdığı ve artışın sonucu parçanın sıklık artması ile sürtünme yorulmasının artarak parçanın ömrünü azalttığı görülmüştür. İncelenen sürtünme katsayılarının parçanın temas kuvveti ve sürtünme yorulması açısından parçanın ömründe büyük bir etki yaratmadığı gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 91422
Anahtar Kelimeler : Temas Kuvveti, Sürtünme yorulması, Sıklık, Hertzian temas teoremi
Sayfa Adedi : 93
Danışman : Prof. Dr. Tuncay KARAÇAY

INVESTIGATION OF FATIGUE BEHAVIOR OF HELICOPTER PITCH CHANGE
LINK UNDER THE EFFECT OF CONTACT FORCES

(M. Sc. Thesis)

Sadık KARADUGAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

ABSTRACT

The dynamically loaded rod end and spherical bearing race connection that macro relative movements can be quite dangerous in terms of fretting fatigue and fatigue methodology. In this study, fretting fatigue with contact force effect of pitch link assembly - rod end part from the one of the most important parts of helicopter rotor system is examined. In the case of relatively small slip motion between the contact surfaces leading to appear fretting fatigue and contact force. In the study, different tightnesses, different material properties, together with different friction coefficients, the effect of friction fatigue were examined and the effect of contact force on the part was studied. For contact force, Hertzian contact theory, which is studied most in the literature and where the most accurate results are given, has been used. In order to define the friction theme in the review, ABAQUS program is preferred from commercial finite element model programs. After the examinations, the experimental results were compared with the analysis results. As a result of the study, it has been seen that fretting fatigue with steel material reduces its life more than the aluminum part in terms of fretting fatigue, and increasing the contact tightness increases the contact force of the part. It has been observed that the examined friction coefficients do not have a major impact on the life of the part in terms of contact force and friction fatigue.

Science Code : 91422
Key Words : Contact force, fretting fatigue, tightnesses, Hertzian Contact Theorem
Page Number : 93
Supervisor : Prof. Dr. Tuncay KARAÇAY

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenim hayatım ve tez çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübeleri ile desteğini hiçbir zaman esirgemedi katkıda bulunan danışman hocam Sn. Prof. Dr. Tuncay Karaçay’a en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam için tüm imkân ve olanaklarını sunarak bana destek olan Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. ’ne teşekkür ederim.

Analiz çalışmaları ve tez çalışmam süreci içerisinde bana her konuda yardımcı olan Sn. Umut YILMAZ ve Sn. Eren EROL ’a teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışmam için yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Sn. Murat GÜNEL ve Sn. Arif BELDEK ’e teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde benden maddi ve manevi her türlü desteği hiçbir zaman esirgemeyen çok kıymetli AİLEME en derin duygularıyla teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
3. MODEL VE YÖNTEM.....	27
3.1. Teorik Arka Plan Çalışmaları.....	27
3.2. Parça Tasarımı ve Modellenmesi	30
3.3. Analiz	34
3.3.1. Geometri ve mesh yapısı	34
3.3.2. Yükler, sınır koşulları ve analiz modelinin sadeleştirilmesi.....	40
4. DENEYSEL ÇALIŞMALARI.....	47
4.1. Testin Amacı	47
4.2. Deney Düzeneği	47
4.3. Test Spesimen Açıklaması	49
4.4. Test Spesimen Enstrümantasyon ve Kalibrasyonu	50
4.5. Yükler ve Sınır Koşulları	52
4.6. Parça Yüklemeleri ve Ömür Bilgileri	54
4.7. Test Sonuçları ve Test İncelemesi.....	56

Sayfa

5. BULGULAR VE TARTIŞMA	61
5.1. Hücum Açısı Değiştirici Parçası Kuvvet Analiz Sonuçları	62
5.2. Hücum Açısı Değiştirici Parçası Temas Kuvveti Analiz Sonuçları.....	67
5.3. Hücum Açısı Değiştirici Parçası Yapışma ve Kayma Analiz Sonuçları.....	72
5.4. Hücum Açısı Değiştirici Parçası Birim Uzunluk Başına Deforme Sonuçları.....	78
5.5. Hücum Açısı Değiştirici Parçası Sürtünme Yorulması Ömür Sonuçları	83
6. SONUÇLAR.....	87
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	93

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. SAE 52100 çeliği kimyasal karışım oranı	23
Çizelge 2.2. SAE 52100 çeliğinin mekanik özellikleri	23
Çizelge 3.1. Tasarımda kullanılan parçalar ve malzemeler	33
Çizelge 3.2. Tasarımda kullanılan malzeme özellikleri	33
Çizelge 3.3. Tasarımda kullanılan malzeme özellikleri	34
Çizelge 3.4. Katı model mesh türleri	34
Çizelge 3.5. Önerilen katı model mesh türleri	35
Çizelge 3.6. Mesh doğrulaması	36
Çizelge 3.7. Sonlu elemanlar modeli örgü detayı	40
Çizelge 4.1. Cres 15-5 ph malzeme özellikleri	50
Çizelge 4.2. Pitch link bağlantısı test numunesi komponentleri	50
Çizelge 4.3. Test yükleme değerleri	53
Çizelge 4.4. Numune 1 için hcf yükleme tanımı	55
Çizelge 4.5. Deney numuneleri ömür sonuçları	59
Çizelge 5.1. Çelik ve alüminyum için 0,1 sürtünme katsayısında farklı sıkılık kuvvet sonuçları	65
Çizelge 5.2. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıkılık kuvvet sonuçları	65
Çizelge 5.3. Çelik ve alüminyum için 0,1 sürtünme katsayısında farklı sıkılık temas kuvvet, sonuçları	70
Çizelge 5.4. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıkılık temas kuvveti sonuçları	70
Çizelge 5.5. Çelik ve alüminyum için 0,1 sürtünme katsayılarında farklı sıkılık miktarlarına göre birim uzunluk başına deforme sonuçları	82
Çizelge 5.6. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıkılık miktarlarına göre birim uzunluk başına deforme sonuçları	82
Çizelge 5.7. 0,10 ve 20 sıkılık için sürtünme yorulma ömür sonuçları	86

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Sürtünme aşınması ve sürtünme yorulmasının yer değiştirme genliğine bağlı şematik gösterimi	7
Şekil 2.2. Kuyruk spesimeni test sırasında kırılımı	9
Şekil 2.3. Otomotiv sok absorpsiyon valf diski için sürtünme yorulması	9
Şekil 2.4. Behman ve Mohammed'in Hertz temas teorisi ile sürtünme yorulması çalışması.....	11
Şekil 2.5. Geometrik ve yükleme koşulları.....	12
Şekil 2.6. Thes Rauert, Jenni Herrmann, Peter Dallhoff ve Manuele Sander çalışması.	13
Şekil 2.7. Thes Rauert, Jenni Herrmann, Peter Dallhoff ve Manuele Sander çalışması. a)rotor shaftı için 1:10 ölçeklendirilmiş model b) rotor shaftı için tam ölçekli model.....	13
Şekil 2.8. Küresel olmayan parçacık çalışması temas kuvvet incelemesi	14
Şekil 2.9. Çalışma için parçacıkların birbirleri üzerinde yuvarlanma hareketi gösterimi	15
Şekil 2.10. Re Xia, Guoming Hu çalışması için Poisson's oranındaki gevşeme fonksiyonlu Visko elastik arasındaki temas.....	16
Şekil 2.11. Re Xia, Guoming Hu çalışması kürenin doğrulama için kup ile temas eden üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ve temas alanının yakındaki mesh yapısı	16
Şekil 2.12. Çelik tellerin sürtünme yorulması için şematik gösterimi	17
Şekil 2.13. Çelik teller için yapılan 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli	18
Şekil 2.14. Çelik teller için sürtünme yorulması sonucu malzeme özellikleri.....	18
Şekil 2.15. Makaralı koni matkap uçlarının kaymalı rulman küresel sabit bilezik yapıları	19
Şekil 2.16. Orijinal Fang modelinde tam küresel skeç	19
Şekil 2.17. Değişken yük sebebiyle enine yuvarlanma hareketi ve açısal bir yatağın değişken temas reaksiyonu.....	20
Şekil 2.18. Fem modeli iç halka, dış halka, halkalara iki temas modeli	21
Şekil 2.19. Çalışma için doğrulama amacıyla kurulan deneysel test düzeneği	21

Şekil	Sayfa
Şekil 2.20. (a) yorgunluk örneğinin kırılma yüzeyi 6.28×10^7 döngüde 14.3 n temas yükünde (b) kırılmış yüzeydeki WCA ve DFA bölgelerinde (c) DFA bölgesi (d) BRA bölgesi	23
Şekil 2.21. (a) adaptif orgu görüntüsünün sonlu elemanlar modeli üzerinde şematik gösterimi.....	24
Şekil 2.22. Sonlu elemanlar modelinde malzeme mikroyapı topolojisi uygulaması.....	25
Şekil 3.1. Yarım alan varsayımıyla Hertzian temas konfigürasyonu.....	28
Şekil 3.2. Hertz temasının temsili gösterimi.....	28
Şekil 3.3. Kayma ve yapışma bölgelerinin temsili görünümü	29
Şekil 3.4. Ana gövde ve çubuk detay gövde parça modelleri.....	31
Şekil 3.5. Kullanılan somunlar, pullar ve küresel rulman modelleri	32
Şekil 3.6. Catia v5 ile modellenen hücum açısı değiştirici parçası montaj görünümü ...	33
Şekil 3.7. Mesh doğrulaması.....	37
Şekil 3.8. Hücum açısı değiştirici parçası montajı Abaqus® sonlu elemanlar modeli...	37
Şekil 3.9. Hücum açısı değiştirici bağlantı parçaları ve element tipleri	38
Şekil 3.10. Hücum açısı değiştirici bağlantı parçaları ve element tipleri	39
Şekil 3.11. Ana gövde, çubuk uçları ve bağlantı elemanları element tipleri	39
Şekil 3.12. Analiz için örnek sadeleştirme işlemi.....	40
Şekil 3.13. Temas/bağ tanımı hücum açısı değiştirici üst kısım ve bağlantıları.....	41
Şekil 3.14. Temas/bağ tanımı hücum açısı değiştirici alt kısım ve bağlantıları	41
Şekil 3.15. Temas/bağ tanımı hücum açısı değiştirici ana gövde ve çubuk ucu.....	42
Şekil 3.16. Hücum açısı değiştirici yük ve sınır koşulları	43
Şekil 3.17. Hücum açısı değiştirici çubuk ucu sürtünme yorulması için örnek.....	45
Şekil 4.1. Pitch link yorulma testi a) izometrik görüntüsü b) kesit görüntüsü.....	49
Şekil 4.2. Köprü ve lineer gage'ler için enstrümantasyon yerleri.....	51
Şekil 4.3. Eksenel kalibrasyon	52
Şekil 4.4. Yükleme süresi sonuçları.....	53

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Parça yüklenmesi	54
Şekil 4.6. Numune 1 için eksenel yükleme	55
Şekil 4.7. Numune 3 için s/n Curve eğrisi	58
Şekil 5.1. Analiz teoremleri	62
Şekil 5.2. 0,5 frekans, 0,1 sürtünme katsayısı ve 0 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına etkisi sonucu	62
Şekil 5.3. 0,5 frekans, 0,1 sürtünme katsayısı ve 0 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına etkisi sonucu	63
Şekil 5.4. 0,5 frekans, 0,1 sürtünme katsayısı ve 20 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına etkisi sonucu	63
Şekil 5.5. 0,5 frekans, 0,01 sürtünme katsayısı ve 0 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına etkisi sonucu	64
Şekil 5.6. 0,5 frekans, 0,01 sürtünme katsayısı ve 10 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına etkisi sonucu	64
Şekil 5.7. 0,5 frekans, 0,01 sürtünme katsayısı ve 20 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına etkisi sonucu	65
Şekil 5.8. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıkılık kuvvet sonuçları	66
Şekil 5.9. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıkılık kuvvet sonuçları	66
Şekil 5.10. 0,5 frekans, 0,1 sürtünme katsayısı ve 0 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına temas kuvveti etkisi sonucu	67
Şekil 5.11. 0,5 frekans, 0,1 sürtünme katsayısı ve 10 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına temas kuvveti etkisi sonucu	68
Şekil 5.12. 0,5 frekans, 0,1 sürtünme katsayısı ve 20 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına temas kuvveti etkisi sonucu	68
Şekil 5.13. 0,5 frekans, 0,01 sürtünme katsayısı ve 0 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına temas kuvveti etkisi sonucu	69
Şekil 5.14. 0,5 frekans, 0,01 sürtünme katsayısı ve 10 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına temas kuvveti etkisi sonucu	69
Şekil 5.15. 0,5 frekans, 0,01 sürtünme katsayısı ve 20 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına temas kuvveti etkisi sonucu	70

Şekil	Sayfa
Şekil 5.16. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıkılık temas kuvveti sonuçları	71
Şekil 5.17. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıkılık temas kuvveti sonuçları	71
Şekil 5.18. 0,5 ve 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 0 sıkılık için kayma ve yapışma sonuçları.....	72
Şekil 5.19. 0,5 ve 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 10 sıkılık için kayma ve yapışma sonuçları.....	73
Şekil 5.20. 0,5 ve 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 20 sıkılık için kayma ve yapışma sonuçları	74
Şekil 5.21. 0,5 ve 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 0 sıkılık ve 0,01 sürtünme katsayısı için kayma ve yapışma sonuçları	75
Şekil 5.22. 0,5 ve 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 10 sıkılık ve 0,01 sürtünme katsayısı için kayma ve yapışma sonuçları	76
Şekil 5.23. 0,5 ve 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parçaların 20 sıkılık ve 0,01 sürtünme katsayısı için kayma ve yapışma sonuçları	77
Şekil 5.24. 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 0 sıkılık ve 0,1 sürtünme katsayısı için birim uzunluk başına deforme sonuçları.....	79
Şekil 5.25. 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 10 sıkılık ve 0,1 sürtünme katsayısı için birim uzunluk başına deforme sonuçları	79
Şekil 5.26. 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 20 sıkılık ve 0,1 sürtünme katsayısı için birim uzunluk başına deforme sonuçları	80
Şekil 5.27. 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 0 sıkılık ve 0,01 sürtünme katsayısı için birim uzunluk başına deforme sonuçları.....	80
Şekil 5.28. 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 10 sıkılık ve 0,01 sürtünme katsayısı için birim uzunluk başına deforme sonuçları.....	81
Şekil 5.29. 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 20 sıkılık ve 0,01 sürtünme katsayısı için birim uzunluk başına deforme sonuçları.....	81
Şekil 5.30. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıkılık miktarlarına göre birim uzunluk başına deforme sonuçları	82
Şekil 5.31. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıkılık miktarlarına göre birim uzunluk başına deforme sonuçları	83
Şekil 5.32. 0 sıkılık çelik- çelik teması için maksimum alternating vonmises sonucu...	84
Şekil 5.33. 10 sıkılık çelik- çelik teması için maksimum alternating vonmises sonucu.	84

Şekil	Sayfa
Şekil 5.34. 20 sıklılık çelik- çelik teması için maksimum alternating vonmises sonucu.	85
Şekil 5.35. Ömür hesabı için kullanılan grafik	86



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Rotor sistemleri montajı	2
Resim 1.2. Helikopter mast	3
Resim 1.3. Eğik plaka montajı	4
Resim 1.4. Hücüm açısı değıştiricisi	5
Resim 1.5. Hücüm açısı değıştiricisi.....	5
Resim 2.1. Sürtünme aşınması test cihazı	25
Resim 4.1. Hücüm Açısı Değıştiricisi yorulma testi deney düzeneğı.....	48
Resim 4.2. Test set up deney cihazı instron 8801	48
Resim 4.3. Numune 1 çubuk ucu arızası.....	56
Resim 4.4. Numune 2 çubuk ucu arızası.....	57
Resim 4.5. Numune 3 çubuk ucu arızası.....	57
Resim 4.6. Numune 3 mikroyapı için parça kesimi.....	58
Resim 4.7. Numune 3 mikroyapı incelemesi	59

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında rotor sistemleri parçalarından hücum açısı değiştirici parçasının çubuk ucu ve küresel rulman dış kısım arasındaki değişik sıkılık miktarı ile temas kuvvetinin etkisi incelenmiştir. Çalışma içerisinde gerilme, temas kuvveti, birim uzunluk başına deforme miktarı, kayma- yapışma özellikleri farklı malzeme, sıkılık, sürtünme katsayısı ile beraber temas kuvvetinin etkisi bulunmuş tez doğrulaması yorulma testleri ile gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasının ana amacı çubuk ucu üzerindeki sürtünme olgusunun etkisinin araştırılmasıdır. Normal yük altında yorulma ömrü açısından farklı birleşme yüzeyleri ile etkisi incelenmiştir. Helikopter endüstrisinde sıklıkla kullanılan malzemelerden 15-5 PH çelik ve AL7050 T7451 malzemeler tez boyunca kullanılmıştır. Bu bağlamda yapılan sonlu eleman modelleri oluşturulmuş, yorulma analizleri gerçekleştirilmiş ve test sonuçları ile gerekli karşılaştırmalar yapılarak araştırma tamamlanmıştır.

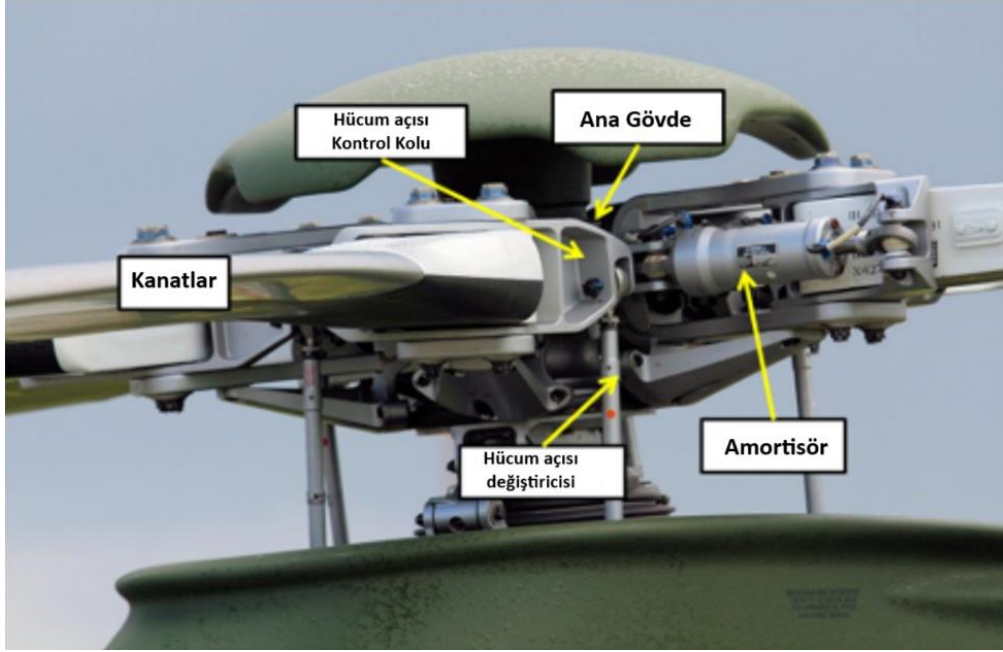
Temas kuvvetinin bir etkisi sonucu sürtünme olgusu oluşmaktadır ve sürtünme olgusu, temas yüzeyindeki küçük bir kayma hareketi olarak iki temas eden cisim arasında meydana gelmektedir.

Bu sürtünme olgusu sonucu temas kuvvetinin etkisi ile beraber parçalar yorularak kırılma meydana getirmektedir. Helikopter endüstrisinde özellikle rotor sistemleri üzerinde neredeyse tüm parçaların dinamik olarak çalıştığı bir yerde oldukça önemli bir yerde bulunan yorulma analizleri ve parçanın ömürleri hesaplanması gerekir ve bu yüzden helikopter rotor parçalarından hücum açısı değiştirici parçasının yorulma araştırılması yapılmıştır.

Helikopter rotoru karmaşık, çok disiplinli mekanik bir sistemdir. Aerodinamik, yapı dinamiği gibi çok farklı disiplinler ile beraber uçuş dinamiği, kontrol teorisi, sayısal analiz, numerik analizler kombine bir çalışma sistemi vardır. Helikopter rotor sistemi uçuş için en kritik bölge olmasının nedeni helikopterin döner kanatlar vasıtasıyla uçuşması ve kontrol edilmesini sağlamaktır.

Rotor sistemleri genel olarak aşağıdaki parçalar gibi birçok yapının birleşimi ile oluşmaktadır.

- Rotor kanatları
- Ana gövde
- Şaft
- Hücüm Açısı Değiştiricisi
- Eğik plaka
- Hücüm Açısı Kontrol Kolu



Resim 1.1. Rotor sistemleri montajı [1]

Şaft: İçi bos bir silindirdir ve rotor kanatlarını döndürmek amacıyla motor gücünü tork olarak aktarmak için kullanılmaktadır. Birçok özel bağlantı yöntemi ile alt bağlantısı transmisyonda olurken üst bağlantısı ana gövde üzerinde olmaktadır.



Resim 1.2. Helikopter mast [2]

Ana gövde: Rotor ana gövdesi, rotor sistemleri içerisinde ana yükü taşıyan komponenttir. Rotor kanatları ile bağlantı kurarak motordan üretilen gücün mekanik gücün rotor kanatlarına transfer olmasını sağlamaktadır. Bu yüzden, yüksek yüklerle mücadele edebilmesi amacıyla rotor ana gövdenin oldukça güçlü olması gerekmektedir. Ana gövde parçası, tek parça dövme, çelik veya titanyumdan üretilen bir parçadır.

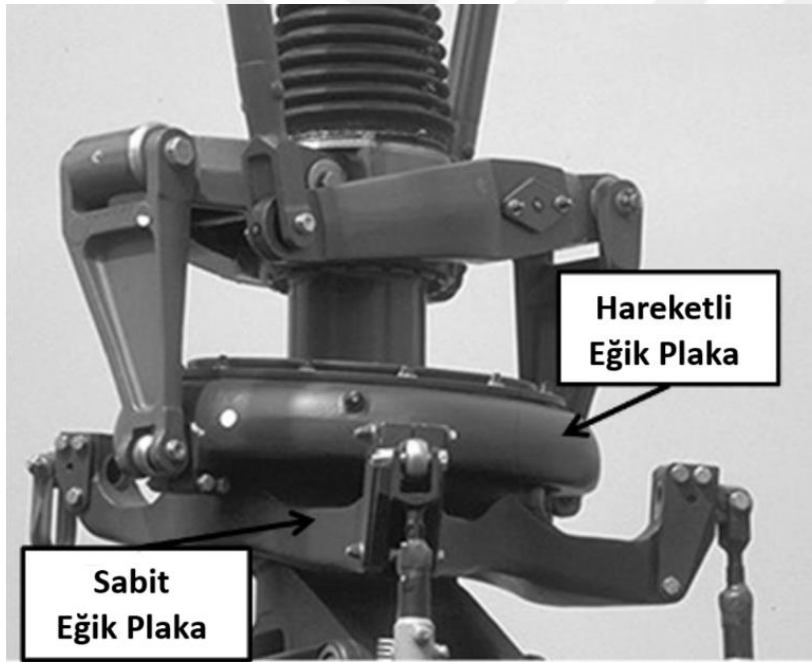
Rotor kanatları: Rotor kanatları helikopter kalkışları, inişleri ve hareketleri için aerodinamik kuvvetler oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır. Hücüm açısının artması uçuş sırasında helikopterin daha fazla yükselmesi anlamına gelmektedir. Ayrıca bozucu yükler ve aerodinamik yükler doğrudan rotor kanatlarına etki etmektedir.

Rotor kanatları genellikle kompozit malzemeden üretilmektedir. Kompozit malzemelerin yüksek yorulma ömrü, kütlesi ve sertlik dağılımı aerolastik performansı artırabildiği için kompozit malzemeler rotor kanatları için oldukça yüksek verimlilik içermektedir.

Hücüm Açısı Kontrol Kolu: Hücüm açısı kontrol kolu, hücüm açısı değiştirici, damper, rotor kanatları, ana gövde gibi parçalar ile bağlantı arayüzüdür. Kanat üzerindeki burulma

yüklerini ve hücum açısı değişimi sırasında oluşan yükleri uçuş kontrol sistemine aktarmaktadır.

Eğik plaka: Eğik plaka montajı pilot kontrol girişlerini ana rotora iletmek ve hücum açılarını bağlantılar yardımıyla iletmek için kullanılır. Resim 1.3'te, eğik plaka döner ve sabit eğik plaka olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Uçuş kontrol aktüatörleri sabit eğik plaka'ya bağlantılıdır ve sabit eğik plaka ana rotor şaftına küresel şekilli top rulman ile montajlanarak eğik plakanın yanal ve dikine yönde hareket etmesini ve bu sayede eğim açısı oluşturmasını sağlamaktadır. Döner eğik plaka ana rotor ile aynı hızda dönüş yapmaktadır ayrıca top rulman yardımıyla sabit eğik plaka ile ilişkili hareket sağlamaktadır. Son olarak hücum açısı değiştiriciler döner eğik plaka bağlantısı ile beraber ana rotor kanatları için hücum açısı oluşturmaktadır.



Resim 1.3. Eğik plaka montajı [3]

Hücum Açısı Değiştirici: Hücum açısı değiştiricisi hücum açısı değişim komutlarının rotor kanatlarına transfer edilmesini sağlamaktadır. Hücum açısı değiştiricinin bir ucu hücum açısı kontrol kolu yardımıyla rotor kanatlarına bağlantılı iki diğer kısmı ana rotor için eğik plaka bağlantısı, kuyruk rotoru için çapraz kafa bağlantısı ile beraber bu değişimleri yapmaktadır. Hücum açısı değiştirici montajı iki tip çubuk ucunun içerisine yerleştirilen top rulmanlar ve hücum açısı değiştiricisi ana gövdeden oluşmaktadır.



Resim 1.4. Hücum açısı değiştiricisi [4]



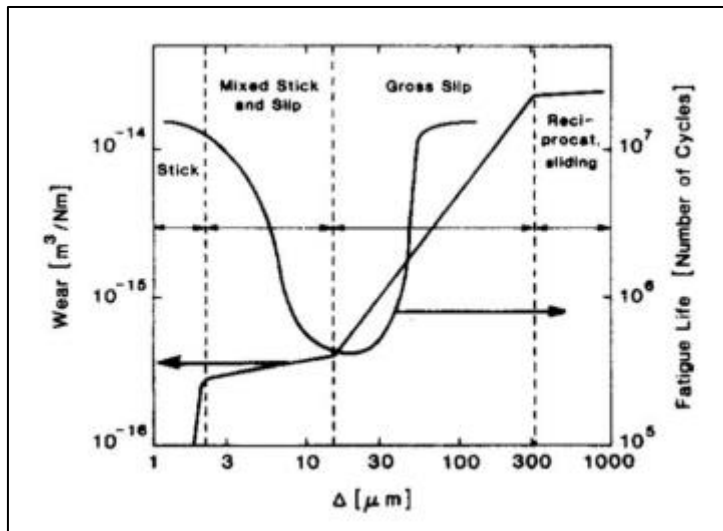
Resim 1.5. Hücum açısı değiştiricisi [4]



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde, helikopter rotor parçalarından hücum açısı değiştiricisi çubuk ucu parçası ile ilgili temas kuvvetin etkisi, titreşimli yorulma analizi gibi özellikle montajlı parçalar için direkt olarak yapılan herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu sebeple literatür taraması ; temas kuvvetinin incelendiği benzer çalışma yapısına sahip parçalar, titreşimli yorulma dayanımının incelenmesi için farklı ve aynı özellikli malzemeler , tellerin titreşimli yorulma incelemesi, rulman titreşimli yorulma analiz incelemeleri, parçaların titreşimli yorulma dayanımı sonrası mekanik özelliklerine etkileri , benzer konularda yapılan test işlemleri , sonlu elemanlar yöntemi ile titreşimli yorulma analizinin yapılması gibi temel başlıklar incelenmiştir.

Sürtünme olgusu, temas kuvvetinin bir etkisi sonucu temas yüzeyindeki küçük bir kayma hareketi olarak tanımlanır ve iki temas eden cisim arasında sürtünme meydana gelir. Sürtünme temas eden kısımlar arasındaki göreceli kaymaya bağlı olarak genellikle sürtünme yorulması veya sürtünme aşınması şeklinde sınıflandırılır ve her ikide parçanın yorulma sebebiyle kırılma veya çatlamasına sebep olmaktadır. Sürtünme yorulması, temas eden alanlarda sürtünme aşınmasına göre çok daha fazla zararlı etkilere neden olmaktadır [5]. Sürtünme yorulması ve sürtünme aşınması arasındaki yaşam ilişkisi Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



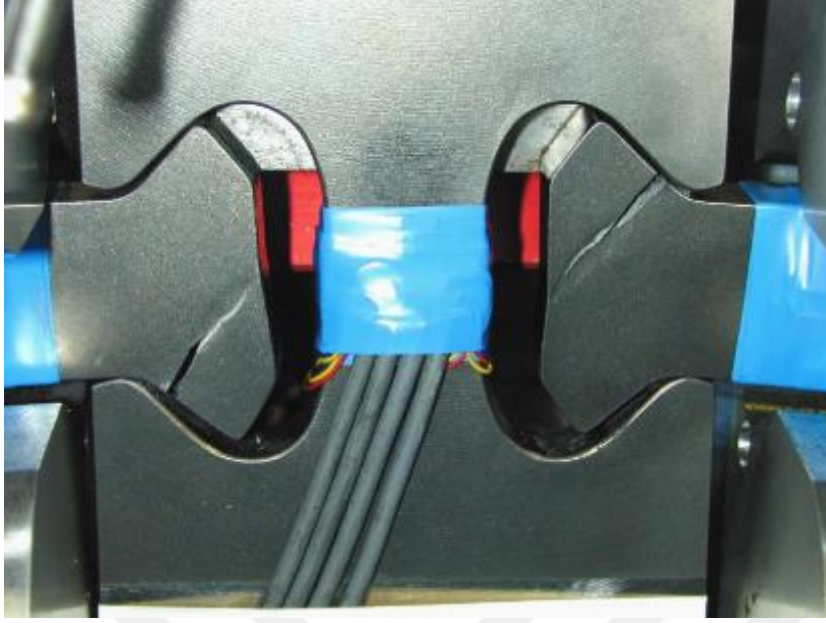
Şekil 2.1. Sürtünme aşınması ve sürtünme yorulmasının yer değiştirme genliğine bağlı şematik gösterimi [6].

Sürtünme yorulması ile ilgili ilk çalışmalar eden ve arkadaşları tarafından çelik bir parçanın kulplar ile beraber tutturulması ve parça üzerinde kahverengi oksit kalıntıları kalmıştır [6]. Sürtünme yorulması dinamik ve statik olarak çalışan temas eden cıvatalı bağlantılar, uçak motorları, gaz türbinleri, tel halatlar, bilyeli rulmanlar gibi pek çok çalışma ortamında gözlemlenmektedir.

Temas kuvveti etkisi ile sürtünme aşınmasının tarihi oldukça eskiye dayanmaktadır. Yorulma ömürleri temas kuvvetinin etkisi ile oluşan sürtünme yorulması sebebiyle önemli ölçüde azalabilir. Hertz 1881 yılında iki elastik malzeme arasındaki sürtünmesiz temas bölgesindeki basınç dağılımını araştırmak için analitik bir yaklaşım olan Hertzian temas teorisini geliştirmiştir [7]. Daha sonra Mindlin ve Deresiewicz 1953 yılında temas arayüzünde teğetsel yükleme ve karşılık gelen sürtünmenin etkisini ekleyerek Hertz temas teorisini daha da geliştirmiştir [8].

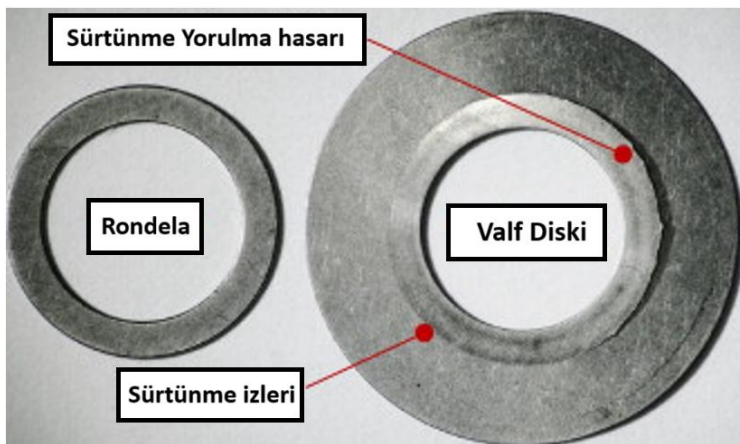
Mindlin teorisi temas bölgesindeki yapışma ve kayma bölgelerine ek olarak temas arayüzündeki kesme çekiş dağılımını vermektedir. Bununla birlikte, bu teori kesme çekiş dağılımının hesaplamalarında toplu stres etkisini simüle edememektedir. Bu etki Hills ve Nowell tarafından 1986 yılında kesme çekiş dağılımı açısından temas bölgesindeki toplu stres etkisini araştırmak için Mindlin teorisini değiştirdikleri yer olarak kabul edilmektedir [9].

Rajasekaran ve Nowell (2006), hava araçları için kullanılan kuyruk spesimeni bağlantısı ve temas kuvveti etkisi ile sürtünme aşınmasını incelemişlerdir. Bu çalışmada yüzey fraksiyonlarını ve iç gerilmeleri doğru bir şekilde sonlu elemanlar modeli incelemesi yapabilmek amacıyla yarı analitik bir yöntem kullanılmıştır ve yarı analitik modelde kuyruk spesimeni yarı düzlem varsayımlar altında ‘düz ve yuvarlak’ teması olarak yakınsanmıştır. Bu yaklaşımı doğrulamak amacıyla motor koşullarını doğru bir şekilde simüle eden çift eksenli bir deney analizi gerçekleştirilmiş ve sürtünme aşınması deney ile benzer sonuçlar vermiştir. Bu çalışmanın sonucu olarak yüksek sürtünme katsayısının parçada sürtünme aşınması sebebiyle kırılma olasılığının daha yüksek olduğunu göstermiştir [10].



Şekil 2.2. Kuyruk spesimeni test sırasında kırılımı [10]

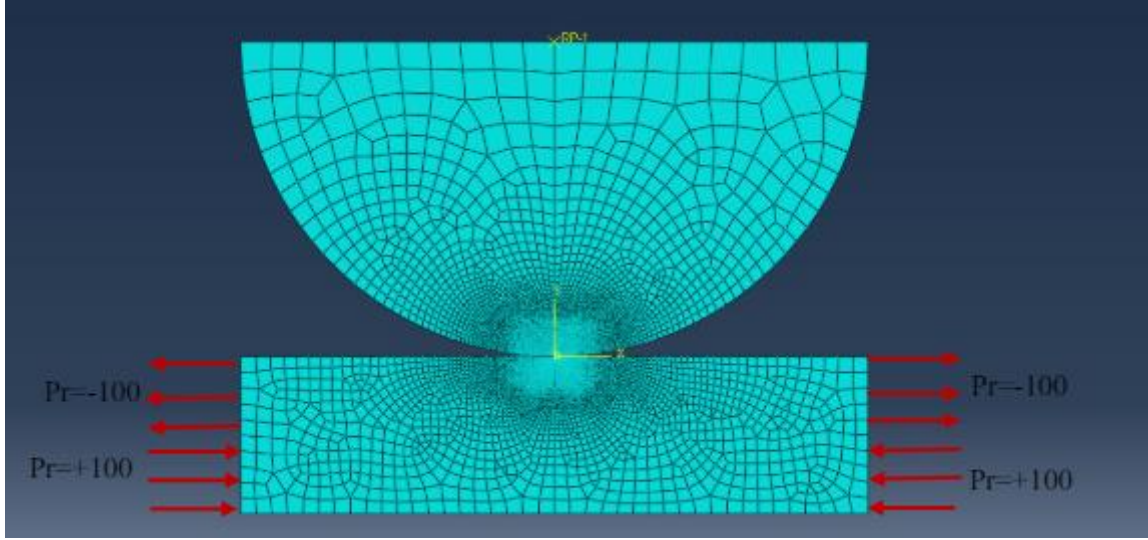
2014 yılında Reza Hojjati-Talemi ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada otomotiv amortisör valfinin sürtünme aşınması için yorulma analizi incelenmiştir. Bu çalışmada pul ve valf diskinin temas arayüzünde temas kuvveti etkisiyle ilk çatlak oluşturduğu ve sürtünme aşınması sebebiyle oluşan ilk çatlakın valf diskinin kırılmasına kadar ilerlettiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada sonlu elemanlar modeli ile deneysel çalışmalar yapılmıştır ve sonlu elemanlar model yaklaşımının deneysel testlere kıyasla ayrıntıyı kolayca araştırma olasılığını arttırdığı ve temas arayüzlerinde eşdeğer çok eksenli hasar stresini izleyerek tahmin edilebileceği gösterilmiştir [11].



Şekil 2.3. Otomotiv sok absorpsiyon valf diski için sürtünme yorulması [11]

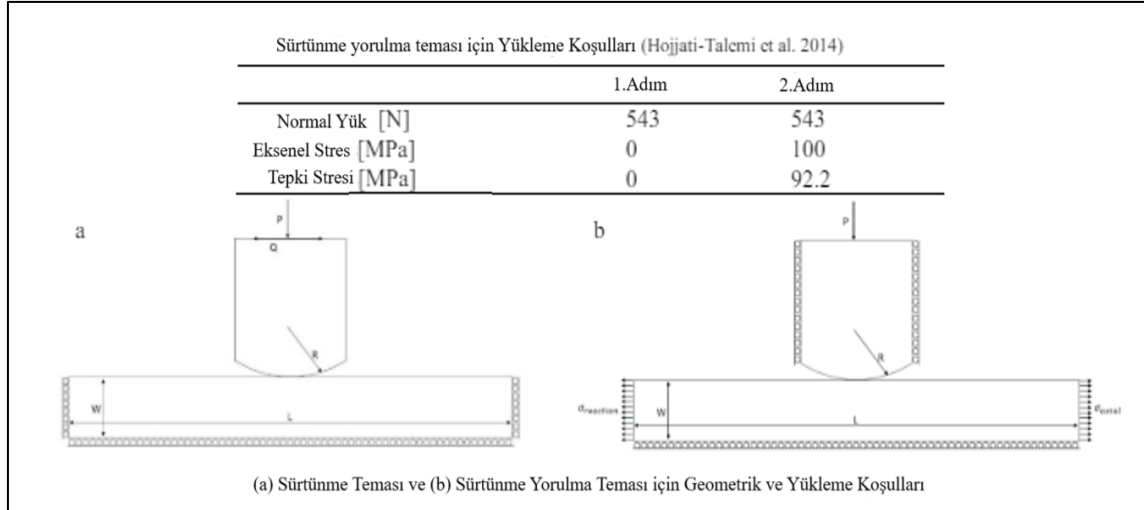
Literatürde incelenen başka bir çalışmada Shi, Backman ve Bllinger (2005), köpek kemiği modeli için sonlu elemanlar modeli ile temas yüzeyi ile sürtünme aşınması incelemiştir. Temas bölgesindeki temas traksiyonları ve teğetsel stres dağılımları, kesme kuvveti ve yığın yükünün stres dağılımları üzerindeki etkileri farklı yük durumları altında incelenmiştir. Bu araştırma sonrasında numunedeki temas traksiyonları ve stres dağılımlarının yük koşullarının kombinasyonuna büyük ölçüde bağlı olduğu, normal artı toplu kuvvetlerin yük durumunda (kesme kuvveti olmadan) meydana gelen eksantriklik olmadığı, normal + kesme ve toplu kuvvetlerin kombinasyonları altında eksantriklik meydana geldiği, eksantriklik miktarının toplu gerilme oranına ve maksimum normal basınca bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çalışma içerisinde ayrıca en büyük çekme gerilmesinin numunedeki temas yüzeyinde meydana geldiği bunun da çatlak oluşumu ve büyümesi için itici güç olduğuna değinilmiştir [12].

Hajshirmohammadi ve Mehdizadeh (2021), yaptığı çalışmada Hertzli Temas teorisi ile sürtünme yorulmasını incelemiştir. Bu çalışmada üç adım için inceleme gerçekleştirilmiştir. İlk adım için normal yük silindirin merkezine uygulanmıştır. Belirlenen sınır koşulları üzerindeki düğümlerin yatay ve dikey yönünde daire üzerinde yer değiştirme meydana gelmemiştir. Silindirin ilk adım sırasında hareket donuşunu önlemek için, yükün silindir üzerine etki ettiği merkez noktaya kısıtlama uygulanmıştır. İkinci adımda, kesme kuvveti silindirin üstündeki merkezi noktaya uygulanmıştır. İkinci adımda yük noktası için dönme kısıtlaması aktif tutulmuştur ve yer değiştirmenin olmadığı sınır koşulu, düz yüzeyin sağ ve sol taraflarında uygulanmıştır. Üçüncü adımda, düzlemsel parçanın yan yüzeyleri için yer değiştirme olmamasının sınır koşulu devre dışı bırakılmıştır. Momentin düz yüzeyde uygulamak için, düzlemsel yüzeyin yanlarına iki çift basınç yüklenmiştir. Doğrusal basıncın değeri her iki tarafta da eşit olduğu için net kuvvet sıfır kalmıştır ve yan yüzeylerdeki basıncın tek etkisi moment olmuştur. Bu çalışmanın sonucu olarak çalışmada temas bölgesindeki kayma stresinin parçanın kısmi kayma bölgesi sınırında önemli ölçüde yükseldiği, saf momentin kısmi kayma bölgesindeki kayma gerilmesi değerini azaltabileceğini, temas bölgesindeki normal stres dağılımı üzerinde temas anının ihmal edilebilir etkisi olduğunu ve bağlı kayma, kişi kayma bölgesi sınırındaki yüzeyler arasında kayma değerinin yükselmesine yol açan momentten etkilendiği bulunmuştur [13].



Şekil 2.4. Behman ve Mohammed'in Hertz temas teorisi ile sürtünme yorulması çalışması [13]

Yezdan, Korkmaz ve Demirkan (2017), benzer özellikli ve homojen olmayan malzemeler için kontak sürtünmesi araştırmasını sonlu elemanlar modeli ile gerçekleştirmiştir. Yaptığı çalışmada sürtünme katsayısı, malzeme farklılığı, teğetsel yükleme durumu ve numunedeki deliklerin gerilmeler ve temas yüzeylerinin göreceli kayması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan inceleme, araştırmalar ve çalışma sonucunda temsil edilen alt yüzeye uygulanan teğetsel yükün sürtünme katsayısının etkisini gözlemlemek ve benzer, farklı malzemeleri karşılaştırmak için kullanılmıştır. Sürtünme katsayısının artmasının yapışma bölgesini artırdığı sonucuna ulaşıldığı ve teorilerle benzer sonuçlar geldiği , farklı malzemeler ile Hertz temas teorisi temas basıncı açısından sonlu elemanlar analizi ile benzer sonuçlar üretme yeteneğine sahip olmasına rağmen , Mindlin çözümü ile kesme çekiş dağılımı sonlu elemanlar sonuçlarının uygunluk göstermediği , eksenel stresin Hills ve Nowell tarafından da belirtildiği gibi yapışma bölgesinde eksantriklik ürettiği ve temas yüzeyinin yakınındaki bir numuneye delik yerleştirildiğinde maksimum temas basıncını azalttığı ve çubuğun temas bölgesini uzattığı ve sonucunda göreceli kayma genliğini azalttığı sonuçlarına ulaşmışlardır [14].

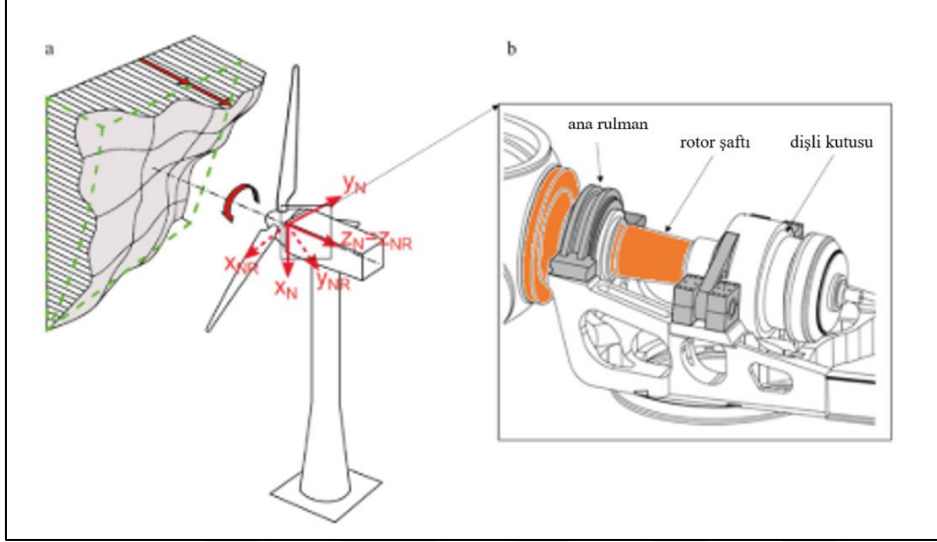


Şekil 2.5. Geometrik ve yükleme koşulları

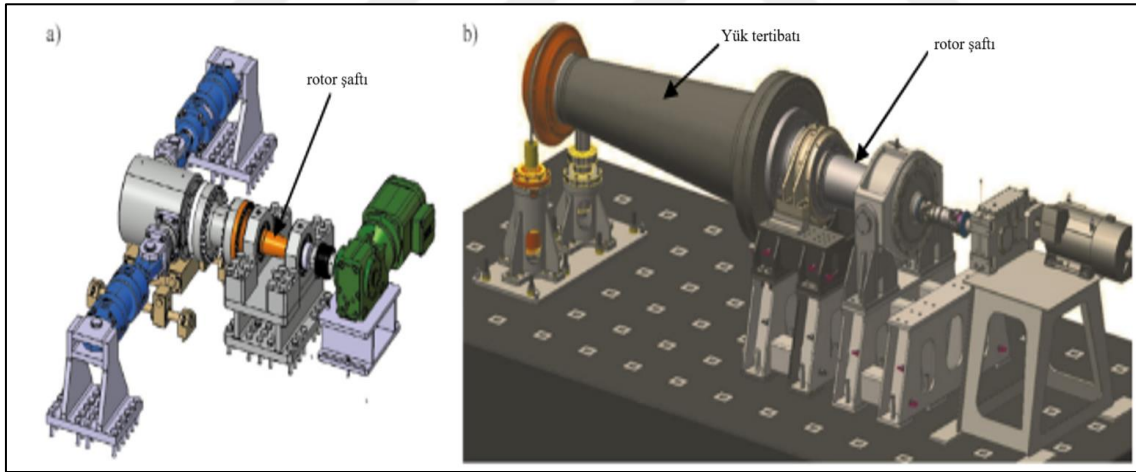
Literatürde ayrıca sonlu eleman modellerinin doğruluğu açısından da emin olmak amacıyla pek çok çalışma yapılmıştır. Giner, Sukumar, Denia ve Fuenmayor (2008), yaptığı çalışmada sonlu elemanlar yöntemi (X-FEM) ile yorulma problemlerini incelemiştir. Çalışmalarında X-FEM'in iki boyutlu bir uygulaması olan ABAQUSTM sonlu elemanlar yazılımı içerisinde kullanıcı alt yordamları vasıtasıyla gerçekleştirmişlerdir ve yorulma problemlerinde çatlak yayılımını araştırmışlardır. Bu yazılımın doğrusal olmayan yeteneklerini kullanırken, ayrıca sayısal teknik bir numune-gösterge modeli uygulanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda teöas kuvveti etkisi ile oluşan sürtünme yorulması çalışmaları için X-FEM modelinin literatürde görünen mevcut modellere göre bir dizi belirgin fayda sağladığı görülmüştür. Ana avantaj bu çalışmada herhangi bir çatlak yerini ve yönünü modellemenin, kolayca üretilen parça için kullanarak basit bir görev şeklinde yapmasıdır. Metodolojinin alan integrallerine dayanan enerjik yöntemlerle doğru SIF çıkarımları sağladığı, elde edilen doğruluğun tekil çatlak uç alanlarına FE çözümünden çok daha iyi uyum sağlayan çatlak uçlu zenginleştirme işlevlerinin kullanılması sebebiyle standart bir FE formülasyonundan çok daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [15].

Rauert, Herrmann, Dallhoff ve Sander (2016), yaptığı çalışmada rüzgâr türbini rotor şaftında takılı siki geçme ana rulman üzerinde sürtünme yorulmasına bağlı yüzey çatlakları üzerine çalışmıştır. Çalışma içerisinde ana rulman iç halkası ile rotor mili arasındaki göreceli hareketin temel sorunu ve ortaya çıkan yorulma yorgunluğu fenomeni açıklanmıştır. Çalışma sonucunda şaftın mikro kesitlerinde görülebilen spesifik çatlaklara göre, yüksek lokal gerilme varlığında tam bir arıza olasılığını doğrulayan bir çatlak büyüme hesaplaması

gerçekleştirilmiştir. Gerçekçi bir ortam ile rotor milinin tam ölçekli ve 1:10 ölçekli testlerine eşlik ederek yorulma simülasyon modellerine doğrulama imkânı sunmuştur [16].



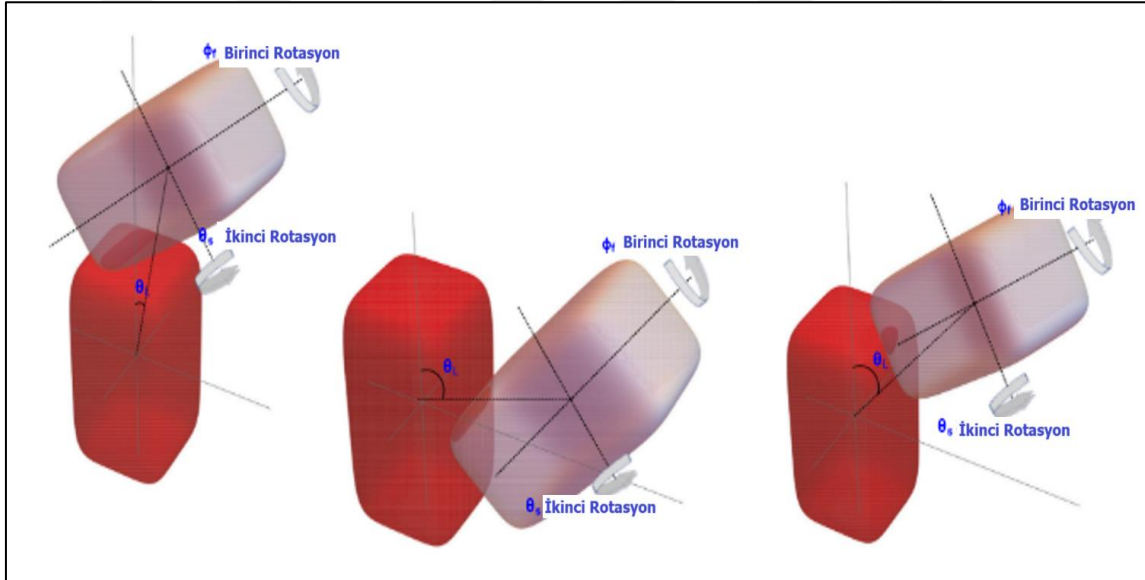
Şekil 2.6. Theis Rauert, Jenni Herrmann, Peter Dallhoff ve Manuele Sander çalışması [16]



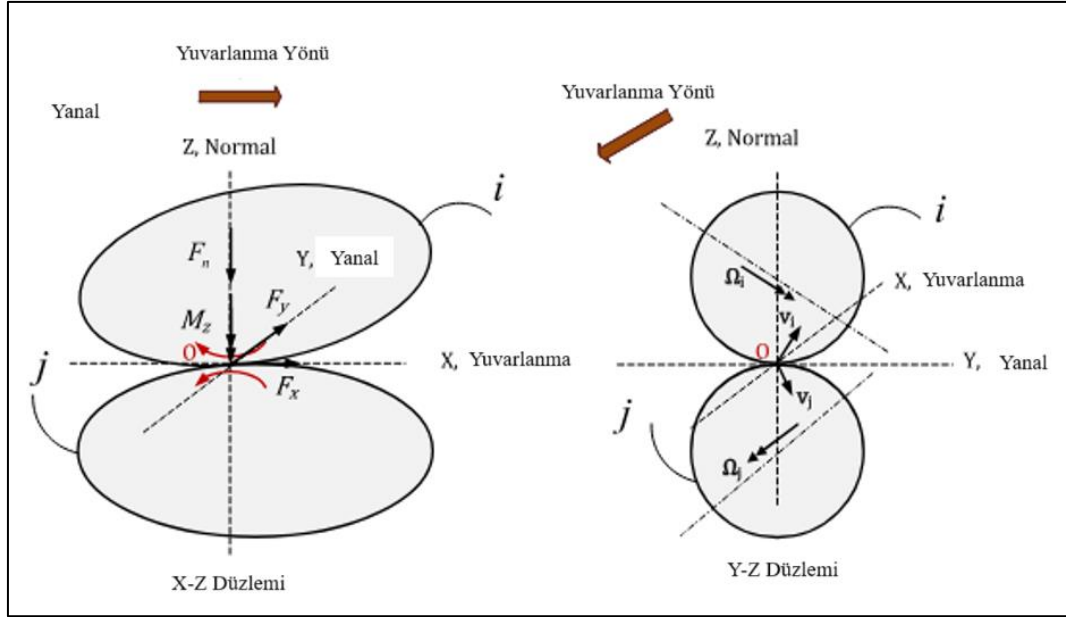
Şekil 2.7. Theis Rauert, Jenni Herrmann, Peter Dallhoff ve Manuele Sander çalışması. a) rotor milinin 1:10 ölçeklendirilmiş modeli b) rotor milinin tam ölçekli modeli [16]

Kildashti, Dong ve Yu (2022), farklı yüzey özelliklerine sahip küresel olmayan parçacıklar için temas kuvveti modelleri üzerine çalışmışlardır. Çalışma içerisinde temas kuvveti ile geometri, malzeme arasındaki ilişkiyi tanımlayan küresel olmayan parçacıklar için son teknoloji temas kuvveti modelleri gözden geçirilmiş ve temas eden parçacıkların mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışma için ilk olarak klasik Hertzian teorisinin uzantısına dayanan temas kuvveti modelleri gözden geçirilmiştir ve burada doğru bir geometrik temas

kuvveti vurgulanmıştır. İkinci olarak elastoplastiside, viskoelastisite, yapışma ve sürtünme katsayısı gibi farklı değişkenlerin temas kuvveti üzerindeki etkileri üzerine yapılan araştırmalar gözden geçirilmiş ve daha sonra doğru geometrik temas kuvveti modeline dahil edilmiştir. Üçüncü olarak çeşitli yükleme rejimleri altında temas halindeki küresel olmayan parçacıklar için teğetsel kuvvet modelleri gözden geçirilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak sayısal sonuçların, doğru geometrik modele dayanarak yüzey özelliklerinin öngörülen temas kuvveti ve temas alanı üzerindeki etkisinin açık olduğu görülmüştür. Ayrıca kuvvet modelleri için DEM’de özellikle küresel olmayan parçacıklar için düzgün olmayan parçacıklar ve yapışkan parçacıklar ve ilgi parçacık dinamik davranışlarını daha doğru tahmin etmeye yaradığı sonucuna ulaşılmıştır [17].



Şekil 2.8. Küresel olmayan parçacık çalışması temas kuvvet incelemesi [17]

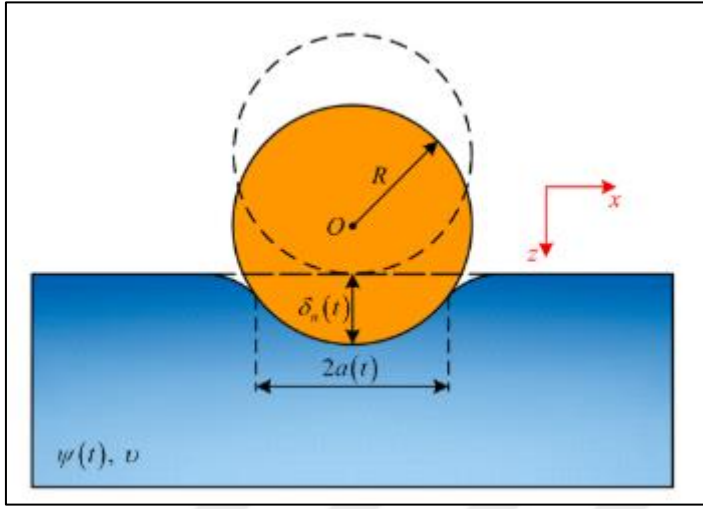


Şekil 2.9. Çalışma için parçacıkların birbirleri üzerinde yuvarlanma hareketi gösterimi [17]

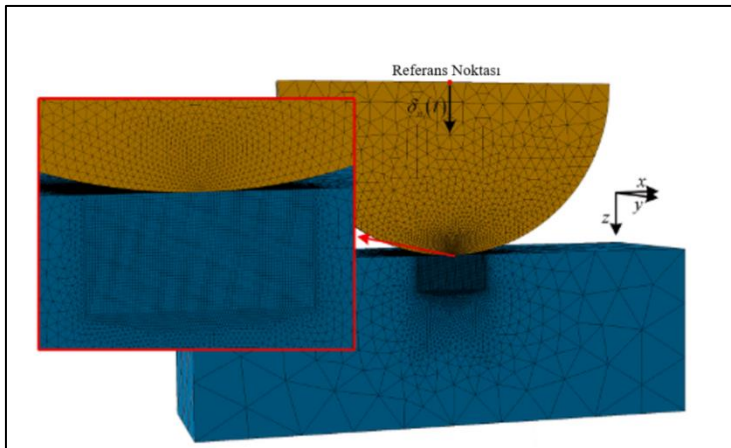
Xia ve diğerleri (2023), yaptıkları çalışmada geliştirilmiş Maxwell modeline dayanan visko elastik materyaller için yaklaşık temas kuvveti modeli incelemesi gerçekleştirmişlerdir. Çalışma için sert bir küre ile visko elastik bir yarı boşluk arasındaki normal temas kuvvetini tahmin etmek için yeni bir yaklaşık model önermektedir. Geliştirilmiş Maxwell modelinden türetilen gevşeme fonksiyonu, visko elastik temas için integral bir basınç ifadesi elde ederek elastik, visko elastik yazışmaya dayanan elastik temas probleminin çözümüne uygulanmıştır. Taylor serileri temelinde yaklaşık yöntemi kullanarak, integral ifadesi, yer değiştirme, hız, zaman ve malzeme özelliklerinin açık bir fonksiyonuna çevrilmiştir. Temas alanı üzerindeki basıncın entegre edilmesiyle normal bir temas kuvveti modeli kurulmuştur. Visko elastik parametreleri yakalamak için Nafion® XL'nin bir gevşeme testi yapılmış ve bu parametreler, temas kuvveti modelindeki ölçek faktörünü belirlemek için sonlu elemanlar yöntemini (FEM) kullanarak temas davranışlarını simüle etmek için kullanılmıştır. Yaklaşık modelin geçerliliğini doğrulamak için, modelden elde edilen sonuçlar FEM tarafından üretilenlerle karşılaştırılarak parametrelerdeki varyasyonların normal temas davranışları üzerindeki etkilerini analiz etmek için parametrik bir çalışma yapılır.

Çalışmanın sonucu olarak kurulan yaklaşık temas kuvveti modeli ile FEM arasındaki karşılaştırmaların modelin hesaplamalarının, farklı temas süresi ve kesme değerleri altında FEM'i kullanan sonuçlarla iyi bir şekilde anlaşılabilceği gösterilmiştir. Temas süresinin

artması, maksimum temas kuvvetinin azalmasına yol açar, ancak temas davranışlarını tahmin etmede yaklaşık modelin doğruluğu üzerinde neredeyse hiçbir etkisi yoktur. Kesme viskozitesinin azalmasıyla, temas kuvvetlerinin tepe değeri açıkça düşmesine rağmen, iki yöntemin tutarlılığı neredeyse değişmeden kalmıştır. Ayrıca parametrik çalışma, tüm normal kuvvetler, zaman- normal kuvvet, yer değiştirme eğrilerinin – normal kuvvet koordinat orijininin başladığını ve sıkıştırma fazında yükseldiğini göstermiştir.

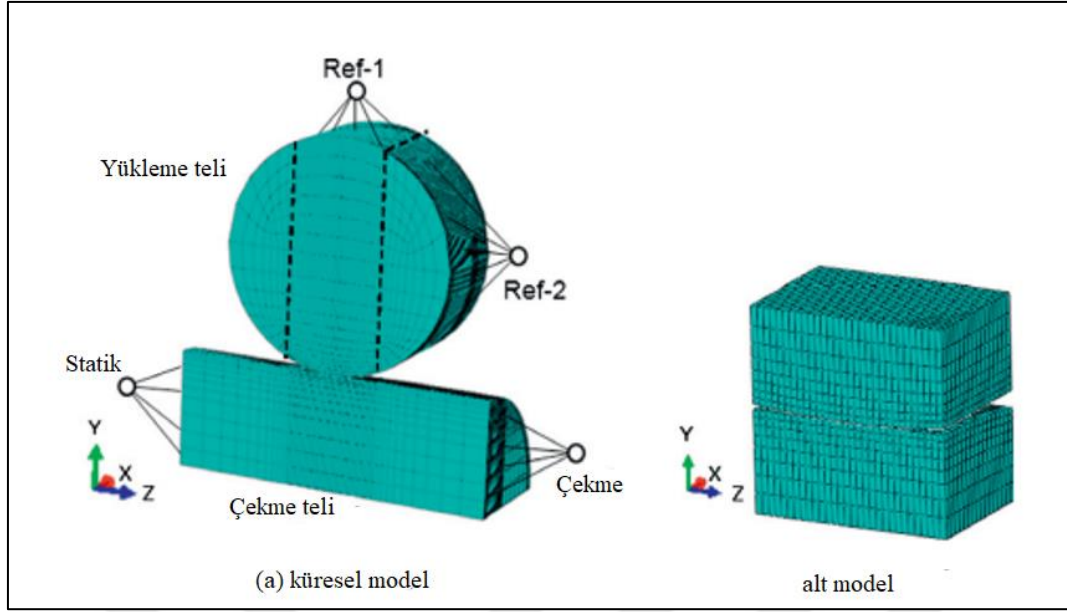


Şekil 2.10. Re Xia, Guoming Hu çalışması için Poisson's oranındaki gevşeme fonksiyonlu Visko elastik arasındaki temas

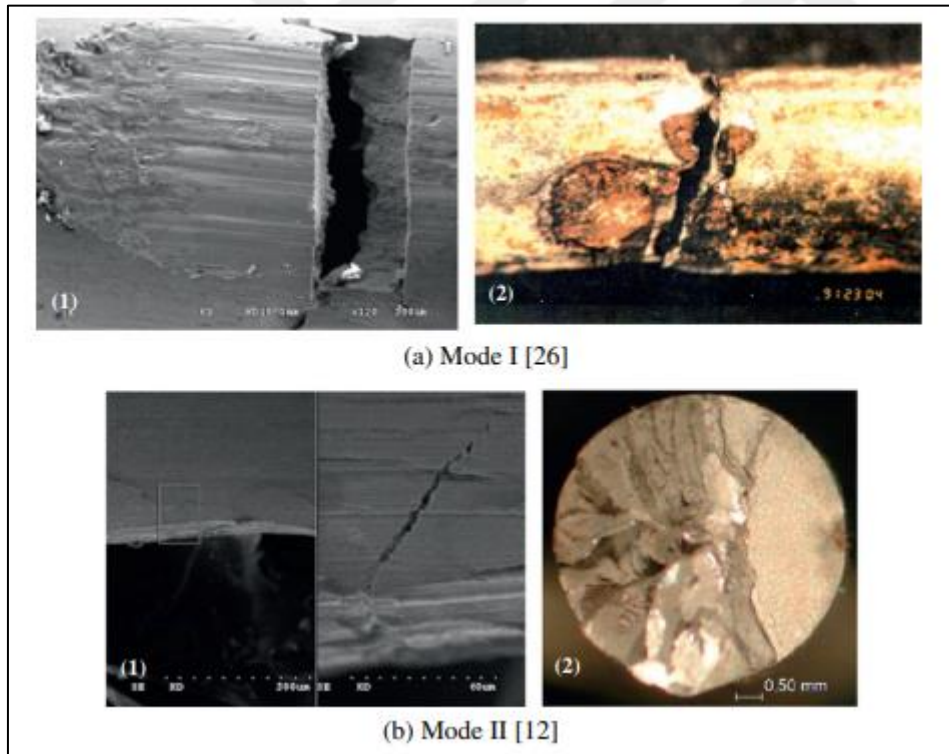


Şekil 2.11. Re Xia, Guoming Hu çalışması kürenin doğrulama için kup ile temas eden üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ve temas alanının yakındaki mesh yapısı

Wang, Zhang ve Ge (2012), çelik tellerin sürtünme yorulma davranışının ve çatlak başlatma özelliklerinin sonlu eleman analizi üzerine çalışmışlardır. Sürtünme parametrelerinin, çelik tellerin sürtünme ve çelik tellerin yorgunluğunun ilk aşamasında temas eden tellerin stres



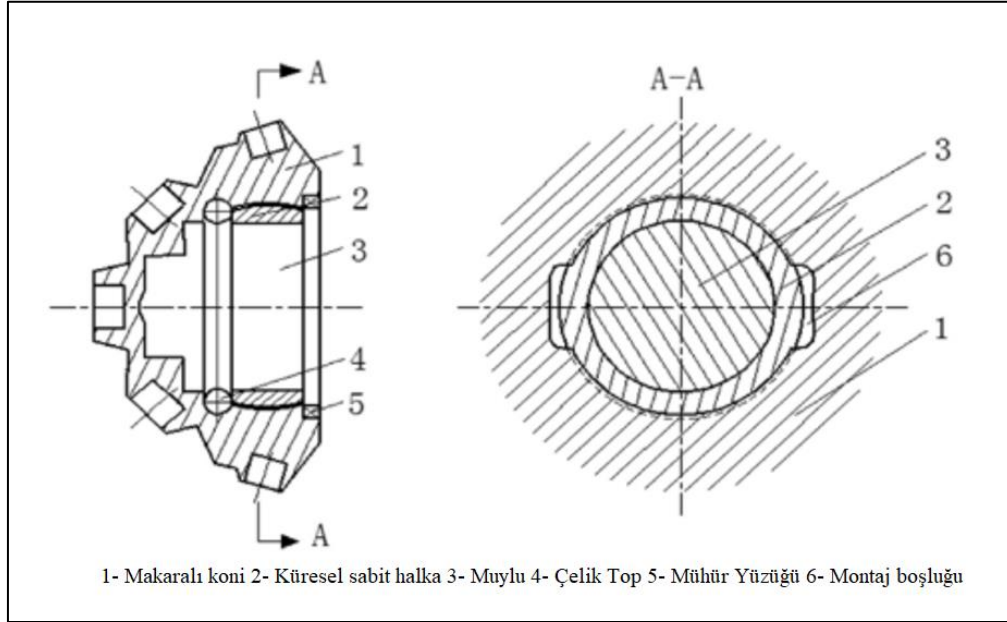
Şekil 2.13. Çelik teller için yapılan 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli



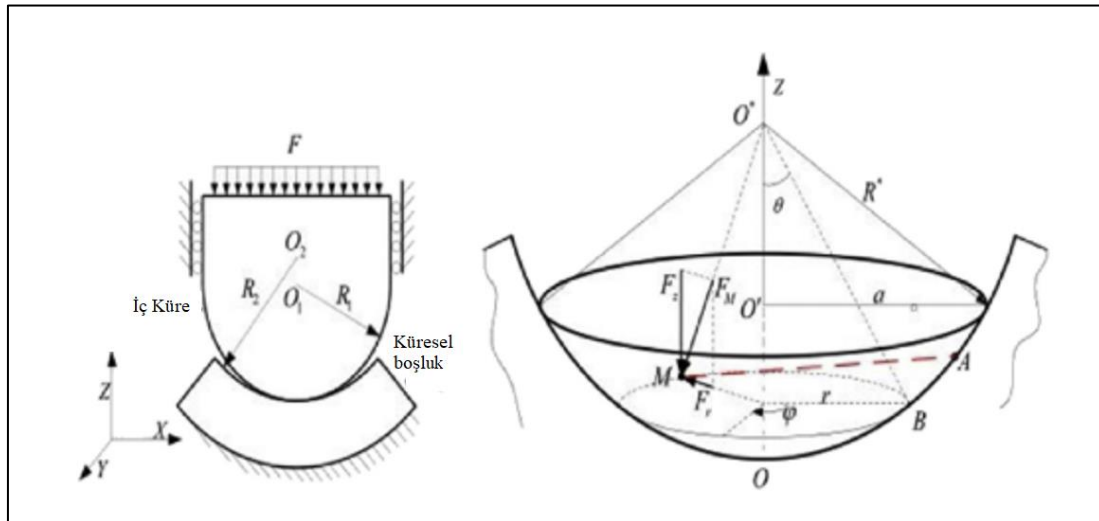
Şekil 2.14. Çelik teller için sürtünme yorulması sonucu malzeme özellikleri

He ve diğerleri (2016) yılında makaralı koni matkap uçlarının kaymalı rulman temas yorulması üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. Yaptığı çalışmada Hertzian temas modeli, Fang temas modellerini dikkate alarak kaymalı rulmanlar için küresel sabit bilezik yatağının stresini azaltmak için çalışmalar gerçekleştirmiştir. Yaptığı çalışmada makaralı koni

uçlardakinin kaymalı yataklar için küresel sabit bileziklerin temas özelliklerini hesaplayabilmek için MATLAB programı kullanılmıştır. Bu çalışmada ayrıca dış yük, yarıçap, boşluk değerleri ve malzeme parametrelerinin etkisi incelenmiştir [18].



Şekil 2.15. Makaralı koni matkap uçlarının kaymalı rulman küresel sabit bilezik yapıları [18]

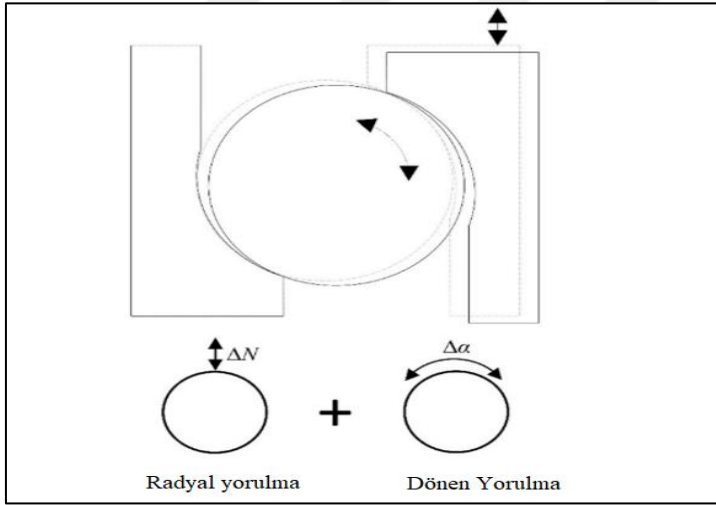


Şekil 2.16. Orijinal Fang modelinde tam küresel skeç [18]

Yapılan bu çalışmanın sonuçları olarak Fang temas modeli ve Hertzian temas modelinin küresel sabit bilezik stres konsantrasyonunu azaltmak için etkili olduğu gösterilmiştir. Dış yük, yarıçap, boşluk değeri ve Young malzeme modülü, makaralı koni matkap uçlarının çalışma performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır. Malzemeler için

farklı sürtünme katsayısının farklı temaslara sahip olduğu anlaşılmıştır. Yapılan çalışmada sürtünmeyi ve aşınmayı azaltma perspektifinden, sert göstergeye rağmen iç kısımda esnek olma özelliğine sahip malzemelerin seçilmesi gerekliliği belirtilmiştir. Bunun nedeni olarak sadece aşınma direncini azaltmakla kalmayıp aynı zamanda temas basıncının tepe noktasının da etkili bir şekilde azaltıldığı belirtilmiştir. Böylece yatağın ömrünü uzatabilir, delme verimliliği artırılabilirdiği gözlemlenmiştir [18].

Cubillas ve diğerleri (2022), bilyeli rulmanlar için yuvarlanma yollarındaki sürtünme hasarını tahmin etmek amacıyla değişken yükleme altında yârin analitik metodoloji çalışması gerçekleştirmiştir. Rulmanlardaki küçük karşılıklı hareketler, yuvarlanma yolu arasındaki temasta yorulma olayları nedeniyle aşınma hasarına neden olabilmektedir. Bu hasara aynı zamanda sürtünme korozyonu denmektedir. Bu hasar sebebiyle yağlama koşulları oluşur, titreşimlere ve gürültülü çalışmaya neden olarak sonunda bileşenin değiştirilme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Yapılan çalışmada FEM aracılığıyla yapılan sayısal bir doğrulama ve deneysel bir doğrulama gerçekleştirilmiştir [19].



Şekil 2.17. Değişken yük sebebiyle enine yuvarlanma hareketi ve açısal bir yatağın değişken temas reaksiyonu [19]

Çalışmanın sonuçları olarak rulman deformasyonlarını, temas açısını ve temas reaksiyonlarını hesaplamak için sayısal bir model kullanılmıştır ve standart ISO/TS 16281 tarafından elde edilen sonuçlardan önemli bir fark göstermiştir. Deneysel testlerde açısız yatak halkaları eksenel yükler altında önemli ölçüde radyal deformasyona uğramıştır, bu etki belirtilen standartlarda dikkate alınmamaktadır ve sayısal modelin serbest yanal yüzlerle bu konfigürasyonda kullanılmasıyla daha güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada en yüksek bağıl fark değerlerinin düşük yük değerlerinde çıktığı gözlemlenmiştir. Düşük yük, sonlu elemanlar modeli sonuçlarının güvenilirliğini olumsuz yönde etkileyen temas alanının azalması nedeniyle düşük sayıda temas noktası ile sonuçlanmıştır. Sonuç olarak her bir sürtünme aşınması modunun katkısı incelenmiştir ve değişken reaksiyon nedeniyle ana hasar kaynağının radyal sürtünme olduğu bulunmuştur. Bu analizin dönme sürtünmesinin nihai hasar üzerindeki etkileri incelenmiş ve dağılan enerjinin küçük olduğu bölgelerde farklılıkların daha dikkate değer hale geldiği görülmüştür, bu sonuçlardan dönme sürtünmesinin etkisinin hasar alanlarının tahminine hassasiyet kattığı sonucuna ulaşılmıştır. [19].

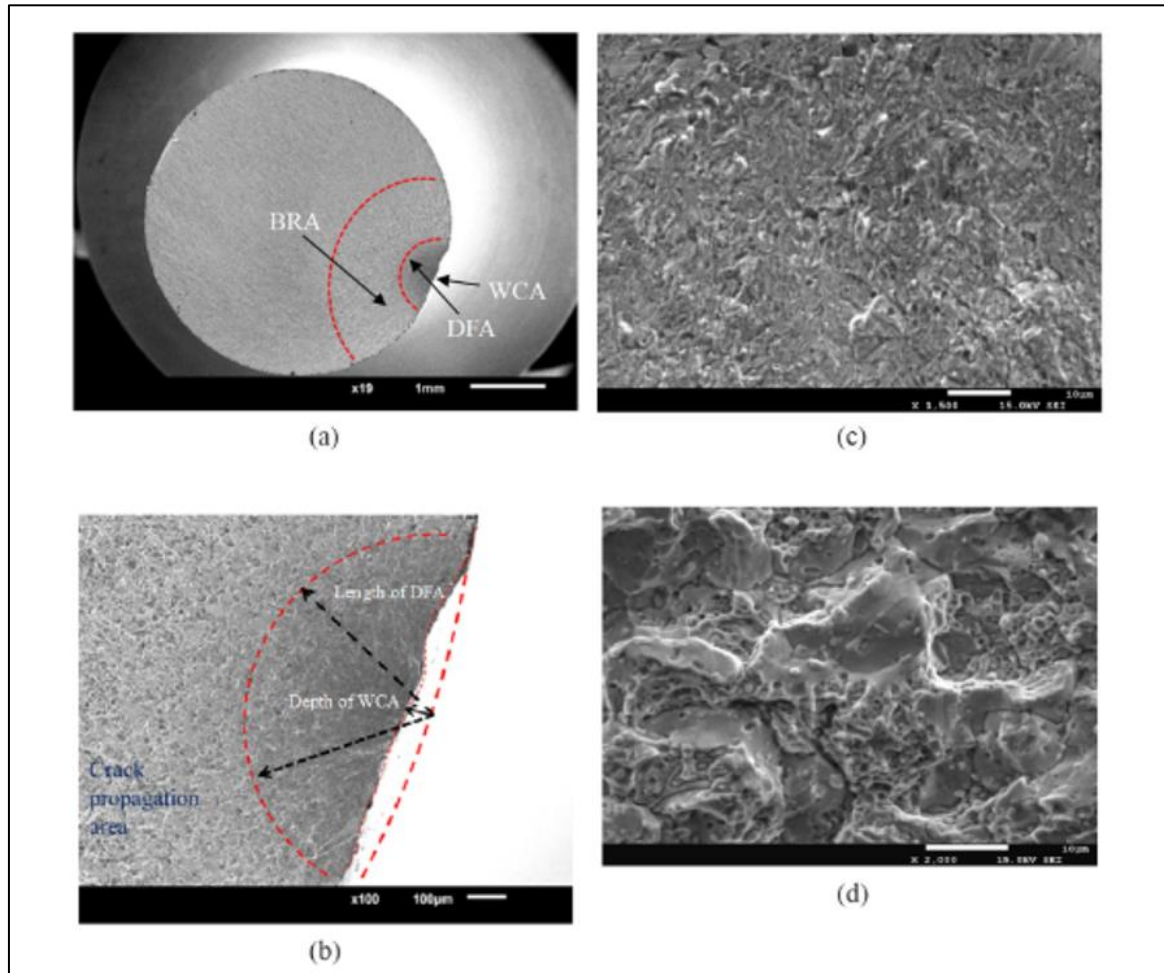
Huang ve diğerleri (2019), çok yüksek çevrim yoğunluğunda yüksek mukavemetli rulman çeliğinin özellikleri üzerinde sürtünme hasarının etkisi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada SAE 52100 çeliğinin sürtünme yorulması davranışı, çok yüksek yorulma döngülerine kadar incelenmiştir. Çok yüksek çevrimle sürtünme yorulma rejiminde malzemenin yorulma mukavemetinin azaltılması temas yükü ile artmaktadır. Çalışmanın sonucu olarak malzemenin 107 döngüye kadar sürtünme yorulma ömrü malzeme üzerindeki toplu gerilmeye bağlıdır ve yük kritik olandan daha yüksekse temas yüküne göre değişmediği gözlemlenmiştir. Sürtünme yorulma ömrü, VHCF rejimindeki malzeme üzerindeki sürtünme temas yüküne bağlı olduğu, daha yüksek sürtünme temas yükünün malzemenin daha düşük sürtünme yorulma ömrü ürettiği, VHCF rejiminde sürtünme yorulma ömrünün, malzemelerde hasar büyüklüğü büyümesinin sürtünme mekanizmasını bağlı olduğu ve daha yüksek sürtünme yorulma ömrünün daha düşük aşınma oranına ve daha yüksek yüzey sertliğine sahip malzemelerde daha düşük temas yükü kullanıldığında elde edilebileceği gözlemlenmiştir [20].

Çizelge 2.1. SAE 52100 çeliği kimyasal karışım oranı [20]

C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	S	P	Fe
0,99	0,23	0,32	1,50	0,06	0,1	0,02	0,1	0,02	Dengede

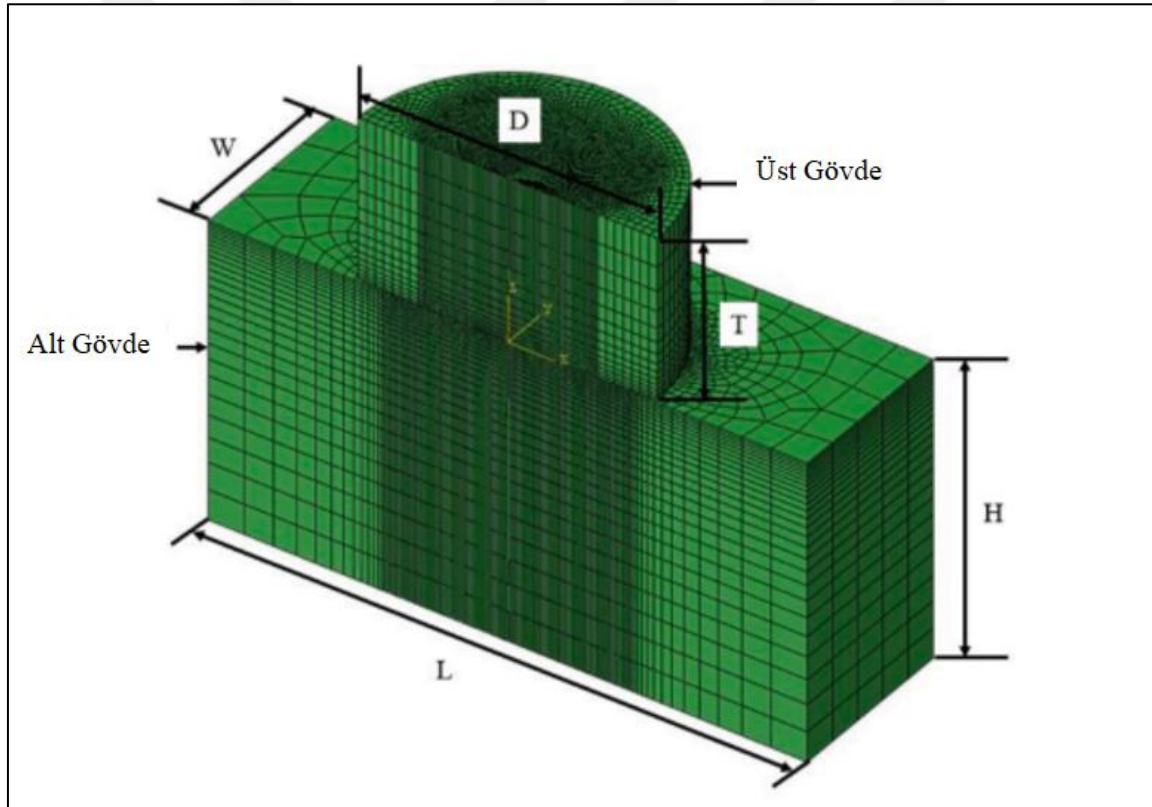
Çizelge 2.2. SAE 52100 çeliğinin mekanik özellikleri [20]

Malzeme	Mikro Sertlik (kgf/mm ²)	Maksimum Sertlik (MPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Young Modülü (GPa)
SAE 52100	910	2300	7,86	208

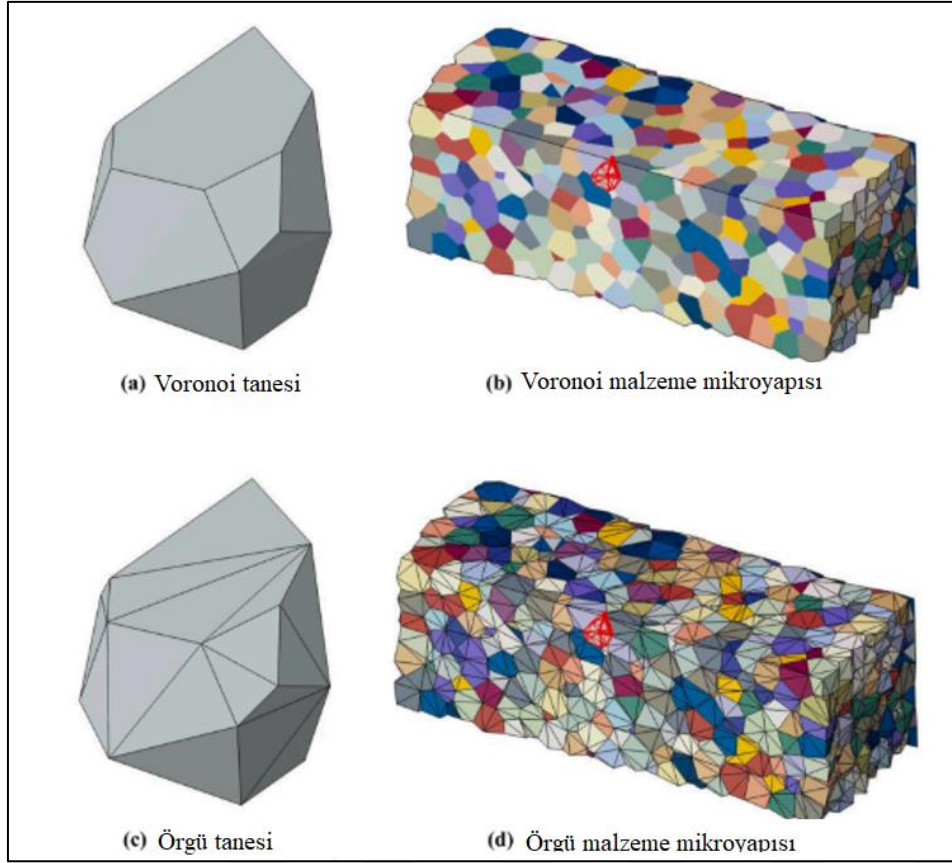
Şekil 2.20. (a) yorgunluk örneğinin kırılma yüzeyi 6.28×10^7 döngüde 14.3 n temas yükünde (b) kırılmış yüzeydeki WCA ve DFA bölgelerinde (c) DFA bölgesi (d) BRA bölgesi [20]

Sharma ve Sadeghi (2023), sürtünme aşınmasının yuvarlanma temas yorgunluğu üzerindeki etkileri üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmalarında rulman çeliklerinin yuvarlanma temas yorgunluğu (RCF) üzerindeki sürtünme aşınmasının etkilerini araştırmak için üç boyutlu süreklilik hasarı mekaniği (CDM) ve sonlu elemanlar modeli (FE) geliştirilmiştir. Sürtünme

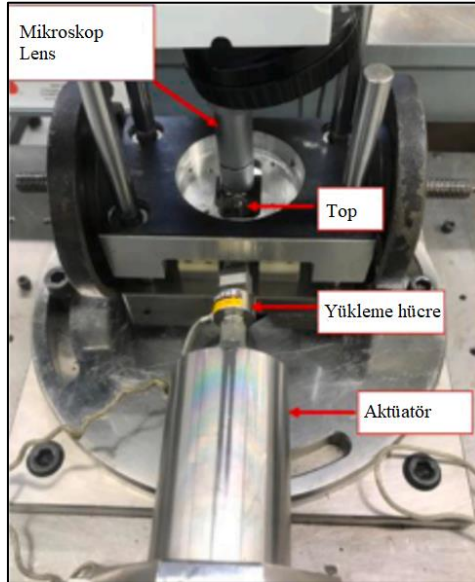
hasar geometrisini belirleyebilmek için, birbirinden farklı başlangıçta bozulmamış sürtünme basınçları için iki elastik cisim arasındaki yıpranmayı simüle etmek amacıyla 3D Lagrangian-Eularian (ALE) adaptif orgu sonlu elemanla modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modelde 0.5,0.75, 1 GPa ve 0.15,0.175, 0.25 sürtünme katsayıları $c/a= 0.35, 0.55, 0.75$ temas genişliği oranları incelenmiştir ve inceleme sonucunda bölgeler için yapışma gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan aşınma profilleri, başlangıçta bozulmamış çeşitli RCF basınçlarına 1,2.2 ve 3.4 GPa tabi tutulmuştur. RCF için basınç profilleri, kontağı 21 adımda sürtünme aşınma profilleri üzerinden hareket ettirilerek belirlenmiştir. Bu basınç modelleri daha sonra üç boyutlu süreklilik hasarı mekaniği ve sonlu elemanlar modelinde sürtünme yüzeylerinin RCF ömrünü tahmin etmek için kullanılmıştır [21].



Şekil 2.21. (a) adaptif orgu görüntüsünün sonlu elemanlar modeli üzerinde şematik gösterimi [21]



Şekil 2.22. Sonlu elemanlar modelinde malzeme mikroyapı topolojisi uygulaması [21]



Resim 2.1. Sürtünme aşınması test cihazı [21]

Yapılan çalışma sonucunda artan sürtünme basıncı yüzeyde daha fazla aşınmaya yol açmıştır, böylece RCF ömrünü azaltılmıştır. 1 GPa sürtünme basıncında ve 1 GPa RCF

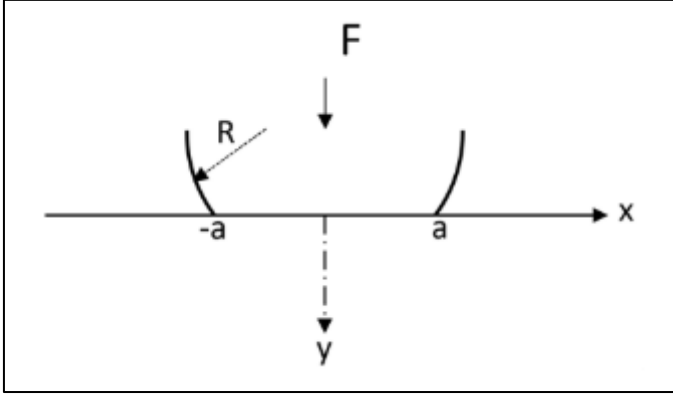
basıncında, RCF ömrü % 99,8 kadar düşebildiği görülmüştür. Bununla birlikte, bu azalmadan sonra bile kalan yaşam hala önemli ve 17 milyardan döngüden fazla olduğu gözlemlenmiştir. Temas genişliği oranına (c/a) yapışma azaldıkça, temas bölgesinin yüzeyde daha fazla kayma ve aşınmaya neden olduğu ve bunun da temas bölgelerinde daha büyük basınç dalgalanmalarına yol açtığı belirtilmiştir. Daha büyük indüklenmiş basınçlar RCF ömrünü azalmıştır ancak ömürdeki bu azalma daha düşük RCF basınçlarında daha belirgin bir hal almıştır. RCF basıncı arttıkça RCF ömrü üzerindeki sürtünme etkisi azaldığı, yüksek RCF temas basınçları altında ömrün temas genişliği oranı ile daha düşük basınçta üretilen RCF basıncı ve sürtünme izlerinin büyüklüğüne göre yönetildiği gözlemlenmiştir. Son olarak test edilen koşulların aralığı için M-10 rulman çeliğindeki sürtünme temaslarının L50 ömrünü değerlendirebilen bir yaşam denklemi oluşturulmuştur [21].

3. MODEL VE YÖNTEM

Bu bölümde ilk olarak, temas kuvveti ile sürtünme yorulma çalışmalarının ve yapılan çalışmada kullanılan teorem ve sayısal yöntemler hakkında bilgi verilecektir, daha sonra helikopter kuyruk rotoru hücum açısı değiştirici parçası için dikkate alınan parametreler ve yaklaşımlar üzerinde durulmuş olup parçanın yorulma , analiz gibi karakteristiklerinin elde edilebilmesi amacıyla geliştirilen sonlu elemanlar modeli, gerçekleştirilen lineer statik analizlerin kapsamı hakkında bilgiler verilecektir. Devamında, çalışma kapsamında tasarlanan hücum açısı değiştirici parçasının genel özelliklerinden bahsedilecek olup hücum açısı değiştirici parçasının sürtünme yorulması ile farklı malzemeler, aynı malzemeler, sürtünme kuvveti gibi etkilerinin kullanılabilirliğini incelemek amacıyla geliştirilen sonlu elemanlar modeli ve bu modeli dikkate alarak gerçekleştirilen statik analizler ve yorulma analizleri hakkında bilgiler verilecektir. Helikopter açısı değiştirici parçasının tasarımı CATIA V5 yazılımı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modeli ve analizleri ise ABAQUS programında gerçekleştirilmiştir.

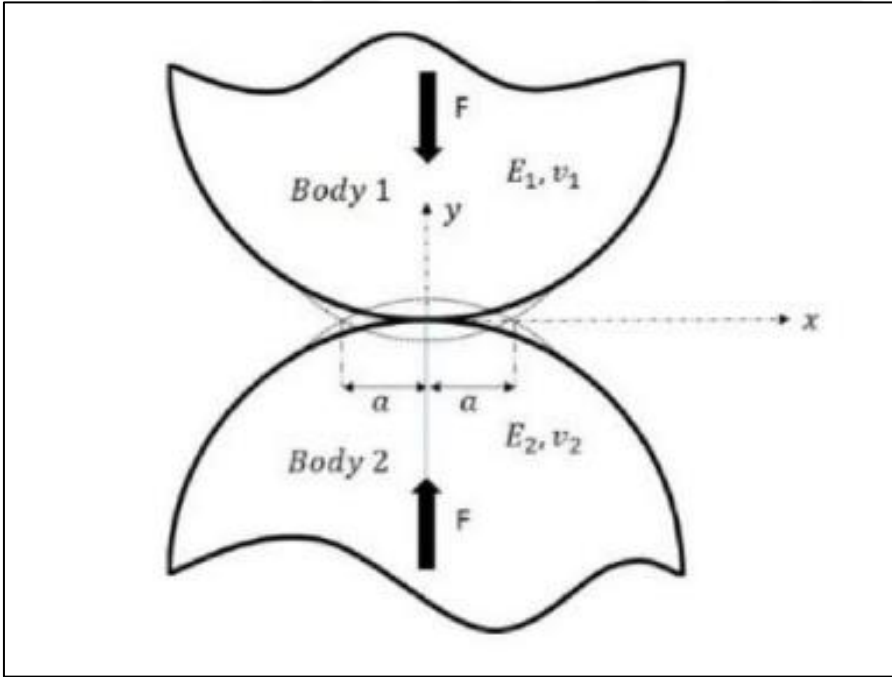
3.1. Teorik Arka Plan Çalışmaları

Bu bölümde Hertz Kontak Teorisi ve Mindlin Teorisi anlatılmaktadır. Bu teori, temas bölgesindeki normal basıncı hesaplamamızı sağlamaktadır. Sonlu elemanlar modelini doğrulamak için Hertz Temas Teorisinden yararlanılmaktadır ve Hertzian temas teorisi sürtünme yorulma çalışmalarının en önemli teoremlerinden bir tanesidir. Hertz Temas Teorisi, normal bir kuvvet (F) kullanan iki temaslı silindire dayanmaktadır. Bu teoremin amacı bu silindirlerin teması sonucu oluşan basıncı elde etmektir. İki boyutlu düzlem şekil değiştirme koşulları silindir uçlarından uzakta geçerli olmaktadır. Şekil 3.1'de verilen silindir ve yarım düzlem temas konfigürasyonunu elde etmek için silindirlerin yarıçaplarından birinin sonsuz olduğu varsayılmaktadır [14].



Şekil 3.1. Yarım alan varsayımıyla Hertzian temas konfigürasyonu

Hertz Temas Teorisi [7], temas eden cisimlerin farklı geometrileri veya malzeme özellikleri durumunda sürtünme olmadan temas basıncını hesaplayabilmektedir. Hertzian Temas Teorisine göre Hertz temasının temsili bir görünümü Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Hertz temasının temsili gösterimi [7]

Hertz Temas Teorisine göre silindirik gövdeler arasında temas koşulları sağlandığında dikdörtgen bir temas alanı oluşmaktadır. Bu temas basıncı, temas bölgesinin merkezinde maksimum seviyededir ve temas kenarlarında sıfır olmaktadır. Normal basınç dağılımı herhangi bir kesme çekişinden etkilenmemektedir. Etkin eğrilik yarıçapının hesaplanması şu şekilde verilmektedir:

$$k = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (3.1)$$

Gövdeler birbirinden farklı malzeme özelliklerine sahip olabilir. Bu nedenle etkin elastikiyet modülü (uyum) (3.2) ile hesaplanmalıdır.

$$A = 2 \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right) \quad (3.2)$$

Temas alanındaki basınç dağılımı şu şekilde hesaplanabilir:

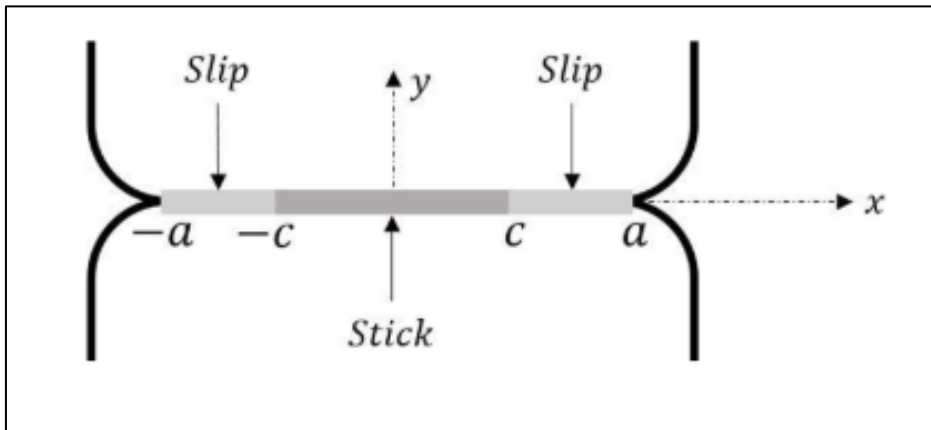
$$p(x) = -\frac{2F}{\pi al} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad (3.3)$$

Toplam temas alanının yarı genişliğini elde etmek için aşağıdaki denklem kullanılmalıdır.

$$pa = \sqrt{\frac{2FA}{\pi kl}} \quad (3.4)$$

Yukarıda bahsedilen Ei , vi , Ri elastik modüllerdir. Poisson oranı ve üst ve alt yüzeylerin yarıçapı sırasıyla $i=1,2$ ve l için temas alanının kalınlığıdır.

Mindlin ve Dereiswicz [22], sürtünme katsayısının etkisini hesaba katan teğetsel yükün etkisini de içerecek şekilde Hertz teorisini daha da geliştirmişlerdir. Temas bölgesini Şekil 3.3'te görülebileceği gibi yapışma ve kayma bölgelerinden oluşan iki bölgeye ayırmışlardır.



Şekil 3.3. Kayma ve yapışma bölgelerinin temsili görünümü

Mindlin teorisine göre normal basınç dağılımı değişmeden kalırken, teğetsel kuvveti sürdürmek için kesme çekişleri geliştirilir. Kesme çekişi dağılımı $q(x)$, şu şekilde hesaplanır:

$$q(x) = \begin{cases} -fp_0\sqrt{1 - (x/a)^2} & c \leq |x| \leq a \\ -fp_0 \left[\sqrt{1 - (x/a)^2} - 2\frac{c}{a}\sqrt{1 - (x/c)^2} \right] & |x| < c \end{cases} \quad (3.5)$$

Burada f sürtünme katsayısı ve c çubuk bölgesinin uzunluğudur. Çubuk bölgesinin toplam temas alanına oranı şu şekilde hesaplanabilir:

$$\frac{c}{a} = \sqrt{1 - \frac{Q}{fF}} \quad (3.6)$$

Burada Q teğet kuvvettir.

Bununla birlikte, Hills ve Nowell (1993), kesme yükünün bir bileşene uygulanan eksenel kütle gerilimi tarafından oluşturulduğu zaman, çubuk bölgesinin eksantriklik değerine kadar kaydırıldığını ve bunun da aşağıdaki denklemle verilen kesme çekişi dağılımında bir değişikliğe neden olduğunu göstermiştir.

$$q(x) = \begin{cases} -fp_0\sqrt{1 - (x/a)^2} & c \leq |x| \leq a \\ -fp_0 \left[\sqrt{1 - (x/a)^2} - 2\frac{c}{a}\sqrt{1 - (x + e/c)^2} \right] & |x + e| < c \end{cases} \quad (3.7)$$

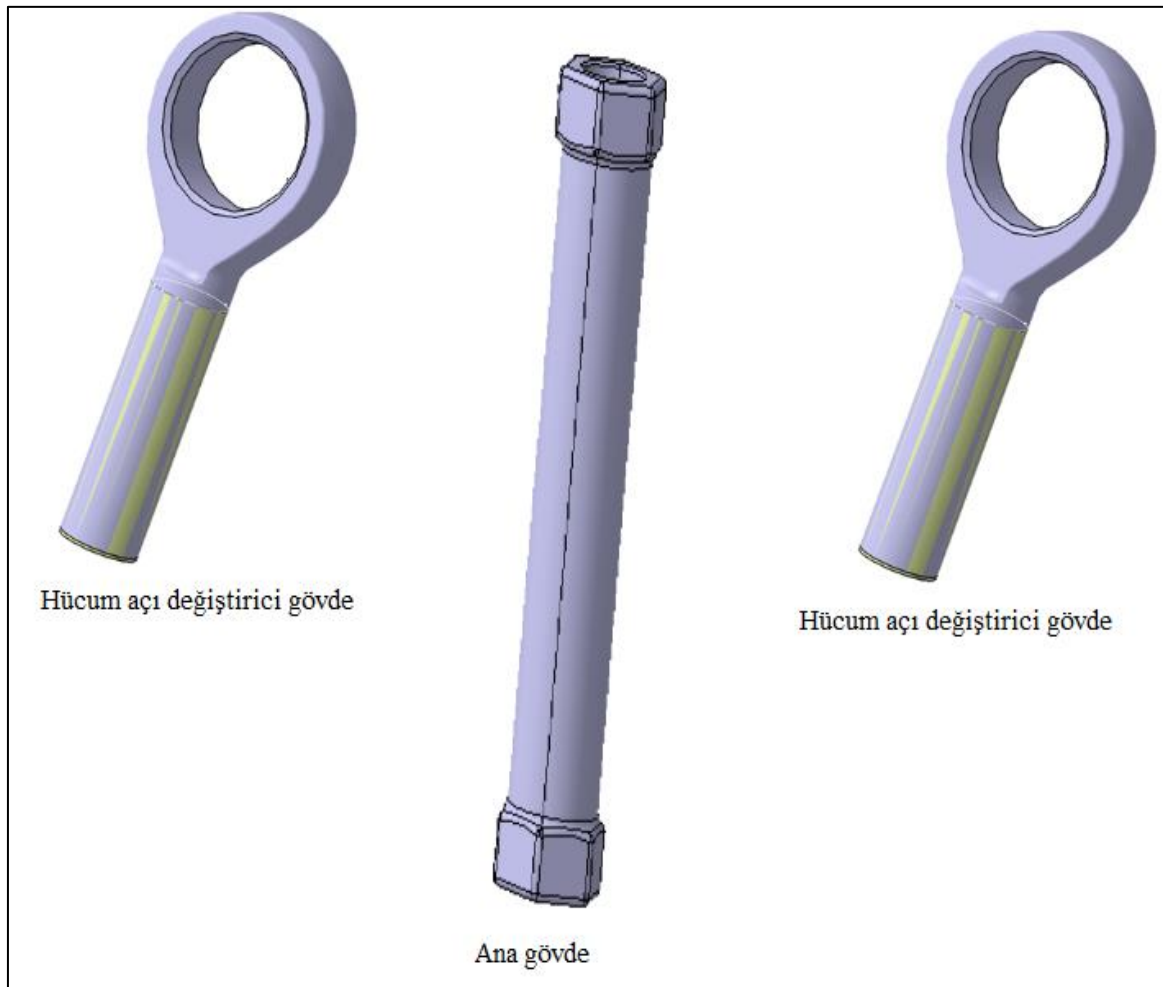
Burada eksantriklik, e , aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$e = \frac{a\sigma_{axial}}{4\mu P_0} \quad (3.8)$$

3.2. Parça Tasarımı ve Modellenmesi

Yapılan çalışmada tüm parçalar test boyutları, malzemeleri, toleransları ile beraber Catia V5 tasarım programı ile modellenmiştir. Hücum açısı değiştirici parçası helikopterde dinamik olarak çalışan bir parça olup uçuş için en kritik komponentlerden biridir. Parça helikopter üzerinde pilotun manevraları için kanat yardımıyla açı değişimi ve parçaların birbiri ile etkili çalışması için kullanılan helikopter parçasıdır. Hücum açısı değiştirici parçasının ana gövde

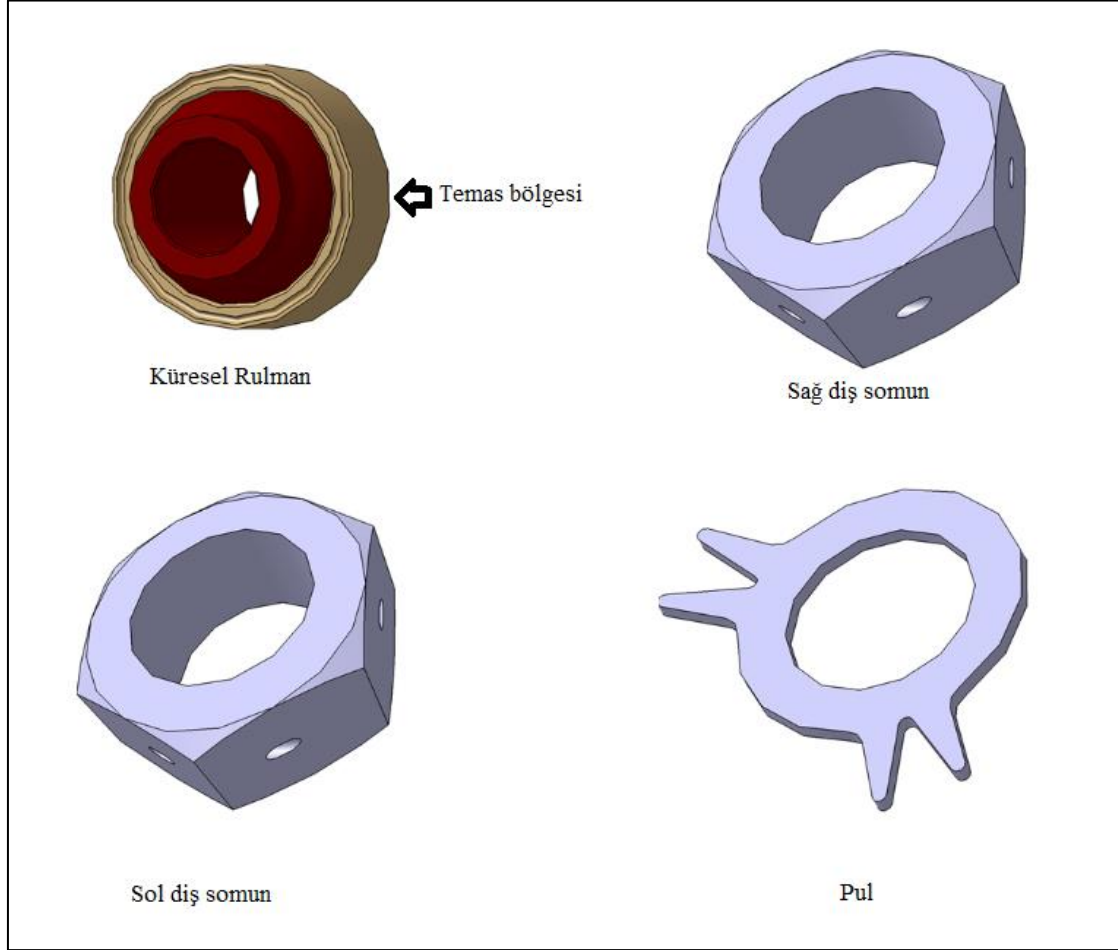
kısımının iç kısmında iki farklı diş tipi mevcuttur. Kullanılan iki adet çubuk kısımları ise ana gövde bağlantıları için farklı diş tipinden oluşmaktadır. Diş tiplerinin farklı olması parçanın boyunun helikopter ayarları ve titreşimlerin minimum mertebede olması amacıyla tüm kanatların benzer açılarda olması için boy ayarı yapabilmek amacıyla kullanılmaktadır. Ana gövde parçası somunların tork değerinin alınması ile beraber sağa veya sola döndürülerek hücum açısı değiştirici parçasının boyunun artması veya azalmasına yardımcı olmaktadır. Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6 görsellerinde CATIA V5 programı ile modellenen parçalar ve açıklamaları görülmektedir.



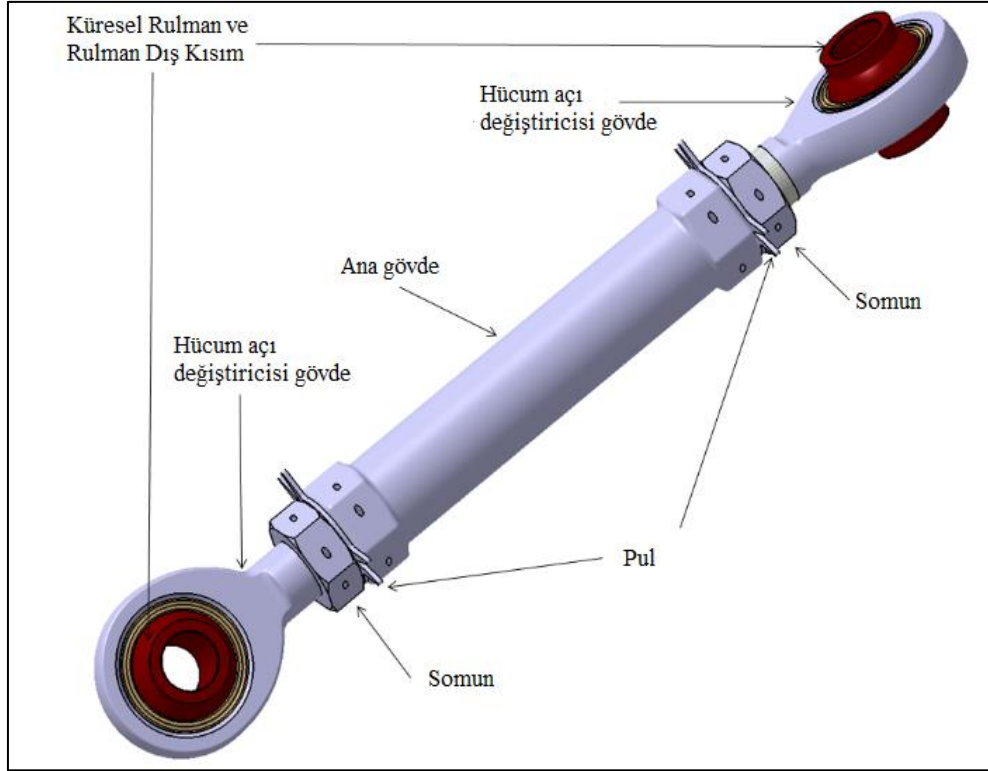
Şekil 3.4. Ana gövde ve çubuk detay gövde parça modelleri

Parçalar için çubuk gövde içerisine küresel rulmanların montajı yapılmaktadır. Küresel rulman montajı ile beraber somunlar, pullar gibi bağlantı elemanları ile beraber ana gövde içerisine monte edilmektedir. Montaj sırasında boy ayarı çubuk gövde delik merkezleri

arasındaki mesafeler ile boy kontrolü yapılmaktadır. Çubuk gövde delik merkezinin ana gövdeye olan uzaklığı iki çubuk için de aynı olması gerekmektedir.



Şekil 3.5. Kullanılan somunlar, pullar ve küresel rulman modelleri



Şekil 3.6. Catia v5 ile modellenen hücum açısı değiştirici parçası montaj görünümü

Çizelge 3.1. Tasarımda kullanılan parçalar ve malzemeler

İsim/Açıklama	Malzeme
Hücum Açısı Değiştirici Ana Gövde	15-5 PH H1025 AMS5659
Üst Çubuk Gövde	15-5 PH H1025 AMS5659
Alt Çubuk Gövde	15-5 PH H1025 AMS5659
Küresel Rulman (Dış Kısım)	17-4 PH H1150 AMS5643
Küresel Rulman (Top)	13-8 PH Mo H100 AMS5629
Üst Bağlantı Cıvatası	Alaşımlı Çelik A286 AMS 2759
Burçlar	15-5 PH H1025 AMS5659
Bağlantı Somunları	AISI 4130 AMS6350
Hücum Açısı Değiştirici Somunları	Alaşımlı Çelik A286 AMS 5525
Pullar	15-5 PH H1025 AMS5862

Çizelge 3.2. Tasarımda kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme	Elastik Modülü	Poisson Oranı	Maksimum Çekme (MPa)	Maksimum Kesme (MPa)
Çelik 15-5PH H1025 AMS 5659	196507,5	0,27	1068,73	668,82
Çelik 15-5PH H1025 AMS 5862	196507,5	0,27	1061,83	668,82
Alaşımlı Çelik A286 AMS2759	200644,5	0,31	1103,2	606,76
Alaşımlı Çelik A286 AMS5862	200644,5	0,31	965,3	530,92

Çizelge 3.3. Tasarımda kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kesme Mukavemeti (MPa)	Sünme Dayanımı (MPa)	Maksimum Sünme (MPa)
Çelik 15-5PH H1025 AMS 5659	999,78	621,35	985,99	1068,73**
Çelik 15-5PH H1025 AMS 5862	985,99	621,04	985,99	1061,83
Alaşımlı Çelik A286 AMS2759	827,4	455,07	827,4	1103,20**
Alaşımlı Çelik A286 AMS5862	655,03	360,26*	655,03*	965,30**

3.3. Analiz

3.3.1. Geometri ve mesh yapısı

Bu bölümde Abaqus yazılımının tanımlarına göre mesh yapısı ile ilgili bilgiler verilmiştir. Katı model için nominal boyut kullanılmaktadır. Bir boyutun (kalınlığın) diğer boyutlardan önemli ölçüde küçük olduğu ve kalınlık yönündeki gerilmelerin ihmal edilebilir olduğu (1/20; kalınlık/uzunluk oranı) yapıları modellemek için kabuk elemanları kullanılmaktadır.

2 boyutlu kabul elemanlar için önerilen meshleme elemanı türleri için kabuk türleri kullanılmaktadır. Katı modeller için önerilen ağ oluşturma elemanı türlerinin taslağı Çizelge 3.4'de verilmiştir. FEM için doğrusal tetrahedronun kullanılmamaktadır.

Çizelge 3.4. Katı model mesh türleri

Element Tipi	Tanımı	Tip
Tetrahedra	10 düğümlü ikinci dereceden tetrahedron	Katı model
Hexahedra	8 düğümlü doğrusal tuğla	Katı model
Hexahedra	20 düğümlü ikinci dereceden doğrusal tuğla	Katı model

Yapısal analiz için aşağıda verilen bilgilere göre eleman tipleri tercih edilmeli ve önerilen eleman tiplerinin listesi Çizelge 3.5'de verilmektedir.

Çizelge 3.5. Önerilen katı model mesh türleri

Element Tipi	Tanımı	Tip
C3D10	10 düğümlü ikinci dereceden tetrahedron	Katı model
C3D10M	10 düğümlü düzenlenmiş ikinci dereceden tetrahedron	Katı model
C3D8R	8 düğümlü doğrusal tuğla, azaltılmış entegrasyon, kum saati kontrolü (geliştirilmiş)	Katı model
C3D8I	8 düğümlü doğrusal tuğla, uyumsuz modlar	Katı model
C3D20R	20 düğümlü ikinci dereceden tuğla, azaltılmış entegrasyon	Katı model

Tetrahedra elemanı C3D10, hekzahedra elemanları ile örülemeyen karmaşık şekilli bileşenler için kullanılmaktadır.

- Temaslı modeller için sadece yüzey ve yüzey tip kontak ile kullanılmalıdır , ancak mümkün ise tercih edilmemelidir.
- Kritik problemleri bükme için yararlı olmamaktadır.

Tetrahedra elemanı C3D10M, hekzahedra elemanları ile örülemeyen karmaşık şekilli bileşenler için kullanılmaktadır.

- Yüksek deformasyon ve temas problemleri için uygun olmaktadır.
- Kesme ve volümetrik kilitleme, C3D10M kullanılarak önlenebilmektedir.
- Hem düğüm düğüm hem de yüzey yüzey temas türleri için uygun olmaktadır.

Hekzahedra (Tuğla-Şekil) elemanı C3D8R, bölgelerin hex mesh olması için tercih edilmektedir.

- Bükülme yükleri taşıyan herhangi bir yapıyı modellerken kalınlık boyunca en az dört eleman (makul derecede ince örgü) ile kullanılmaktadır.
- Kum saatini azaltmak için sıfır sertlik etkisi arttırılmış kum saati kontrolü etkinleştirilmektedir.

Hekzahedra (Tuğla-Şekil) elemanı C3D8I bölgelerin hex mesh olması için tercih edilmektedir.

- Modelin bükme davranışını geliştirmektedir.
- İlk sipariş problemleri için azaltılmış entegrasyon önerilmemektedir. (Hassasiyet problemleri ortaya çıkmaktadır.)
- Hibrit elemanlar sıkıştırılmaz problemler için önerilmektedir.

Daha fazla doğruluk için C3D20R Hexahedra (Tuğla- Şekil) elemanı tercih edilmektedir.

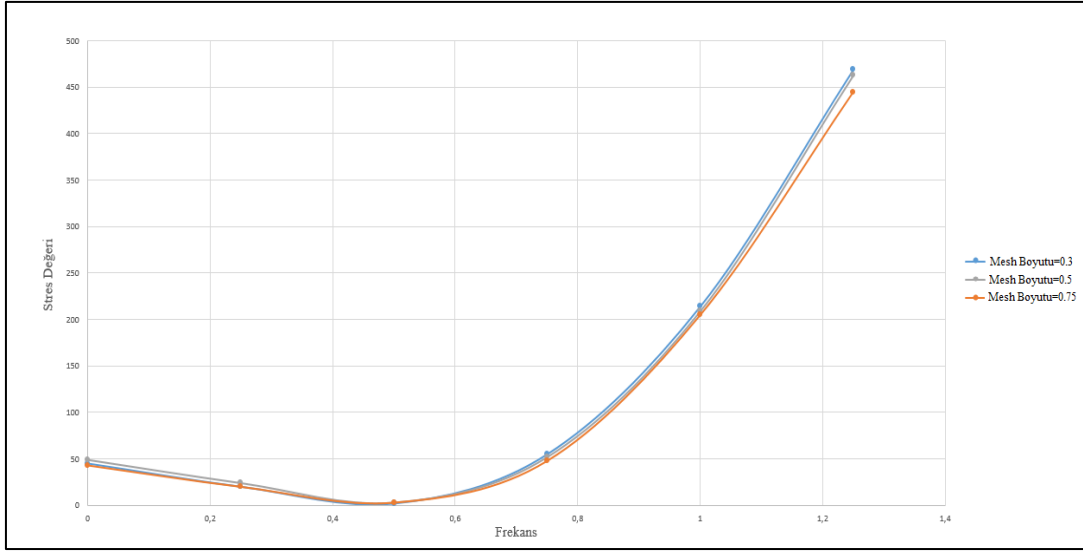
Model mesh doğruluğu için ise en boy oranı en önemli metrik olmaktadır. Bir elemanın en uzun ve en kısa kenarı arasındaki oran olmaklar beraber oran değerinin 5'ten küçük olması önerilmektedir ve her zaman 10'dan az olması gerekmektedir.

Kritik stres bölgeleri için mesh yoğunluğu (Mesh yakınsaması – mesh doğrulaması) işlemi yapılmalıdır. Sonuç için değişiklik en fazla %5'e izin verilmektedir. Mesh arıtma orya çıkan stresi değiştirmektedir. Bu süreçte amaç, örgü arıtma seviyesini bulmaktır, böylece önceki örgü inceltme ile ilgili ortaya çıkan stres değişimi %5'in altında kalacaktır. Başka bir ifadeyle, bazı sonlu eleman model çıkış verilerinin doğrulu kullanılan örgü yoğunluğuna bağlı olmaktadır. Bu nedenle, daha fazla ağ inceltmesi çözeltide ihmal edilebilir bir değişiklik ürettiğinde bir ağın yakınsadığı söylenir.

Mesh doğrulaması için analizin en kritik parçası olan çubuk ucu parçasına 0.3, 0.5 ve 0.75 boyutlarında mesh uygulanmıştır ve incelenen analiz stres değerleri için hatanın tüm değerlerde %5'ten küçük olması, analiz veriliğinin doğruluğunun kontrol edilmesi ile uygun ağ doğrulaması yapılmıştır.

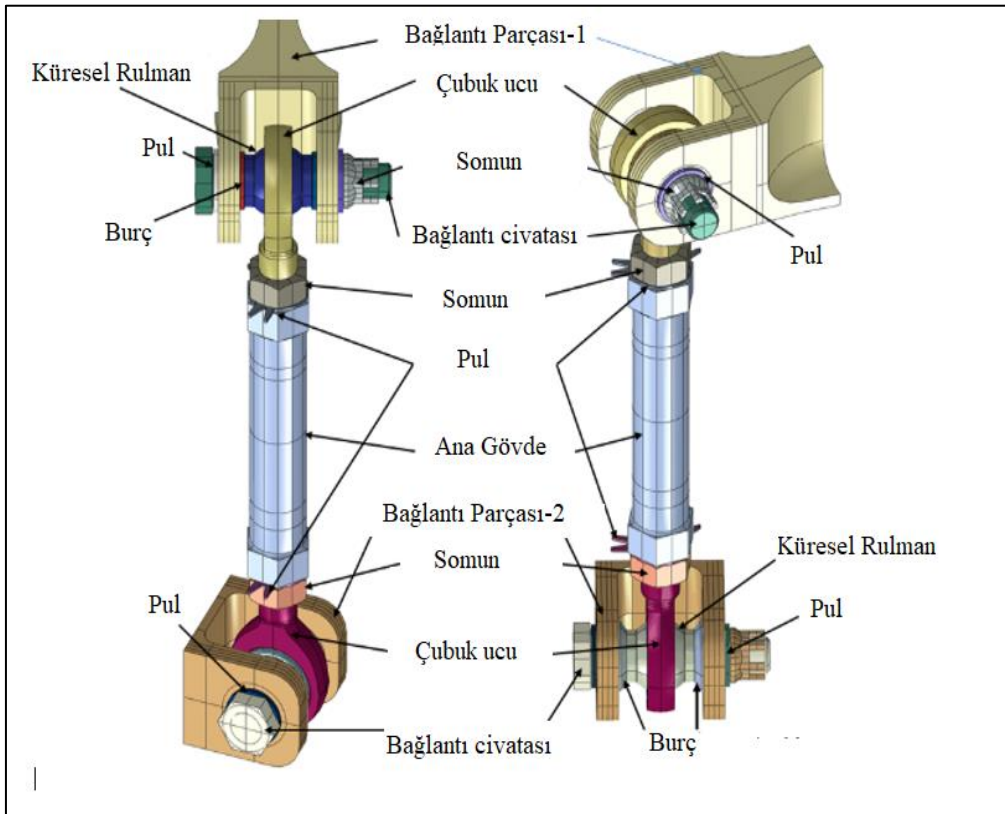
Çizelge 3.6. Mesh doğrulaması

Çubuk Ucu Parçası	
Mesh Boyutu	Mesh Sayısı
0.3	335324
0.5	95083
0.75	28702



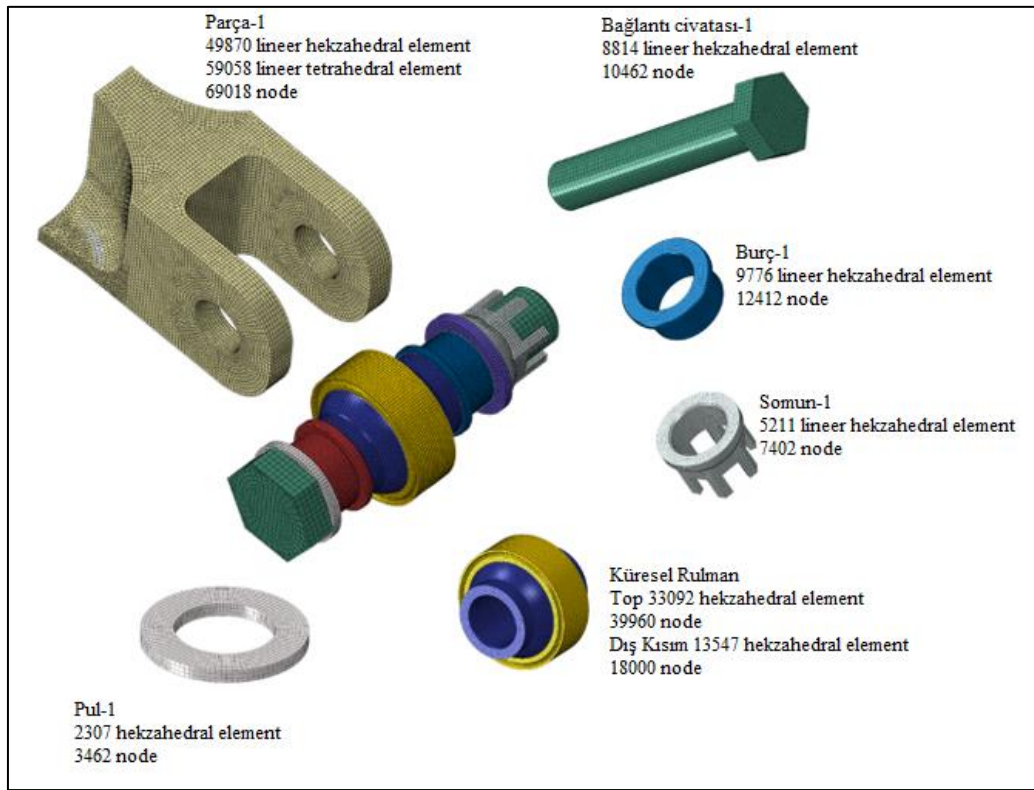
Şekil 3.7. Mesh doğrulaması

Çalışma için hazırlanan kuyruk rotoru hücum açısı değiştirici parçası için sonlu elemanlar modeli (FE) Şekil 3.7’de görülebilir. Sonlu elemanlar modeli için 2 adet gerçeği temsil eden bağlantı parçası, bağlantı cıvataları, somunlar, burçlar, pullar, hücum açısı değiştirici çubuk uçları, ana gövde kullanılmaktadır.

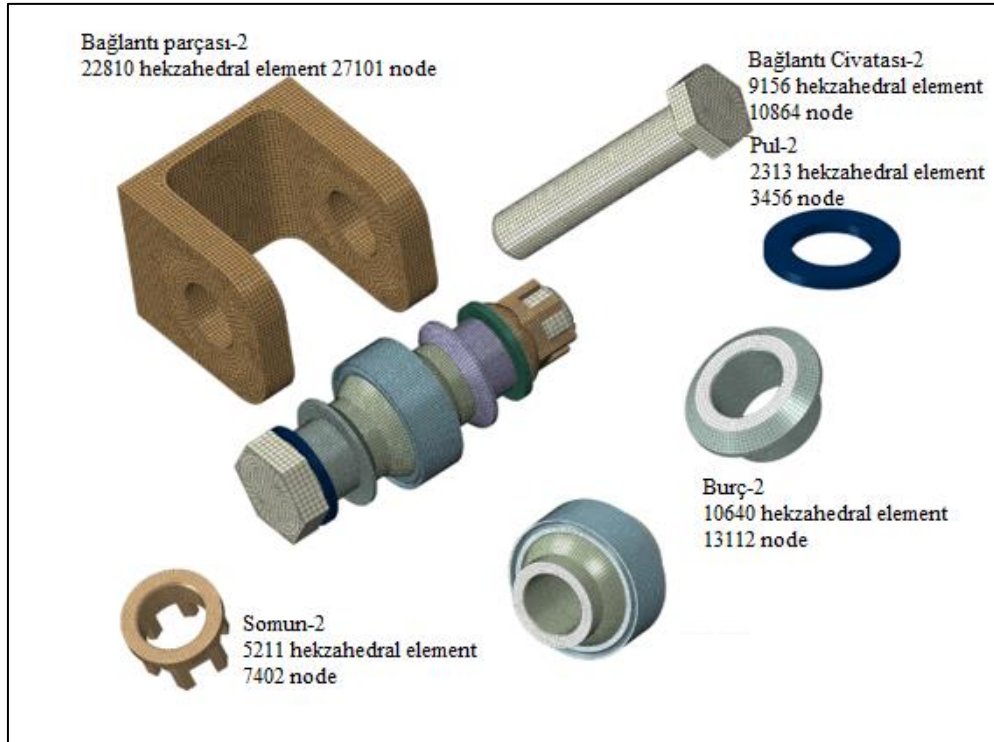


Şekil 3.8. Hücum açısı değiştirici parçası montajı Abaqus® sonlu elemanlar modeli

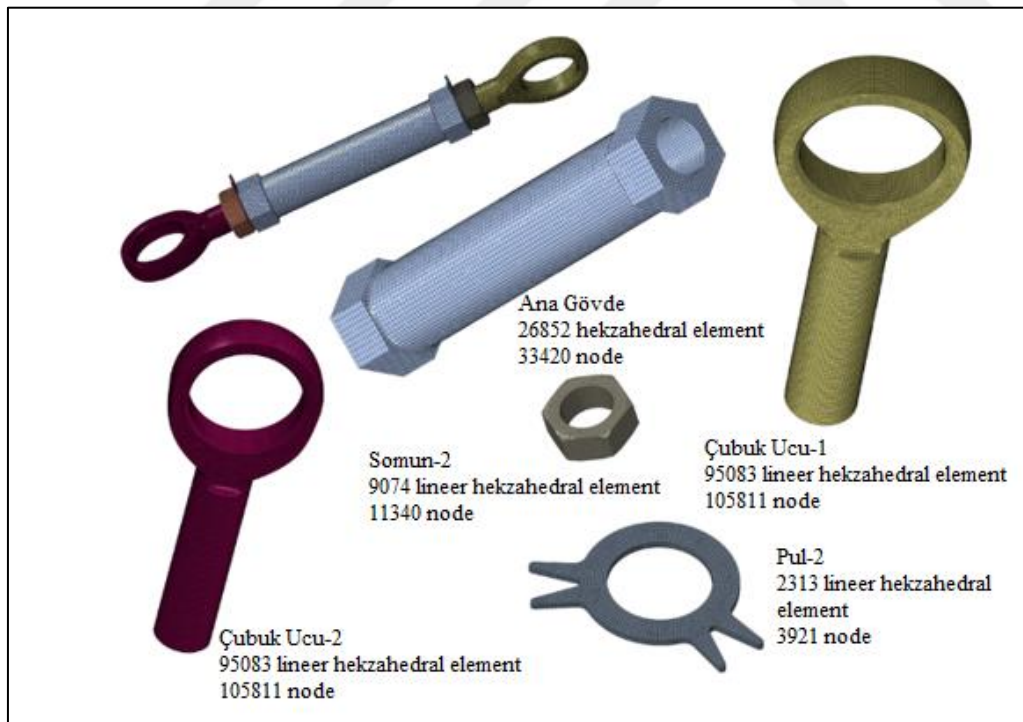
Analiz seviyesinde gerçeği temsil eden bağlantı parçalarının bağlantı yönü ve yük yönü Şekil 3.8'deki gibi değildir. Stres kritik ve analiz değerlendirmelerinin ana parçaları olmadıkları için yukarıdaki görsel model çalışmasının açıklanması için kullanılmıştır. Modelde doğrusal hekzahedral ve doğrusal tetrahedral elemanlar kullanılmıştır. Tüm parçalar ayrıntılı olarak modellenir ve hekzahedral elemanlarla örülecek şekilde ayrı ayrı bölümlendirilmektedir. Sadece gerçeği temsil eden bağlantı eleman parçası-1 için tetrahedral eleman örgü kullanılmıştır. Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Çizelge 3.7 için yapılan analiz çalışmaları için örgü detayları görülmektedir.



Şekil 3.9. Hücüm açısı değiştirici bağlantı parçaları ve element tipleri



Şekil 3.10. Hücum açısı değiştirici bağlantı parçaları ve element tipleri



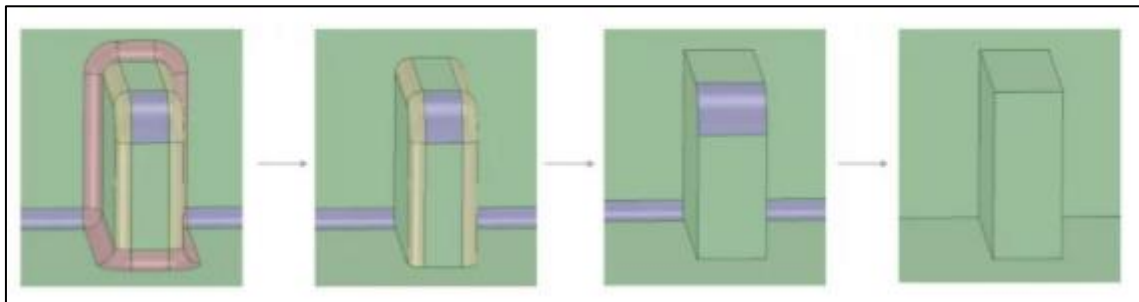
Şekil 3.11. Ana gövde, çubuk uçları ve bağlantı elemanları element tipleri

Çizelge 3.7. Sonlu elemanlar modeli örgü detayı

İsim/Açıklama	Element Tipi	Örgü Sayısı
Parça -1	C3D4	49870
	C3D8R	59058
Parça -2	C3D8R	22810
Çubuk Ucu-1	C3D8R	95083
Çubuk Ucu-2	C3D8R	95083
Ana Gövde	C3D8R	26852
Rulman Dış Kısım	C3D8R	13547
Rulman Top	C3D8R	33092
Bağlantı Civatası-1	C3D8R	8814
Burç-1	C3D8R	9776
Pul-1	C3D8R	2307
Somun-1	C3D8R	5211
Somun-2	C3D8R	5211
Pul-2	C3D8R	2313
Bağlantı Civatası-2	C3D8R	9156
Burç-2	C3D8R	10640

3.3.2. Yükler, sınır koşulları ve analiz modelinin sadeleştirilmesi

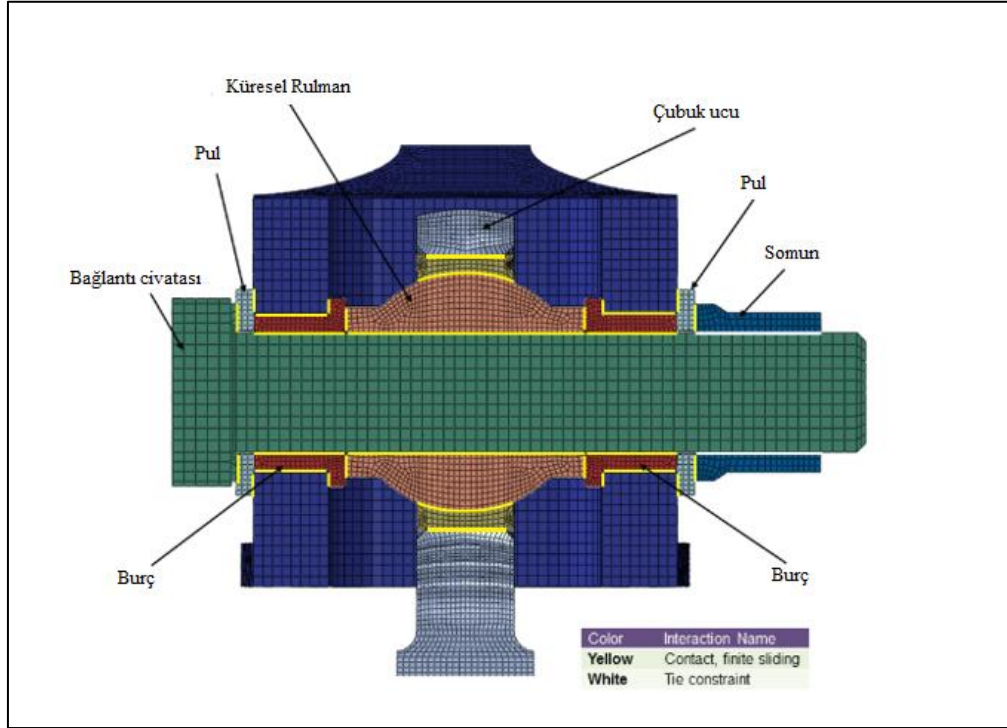
Tasarım ve üretimler yapılırken parçaların keskin köşelerden kırılmaması ve ömrünün daha uzun olması amacıyla radyuslar ve yumuşatma işlemi yapılmaktadır. Sonlu eleman modelleri yapılırken ise bu işlemler parçaların analiz işlemlerinin oldukça uzun ve zorlaştırıcı olmaması, daha verimli ve daha kolay olması amacıyla analizlerde, özellikle karmaşık geometrili modellerde sadeleştirme işlemi yapılmaktadır. Analiz için yapılan sadeleştirme işlemlerinde, parçaların olduğundan daha rijit bir hale gelmemesine özellikle dikkat edilmiştir.



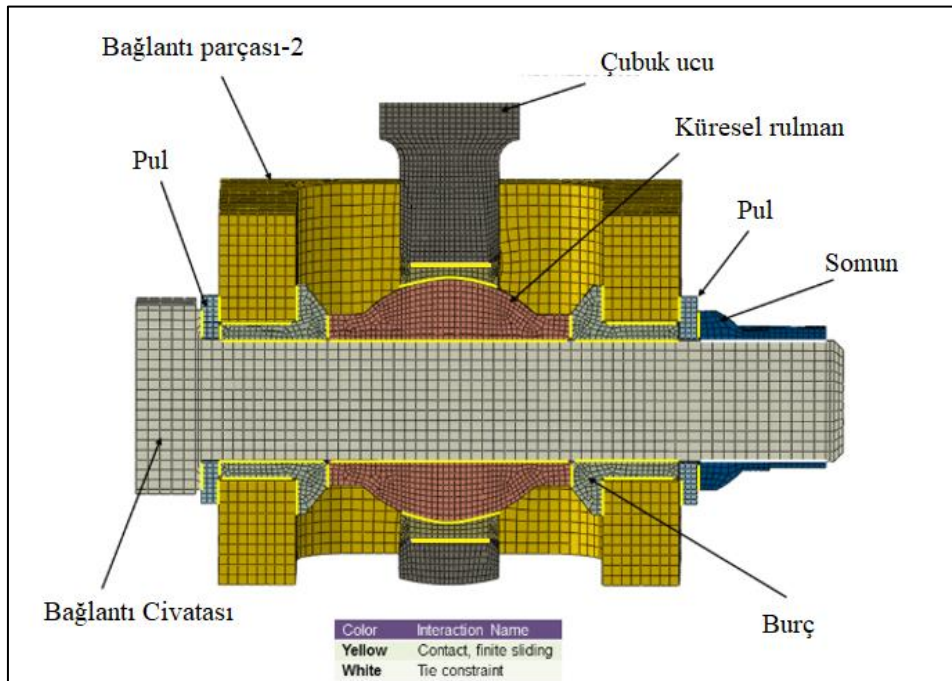
Şekil 3.12. Analiz için örnek sadeleştirme işlemi [22].

Sonlu eleman modelleri hazırlanırken reelde gerçekleşen bağ ve temas kuvvetleri verilmiştir. Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 üzerinde hücum açısı değiştirici parçası için verilen temas ve bağlar görülmektedir. Sonlu eleman model (FE) karmaşıklığı ve yakınsama

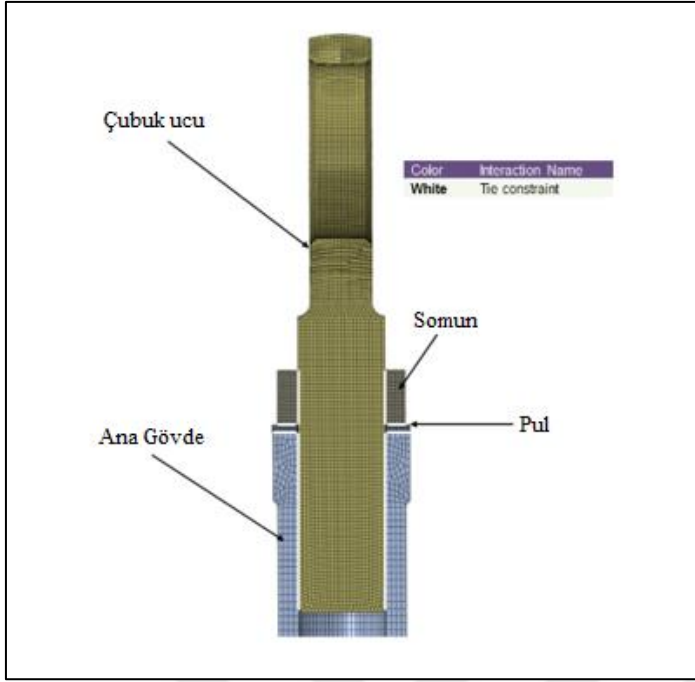
endişeleri nedeniyle, sonlu kayma sabiti (sürtünme katsayısı) 0,1 olarak seçilmiştir. Ayrıca bu sürtünme katsayısının parçaya olan etkisini incelemek amacıyla 0,01 olarak analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.13. Temas/bağ tanımı hücum açısı değiştirici üst kısım ve bağlantıları

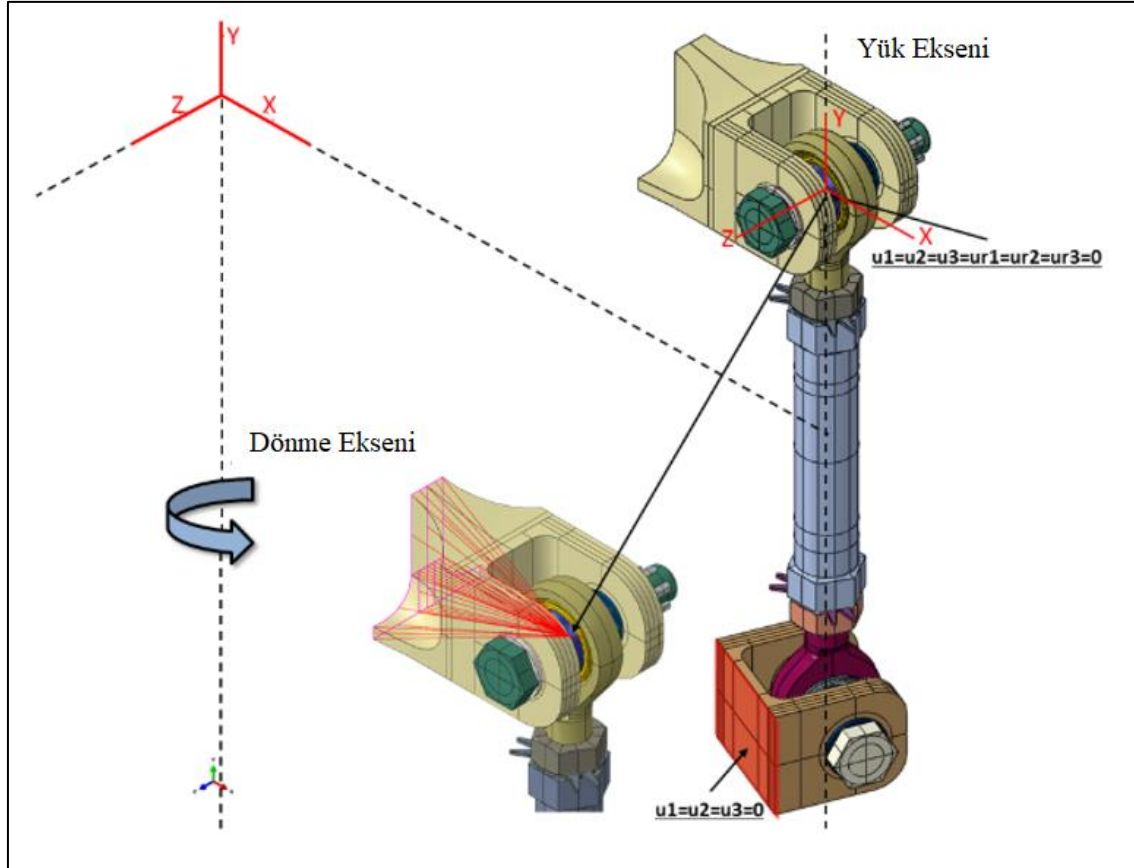


Şekil 3.14. Temas/bağ tanımı hücum açısı değiştirici alt kısım ve bağlantıları



Şekil 3.15. Temas/bağ tanımı hücum açısı değiştirici ana gövde ve çubuk ucu

Hücum açısı değiştirici parçası için yükler küresel yatağın merkezinden uygulanmaktadır ve Şekil 3.15 üzerinde uygulama noktaları görünmektedir. Helikopter üzerinde kuyruk rotorunun dönüşüne göre Santrifüj kuvveti uygulanmaktadır. Sonlu Elemanlar analizi için iki yük durumu (LC1, LC2) türetilmiştir. Bunlardan LC1 için hücum açısı değiştirici parçası bağlantısı, merkezkaç kuvveti uygulamasıyla birlikte çekme yüklemesi altında analiz edilmektedir. LC2 hücum açısı bağlantısı için ise, merkezkaç kuvvetinin uygulanmasıyla beraber basınç yüklemesi altında analiz edilmektedir. Yük, yük hesaplama referans noktalarında konsantre yükleme olarak uygulanmaktadır ve Parça-1 duvarına MPC giriş kısıtlamaları ile dağıtılmaktadır. Santrifüj kuvveti, kullanılan malzemelerin yoğunluklarını tanımlayarak Abaqus® FEM yazılımında dönme cisim kuvveti olarak uygulanmıştır. Yarıçap, kuyruk rotoru dönmesine göre hesaplanmaktadır.



Şekil 3.16. Hücum açısı değiştirici yük ve sınır koşulları

Tamamlanmış sınır koşulları Şekil 3.15 üzerinde gösterilmektedir. Küresel koordinat sisteminde üç sınır koşulu modellenmiştir. Küresel rulman merkezi her yöne sabitlenmektedir, küresel yatak merkezi, MPC kiriş üzerinde Parça 1 duvarına bağlanır ve Parça 2 duvarı 3 boyutta sabitlenmektedir.

Yorulma analizleri ve doğrulama için ise Manson-McKnight Method ile sürtünme yorulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Manson-McKnight Method ile elde edilen değerler Abaqus® FEM yazılımında HCF-Alternating MaxPrincipal, HCF Alternating VonMises, HCF Mean MaxPrincipal, HCF Mean VonMises, MS HCF MaxPrincipal ve MS HCF VonMises sonuçlarına ulaşılmıştır [23].

Stres genliği ve ortalama stres Von Mises kriterleri ile tanımlanır. Ek olarak, ortalama stres, ortalama stresin işaretinin SIGN teriminin kullanımıyla normal streslerin toplamının işareti olduğu durumlarda değiştirilir. Bu yöntemin en büyük sınırlaması, kesme gerilmelerinin

hakim olduğu vakalar içindir. Bir malzemenin normal bir stres ve orantılı bir kesme stresi altında çevrildiği düzlem stres durumu olmaktadır [23].

Modifiye MansonMcKnight yöntemi ortalama stres için işaret hesaplamasını değiştirir. Manson-McKnight ortalama stres denkleminin işaret terimi $\text{SIGN}(x_m + y_m + z_m)$, 1 ve 3, en büyük ve en küçük temel gerilmelerin bir fonksiyonu ile her yükleme koşulu için değiştirilir. Asıl gerilmeler aşağıdaki determinant ile çözülerek bulunur.

$$\begin{vmatrix} (\sigma_x - \sigma) & \tau_{xy} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - \sigma) & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & (\sigma_z - \sigma) \end{vmatrix} = 0 \quad (3.8)$$

Yerine koyma, en büyük ana gerilmenin işareti olan 1'in, en küçük ana gerilmenin işaretinden farklı olduğu durum içindir, 3. Fonksiyonu aşağıdaki gibidir;

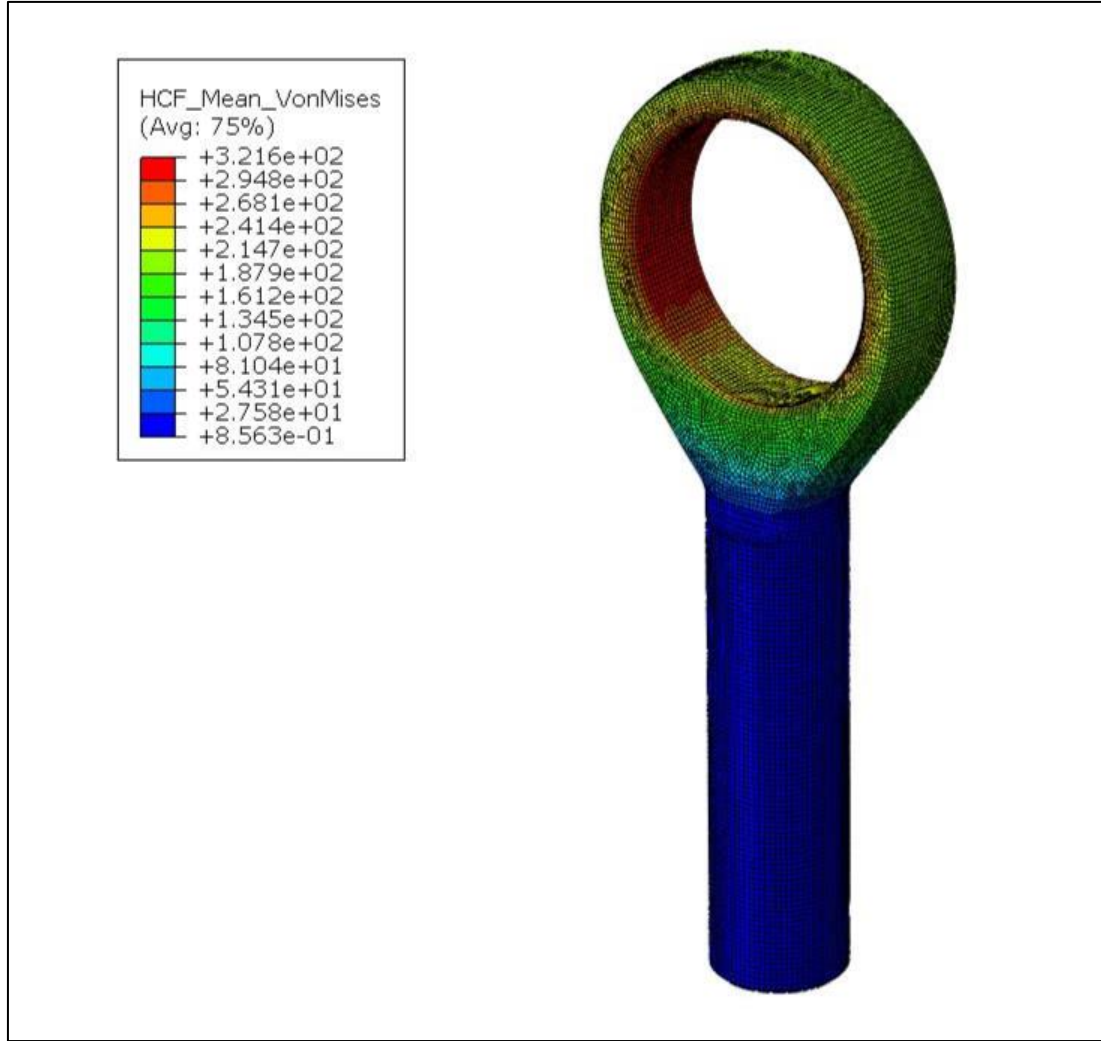
$$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (3.9)$$

Ortalama stres için ortaya çıkan denklem şudur;

$$\sigma_m = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{xm} - \sigma_{ym})^2 + (\sigma_{ym} - \sigma_{zm})^2 + (\sigma_{zm} - \sigma_{xm})^2 + 6(\tau_{xym}^2 + \tau_{yzm}^2 + \tau_{zxm}^2)} * \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right) \quad (3.10)$$

Stres genliği için denklem şudur,

$$\sigma_a = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{xa} - \sigma_{ya})^2 + (\sigma_{ya} - \sigma_{za})^2 + (\sigma_{za} - \sigma_{xa})^2 + 6(\tau_{xya}^2 + \tau_{yza}^2 + \tau_{zxa}^2)} \quad (3.11)$$



Şekil 3.17. Hücüm açısı değıştirici çubuk ucu sürtünme yorulması için örnek



4. DENEYSEL ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, yorulma deneysel test kurulumu tasarlanmış ve test tamamlanmıştır. Yorgunluk deneyleri, çubuk ucu ve küresel rulman teması için hücum açısı değıştiricisi yorulma testi olarak tamamlanmıştır. Test helikopter endüstrisinde sıkça kullanılan bir malzeme olan 15-5 PH çelik malzeme ve küresel rulman malzemesi olan yine 15-5 PH çelik malzeme olarak yapılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde 15-5 PH çelik çubuk ucu ve 15-5 PH küresel rulman dış kısmının yani sıra malzeme farklılığının kontak temasına etkisini göstermek amacıyla 15-5 PH çelik çubuk ucu ve Al7050 T7451 malzeme olarak yapılmıştır. 3 farklı parça ile test gerçekleştirilmiştir.

4.1. Testin Amacı

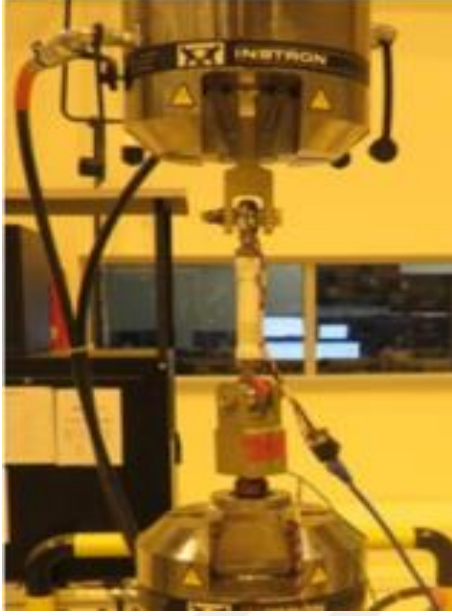
Test, kuyruk rotoru hücum açısı değıştirici bağlantısının güvenli ömrünü yüksek çevrim yorulma mukavemetini göstermek ve yapılan temas yorulma çalışmasının doğruluğunu göstermek amacıyla yapılmıştır. Yorulma yükleri, numunenin arızasını hedeflemek ve hücum açısı değıştiricisi bağlantısının yorulma mukavemeti potansiyelini göstermek için çalışma koşullarına göre yükseltilmiştir. Test sonuçları hücum açısı değıştirici bağlantısı S/N eğrisi oluşturmak için veri sağlamaktadır. Testte toplanan gerilme ölçer verileri, statik analiz modeli korelasyon aktivitesini desteklerken, yorulma analizleri ile de desteklenmek amacıyla yapılmıştır.

4.2. Deney Düzenegi

Test örnekleri, hücum açısı bağlantı çubuğunun eksenî yönünde döngüsel eksenel yük sağlamak için kullanılan Instron 8801'e, simüle eden FTC'ler vasıtasıyla bağlanır ve çapraz kafa bağlantısı ve hücum açısı kontrol kolu parçasının bağlantı kolunu simüle etmektedir. Eksenel yük, Test bağlantı aparatı-1 üzerinden test örneğine uygulanırken, tüm serbestlik derecelerinde sabit olarak tanımlanan sınır koşulu Test bağlantı aparatı-2 üzerinden uygulanır. Test içerisinde döngüsel eksenel yükler hücum açısı değıştirici parçasının ana gövdesi merkezini birleştiren çizgiden tüm parçaya aktarılmaktadır. Numune ve test bütünlüğünü sağlamak için ihtiyaç duyulan bağlayıcı malzemeleri için tork değerleri

havacılık standardında kullanılan değerlerden test cihazına aktarılmıştır. Testte cihazı Instron 8801 100 kN statik ve +/-50 kN dinamik yükleme kapasitesine sahip bir cihazdır.

Test deney düzeneği Resim 4.1’de görülmektedir.



Resim 4.1. Hücum Açısı Değiştiricisi yorulma testi deney düzeneği

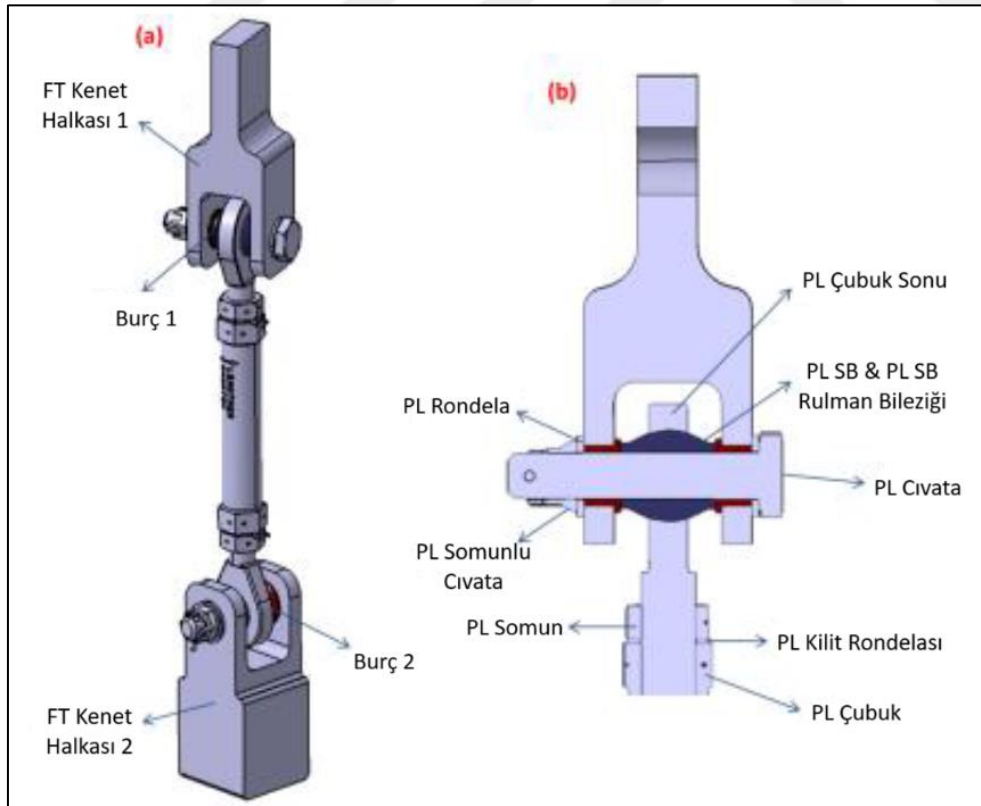


Resim 4.2. Test set up deney cihazı instron 8801 [24]

4.3. Test Spesimen Açıklaması

Kuyruk rotoru hücum açısı değiştiricisi bağlantı düzenekleri, hücum açısı hareketinin kuyruk rotor kontrollerinden hücum açısı kontrol kollarına ve daha sonra kanatlara aktarılmasından sorumludur. Pitch link bağlantı montajı, bir ana gövdeden oluşur ve ana gövdenin her iki tarafındaki küresel rulmanlarla iki ayarlanabilir çubuk ucu oluşmaktadır. İki taraftaki küresel rulmanlarla bağlantılı çubuk ucu boy ayarlaması yapılabilmesi için birbirinden farklı parçalardır. Birbirinden farklı boy ayarlaması için farklı tip diş yapılmasıdır. Pitch link bağlantı parçası bir uçtan çapraz kafa koluna bağlanırken, diğer uçtan kanatlara açılabilirliği sebebiyle hücum açısı kontrol kolu parçasına bağlanmaktadır. Ana gövde ve çubuk ucu parçası Cres 15-5 PH H1150 parçasından islenirken, küresel rulman dış kısmı Cres 15-5 PH H1150 ve küresel rulmanlar Cres 440C malzemedir.

Hücum açısı değiştirici bağlantı parçası için test düzeneği 3D model üzerinde Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Pitch link yorulma testi a) izometrik görüntüsü b) kesit görüntüsü

Test için kullanılan malzeme Cres 15-5 PH malzeme özellikleri ve analizde test dışında kullanılan AL7050 T7451 malzeme özellikleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Cres 15-5 ph malzeme özellikleri [25]

Özellikler	Değerler
E	197 GPa
ν	0,27
$\sigma'f$	839 MPa
b	-0,1083
C	1,53E-10
m	2,5

AL 7050 T7451 malzemesi Young modülü için 71 GPA ve poisson oranı için 0.33 değerleri sonlu elemanlar analizleri için modellerde kullanılmıştır [25].

Çizelge 4.2. Pitch link bağlantısı test numunesi komponentleri

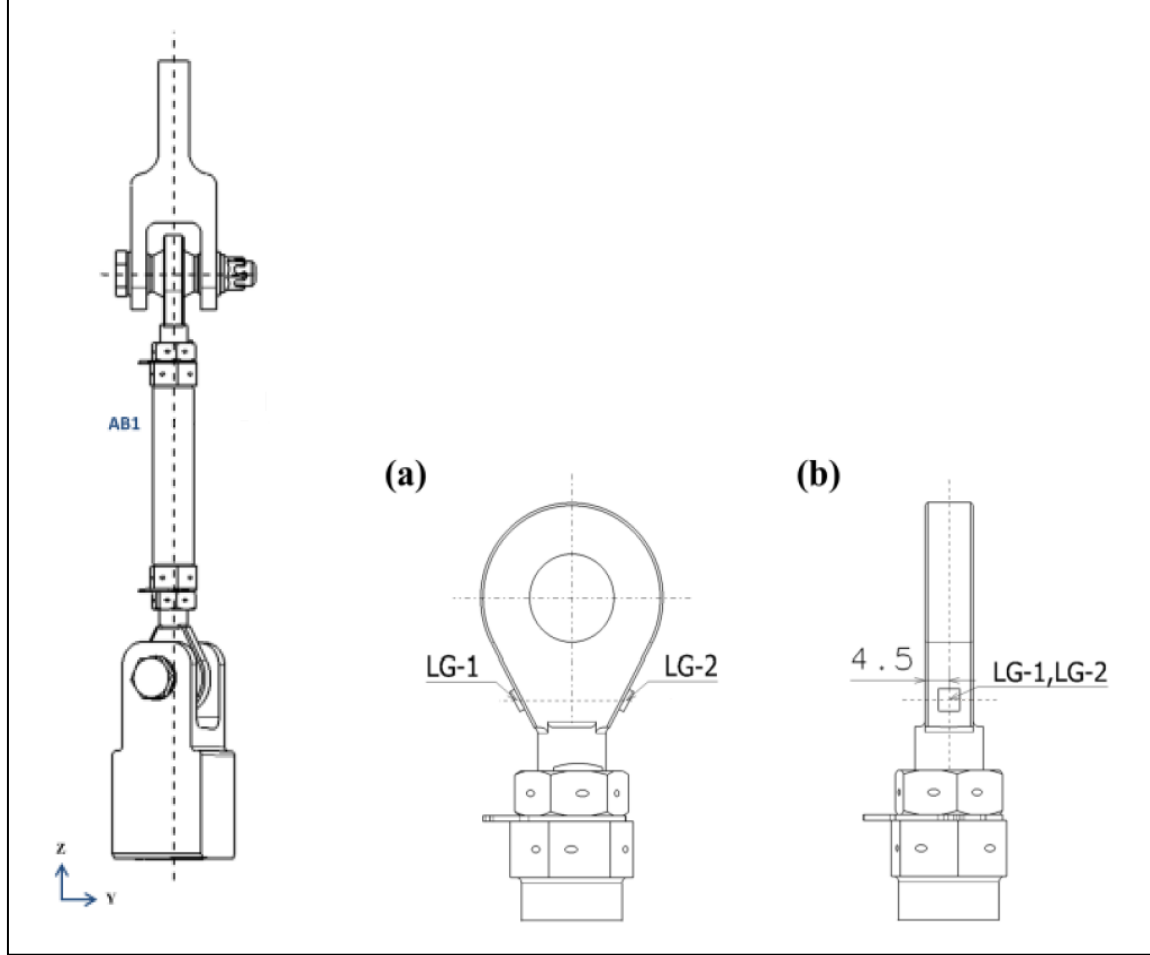
Parça Tanımı	Malzeme	Açıklama
Test Bağlantı aparatı-1	Cres 15-5 PH H1150	Simülasyon parçası
Test Bağlantı aparatı-2	Cres 15-5 PH H1150	Simülasyon parçası
Pitch link ana gövde	Cres 15-5 PH H1150	Orijinal test parçası
Pitch link rod endler	Cres 15-5 PH H1150	Orijinal test parçası
Cıvata	Cres A286	Orijinal test parçası
Küresel rulman dış kısım	Cres 15-5 PH H1150	Orijinal test parçası
Küresel rulman topu	Cres 440C	Orijinal test parçası

Çizelge 4.2. içerisinde hücum açısı değiştiricisi yorulma testi için kullanılan malzemeler verilmiştir. Test içerisinde yapılan 3 numune içinde aynı malzemeler kullanılmıştır.

4.4. Test Spesimen Enstrümantasyon ve Kalibrasyonu

Eksenel gerilim veya sıkıştırmada düzgün bir yol, bir kesitin herhangi bir noktasında eşit zorlanmaya sahiptir. Test sırasında z yönüne etkiyen kuvveti izlemek amacıyla hatve bağlantısı üzerine bir adet gerinim ölçer tabanlı eksenel köprü inşa edilmiştir. Hassasiyeti en üst düzeye çıkarmak için dört gerinim ölçer ile tam köprü devresi kullanılmıştır. Bunlardan ikisi eksenel gerinim yönünde, biri hatve bağlantısının bir tarafında olacak şekilde hizalanmıştır. Test sırasında bir adet eksenel köprü, bir adet termokupl ve dört adet lineer ölçüm cihazı bulunmuştur. Test numunelerinden biri için minimum olarak her iki çubuk ucundaki doğrusal gerinim verilerinin toplanması gerekmektedir. Ayrıca test sıklığının sabit

tutulması şartıyla sertifikasyon numunelerinden birine termokupl takılmasının sağlanması yeterlidir.

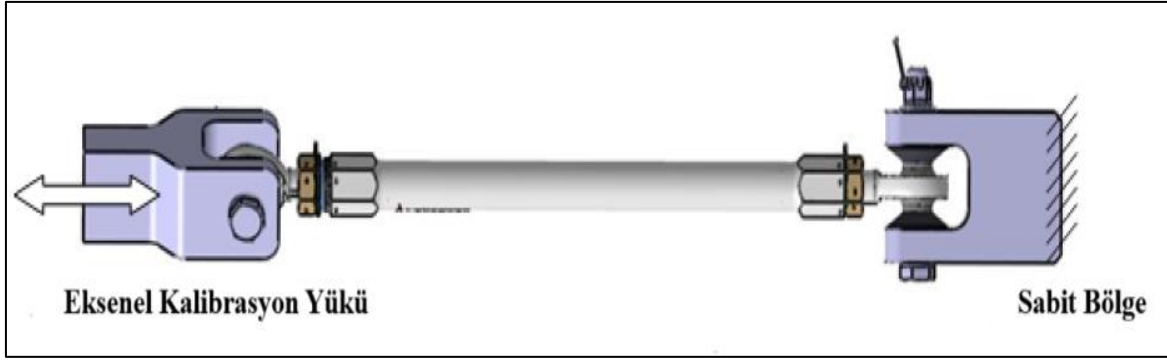


Şekil 4.2. Köprü ve lineer gage'ler için enstrümantasyon yerleri

Gerinim ölçerlerin yerleri belirlenirken aşağıdaki hususlar dikkate alınmıştır:

- Yüksek stres seviyesi (veri kalitesi ve çalışma inceleme yeri çubuk ucu olduğu için)
- Düşük stres gradyanı (analiz ve test arasındaki doğrulama amacıyla)
- Uygun geometrik yüzey (uygun olmayan yüzey test ve analiz açısından olumsuz sonuç verecektir.)

Kalibrasyon için eksenel köprü kalibrasyon prosedürleri için yükleme konfigürasyonu Şekil 4.3.'de gösterilmektedir. Eksenel köprü Instron 8801 üzerinde kalibre edilip, kalibrasyon yükü maksimum test yükünün %80'i olarak düzenlenmiştir. Eksenel köprü hem çekme hem de basma yüklemesinde kalibre edilmektedir.



Şekil 4.3. Eksenel kalibrasyon

4.5.Yükler ve Sınır Koşulları

Bu testte test düzeneği, kenet halkaları sabitken adım bağlantısı merkez hattı eksen boyunca eksenel yüklemeye tabi tutulmaktadır. İki numune seti için aynı sınır koşulları uygulanmıştır. Bu test için analizlerde ve kuyruk rotorlarında kullanılan hatve bağlantı parçasının yorulma mukavemetini göstermek için yüksek çevrimli yorulma yükleri seçilmiştir. Test sırasında analizlerde kullanılan boylardan farklı olarak parçanın emniyetli alanda sürtünme yorulma testleri için maksimum boylarına getirilerek testler gerçekleştirilmiştir.

Test sırasında kenet halkalarının z eksenine aynı hizada kalması gerekir.

3 numune setinin test edilmesi için gerekli yük Çizelge 4.3.'te verilmiştir ve yük süresi kayıtları aşağıdaki Şekil 4.4.'de gösterilmektedir. Üçüncü test numunesi için yükleme koşulu 10500 N salınımlı yükleme olacak, birinci ve ikinci test numuneleri ise 14200 N salınımlı yüklemeye maruz kalmıştır. Ayrıca tüm yüklemeler R of -1 yükleme koşulu altında gerçekleştirilmiştir. Testler, numune yapısal arızasına karşılıncaya veya minimum 2E+06 çevrime ulaşana kadar devam etmiştir.

Ayrıca test ile ilgili numune yaşlandırılmamıştır ve test oda sıcaklığında ($23 \pm 2^\circ\text{C}$), normal nem koşulları altında ($50 \pm 5\text{ RH}$) gerçekleştirilmiştir.

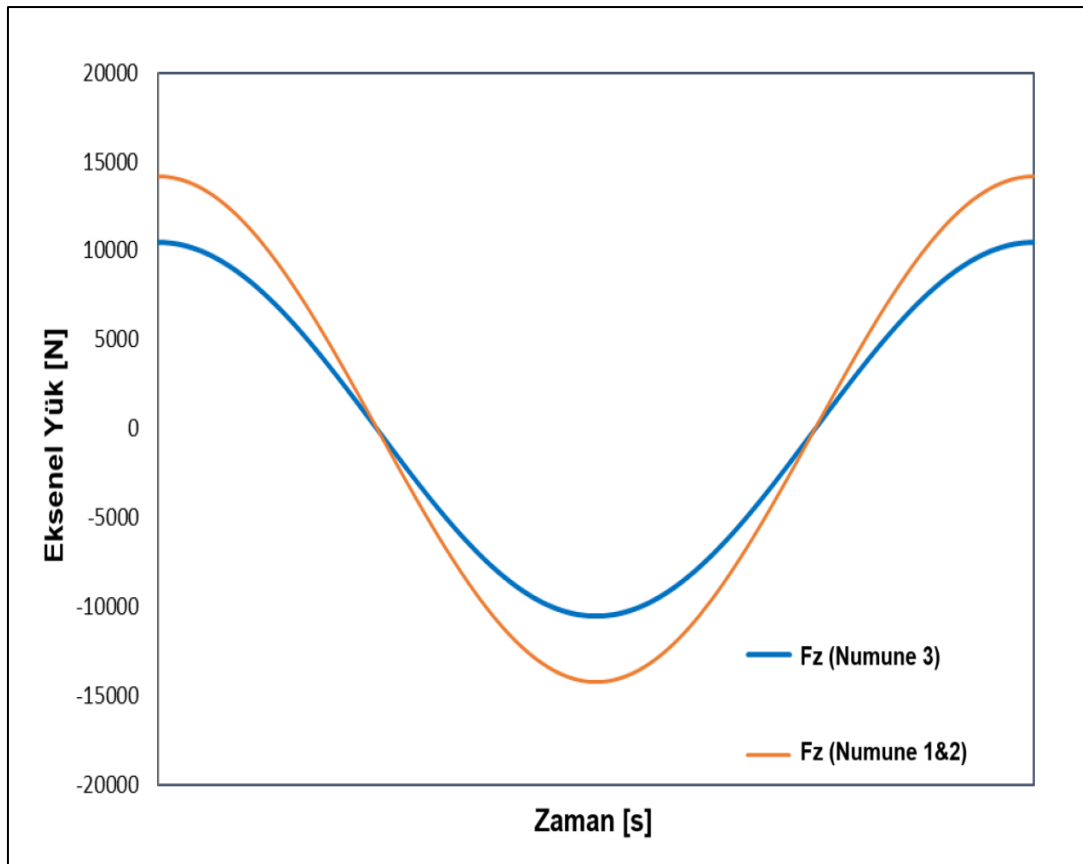
Laboratuvar Şartları:

- Sıcaklık: $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$

- Bağıl nem: $\%50 \pm 5$
- Ön Yükleme: 0

Çizelge 4.3. Test yükleme değerleri

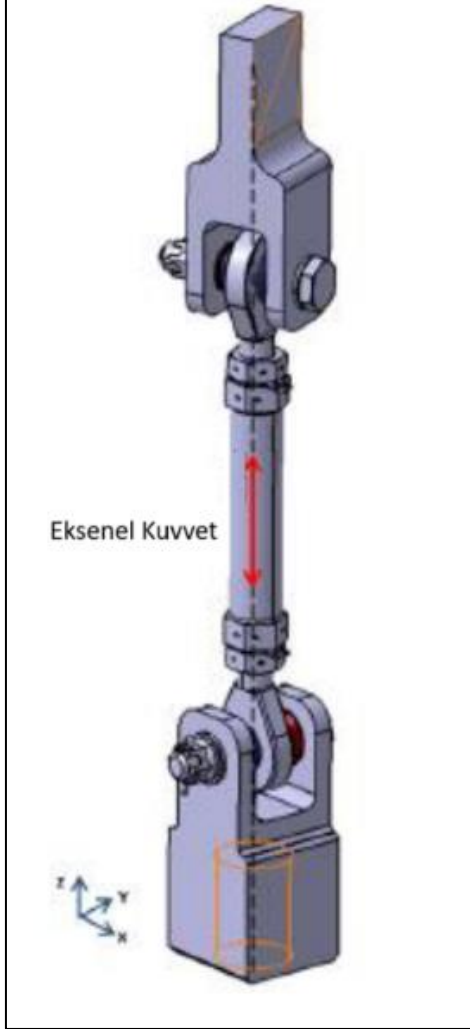
Döngü sayısı	Yük	Yük Açıklaması	Numune	Ortalama	Salınım	Yük Yörüngesi
2E+06 (Minimum)	Fz	Eksenel Kuvvet	Numune 1 & Numune 2	0	14200	-14200 N ↔ 14200 N
			Numune 3	0	10500	-10500 N ↔ 10500 N



Şekil 4.4. Yükleme süresi sonuçları

Şekil 4.4.'de gösterildiği gibi test tertibatı, yorulma testi kenet halkalarından biri tüm serbestlik derecelerinde sabitlenirken z eksenı boyunca hatve bağlantısı merkez çizgisi ile hizalanmış eksenel yüke tabi tutulacaktır. Üç numune seti için aynı sınır koşulları uygulanmıştır.

Test sırasında yorulma testi kenet halkası yük uygulama eksenini (z eksenini) ile aynı hizaya kalmıştır.



Şekil 4.5. Parça yüklenmesi

4.6. Parça Yüklemeleri ve Ömür Bilgileri

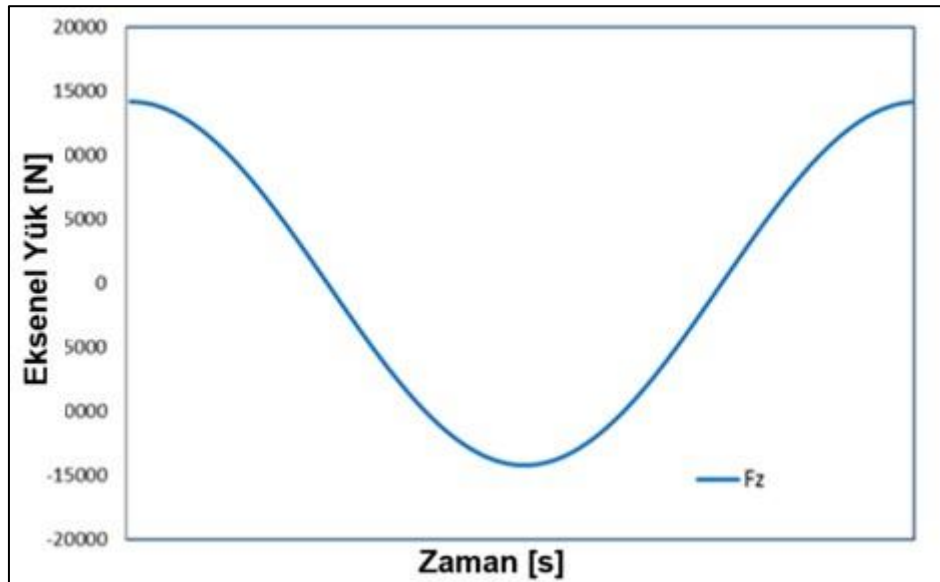
İlk test numunesi için yüksek çevrim yorulma testi, kuyruk rotor hatve bağlantısının 139 141 çevrime kadar 14,2 kN salınımlı eksenel yüklemeye maruz bırakılmasıyla gerçekleştirildi. Burada çevrimin arızanın 5 Hz yükleme frekansı ve termokupl sıcaklığı altında meydana geldiği rapor edildi. HCFT sırasında aralık 23°C-28°C arasında tutuldu. Tamamen tersine çevrilmiş yükleme değeri ($R=-1$), LL2 [4] yük spektrumu göz önüne alınarak ve ayrıca durumda çubuk ucu için yükseltilmiş sürtünme kayması dikkate alınarak konservatif olarak

seçilmiştir ($R=1$). Azalmış bir sürtünme yorulma mukavemetinde konservatif olarak sonuçlanmaktadır.

Yüklemeye tanımı ve sırası Çizelge 4.4. ve Şekil 4.6.'da görülebilir.

Çizelge 4.4. Numune 1 için hcf yüklemeye tanımı

Döngü Sayısı	HCF Aşaması	Yüklemeye	Yük Tanımı	Ortalama	Salınım	Yük Yolu
139 141	HCFT-1	F_z	Eksenel Yüklemeye	0	14200	-14200 ↔ 14200



Şekil 4.6. Numune 1 için eksenel yüklemeye

İkinci yüklemeye, birinci yüklemeye ile tamamen aynı koşullarda ve aynı yüklerde uygulanmıştır. Parça 188 033 döngü sayısında kırılmıştır.

3. yüklemeye, birinci yüklemeye ile aynı yüklemeye frekansında uygulanmıştır. Yüklemeler 2 000 000 döngü sayısı için 10500 salınım ile daha sonra 3 000 000 12000 ve 14200 salınım ile ve en son olarak 17500 salınım ile 1 483 265 döngü sayısına ulaşarak toplam 9 483 265 döngü sayısında sonuçlanmıştır.

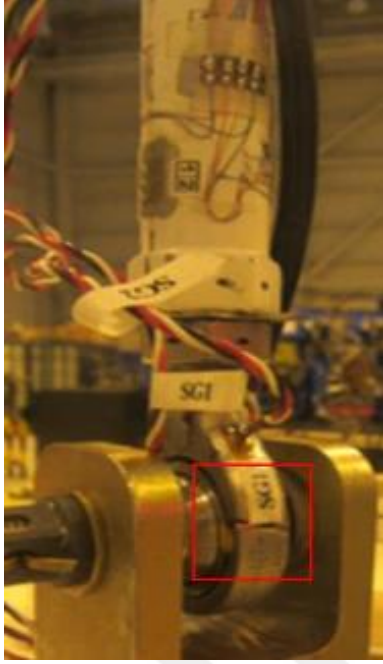
4.7. Test Sonuçları ve Test İncelemesi

Numune 1 arızası, kuyruk rotoru hatve bağlantı sağ dişli çubuk ucunda 139 141 devirlerinde bildirilmiştir, Testin diğer kısımları için HCFT sırasında herhangi bir arıza veya anomali belirtisi gözlenmemiştir. Resim 4.3’de görülebileceği gibi çatlak yayılma yönü yükleme yönünün dik yönünde meydana gelmiştir. Ayrıca şekilde görülebileceği gibi alt çubuk ucu sadece gerilim yükü taşımaktadır.



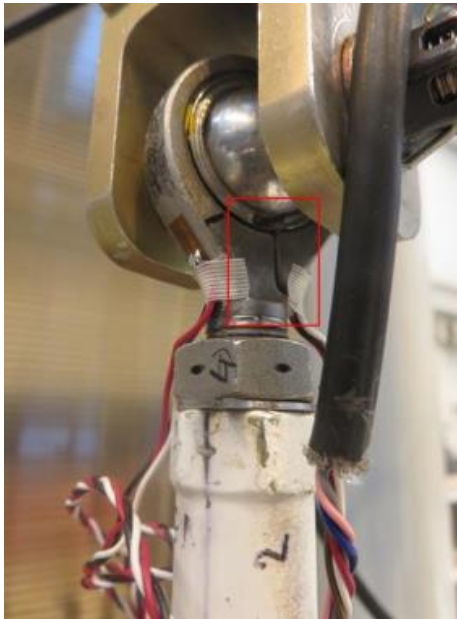
Resim 4.3. Numune 1 çubuk ucu arızası

Numune 2 arızası tamamen aynı şekilde yan bölgeden 188 033 döngü sayısında gerçekleşmiştir. Çatlak yaklaşık olarak 200 000 döngü sayısında gözlemlenmiştir.

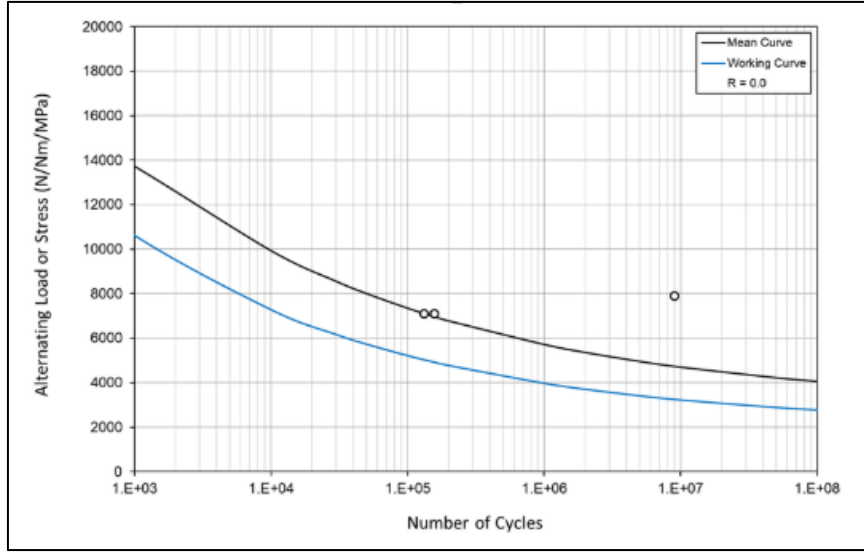


Resim 4.4. Numune 2 çubuk ucu arızası

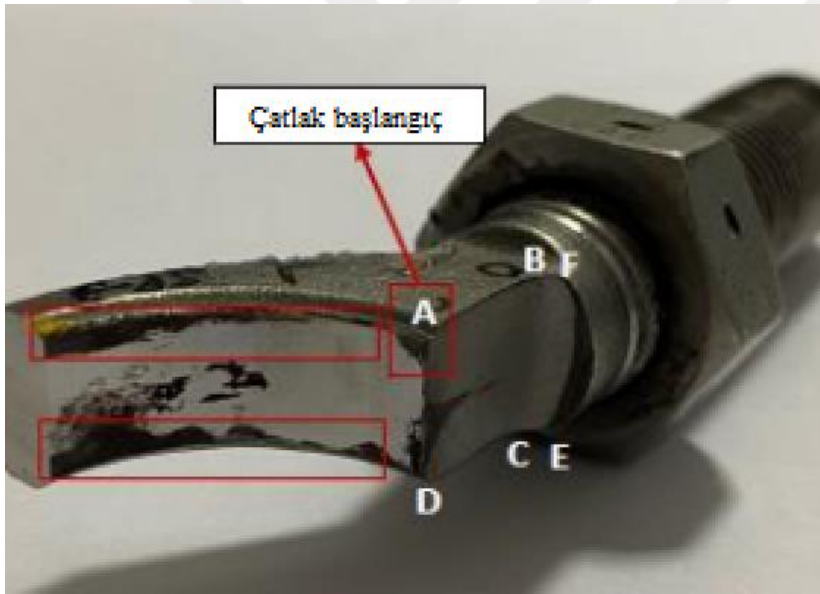
Numune 3 arızası, hatve bağlantı sağ dişli çubuk ucunda 9 483 265 döngülerinde gözlemlenmiştir. Numune 1 ve numune 2’de gözlemlenen arıza modlarının aksine, Numune 3’ün arıza bölgesi, sağ dişli çubuk ucunun kökünde, Resim 4.5’de görülebileceği gibi yaklaşık çift bağlantı eksenini yönünde görülmektedir.



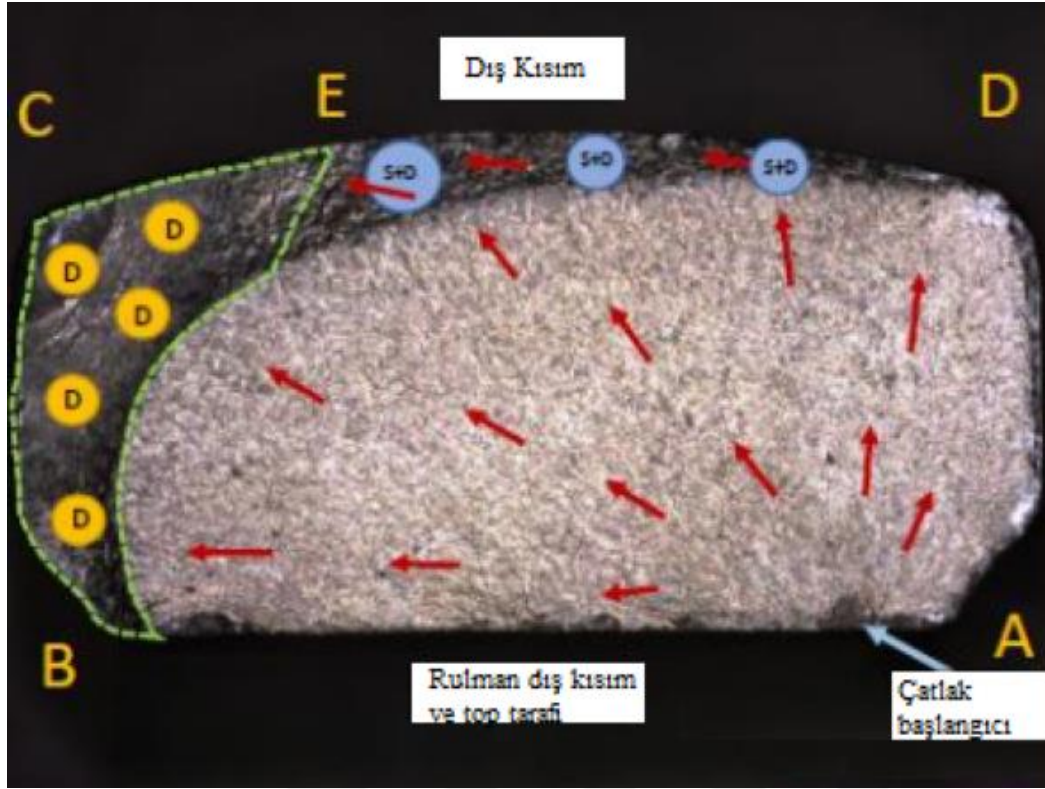
Resim 4.5. Numune 3 çubuk ucu arızası



Şekil 4.7. Numune 3 için s/n Curve eğrisi



Resim 4.6. Numune 3 mikroyapı için parça kesimi



Resim 4.7. Numune 3 mikroyapı incelemesi

Fraktografik analizlere göre üç test örneği kırık yüzeyler için incelenmiştir ve mikroyapı uyumluluğu konusunda anormal bir durum gözlemlenmemiştir. Test numunelerinde gözlemlenen çatlakların, çubuk uç gövdesi ve rulman dış kısım arasındaki temas alanında meydana gelen sürtünme yorulma yorgunluğundan kaynaklandığı bulunmuştur ve güvenli alanda kalmak amacıyla test numunesi analiz numunesine göre daha yüksek yüklere maruz bırakılmaya çalışılmıştır.

Yapılan testler ve S/N Curve eğrileri için herhangi bir ön yükleme uygulanmamıştır. Yapılan testler $R=-1$ yükleme koşulu içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.5. Deney numuneleri ömür sonuçları

Deney Numunesi	Salınım	Döngü Sayısı	Toplam Ömür
Deney Numunesi-1	14200	139141	139141
Deney Numunesi-2	14200	188033	188033
Deney Numunesi-3	10500 12000 14200 17500	2000000 3000000 3000000 1483265	9483265



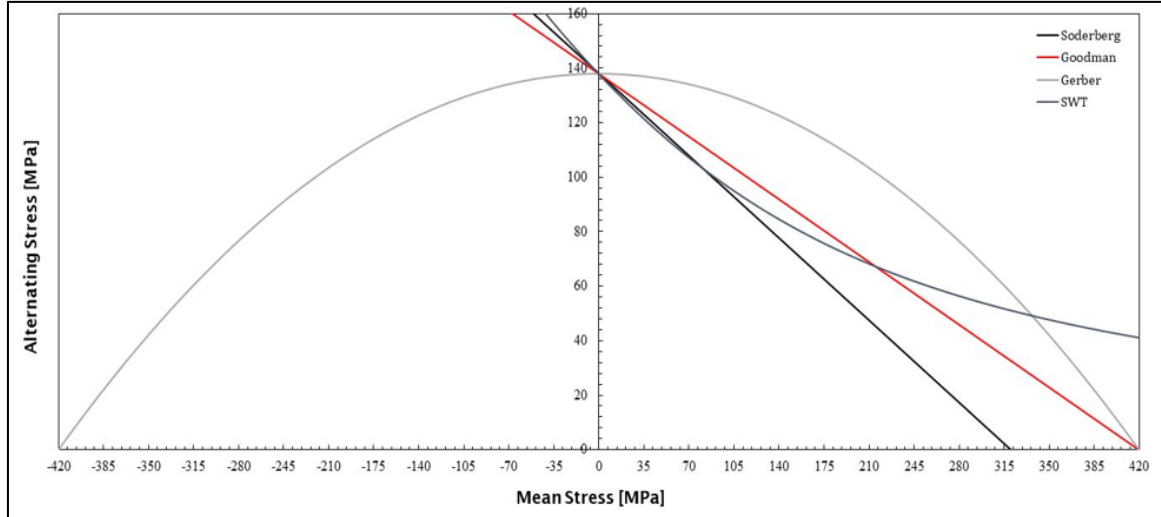
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, tasarımı gerçekleştirilen hücum açısı değiştirici parçası numunelerinin karakteristik özelliklerini elde etmek için yapılan farklı analizlere ait sonuçlar sunulmaktadır. Analizler sonucunda elde edilen değerlerden yola çıkarak parçaların birbiri ile teması sonucu malzemelerin etkisi, sürtünme katsayısının etkisi, montaj hatasında oluşabilecek hatanın analizlere ve parçaya olan etkileri, toleranslar ile yapılan değişikliklerin parçaya olan etkisi gibi özellikler belirlenmiştir. Yapılan analizler ile beraber farklı frekanslardaki parçanın yükleri, kuvvetleri, temas kuvvetleri, yapışma ve kayma özellikleri, temas kuvveti ve yüklenme sonucu parçada olan birim uzunluk deforme olduğu konuları incelenerek kıyaslamalar yapılmıştır.

Analizler için yapılan çalışmalarda Frekans ifadesi $F(t) = F_n + F_z \cdot \sin(\omega t)$ 'dir. Yapılan analiz ve çalışmalarda ön yükleme olmadığı için $F_n = 0$ olarak analizlere uygulanmıştır. Aksyal yük ve zaman grafiğinde gelen analiz ve testlerin, F_z uygulanan yük ile zamana bağlı sinüs formülünün çarpımına analizlerde Frekans olarak bahsedilmiştir.

Yapılan analizler için abaqus'te ve testler için güvenli alanda kalmak amacıyla Soderberg teorisinden yararlanılmaktadır. $S/SI = H + A \cdot (N + C)^B$ formülü olarak sabitleri kabul etmekteyiz.

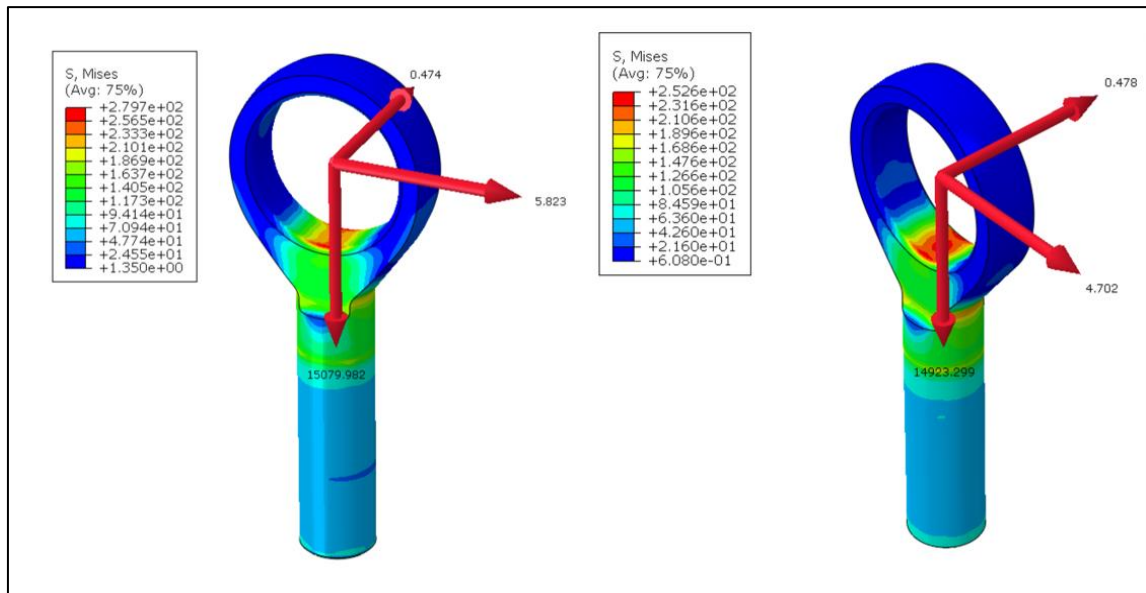
Burada S uygulanan en yüksek stres, SI sonsuzdaki stres seviyesi, H, A, C, B malzeme yapılarından gelen sabitlerdir. Yapılan analizler için de abaqus programında sabit olarak malzeme yapılarından gelen özellikler kullanılmıştır. Uygulanan yükler ± 14200 N olduğu için grafik iki taraflı olup grafiğin dış kısmı parçanın kırılma bölgesi olmaktadır. Dinamik çalışma koşulları sebebiyle güvenli alan yapılan çalışma açısından öncelikli olmuştur.



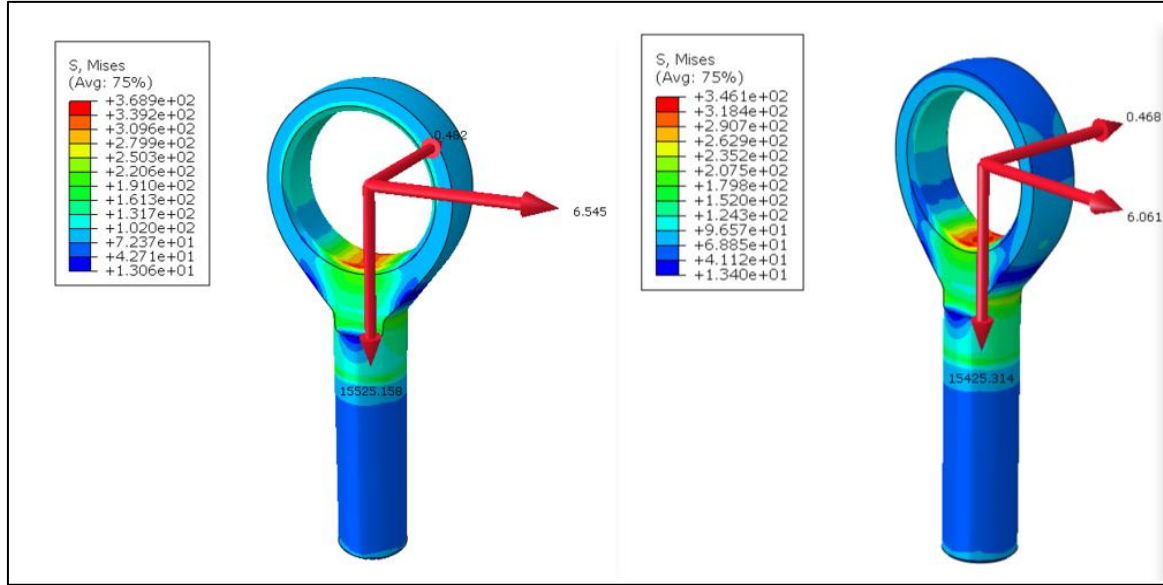
Şekil 5.1. Analiz teoremleri

5.1. Hücum Açısı Değiştirici Parçası Kuvvet Analiz Sonuçları

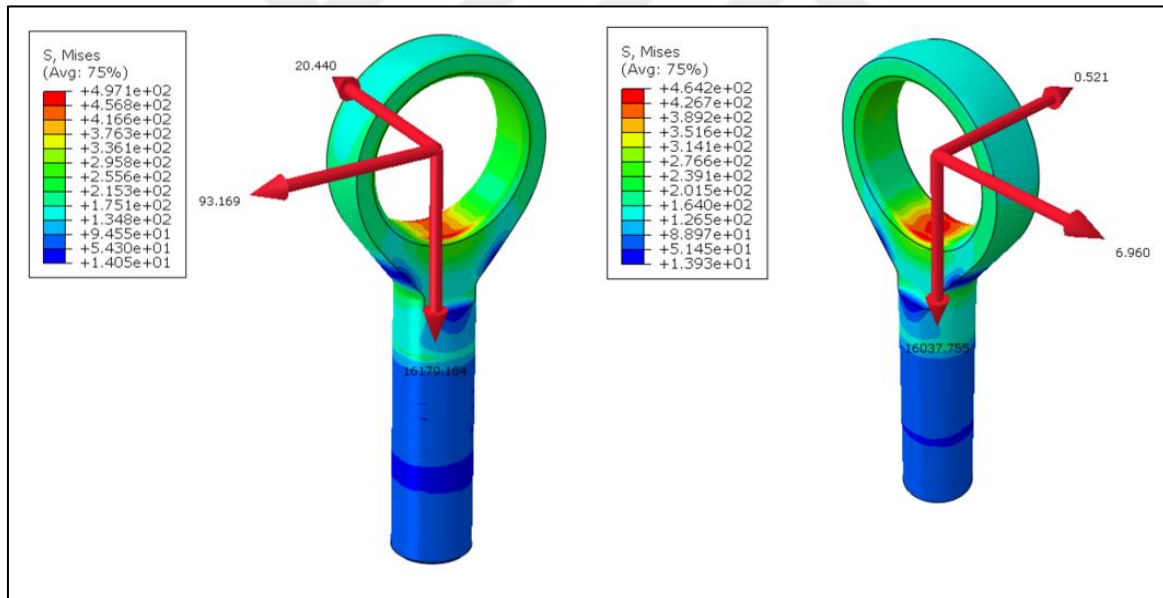
Yapılan çalışma ve incelemelerde hücum açısı değiştirici parçası için çubuk ucu ve küresel rulman dış kısım arasında parçaların etkileşimi incelenmiştir. Çelik ve Alüminyum parçalar için yarıçapta 0, 10 ve 20 mikron sıklık ile beraber çubuk ucuna etkiyen kuvvet sonuçları incelenmiştir.



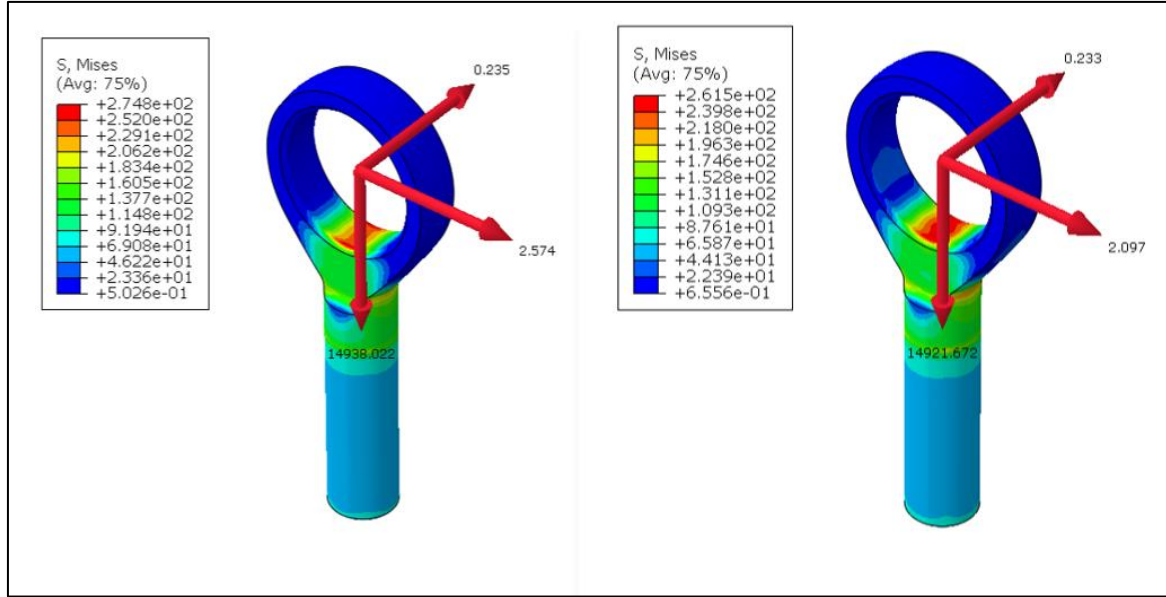
Şekil 5.2. 0,5 frekans, 0,1 sürtünme katsayısı ve 0 sıklık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına etkisi sonucu



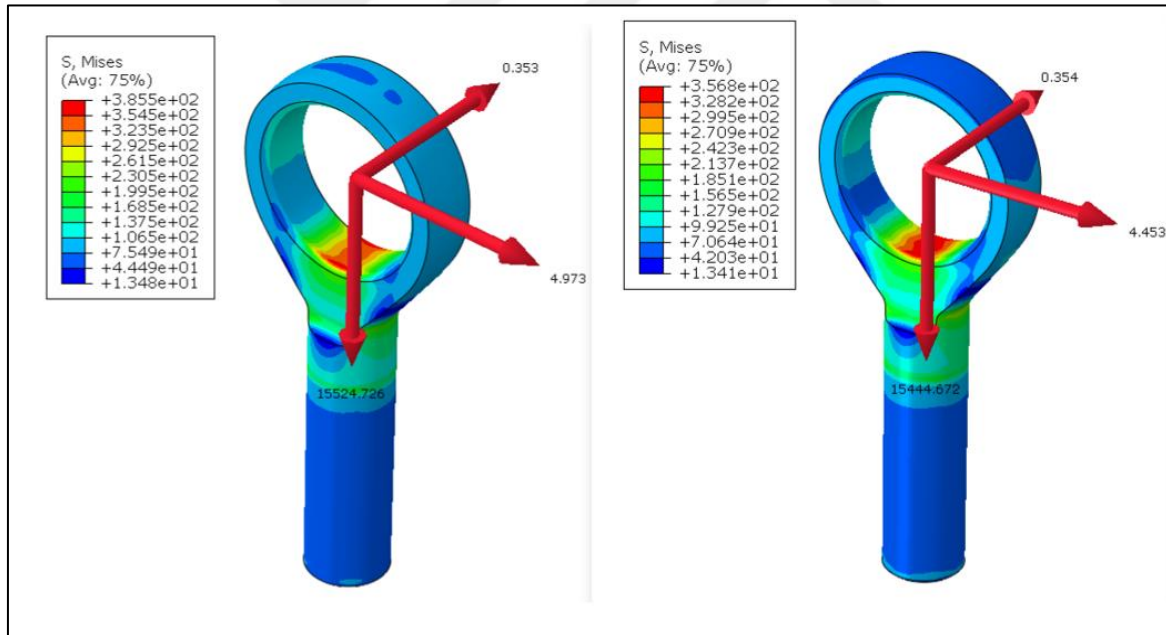
Şekil 5.3. 0,5 frekans, 0,1 sürtünme katsayısı ve 0 sıklık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına etkisi sonucu



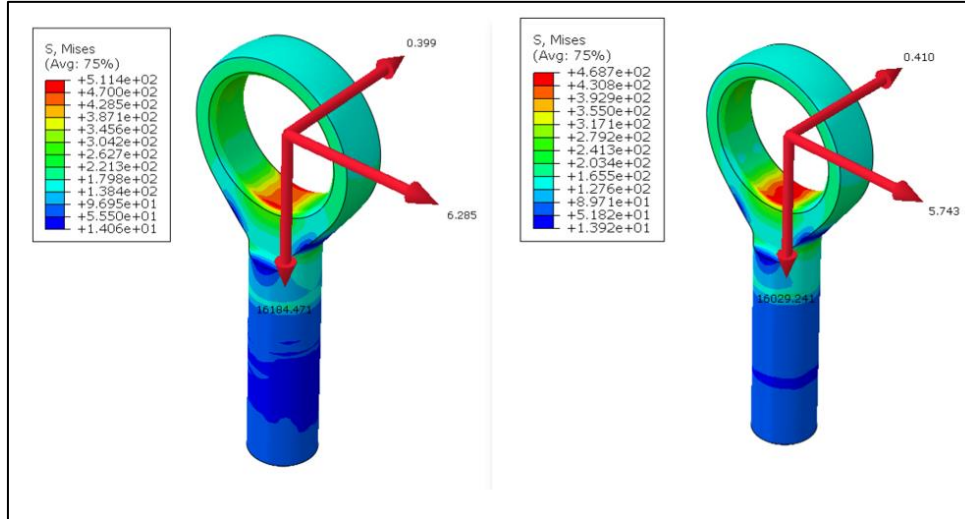
Şekil 5.4. 0,5 frekans, 0,1 sürtünme katsayısı ve 20 sıklık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına etkisi sonucu



Şekil 5.5. 0,5 frekans, 0,01 sürtünme katsayısı ve 0 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına etkisi sonucu



Şekil 5.6. 0,5 frekans, 0,01 sürtünme katsayısı ve 10 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına etkisi sonucu



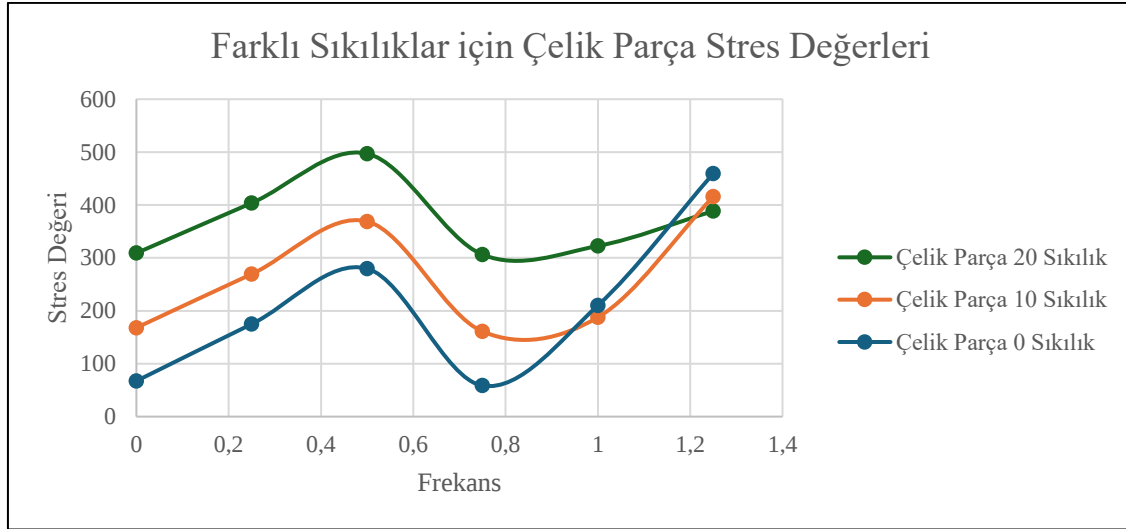
Şekil 5.7. 0,5 frekans, 0,01 sürtünme katsayısı ve 20 sıklılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına etkisi sonucu

Çizelge 5.1. Çelik ve alüminyum için 0,1 sürtünme katsayısında farklı sıklılık kuvvet sonuçları

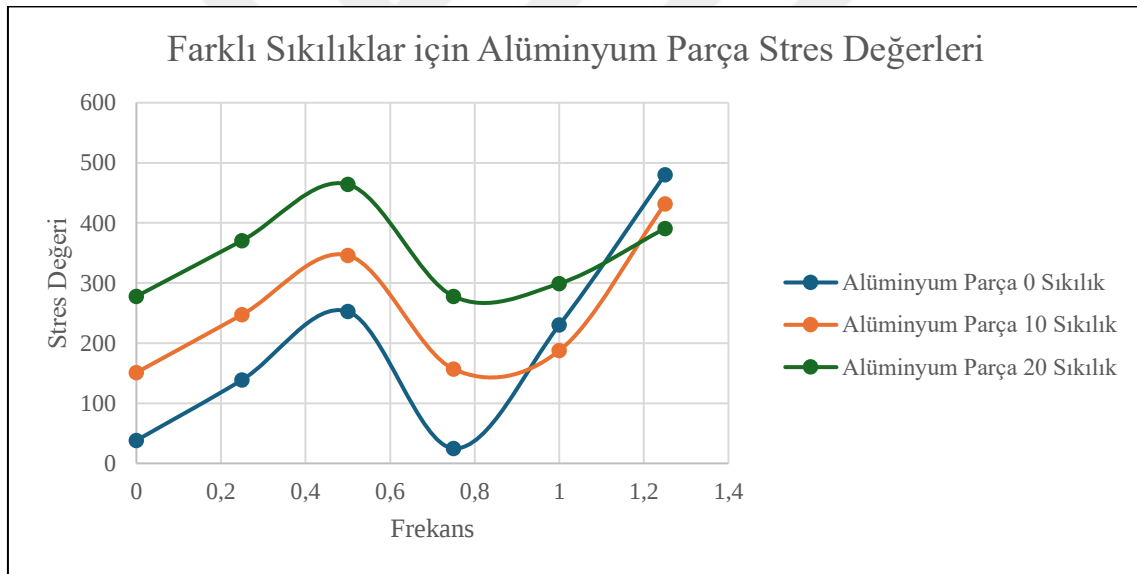
Frekans	0,1 Sürtünme Katsayısı için Çelik			0,1 Sürtünme Katsayısı için Alüminyum		
	0 Sıklılık Çelik	10 Sıklılık Çelik	20 Sıklılık Çelik	0 Sıklılık Alüminyum	10 Sıklılık Alüminyum	20 Sıklılık Alüminyum
0	67,35	168	309,1	38,18	151,1	277,9
0,25	175	269,5	403,8	138,9	247,4	370,6
0,5	279,7	368,9	497,1	252,6	346,1	464,2
0,75	58,54	160,9	306,2	24,93	156,9	277,9
1	210,2	187,7	322,6	230,2	187,5	299,2
1,25	459,5	415,6	388,5	480,3	431,5	390,8

Çizelge 5.2. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıklılık kuvvet sonuçları

Frekans	0,01 Sürtünme Katsayısı için Çelik			0,01 Sürtünme Katsayısı için Alüminyum		
	0 Sıklılık Çelik	10 Sıklılık Çelik	20 Sıklılık Çelik	0 Sıklılık Alüminyum	10 Sıklılık Alüminyum	20 Sıklılık Alüminyum
0	37,45	165,6	301,9	38,4	154,9	277,1
0,25	150	274,8	405,7	144,8	255,5	371,5
0,5	274,8	385,5	511,4	261,5	356,8	468,7
0,75	25,49	161,2	306,5	25,09	151,4	281,4
1	227,8	189,1	325,2	230,3	189,4	302,5
1,25	477,3	417,8	383,3	482,5	430,2	390,7



Şekil 5.8. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıkılık kuvvet sonuçları

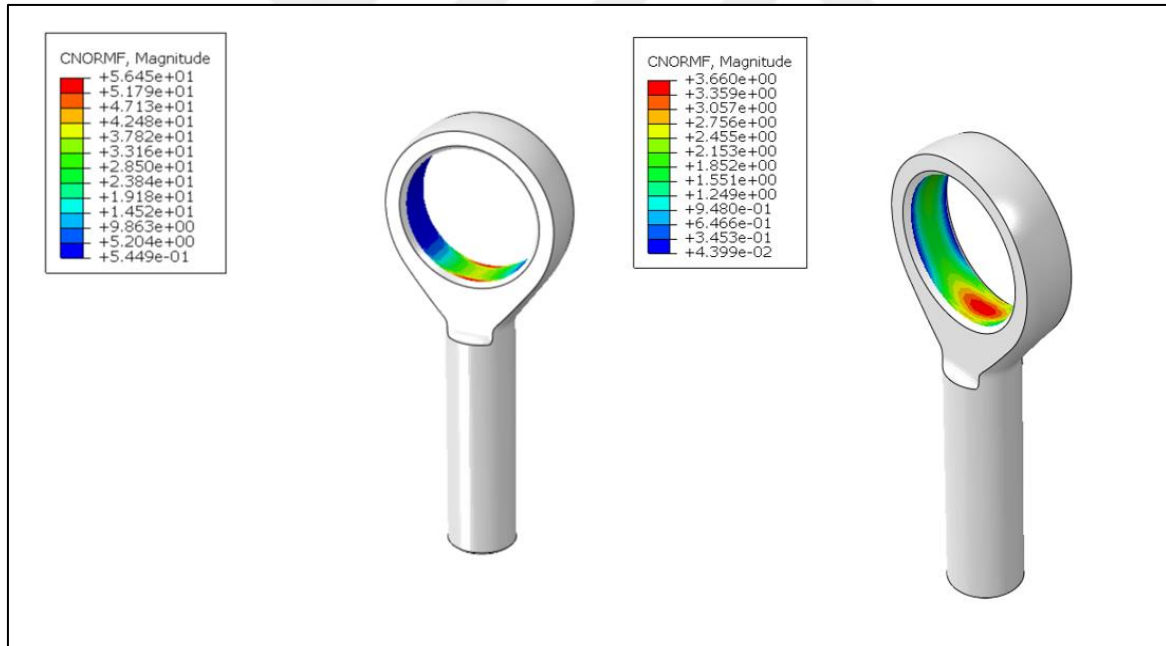


Şekil 5.9. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıkılık kuvvet sonuçları

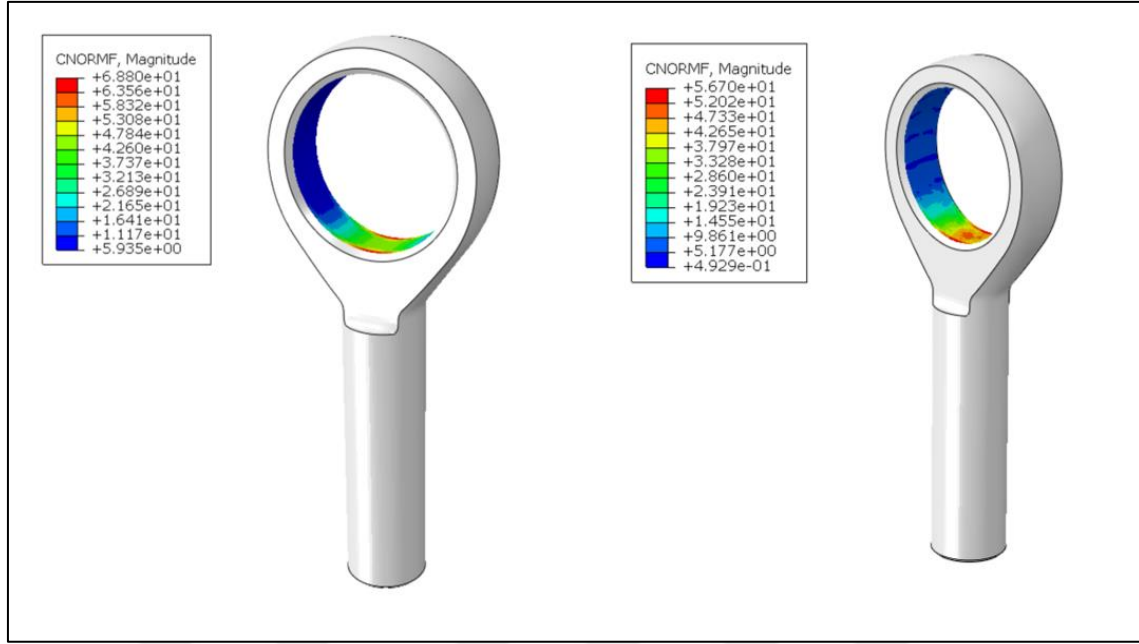
Çizelge ve şekillerden de görülebileceği gibi çubuk ucu parçasına temas eden küresel rulman dış kısım için parçanın alüminyum veya çelik olması çubuk ucu malzemesine uygulanan kuvvet bakımından farklılık göstermektedir. Alüminyum parçası çelik parçasına göre daha az kuvvet uygulamaktadır. Sonlu eleman modellerinde analiz yapılırken oluşan frekanslara göre genel olarak çubuk ucu parçasına uygulanan kuvvetin alüminyum parçada daha az olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısı değerinin değişimi ise çubuk ucu parçasına uygulanan kuvvet bakımından çok büyük bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir.

5.2. Hücüm Açısı Değiştirici Parçası Temas Kuvveti Analiz Sonuçları

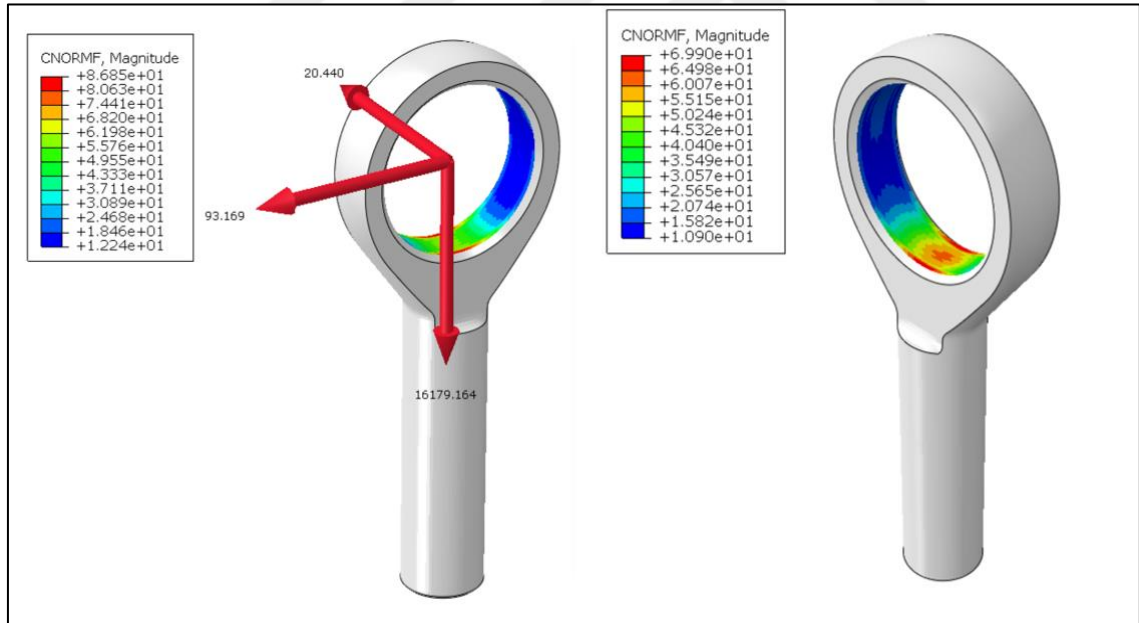
Çalışmanın ana amacı olan çubuk ucu parçasına etkiyen temas kuvveti çelik ve alüminyum parçalar için farklı sıkılık miktarları ile incelenmiştir. Sıkılık miktarının artması ile beraber doğrusal olmayan parçaya etkiyen kuvvetlerin arttığı görülmüştür. Çelik malzemenin çelik malzeme ile teması sonucu çubuk ucu parçasında etkiyen kuvvetin çelik malzemenin alüminyum malzeme teması ile etkiyen kuvvete göre farklı olduğu, temas kuvvetinde malzeme özelliklerinin önemli olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısının, kuvvet analizlerinde olduğu gibi temas kuvveti açısından da yüksek derece de bir fark yaratmadığı, parçalar arasında oluşan kaymayı yenmek için daha fazla kuvvet uygulandığı görülmüştür. Sıkılık miktarının yüksek derece de artması çubuk ucu parçasına doğrusal olmayan bir zarar vereceği ve rulman montajı sırasında rulmana zarar verme durumu oluşabileceği yorumlanmıştır.



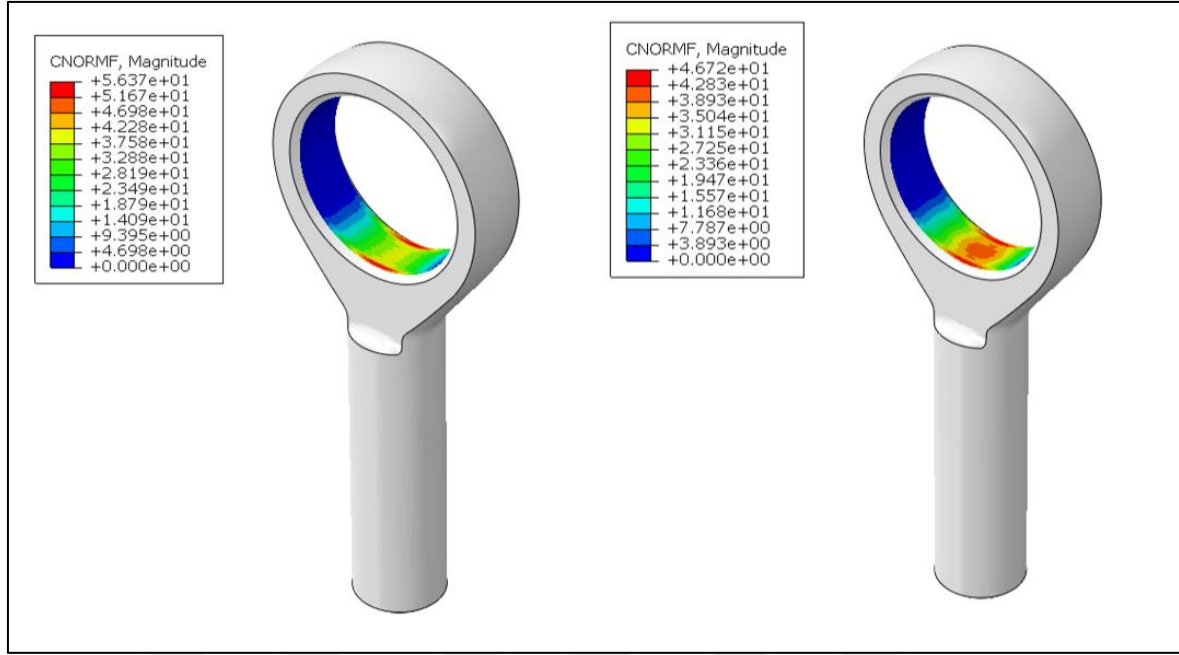
Şekil 5.10. 0,5 frekans, 0,1 sürtünme katsayısı ve 0 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına temas kuvveti etkisi sonucu



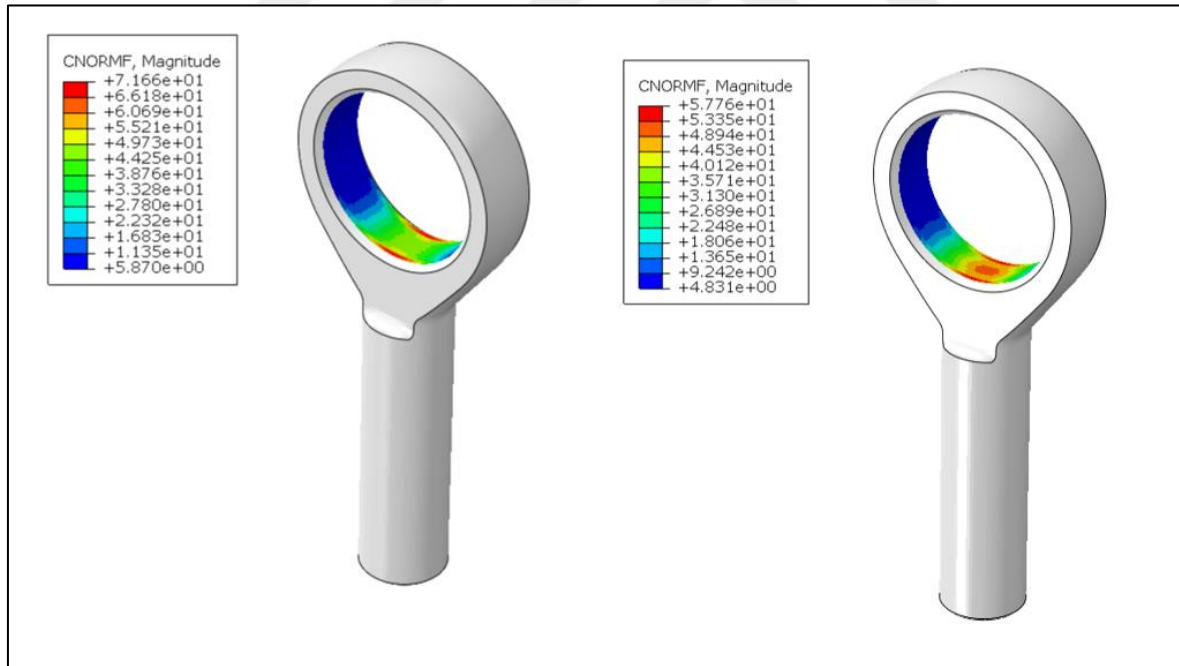
Şekil 5.11. 0,5 frekans, 0,1 sürtünme katsayısı ve 10 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına temas kuvveti etkisi sonucu



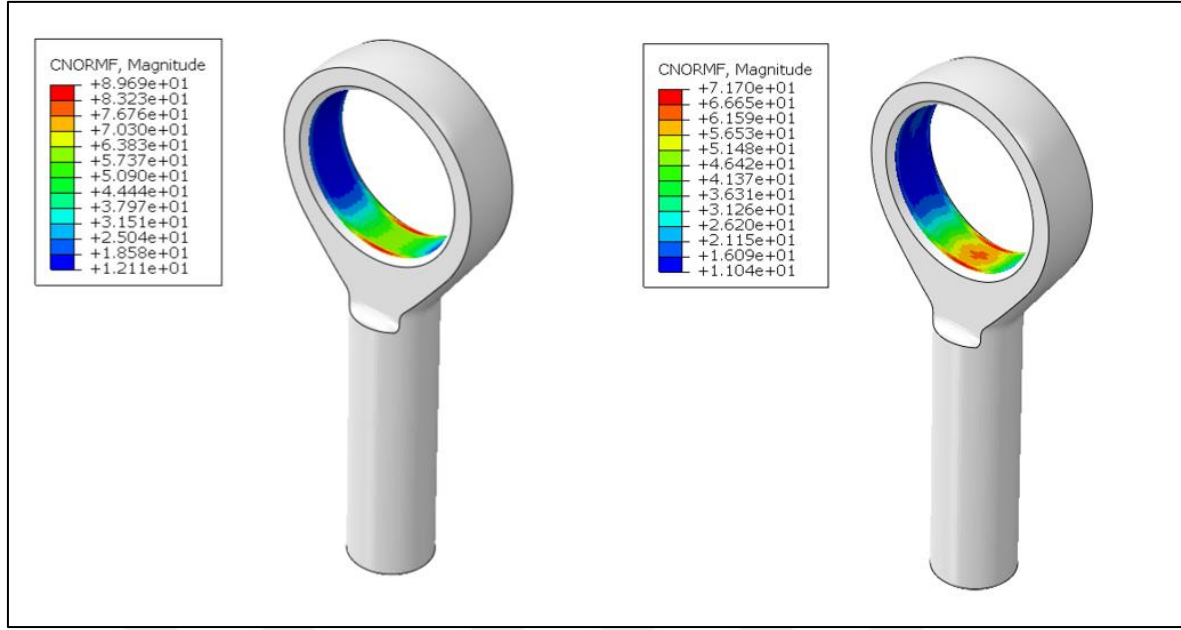
Şekil 5.12. 0,5 frekans, 0,1 sürtünme katsayısı ve 20 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına temas kuvveti etkisi sonucu



Şekil 5.13. 0,5 frekans, 0,01 sürtünme katsayısı ve 0 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına temas kuvveti etkisi sonucu



Şekil 5.14. 0,5 frekans, 0,01 sürtünme katsayısı ve 10 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına temas kuvveti etkisi sonucu



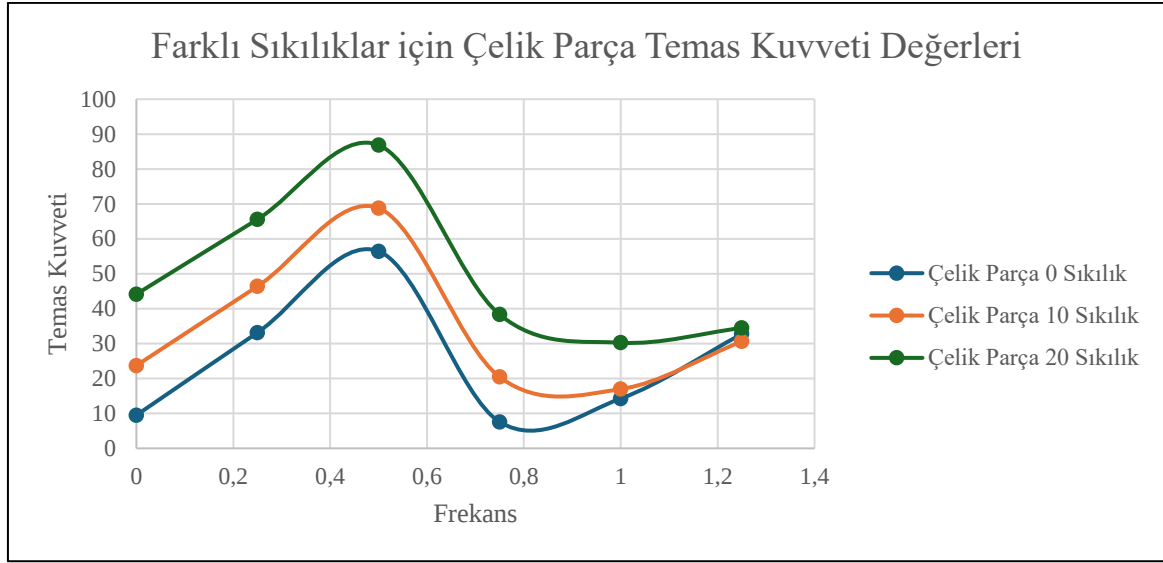
Şekil 5.15. 0,5 frekans, 0,01 sürtünme katsayısı ve 20 sıkılık için çelik ve alüminyum parçanın çubuk ucu parçasına temas kuvveti etkisi sonucu

Çizelge 5.3. Çelik ve alüminyum için 0,1 sürtünme katsayısında farklı sıkılık temas kuvvet, sonuçları

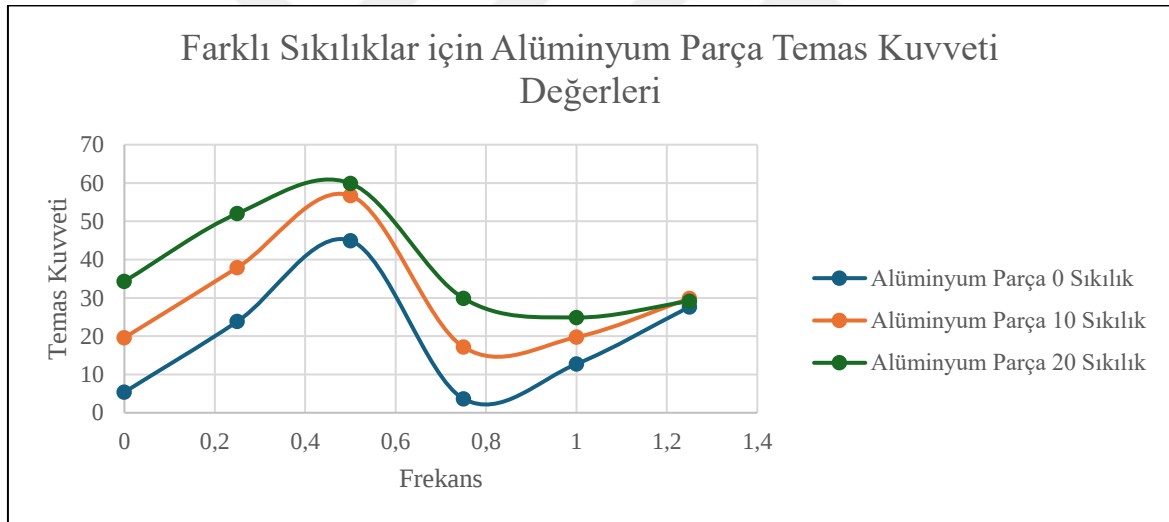
Frekans	0,1 Sürtünme Katsayısı için Çelik			0,1 Sürtünme Katsayısı için Alüminyum		
	0 Sıkılık Çelik	10 Sıkılık Çelik	20 Sıkılık Çelik	0 Sıkılık Alüminyum	10 Sıkılık Alüminyum	20 Sıkılık Alüminyum
0	9,5	23,72	44,17	5,385	19,6	34,33
0,25	33,15	46,4	65,59	23,84	37,91	52,03
0,5	56,45	68,8	86,85	44,95	56,7	69,9
0,75	7,567	20,43	38,31	3,66	17,18	29,9
1	14,27	16,98	30,26	12,73	19,74	24,89
1,25	32,75	30,64	34,48	27,65	29,85	29,14

Çizelge 5.4. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıkılık temas kuvveti sonuçları

Frekans	0,01 Sürtünme Katsayısı için Çelik			0,01 Sürtünme Katsayısı için Alüminyum		
	0 Sıkılık Çelik	10 Sıkılık Çelik	20 Sıkılık Çelik	0 Sıkılık Alüminyum	10 Sıkılık Alüminyum	20 Sıkılık Alüminyum
0	5,401	23,72	43,77	5,371	18,81	34,19
0,25	29,87	47,62	66,65	24,63	38,21	52,86
0,5	56,37	71,66	89,69	46,72	57,76	71,7
0,75	3,608	20,17	37,51	3,582	16,06	29,48
1	15,63	17,57	31,26	13,15	14,92	25,57
1,25	34,25	31,65	36,09	28,53	27,15	30,56



Şekil 5.16. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıklık temas kuvveti sonuçları



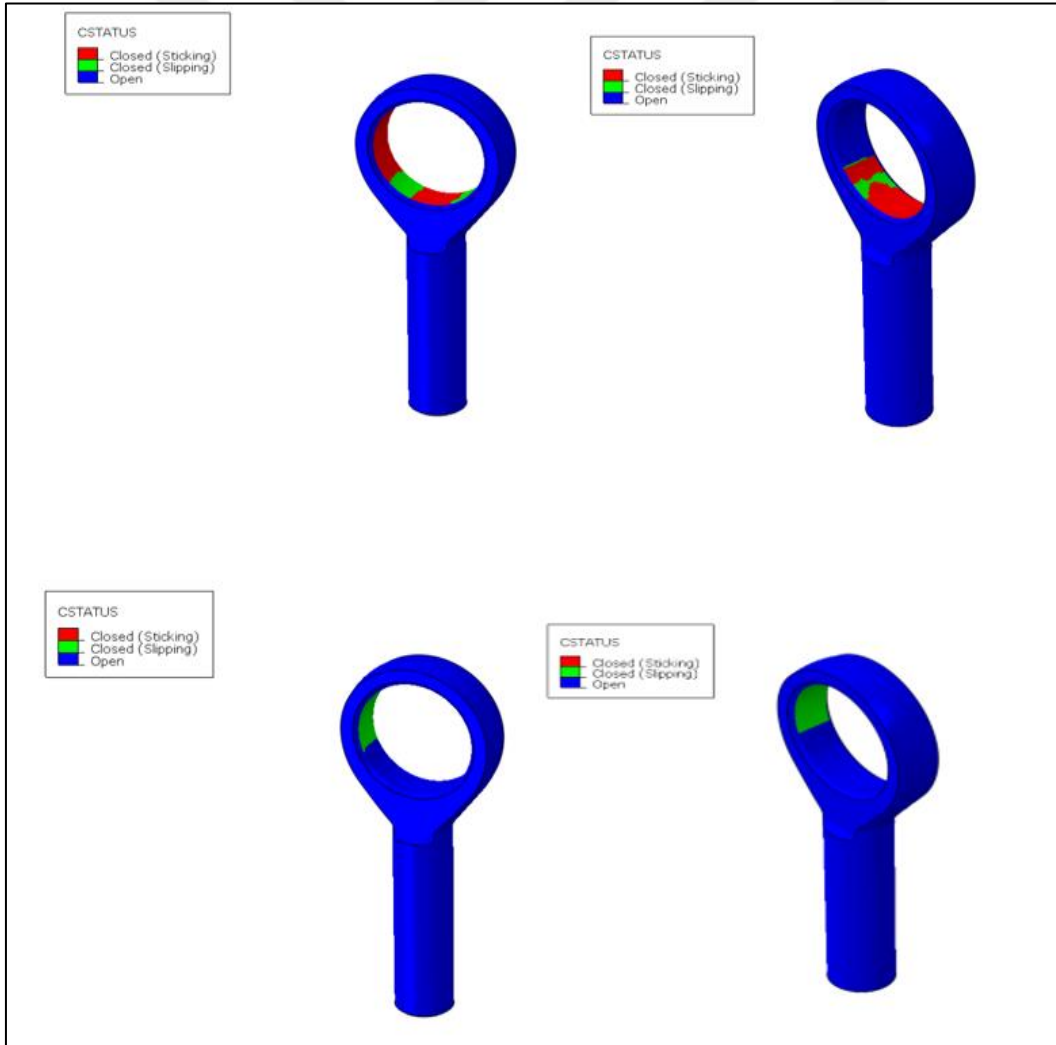
Şekil 5.17. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıklık temas kuvveti sonuçları

Temas kuvveti sonuçları kuvvet sonuçlarına göre daha doğru ve kesin olduğu Çizelge 5.3. ve Çizelge 5.4.'teki temas kuvveti değerlerinden gözükmektedir. Sıklık miktarının artması ile beraber Alüminyum ve Çelik çubuk ucu parçalarında temas kuvvetinin katlanarak arttığı, alüminyum malzemenin çelik malzemeye, çelik-çelik malzeme temasına göre daha az kuvvet uyguladığı, sürtünme katsayısı artışının temas kuvveti açısından parçaya olumlu bir sonuç oluşturmadığı görülmektedir. Buradaki sürtünme katsayısı oldukça düşük bir katsayı ile karşılandığı için bu yüzeyler arasındaki kaymayı yenmek için daha fazla kuvvet uygulamak zorunda kalmaktadır. Bu sonuç bize parça üretiminde sürtünme katsayısı

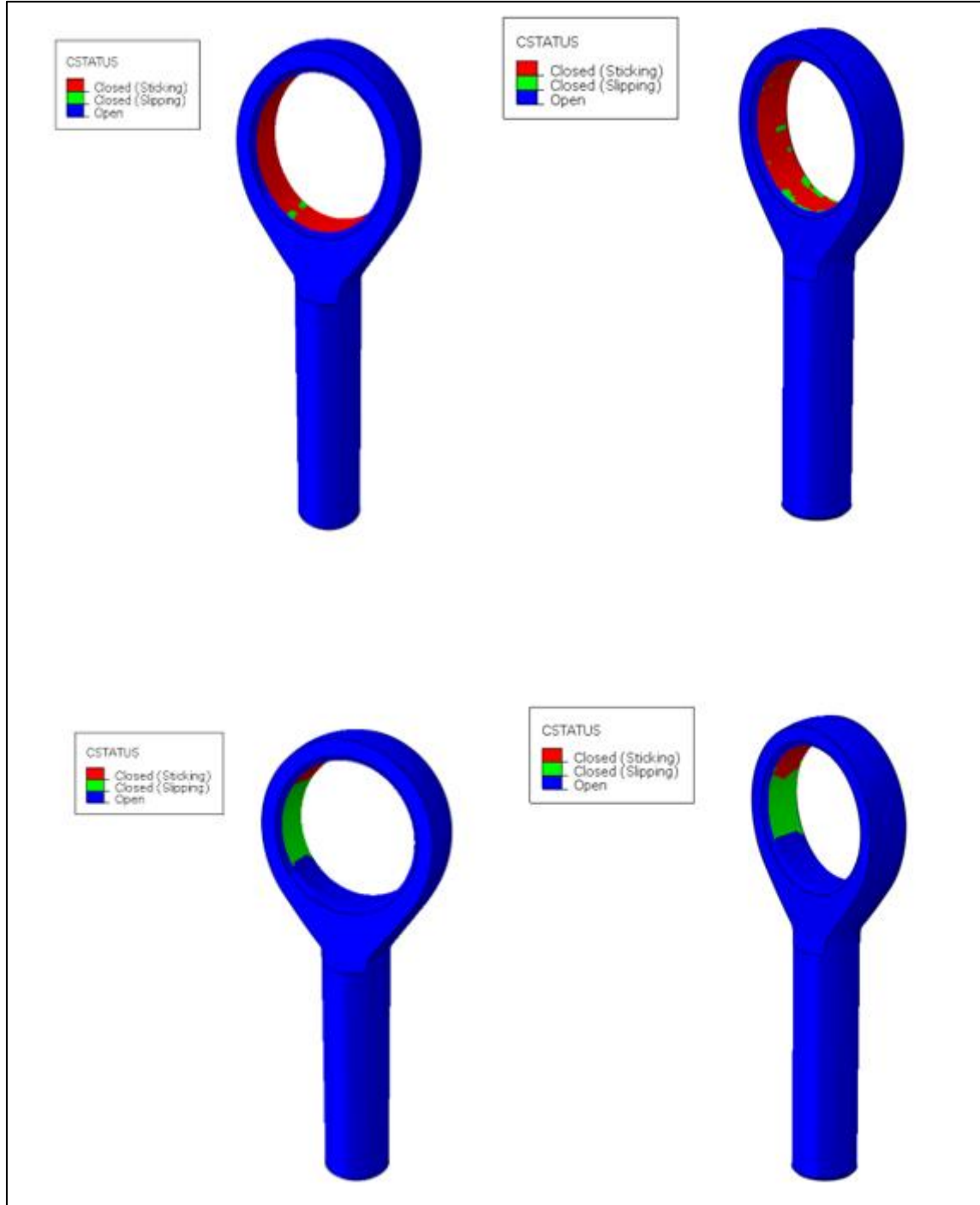
değerinin iyi bir sonuç çıkardığı fakat çok fazla hassas yüzeyin parçalar arasında sorun oluşturabileceğini göstermiştir.

5.3. Hücum Açısı Değiştirici Parçası Yapışma ve Kayma Analiz Sonuçları

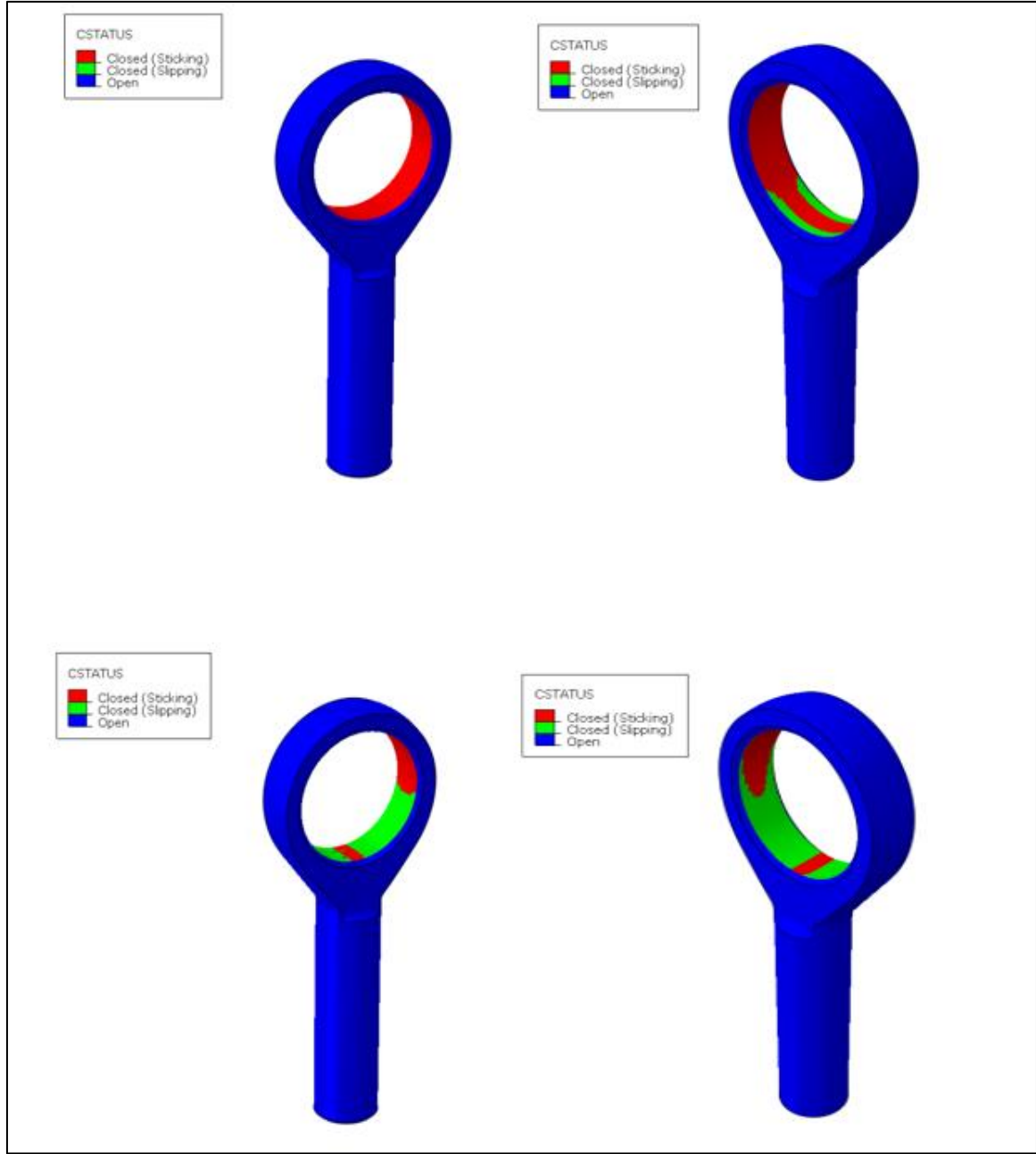
Temas kuvvetinin farklı sıklıklara göre değişmesi ile beraber küresel rulman dış kısım ile çubuk ucu parçası arasında kayma ve yapışma özellikleri de değişmektedir. Parçaların etkileşimi ve analizler sırasında çubuk ucu parçasının belirli bölümlerinde kayma miktarı artarken, belirli yerlerinde parçaların etkileşimi sonucu yapışma sonuçları görülmektedir. Temas kuvveti ve parçaların birbiri ile etkileşimi sonucu malzemelerin, sıklıkların ve analizlerin parçalara yapışma ve kayma etkisi incelenmiştir.



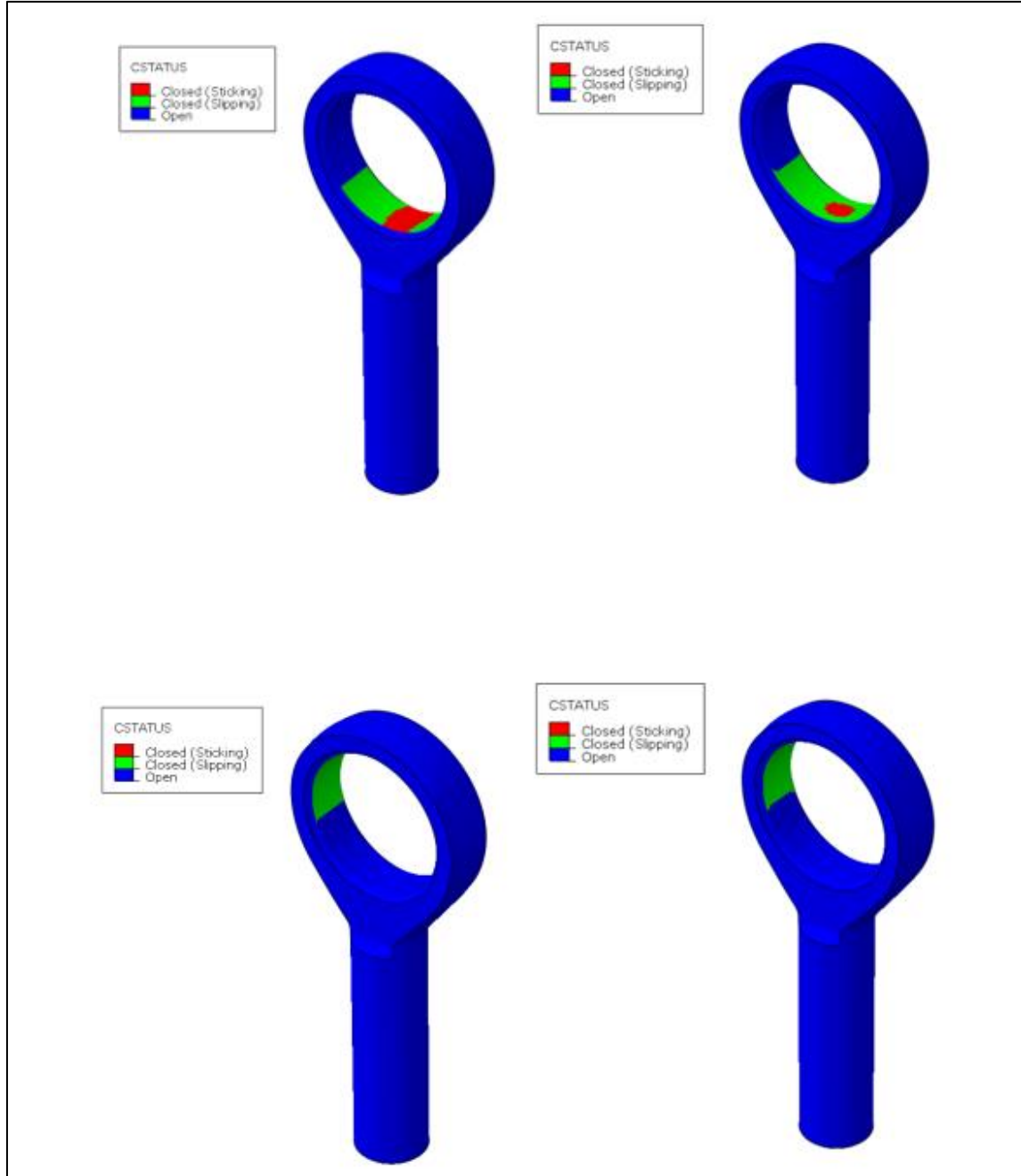
Şekil 5.18. 0,5 ve 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 0 sıklık için kayma ve yapışma sonuçları



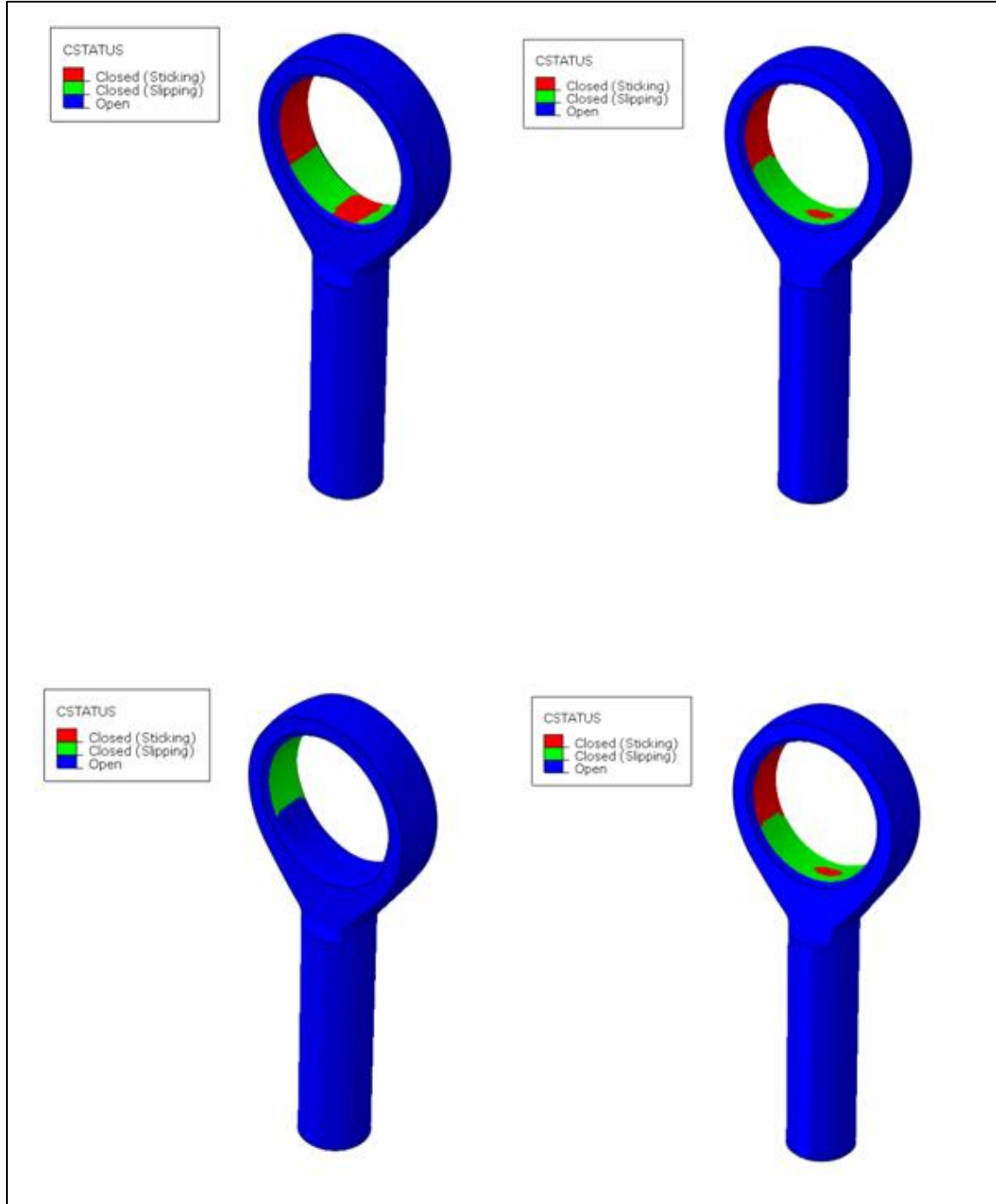
Şekil 5.19. 0,5 ve 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 10 sıkılık için kayma ve yapışma sonuçları



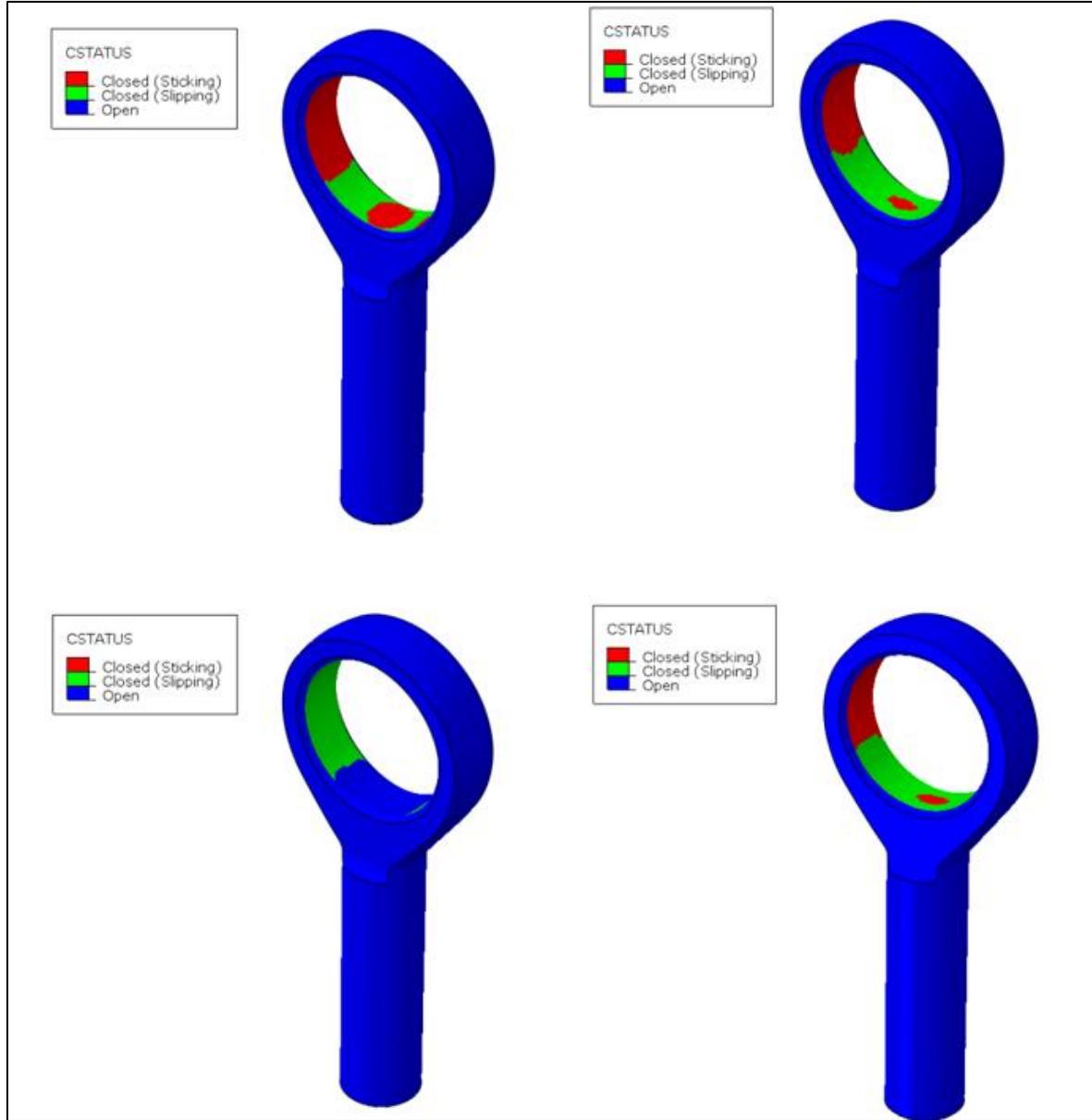
Şekil 5.20. 0,5 ve 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 20 sıkılık için kayma ve yapışma sonuçları



Şekil 5.21. 0,5 ve 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 0 sıkılık ve 0,01 sürtünme katsayısı için kayma ve yapışma sonuçları



Şekil 5.22. 0,5 ve 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 10 sıkılık ve 0,01 sürtünme katsayısı için kayma ve yapışma sonuçları



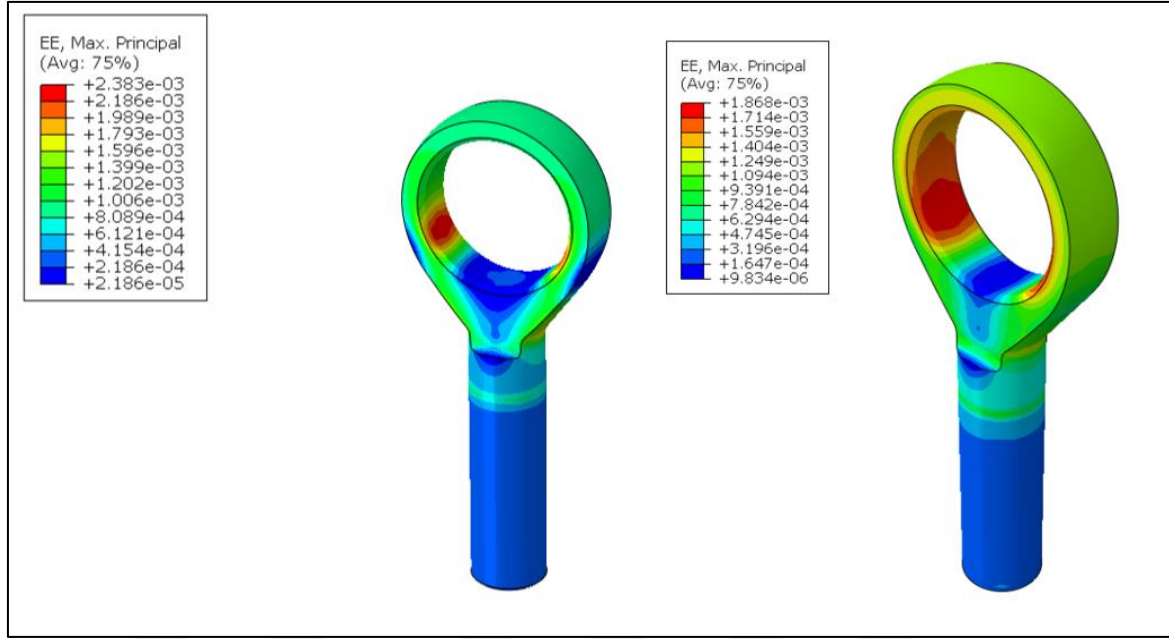
Şekil 5.23. 0,5 ve 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parçaların 20 sıkılık ve 0,01 sürtünme katsayısı için kayma ve yapışma sonuçları

Çalışma içerisinde parçalardan gelen kuvvetlerin minimum ve maksimum olduğu frekanslar için kayma ve yapışma sonuçları incelenmiştir. Şekillerde sırasıyla 0,5 Frekans için Çelik ve Alüminyum daha sonra 1,25 Frekans için Çelik ve Alüminyum parçaları ile etkileşimler gözükmektedir. Parçaların sıkılık miktarının ve malzeme özelliklerinin kayma ve yapışma sonuçları ile doğrudan etkili olduğu şekillerden görülebilmektedir. Sıkılık miktarının artması ile beraber çelik-çelik etkileşimi ve çelik- alüminyum etkileşiminin tümünde yapışma özelliğinin arttığı, kayma özelliklerinin yapışma özelliklerine göre daha az olduğu görülmektedir. Çelik-Alüminyum parça etkileşiminin çelik-çelik parça etkileşimine göre

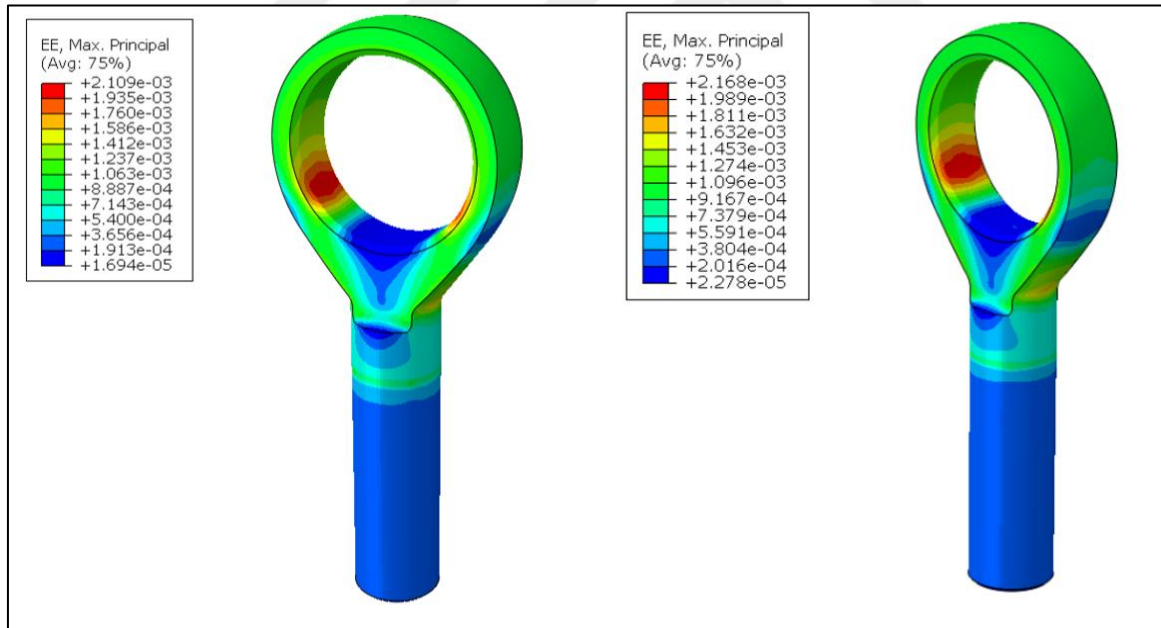
analizin minimum yük olduğu noktalarda yapışmanın daha az olduğu fakat analizin tamamlanması ile beraber yapışmanın çelik-çelik parça etkileşimine göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu gözlem sonucunda analizlerin bitmesi ile beraber çelik ve alüminyum parçanın birbirine temasının oluşan yüklemeler ile beraber çelik-çelik etkileşimine göre çok daha fazla olduğu yorumunu yapabiliriz. Sürtünme katsayısının artmasının ise tüm sıkılık miktarlarında analizin minimum ve maksimum yüklemelerinde parçaların birbirine yapışma özelliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısının parçaları birbiri ile temasında kayma özelliğini arttırdığı gözlemlenmektedir.

5.4. Hücum Açısı Değiştirici Parçası Birim Uzunluk Başına Deforme Sonuçları

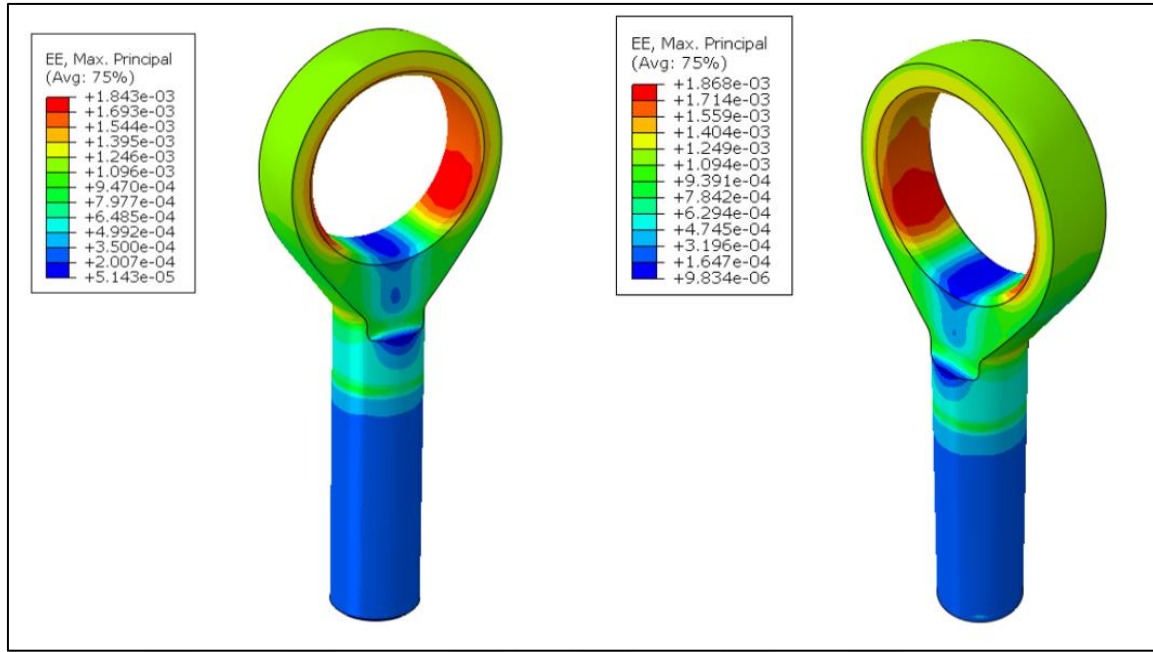
Çalışma sırasında EE (Birim Uzunluk Başına Deforme) analizleri incelenmiştir. Çelik çubuk ucu parçasının çelik ve alüminyum küresel rulman dış kısmı ile temasının farklı sıkılıklar ile parçaya olan etkisi sonuçlandırılmıştır. Sıkılık miktarları, malzeme özellikleri ile beraber sonuçlanan kayma ve yapışma özelliklerinin birim uzunluk başına deforme sonuçlarında etkili olduğu ortaya çıkan sonuçlardan anlaşılmıştır. Yapılan analizlerde çelik ve alüminyum parçaları için analizin tüm adımlarında sıkılık miktarının artması ile beraber birim uzunluk başına deforme sonuçlarının arttığı, sürtünme katsayısının artmasının parçanın kaymaya yönelik karşı bir temas kuvveti oluşturması ile daha da arttığı gözlemlenmektedir. Analizlerin tüm frekans değerlerinin aksine ise analizin sonuç adımında sıkılık miktarının artmasının birim uzunluk başına deforme sonuçlarında çelik ve alüminyum parçasının etkisi ile birim uzunluk başına deforme sonuçlarında azalma olduğu görülmektedir. Analiz için son frekans değerleri için birim uzunluk başına deforme sonuçları Şekillerde görülmektedir. Şekiller sırası ile çelik- çelik etkileşimi ve çelik-alüminyum etkileşimi için verilmiştir.



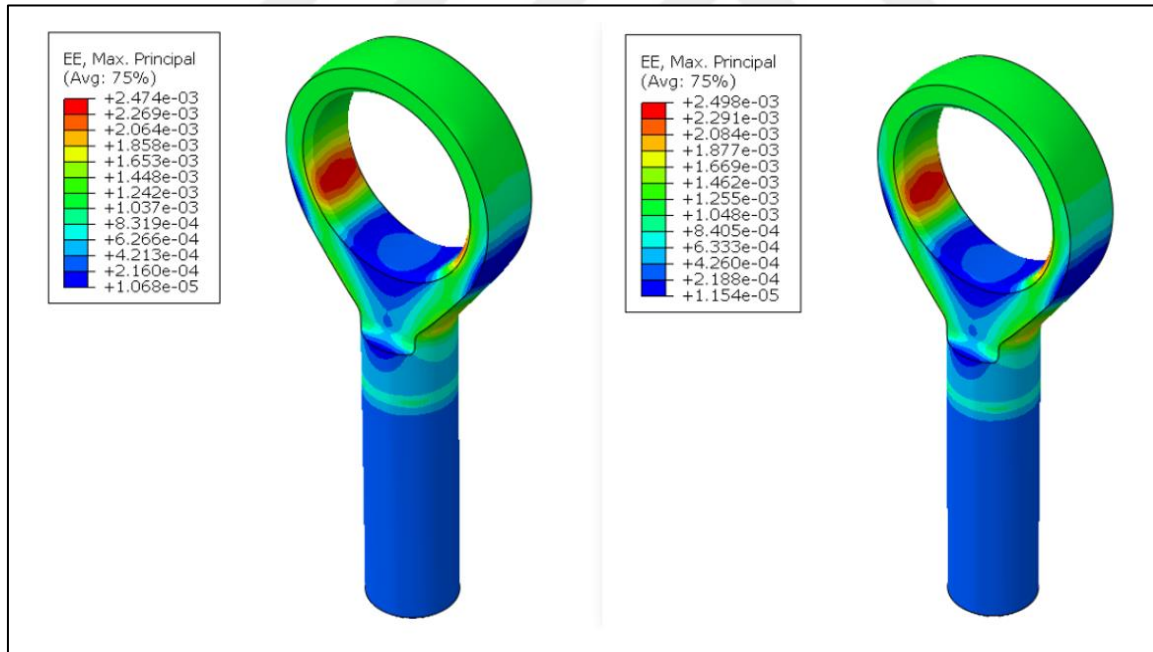
Şekil 5.24. 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 0 sıkılık ve 0,1 sürtünme katsayısı için birim uzunluk başına deforme sonuçları



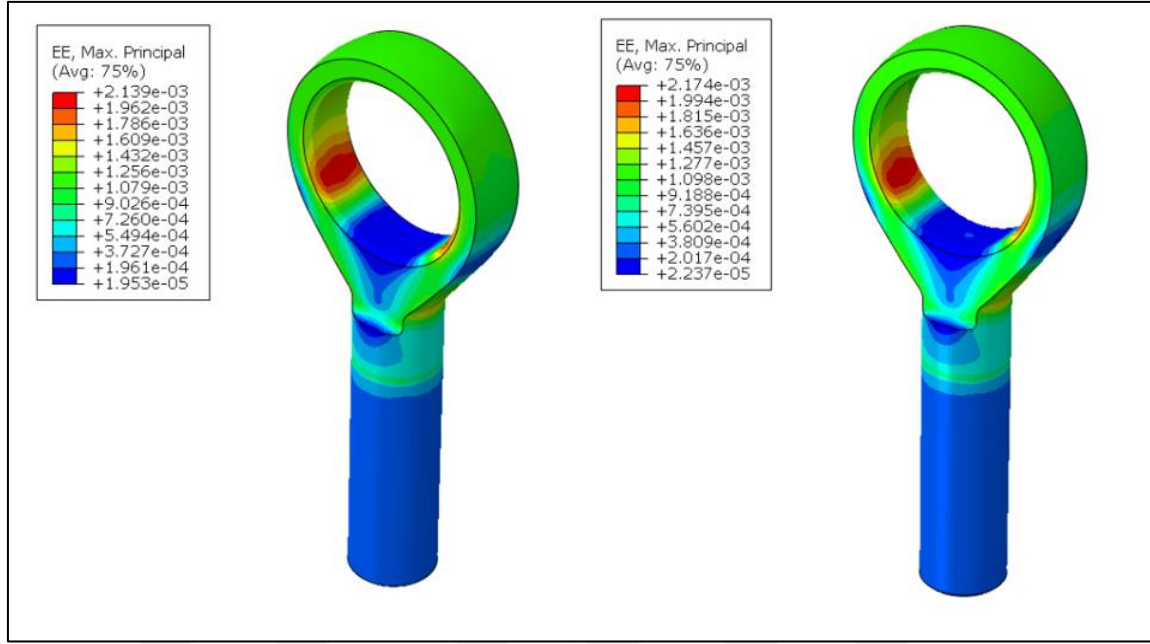
Şekil 5.25. 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 10 sıkılık ve 0,1 sürtünme katsayısı için birim uzunluk başına deforme sonuçları



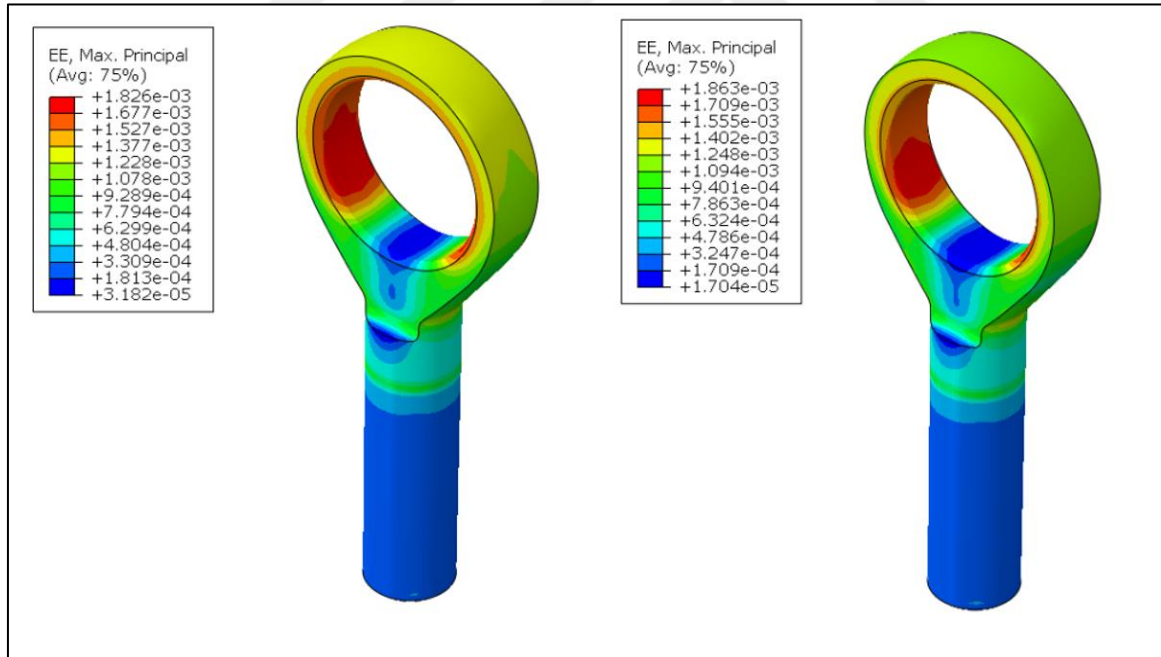
Şekil 5.26. 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 20 sıkılık ve 0,1 sürtünme katsayısı için birim uzunluk başına deforme sonuçları



Şekil 5.27. 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 0 sıkılık ve 0,01 sürtünme katsayısı için birim uzunluk başına deforme sonuçları



Şekil 5.28. 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 10 sıkılık ve 0,01 sürtünme katsayısı için birim uzunluk başına deforme sonuçları



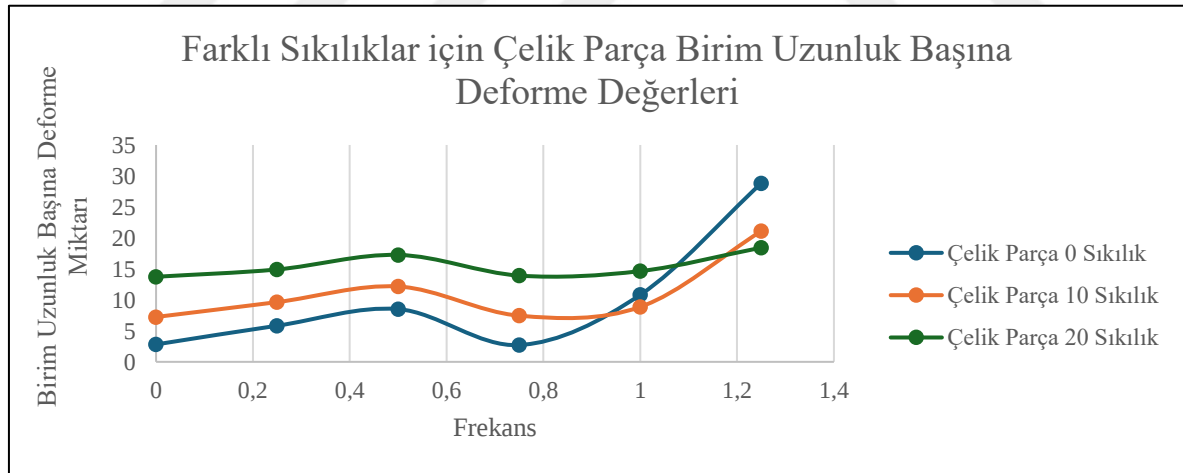
Şekil 5.29. 1,25 frekans için çelik ve alüminyum parça 20 sıkılık ve 0,01 sürtünme katsayısı için birim uzunluk başına deforme sonuçları

Çizelge 5.5. Çelik ve alüminyum için 0,1 sürtünme katsayılarında farklı sıklık miktarlarına göre birim uzunluk başına deforme sonuçları

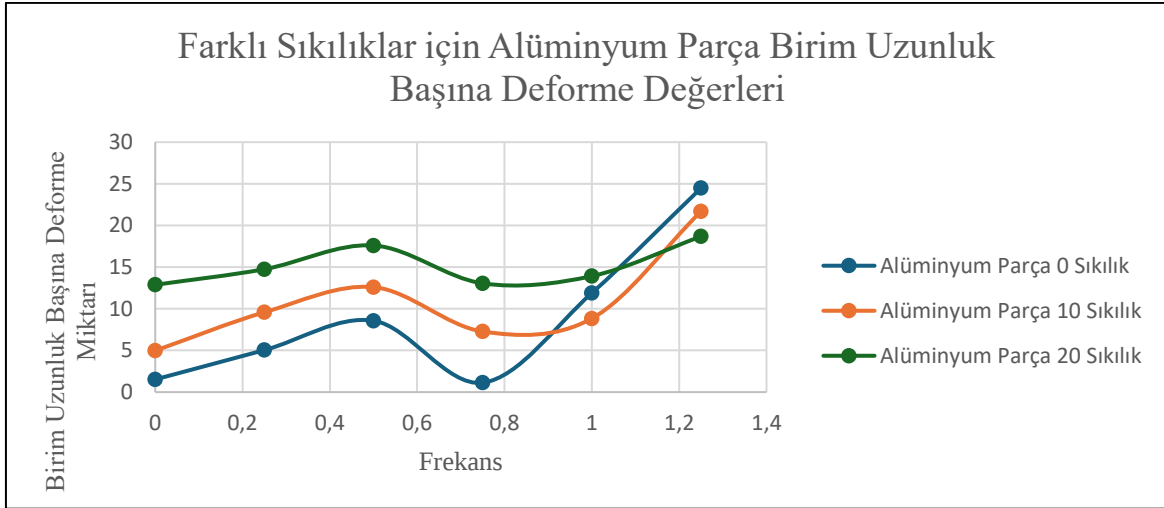
Frekans	0,1 Sürtünme Katsayısı için Çelik			0,1 Sürtünme Katsayısı için Alüminyum		
	0 Sıklık Çelik	10 Sıklık Çelik	20 Sıklık Çelik	0 Sıklık Alüminyum	10 Sıklık Alüminyum	20 Sıklık Alüminyum
0	2,81	7,241	13,73	1,524	4,978	12,88
0,25	5,828	9,641	14,91	5,043	9,578	14,75
0,5	8,51	12,16	17,26	8,574	12,6	17,6
0,75	2,709	7,448	13,92	1,127	7,273	13,05
1	10,82	8,872	14,64	11,89	8,835	13,92
1,25	28,83	21,09	18,43	24,48	21,68	18,68

Çizelge 5.6. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıklık miktarlarına göre birim uzunluk başına deforme sonuçları

Frekans	0,01 Sürtünme Katsayısı için Çelik			0,01 Sürtünme Katsayısı için Alüminyum		
	0 Sıklık Çelik	10 Sıklık Çelik	20 Sıklık Çelik	0 Sıklık Alüminyum	10 Sıklık Alüminyum	20 Sıklık Alüminyum
0	1,483	3,329	13,83	1,539	6,848	12,9
0,25	5,027	10,19	15,48	5,468	10,31	15,23
0,5	8,792	13,48	18,64	9,719	13,98	18,85
0,75	1,14	7,508	14,05	1,133	7,043	13,11
1	11,8	8,044	14,87	11,92	8,929	14,07
1,25	24,74	21,39	19,26	24,98	21,74	18,63



Şekil 5.30. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıklık miktarlarına göre birim uzunluk başına deforme sonuçları



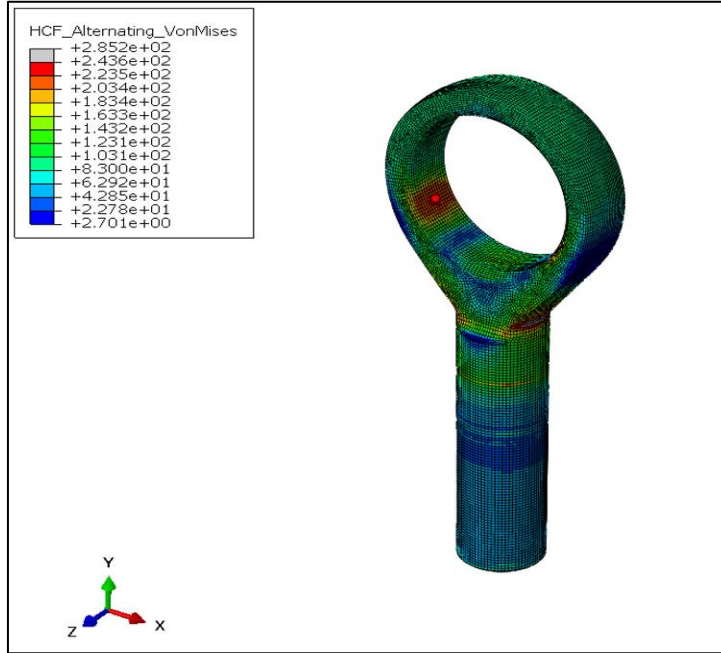
Şekil 5.31. Çelik ve alüminyum için 0,01 sürtünme katsayısında farklı sıklık miktarlarına göre birim uzunluk başına deforme sonuçları

Şekiller ve çizelgelerden de görülebileceği gibi analiz ve parçanın yüklenmeleri sırasında sıklık miktarının parçanın birim uzunluk başına deforme miktarına doğrudan etki ettiği gözükmemektedir. Sıklık miktarının artmasının çubuk parçasında oluşan deforme miktarında yüklemeler ile beraber katlanarak arttığı, analiz ve yüklenmelerin tamamlanması ile beraber ise sıklık toleransının artmasının zıt bir etki yaptığı gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısının 10 kat azalması ile beraber parçada oluşan kayma özelliklerine karşı bir zıt kuvvet uygulamaya çalıştığı bu yüzden çubuk ucu parçasında sürtünme katsayısının yüksek miktarlarda artmasının olumsuz sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi alüminyum parçasının çeliğe teması sonucunda çelik-çelik temasına göre parçayı daha az deforme ettiği belirlenmiştir.

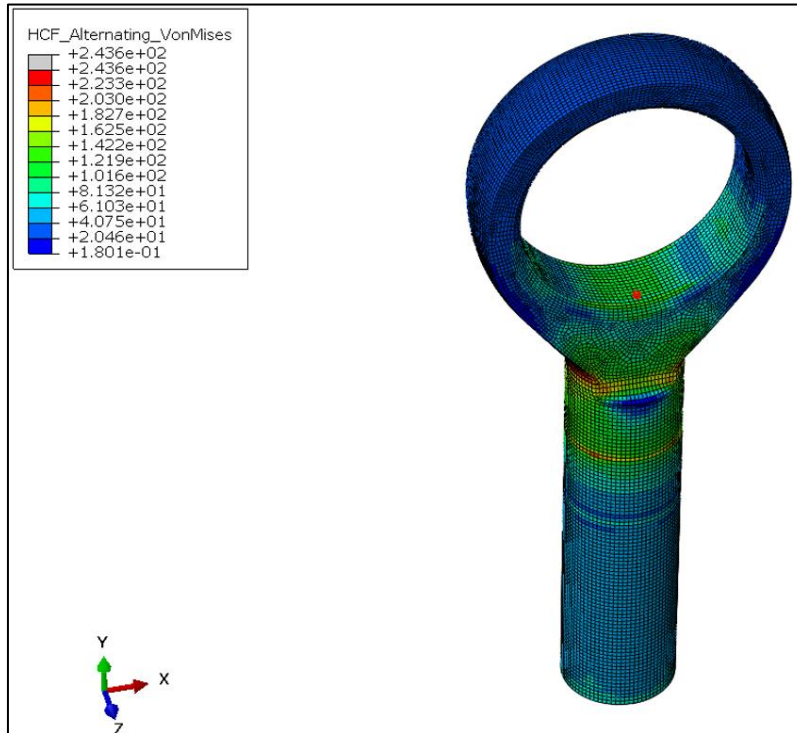
5.5. Hücum Açısı Değiştirici Parçası Sürtünme Yorulması Ömür Sonuçları

Hücum açısı değiştirici montaj parçası için ömür hesabı yapılırken çubuk ucu parçası ve küresel rulman dış kısım parçası için temas kuvveti etkisi ile parçanın temas alanında etkiyen en büyük HCF Alternating VonMises analiz sonuç bölgeleri bulunmuştur. Çelik parçası için 0 sıklıkta parçanın yan kısımlarında, 10 ve 20 sıklık parçalarda ise parçanın orta kısımlarda en fazla yüklenmelerin meydana geldiği görülmüştür. Daha sonra bu değerler kaydedilerek, aynı noktalardan HCF Mean VonMises değerleri incelenmiştir. HCF Alternating VonMises ve HCF Mean VonMises analiz sonuçları ile beraber formülasyon ile R Alternative Stres değerine gidilerek Logaritmik tablo yardımı ile çıkan sonuç üzerinden ömür hesapları

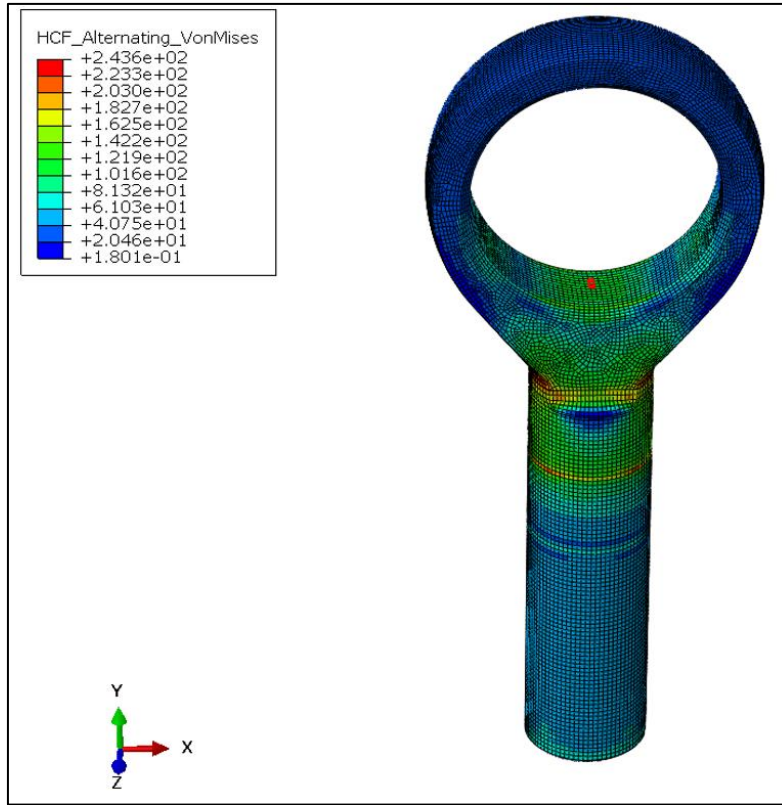
gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.24. , Şekil 5.25. ve Şekil 5.26. üzerinde sıklıklara göre parçaların en fazla yüklenme bölgeleri ile Şekil 5.27. üzerinde Ömür için kullanılan grafik ve Çizelge 5.7. üzerinde parçaların ömür hesapları gösterilmektedir.



Şekil 5.32. 0 sıklık çelik- çelik teması için maksimum alternating vonmises sonucu



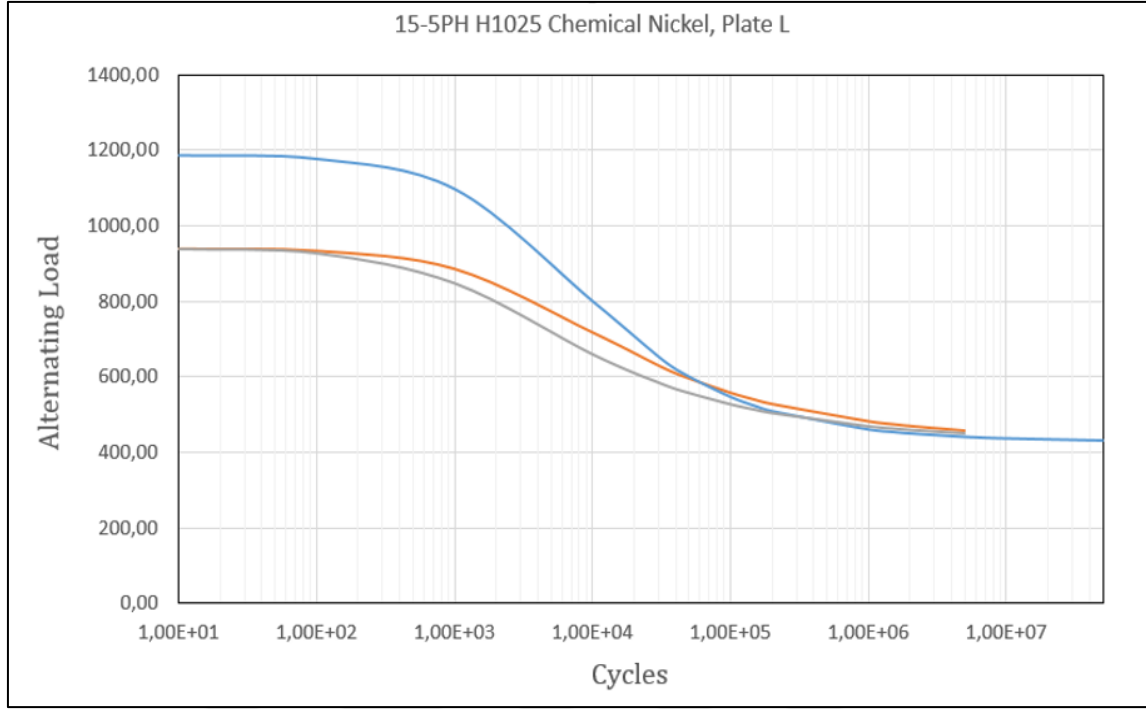
Şekil 5.33. 10 sıklık çelik- çelik teması için maksimum alternating vonmises sonucu



Şekil 5.34. 20 sıklılık çelik- çelik teması için maksimum alternating vonmises sonucu

Alternatif Stres $R=-1$ için formülasyon aşağıdaki gibidir;

$$\sigma_{a,s} = \left(\frac{S_y \sigma_a (1-R_s)}{(1-R_s)(S_y - \sigma_m) + (1+R_s)\sigma_a} \right) \quad (5.1)$$



Şekil 5.35. Ömür hesabı için kullanılan grafik

Çizelge 5.7. 0,10 ve 20 sıklık için sürtünme yorulma ömür sonuçları

Malz.	Sıklık	Model	Element ID	OSC	Mean	R=-1 OSC	Ömür
Çelik	0	Çelik-çelik teması	79417	230	231	298,777695	15000000
Çelik	10	Çelik-çelik teması	67642	117,6	222,9	151,9	Sonsuz
Çelik	20	Çelik-çelik teması	83394	118,2	222,4	152,1	Sonsuz

Yapılan testler ve analizler sonucunda parçanın kırılan bölgeleri analizler ve testlerin incelenmesi ile hemen hemen aynı bölgelerde olduğu görülmüştür. Sürtünme yorulması testlerde A olarak gösterilen iç bölgelerde başlayarak parçanın kırılmasına sebebiyet vermektedir. Yapılan yorulma analizlerinde en yüksek stres değerlerinin olduğu bölgeler ile benzerlik gösterdiği mikro analiz incelemeleri sonucu ortaya çıkmıştır. Çatlak başlangıç noktaları tüm test ve analizlerde temas bölgesinin olduğu rulman dış kısım ve çubuk ucu parçalarında görülmüştür.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, aynı ve farklı malzemelerin farklı sıklıklar ile birlikte sürtünme yorulması koşulları altında çubuk ucu parçası üzerinde yorulma ömrü üzerindeki etkileri, hem aynı normal yük altında temas kuvveti konfigürasyonu kullanılarak sürtünmeli yorulma deneyleri gerçekleştirilerek, hem de sonlu elemanlar modellerinden faydalananarak incelemeler gerçekleştirilmiştir. Deneylerin sonuçları, parçaların kırılması, yüklemeler ile sonlu elemanlar modellerinden çıkan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışma içerisinde stres analizleri, temas kuvveti analizleri, kayma ve yapışma bölge analizleri, parçaların teması sonra birim uzunluk başına deforme analizleri ve parçaların sonlu elemanlar modeli ile ömür hesapları gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmaktadır:

- Çubuk ucu parçalarına etkiyen stres açısından, temas eden küresel rulman dış kısım için parçanın alüminyum veya çelik olması çubuk ucu malzemesine uygulanan kuvvet bakımından dolayısı ile çelik çubuk ucu parçasına gelen stres bakımından farklılık göstermektedir. Alüminyum malzemenin çelik malzemeye temasında çelik malzemenin çelik malzemeye temasına göre daha az kuvvet uyguladığı çıkan sonuçlardan görülmektedir. Yapılan çalışma ve incelemelerde helikopter kuyruk rotoru parçası hücum açısı değiştiricinin dinamik yüklemelerinde bazı zamanlarda alüminyum parçanın daha fazla stres oluşturduğu da gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısı değerinin değişimi ise stres açısından çubuk ucu parçasında çok büyük bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.
- Çubuk ucu parçalarına etkiyen temas kuvveti açısından, temas eden küresel rulman dış kısım yapılan temas kuvveti çalışmasında sıklık miktarının artması ile beraber alüminyum ve çelik malzemelerinin temasının çubuk ucu parçalarında temas kuvvetlerinin katlanarak arttığı, alüminyum-çelik temasının çelik-çelik temasına göre daha az temas kuvveti uyguladığı, sürtünme katsayısı artışının temas kuvveti açısından parçaya olumlu bir sonuç oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin karşılaştırma yapılan sürtünme katsayısı değerinin oldukça düşük bir değer seçilmesi sonucu yüzeyler arasındaki kaymayı yenmek için daha fazla kuvvet uygulamaya çalışması olarak değerlendirilmiştir. İnceleme ve çalışma sonucunda sürtünme katsayısı değerinin iyi bir

sonuç çıkardığı fakat çok hassas yüzeyler için parçaya olumsuz etkiler bırakabildiği görünmüştür.

- Çubuk ucu parçalarına etkiyen yapışma ve kayma açısından, sıklık miktarlarının ve malzeme özelliklerinin kayma ve yapışma sonuçları ile doğrudan etkili olduğu şekillerden görülebilmektedir. Sıklık miktarının artması ile beraber çelik-çelik etkileşimi ve çelik- alüminyum etkileşiminin tümünde yapışma özelliğinin arttığı, kayma özelliklerinin yapışma özelliklerine göre daha az olduğu görülmüştür. Çelik-Alüminyum parça etkileşiminin çelik-çelik parça etkileşimine göre analizin minimum yük olduğu noktalarda yapışmanın daha az olduğu fakat analizin tamamlanması ile beraber yapışmanın çelik-çelik parça etkileşimine göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu gözlem sonucunda analizlerin bitmesi ile beraber çelik ve alüminyum parçanın birbirine temasının oluşan yüklemeler ile beraber çelik-çelik etkileşimine göre çok daha fazla olduğu yorumu yapılmıştır. Sürtünme katsayısının artmasının ise tüm sıklık miktarlarında analizin minimum ve maksimum yüklemelerinde parçaların birbirine yapışma özelliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısının parçaları birbiri ile temasında kayma özelliğini arttırdığı gözlemlenmektedir.
- Çubuk ucu parçalarına etkiyen birim uzunluk başına deforme açısından, analiz ve parçanın yüklenmeleri sırasında sıklık miktarının parçanın birim uzunluk başına deforme miktarına doğrudan etki ettiği görülmüştür. Sıklık miktarının artmasının çubuk parçasında oluşan deforme miktarında yüklemeler ile beraber katlanarak arttığı, analiz ve yüklenmelerin tamamlanması ile beraber ise sıklık toleransının artmasının zıt bir etki yaptığı gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısının 10 kat azalması ile beraber parçada oluşan kayma özelliklerine karşı bir zıt kuvvet uygulamaya çalıştığı bu yüzden çubuk ucu parçasında sürtünme katsayısının yüksek miktarlarda artmasının olumsuz sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Alüminyum parçasının çeliğe teması sonucunda çelik-çelik temasına göre parçayı daha az deforme ettiği belirlenmiştir.
- Deneysel çalışmalar açısından, sonlu elemanlar modelleri ve reel uçuş şart ve yüklerine ek olarak güvenlik katsayısı ile 3 farklı numune için testler gerçekleştirilmiştir. Üç test örneği kırık yüzeyler için incelenmiştir ve mikroyapı uyumluluğu konusunda anormal bir durum gözlemlenmemiştir. Test numunelerinde gözlemlenen çatlakların, çubuk ucu gövdesi ve rulman dış kısım arasındaki temas alanında meydana gelen sürtünme yorulma yorgunluğundan kaynaklandığı bulunmuştur. 9483265 döngü sayısı ile yapılan analiz sonuçlarının benzerlik gösterdiği, parçanın yüklemeleri kaynaklı diğer iki numunenin

188033 ve 139041 döngü sayısında kırılmasının analiz sonuçlarında yer alan en yüksek stres bölgelerinde olduğu gözlemlenmiştir. Test sonuçları, imalat hataları, sonlu elemanlar modeli ile reel parçalarda olan farklılıklar, yüklerin daha güvenli alanda kalması sebebiyle 0 sıkılık sonuçları ile yakın ömür'e ulaştığı gözlemlenmiştir ve test sonuçlarının doğru bir şekilde oluştuğu belirlenmiştir.

- Çubuk ucu parçalarının oluşan yükler, analizler ve testler sonucunda ömür açısından, sıkılık miktarının artması ile beraber parçanın sıkışma eğilimini giderek arttırdığı ve bu sıkışma ile beraber parçanın bütün tek parçaya dönüştüğü ve parçanın ömrünün sıkılık miktarının artması ile beraber arttığı gözlemlenmiştir. Sıkılık miktarının artması ile beraber reel de rulmanlarda montaj sırasında oluşacak sorunlar kaynaklı sıkılık miktarının boşluklu veya çok az miktarlarda sıkı geçme olması gerektiği belirlenmiştir. 0 sıkılık ömür hesabı ile yapılan testlerde çıkan ömür sonucunun doğruluğu açısından uygun olarak görülmüştür.



KAYNAKLAR

1. Johnson, W. (2013). *Rotorcraft aeromechanics*. New York: Cambridge University Press, 85-93.
2. İnternet: Savunma.net. (t.y). *Robinson Helikopterinde Mast Vurması Problemi*. Web: <https://www.sunsavunma.net/wp-content/uploads/2021/01/Robinson-Helikopterlerinde-Mast-Vurmasi-Problemi.pdf>, Son Erişim Tarihi:17/04/2024.
3. İnternet: B-Domke. (t.y). *Helikopter Mast "Burkhard Domke."* Web: <https://www.b-domke.de/>, Son Erişim Tarihi:17/04/2024.
4. İnternet: PSU. (t.y). *Flutter Stability of Rotors with Fluidic Pitch Links*. Web https://www.me.psu.edu/mrl/fluidic_pitch_link/, Son Erişim Tarihi:17/04/2024.
5. Vingsbo, O., Söderberg, S. (1988). On fretting maps. *Wear*, 126(2), 131-147.
6. Eden, E., Rose, W., Cunningham, P. (1911). The endurance of metals: experiments on rotating beams at University College, London. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 81(1), 839-974.
7. Hertz, H. (1881). The contact of elastic solids. *Journal Für Die Reine und Angewandte Mathematik*, 92, 156-171.
8. Mindlin, R. D., Deresiewicz, H. (1953). Elastic spheres in contact under varying oblique forces.
9. Nowell, D., Hills, D. (1987). Mechanics of fretting fatigue tests. *International Journal of Mechanical Sciences*, 29(5), 355-365.
10. Rajasekaran, R., Nowell, D. (2006). Fretting fatigue in dovetail blade roots: Experiment and analysis. *Tribology international*, 39(10), 1277-1285.
11. Hojjati-Talemi, R., Zahedi, A., De Baets, P. (2015). Fretting fatigue failure mechanism of automotive shock absorber valve. *International Journal of Fatigue*, 73, 58-65.
12. Shi, G., Backman, D., Bellinger, N. (2005). Finite element simulations of fretting contact systems. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 49.
13. Hajshirmohammadi, B., Mehdizadeh, M. (2021). Finite Element Investigation of Moment Effect on Fretting Fatigue. *International Journal of Current Science Research and Review*, 4(04), 265-272.
14. Korkmaz, Y. M., Coker, D. (2017). Finite element analysis of fretting contact for dissimilar and nonhomogeneous materials. *Procedia Structural Integrity*, 5, 452-459.
15. Giner, E., Sukumar, N., Denia, F. and Fuenmayor, F. (2008). Extended finite element method for fretting fatigue crack propagation. *International Journal of Solids and Structures*, 45(22-23), 5675-5687.

16. Rauert, T., Herrmann, J., Dalhoff, P. and Sander, M. (2016). Fretting fatigue induced surface cracks under shrink fitted main bearings in wind turbine rotor shafts. *Procedia Structural Integrity*, 2, 3601-3609.
17. Kildashti, K., Dong, K., Yu, A. (2023). Contact force models for non-spherical particles with different surface properties: A review. *Powder Technology*, 418, 118323.
18. He, W., Chen, Y., He, J., Xiong, W., Tang, T. and OuYang, H. (2016). Spherical contact mechanical analysis of roller cone drill bits journal bearing. *Petroleum*, 2(2), 208-214.
19. Cubillas, D., Olave, M., Llavori, I., Ulacia, I., Larrañaga, J., Zurutuza, A. and Lopez, A. (2022). Semi-analytical methodology to predict fretting damage areas in angular contact ball bearing raceways under variable loading. *Wear*, 508, 204477.
20. Huang, Z., Zhang, Z., Teng, Z., Khan, M. K., Wang, Q. and Wang, J. (2019). Effect of fretting damage on characteristics of high strength bearing steel up to very high cycle fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*, 217, 106526.
21. Sharma, A., Sadeghi, F. (2024). Effects of fretting wear on rolling contact fatigue. *Tribology International*, 192, 109204.
22. İnternet: Tyler, F. (2020). *3 Steps to Improve FEA Models*. Web: <https://www.ansys.com/blog/how-to-improve-fea>, Son Erişim Tarihi:18/04/2024.
23. İnternet: Gyekenyesi, J. Z., Murthy, P. L., Mital, S. K. (2005). *NASALIFE-Component fatigue and creep life prediction program*. Web: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20110015541>, Son Erişim Tarihi:19/04/2024.
24. Özgül, F., Bektaş, N. B. (2018). *Investigation of the effect of additives on mechanical properties of e-glass reinforced thermoset composites*. Pamukkale Special Issue of the 8th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress, Aydın. 26-32.
25. İnternet: MMPDS-07. (2012). *Metallic materials properties development and standardization* Web: https://www.sae.org/images/bookstore/b-941/b-941_hr4.5.pdf, Son Erişim Tarihi:17/04/2024.



Gazili olmak ayrıcalıktır...