

Havacılık Aksesuar Dişlileri Rim ve Ağ Kalınlığının Dişli Kontağına ve Doğal Frekansına
Etkileri

Hakan Mert

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Mayıs 2025

The Effects of Rim and Web Thickness on Gear Contact and Natural Frequency in Aerospace
Accessory Gears

Hakan Mert

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Aviation Science and Technology

May 2025

Havacılık Aksesuar Dişlileri Rim ve Ağ Kalınlığının Dişli Kontakına ve Doğal Frekansına
Etkileri

Hakan Mert

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Alper Sofuoğlu

Mayıs 2025

ONAY

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Hakan MERT'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Havacılık Aksesuar Dişlileri Rim ve Ağ Kalınlığının Dişli Konağına ve Doğal Frekansına Etkileri” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Mehmet Alper SOFUOĞLU

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Doç. Dr. Mehmet Alper SOFUOĞLU

Üye: Doç. Dr. Fatih Hayati ÇAKIR

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇETKİN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Mehmet Alper Sofuoğlu danışmanlığında hazırlamış olduğum “Havacılık Aksesuar Dişlileri Rim ve Ağ Kalınlığının Dişli Konağına ve Doğal Frekansına Etkileri” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 20/05/2025

Hakan Mert

İmza

ÖZET

Havacılık aksesuar dişli kutuları, motor ve alt sistemler arasında mekanik güç aktarımını sağlayan kritik sistemlerdir. Bu sistemlerdeki dişliler, yüksek dönüş hızlarında çalışan ve şaftla yekpare olarak tasarlanan hassas bileşenlerdir. Ayrıca hafiflik ve güvenilirlik, bu sistemlerde öncelikli tasarım hedeflerindendir. Bu dişli kutularının tasarım projelerinde özellikle dişli ağırlık ve güvenilirlik optimizasyonu zorlu bir süreçtir. Bu çalışmada, AGMA 2001 D04 standardına uygun olarak modellenmiş bir havacılık aksesuar düz dişli çifti kullanılarak rim ve ağ kalınlıklarının, dişli kontak durumuna ve dişli doğal frekanslarına etkileri incelenmiştir. Bu amaçla statik ve modal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde, kontak kuvvet dağılımları, gövde deformasyonları ve doğal frekanslar üzerindeki etkiler incelenmiştir. Bu tez kapsamında yapılan analizlerde, geometrik değişimlere bağlı olarak Z53 dişlisinde gövde deformasyonuna bağlı %8'e varan dişli kontak kayma değişimleri görülmüş ve ilk 6 mod frekansındaki değişimler ortaya konmuştur. Benzer şekilde Z76 dişlisinde ise %20'lere varan kontak kayma değişimleri ile ilk 6 mod frekansındaki değişimler gösterilmiştir. Kontak kuvvet dağılımları incelendiğinde ise her iki dişlinin de en ince yapılarda olduğu durumda kontak kuvvet dağılımı tepe değerinde %21 kadar bir artış tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları kullanılarak bir havacılık aksesuar dişli kutusu tasarımında kavramsal ve ön tasarım aşamalarında daha hızlı bir şekilde dişli geometrilerinde değişiklik yapılabilir. Şaft ile yekpare olduğu için dişli şaft olarak adlandırılan bu parçalarda rim ve ağ kalınlıkları belli ölçülerde değiştirildiğinde ortaya çıkan etkilerin büyüklüğüne göre dişli şaft geometrileri en az geometri değişikliği ile ihtiyaç dâhilinde iyileştirilebilecektir. Bu sayede tasarım sürecinde hem maliyetler azaltılmakta hem de süreç daha yönetilebilir hale gelmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dişli Gövde Deformasyonu, Aksesuar Dişli Kutusu, Şaft Yapısal Analizler, Dişli Kontak, Dişli Frekans Cevapları, Dişli Boyutlandırması, Dişli Kutusu Tasarımı, MRB Süreci

SUMMARY

Aerospace accessory gearboxes are critical systems that provide mechanical power transmission between the engine and sub-systems. The gears used in these systems are precision components that operate at high rotational speeds and are integrally designed with the shaft. Lightweight design and reliability are among the primary design objectives in such systems. In accessory gearbox design projects, especially the optimization of gear weight and reliability presents a challenging process. In this study, the effects of rim and web thicknesses on the gear contact condition and natural frequencies were investigated using a spur gear pair modeled in accordance with AGMA 2001-D04 standard. For this purpose, both static and modal analyses were performed. The evaluations focused on the distribution of contact forces, housing deformations, and the influence on natural frequencies. The analyses conducted within the scope of this thesis showed that, depending on geometric variations, gear contact sliding variations of up to 8% due to body deformation were observed in the Z53 gear, and corresponding changes in the first six mode frequencies were identified. Similarly, in the Z76 gear, contact sliding variations reached up to 20%, with notable changes in the first six mode frequencies. The contact force distributions showed that, in the thinnest configurations of both gears, the peak contact force increased by approximately 21%. The outcomes of this study enable faster design iterations at the conceptual and preliminary design stages of accessory gearboxes. For the gear-shaft components, which are designed as one piece, rim and web thicknesses can be varied within reasonable limits to improve gear geometry with minimal modification, depending on the magnitude of the observed effects. As a result, the overall design process becomes more cost-effective and manageable.

Key Words: Gear Body Deformation, Accessory Gearbox, Shaft Structural Analysis, Gear Contact, Gear Frequency Responses, Gear Sizing, Gearbox Design, MRB Process

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamda danışmanlık ederek beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım Doç. Dr. Mehmet Alper Sofuoğlu'na; teknik destekleri sebebiyle Kıdemli Tasarım Mühendisi Şükrü Bakar'a; tez süresince sağlanan imkanlar dolayısıyla ALP Havacılık'a ve yöneticilerime; bana yardım ve desteklerini esirgemeyen aileme ve son olarak kıymetli eşim Gulmira Permanova'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM	10
3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve ANSYS	11
3.1.1. Statik analizler	14
3.1.2. Modal analizler	16
3.2. Analitik Çözüm Yöntemi ve KissSoft	17
3.3. Geometrilerin Oluşturulması	18
3.4. Meş Yakınsama Çalışmaları	27
3.5. Sınır ve Yük Koşulları	34
3.6 Değerlendirme Yöntemleri	40
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	46
4.1. Statik Analizler	46
4.1.1. Z53 dişlisi statik analizleri	48
4.1.2. Z76 dişlisi statik analizleri	53

İÇİNDEKİLER

Sayfa

4.1.3. Z53 ve Z76 dişlisi analiz çıktıları karşılaştırması.....	58
4.1.4. Dişli çifti KissSoft kontak analizleri	64
4.2 Modal Analizler.....	74
4.2.1. Z53 dişlisi modal analizleri	76
4.2.2. Z76 dişlisi modal analizleri	85
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	94
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	98
EK AÇIKLAMALAR	104
Ek Açıklama-A: Bölüm 3.3.'te Kullanılan AGMA 2001 D04 Standardı Rim Kalınlığı Grafiği	105
Ek Açıklama-B: Bölüm 4.1.1.'de Kullanılan Z53 Dişli Kontak Kayma Çizelgeleri.....	106
Ek Açıklama-C: Bölüm 4.1.2.'de Kullanılan Z76 Dişli Kontak Kayma Çizelgeleri	111
Ek Açıklama-D: Bölüm 3.3.'te Açıklanan Kütle Değişim Tablosu.....	116
Ek Açıklama-E: Bölüm 1.'de Kullanılan AGMA 927 A01 Standart Çalışma Görseli.....	117

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Safran-Group M88 Motoru Aksesuar Dişli Kutusu	6
3.1. Çalışma Akış Şeması	10
3.2. İki Boyutlu Dikdörtgen Bir Parçanın Dokuzar Düğüm Noktalı Altı Elemanlı Ağ Yapısı [Bathe, 2016]	12
3.3. Kesin Çözüm ve Sonlu Elemanlar Çözümü Kıyaslaması	15
3.4. KissSoft Yazılımı Kontak Durum İncelemesi Tanıtım Görseli.....	18
3.5. Z53 Dişlisi Rim Kalınlığı Gösterimi	19
3.6. Z53 Dişlisi Ağ Kalınlığı Gösterimi	20
3.7. Z76 Dişlisi Rim Kalınlığı Gösterimi	21
3.8. Z76 Dişlisi Ağ Kalınlığı Gösterimi	22
3.9. Z53 Dişlisi Rulman Yatakları Arası Mesafesi.....	24
3.10. Z76 Dişlisi Rulman Yatakları Arası Mesafe	25
3.11. Z53 Dişlisi Kontak Alanı 16 Dikey Kesit Alanına Bölünmüş Haliyle Gösterimi.....	26
3.12. Z76 Dişlisi Kontak Alanı 16 Dikey Kesit Alanına Bölünmüş Haliyle Gösterimi.....	27
3.13. (a) Kıvrımlı Bir Sınır Alanı 41 Kare Eleman ile Modellenmiş ve Taralı Alanlar Modele Dahil Değil (b) Sonlu Elemanlar Meşinin İnceltilmesi Sonucu 192 Kare Eleman ile Modele Dahil Olmayan Alanda Azalma	28
3.14. Kontak Yüzeyi Numaralandırma Yöntemi ve Deformasyon Okuma Eksenleri	29
3.15. Radyal Deformasyon Yüzde Cinsinden Değişim Grafiği	30
3.16. Eksenel Deformasyon Yüzde Cinsinden Değişim Grafiği	31
3.17. Ağ Gerilmeleri Cinsinden Doğrusal ve İkinci Dereceden Elemanlı Modellerin Yüzde Cinsinden Meş Yakınsama Kıyas Grafiği	32
3.18. Meş Yakınsama Çalışmaları Sonucu 0.4 mm Elemanlarla Oluşturulmuş Z53 W3 R3 Meş Yapısı.....	33

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.19. Ayrı Analiz Edilen Z53 ve Z76 Dişlileri Temsilen Kontak Halindeyken Gösterimi	34
3.20. Z53 Dişlisinin Öncü Dişli ile Olan Kontakta Kuvvet Tanımlaması	35
3.21. Z53 Dişlisinin Z76 Dişlisi ile Olan Kontakta Kuvvet Tanımlaması	36
3.22. Z53 Dişlisinin -Z Yönündeki Rulman Yatağı Kısıtlaması	37
3.23. Z53 Dişlisinin +Z Yönündeki Rulman Yatağı Kısıtlaması	37
3.24. Z76 Dişlisinin Z53 Dişlisi ile Olan Kontakta Kuvvet Tanımlaması	38
3.25. Z76 Dişlisinin -Z Yönündeki Rulman Yatağı Kısıtlaması	38
3.26. Z76 Dişlisinin +Z Yönündeki Rulman Yatağı Kısıtlaması	39
3.27. Z76 Dişlisinin Z Dönüş Yönündeki Spline Bölgesi Kısıtlaması	39
3.28. Z53 Dişlisinin Kontak Değerlendirmesinde Kullanılan Silindirik Koordinat Sistemi	40
3.29. Z53 W3 R3 Dişlisi Radyal Kontak Kayması Ölçümü	41
3.30. Z53 W3 R3 Dişlisi Eksenel Kontak Kayma Ölçümü	41
4.1. Z53 Dişlisi W3R3 Geometrisi 1 Numaralı Köşenin Eksenel Kayması	49
4.2. Z53 Dişlisi W3R3 Geometrisi 1 Numaralı Köşenin Radyal Kayması	49
4.3. Z53 Dişlisi Radyal Kontak Kayma Grafiği	51
4.4. Z53 Dişlisi Eksenel Kontak Kayma Grafiği	52
4.5. Z76 Dişlisi W3R3 Geometrisi 1 Numaralı Köşenin Eksenel Kayması	53
4.6. Z76 Dişlisi W3R3 Geometrisi 1 Numaralı Köşenin Radyal Kayması	54
4.7. Z76 Dişlisi Radyal Kontak Kayma Grafiği	56
4.8. Z76 Dişlisi Eksenel Kontak Kayma Grafiği	57
4.9. R1 Rim Kalınlıklarında Ağ Kalınlığı Değişimine Bağlı Radyal Kontak Kayma Yüzdeleri	59
4.10. Z53 ve Z76 Ağ Kalınlıkları W1 İken Rim Kalınlıklarına Bağlı Radyal Kontak Kayma Yüzdeleri	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.11. Z53 ve Z76 Ağ Kalınlıkları W2 İken Rim Kalınlıklarına Bağlı Radyal Kontak Kayma Yüzdeleri	60
4.12. Z53 ve Z76 Ağ Kalınlıkları W3 İken Rim Kalınlıklarına Bağlı Radyal Kontak Kayma Yüzdeleri	61
4.13. Z53 ve Z76 Ağ Kalınlıkları W4 İken Rim Kalınlıklarına Bağlı Radyal Kontak Kayma Yüzdeleri	62
4.14. Z53 ve Z76 Ağ Kalınlıkları W5 İken Rim Kalınlıklarına Bağlı Radyal Kontak Kayma Yüzdeleri	63
4.15. KissSoft Dişli Genel Veri Girişi Ara Yüz Sayfası	64
4.16. İki Dişli Arasındaki Kontakta Meydana Gelen Eğiklik (Inclination) Olayı.....	65
4.17. İki Dişli Arasındaki Kontakta Meydana Gelen Sapma (Deviation) Olayı	66
4.18. Z53 ve Z76 Dişlilerinin Standart Geometrilerinin Kontak Kayması Olmadan Kontak Kuvvet Dağılımı	67
4.19. Eğiklik ve Sapma Değerlerinin Girildiği KissSoft Ara Yüz Penceresi	68
4.20. Z53 W3 R3 ve Z76 W3 R3 Geometrilerinin Eğiklik ve Sapma ile Oluşturdukları Kontak Kuvvet Dağılımı	68
4.21. Z53 W1 R1 ve Z76 W1 R1 Geometrilerinin KissSoft İçerisinde Boyutsal Girdileri.....	69
4.22. Z53 W1 R1 ve Z76 W1 R1 Geometrilerinin Eğiklik ve Sapma ile Oluşturdukları Kontak Kuvvet Dağılımı	69
4.23. Z53 W1 R1 ve Z76 W5 R5 Geometrilerinin KissSoft İçerisinde Boyutsal Girdileri.....	70
4.24. Z53 W1 R1 ve Z76 W5 R5 Geometrilerinin Eğiklik ve Sapma ile Oluşturdukları Kontak Kuvvet Dağılımı	71
4.25. Z53 W5 R5 ve Z76 W1 R1 Geometrilerinin KissSoft İçerisinde Boyutsal Girdileri.....	72
4.26. Z53 W5 R5 ve Z76 W1 R1 Geometrilerinin Eğiklik ve Sapma ile Oluşturdukları Kontak Kuvvet Dağılımı	72

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

4.27. Z53 W5 R5 ve Z76 W5 R5 Geometrilerinin KissSoft İçerisinde Boyutsal Girdileri.....	73
4.28. Z53 W5 R5 ve Z76 W5 R5 Geometrilerinin Eğiklik ve Sapma ile Oluşturdukları Kontak Kuvvet Dağılımı	74
4.29. Z53 W3 R3 Dişlisinin İlk Modu: Ağ Sallanma Modu 2846,7 Hz.....	76
4.30. Z53 W3 R3 Dişlisinin İkinci Modu: Birinci Ağ Modu 3434,95 Hz.....	77
4.31. Z53 W3 R3 Dişlisinin Üçüncü Modu: Şemsiye Modu 3442,4 Hz.....	77
4.32. Z53 W3 R3 Dişlisinin Dördüncü Modu: İkinci Ağ Modu 7852,4 Hz.....	78
4.33. Z53 W3 R3 Dişlisinin Beşinci Modu: Birinci Bükülme Modu 13919 Hz	78
4.34. Z53 W3 R3 Dişlisinin Altıncı Modu: Birinci Burulma Modu 13941 Hz.....	79
4.35. Z53 W3 R3 Dişlisinin Yedinci Modu: Üçüncü Ağ Modu 14243 Hz.....	79
4.36. Z53 W5 R5 Dişlisinin Yedinci Modu: Şaft Radyal Modu 15313 Hz	80
4.37. Z53 Dişlisi Standart Ağ Kalınlığında Rim Kalınlığı Değişiminin Doğal Mod Frekanslarına Etkisi.....	82
4.38. Z53 Dişlisi Standart Rim Kalınlığında Ağ Kalınlığı Değişiminin Doğal Mod Frekanslarına Etkisi.....	84
4.39. Z76 W3 R3 Dişlisinin Birinci Modu: Birinci Ağ Modu 1282,1 Hz.....	85
4.40. Z76 W3 R3 Dişlisinin İkinci Modu: Şemsiye Modu 1301,3 Hz	86
4.41. Z76 W3 R3 Dişlisinin Üçüncü Modu: Çan Modu 1876 Hz	86
4.42. Z76 W3 R3 Dişlisinin Dördüncü Modu: İkinci Ağ Modu 3046,9 Hz.....	87
4.43. Z76 W3 R3 Dişlisinin Beşinci Modu: Üçüncü Ağ Modu 5638,7 Hz.....	87
4.44. Z76 W3 R3 Dişlisinin Altıncı Modu: İkinci Şemsiye Modu 6382,5 Hz.....	88
4.45. Z76 W3 R3 Dişlisinin Yedinci Modu: Ağ Sallanma Modu 6812,6 Hz	88
4.46. Z76 Dişlisi Standart Ağ Kalınlığında Rim Kalınlığı Değişiminin Doğal Mod Frekanslarına Etkisi.....	90

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

4.47. Z76 Dişlisi Standart Rim Kalınlığında Ağ Kalınlığı Değişiminin Doğal Mod Frekanslarına Etkisi.....	92
--	----



ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

3.1. Çelik 9310 Malzeme Özellikleri.....	13
3.2. Z53 ve Z76 Dişlilerinin AGMA 2001 D04 Standardında Rim ve Ağ Kalınlıkları	19
3.3. Z53 Dişlileri Ağ Kalınlıkları	22
3.4. Z53 Dişlileri Rim Kalınlıkları	22
3.5. Z76 Dişlileri Ağ Kalınlıkları	23
3.6. Z76 Dişlileri Rim Kalınlıkları	23
3.7. Z53 ve Z76 Dişlilerinin Tüm Geometri Konfigürasyonlarının Adlandırılması	24
3.8. Meş Yakınsama Çalışmaları Deformasyon Çıktıları.....	30
3.9. Meş Yakınsama Çalışmaları Sırasında Ağ Yüzeylerinde Oluşan Gerilme Değerleri	31
3.10. Z53 ve Z76 Dişlilerinin Ağ ve Rim Kalınlıklarına Bağlı Kontak Kayma Değerleri ve Ağ Kalınlığı Değişkenine Göre KissSoft Kontak Kayma Analiz Girdisi Seçimleri.....	43
3.11. Z53 ve Z76 Dişlilerinin Ağ ve Rim Kalınlıklarına Bağlı Kontak Kayma Değerleri ve Rim Kalınlığı Değişkenine Göre KissSoft Kontak Kayma Analiz Girdisi Seçimleri.....	44
3.12. Z53 ve Z76 Dişlilerinin Ağ ve Rim Kalınlıklarının En Uç Değerlerine Bağlı Kontak Kayma Değerlerinin 2 x 2 Şeklinde Eşleştirilmiş Hali.....	45
4.1. Z53 ve Z76 Dişlilerinin Ağ Kalınlığı Değişimine Bağlı Kontak Kayma Değerleri.....	47
4.2. Z53 ve Z76 Dişlilerinin Rim Kalınlığı Değişimine Bağlı Kontak Kayma Değerleri.....	47
4.3. Z53 ve Z76 Dişlilerinin Ağ ve Rim Kalınlıklarının En Uç Değerlerine Bağlı Kontak Kayma Değerleri.....	48
4.4. Ağ ve Rim Kalınlığı Değişimine Bağlı Z53 Dişlisi Radyal Kontak Kayma Değerleri...	50
4.5. Ağ ve Rim Kalınlığı Değişimine Bağlı Z53 Dişlisi Radyal Kontak Kayma Değerlerinin Standart Rim Kalınlığı Çıktılarına Normalize Edilmiş Hali	50
4.6. Ağ ve Rim Kalınlığı Değişimine Bağlı Z53 Dişlisi Eksenel Kontak Kayma Değerleri .	51
4.7. Ağ ve Rim Kalınlığı Değişimine Bağlı Z76 Dişlisi Radyal Kontak Kayma Değerleri...	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.8. Ağ ve Rim Kalınlığı Değişimine Bağlı Z76 Dişlisi Radyal Kontak Kayma Değerlerinin Standart Rim Kalınlığı Çıktılarına Normalize Edilmiş Hali	55
4.9. Ağ ve Rim Kalınlığı Değişimine Bağlı Z76 Dişlisi Eksenel Kontak Kayma Değerleri .	56
4.10. Z53 ve Z76 Dişlilerinin Radyal Kontak Kayma Durumlarının Standart Rim Kalınlığı Çıktılarına Göre Değişim Yüzdeleri	58
4.11. Z53 ve Z76 Dişlilerinin Eksenel Kontak Kayma Durumlarının Standart Rim Kalınlığı Çıktılarına Göre Değişim Yüzdeleri	63
4.12. Z53 Dişlisi Ağ Kalınlıkları W1'den W3'e Kadar Çıkan Mod Hareketleri ve Frekansları	80
4.13. Z53 Dişlisi Ağ Kalınlıkları W3'ten W5'e Kadar Çıkan Mod Hareketleri ve Frekansları	81
4.14. Z53 Dişlisi Rim Kalınlıkları R1'den R3'e Kadar Çıkan Mod Hareketleri ve Frekansları	83
4.15. Z53 Dişlisi Rim Kalınlıkları R3'ten R5'e Kadar Çıkan Mod Hareketleri ve Frekansları	83
4.16. Z76 Dişlisi Ağ Kalınlıkları W1'den W3'e Kadar Çıkan Mod Hareketleri ve Frekansları	89
4.17. Z76 Dişlisi Ağ Kalınlıkları W3'ten W5'e Kadar Çıkan Mod Hareketler ve Frekansları	89
4.18. Z76 Dişlisi Rim Kalınlıkları R1'den R3'e Kadar Çıkan Mod Hareketleri ve Frekansları	91
4.19. Z76 Dişlisi Rim Kalınlıkları R3'ten R5'e Kadar Çıkan Mod Hareketleri ve Frekansları	91

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Çubuğun kesit alanı
α	Sönüm katsayısı
B	Gerilme deformasyon matrisi
β	Sönüm katsayısı
C	Modal sönümleme matrisi
D	Malzeme elastisite matrisi
d	Çap
ΔL	Çubuğun uzama miktarı
E	Elastisite modülü
ε	Deformasyon
f	Doğal Frekans
F	Kuvvet
F_r	Radyal kuvvet
F_t	Teğetsel kuvvet
Hz	Hertz
k	Modal rijitlik
K	Rijitlik matrisi
L	Çubuk başlangıç uzunluğu
m	Modal kütle

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

M	Modal kütle matrisi
N	Düğüm noktası mod fonksiyonu
q	Genel bir moda ait deplasman vektörü
$\dot{q}$	Genel bir moda ait hız vektörü
$\ddot{q}$	Genel bir moda ait ivme vektörü
ρ	Özkütle
Φ	Basınç açısı
T	Tork
σ	Gerilme
σ_v	Eşdeğer (von-Mises) Gerilme
$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$	Normal Gerilme
$\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{13}$	Kayma Gerilmesi

Kisaltmalar

Açıklama

ADK	Aksesuar Dişli Kutusu
MRB	Maintenance Review Board
RPM	Revolution Per Minute
UTS	Ultimate Tensile Strength
YTS	Yield Tensile Strength

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Havacılık aksesuar dişli kutuları genel olarak dakikada on bin devir ve üzeri hızlarda çalışmaktadır. Turbo şaft motorlar için tasarlanan aksesuar dişli kutuları ise dakikada elli bin devire varan hızlarıyla diğer motorlar için tasarlanan aksesuar dişli kutularından genel olarak daha yüksek devir hızlarında çalışmaktadır (Zachary, 1995). Bu sistemler aksesuarlar tarafından istenen güç çekişlerini sağlayabilmek için bu yüksek devir hızlarında düşük yükler altında çalışmaktadır. Yüksek devirlerde çalışan bir mekanik sistem için verim, performans ve dayanım gerekliliklerinin karşılanması oldukça zorlu konulardır. Bu yönüyle de turbo şaft motor aksesuar dişli kutusu tasarımları dünyada sayılı ülke ve firma tarafından yapılabilmektedir. Ülkemizde de turbo şaft motorlar için ilk aksesuar dişli kutusu tasarımı, üretimi ve fonksiyonel testleri Alp Havacılık bünyesinde kurulan tasarım ekibi tarafından gerçekleştirilmiştir (TEI, 2022; Yıldırım 2023).

Havacılık aksesuar dişli kutularında kullanılan dişli sistemlerinin tasarımlarında bu sistemlerin statik ve dinamik davranışları birlikte incelenir. Her hava aracı parçasında olduğu gibi hafiflik ve güvenilirlik bu sistemlerde de ön plandadır. Bu sebeple havacılık aksesuar dişli yapılarında ihtiyaç duyulan güç aktarım fonksiyonunu yerine getirebilecek en hafif tasarım hedeflenir. Sonuçta birbiri ile kontak halinde olan dişli sistemlerinin optimizasyonu ile ortaya ideal bir tasarım sonucu çıkarılır. Bu gibi aksesuar dişli kutularında çok sayıda düz dişli birbiri ile kontak halinde bulunabilmektedir (EPI Inc., 2023). Havacılık aksesuar dişli kutularında bulunan bu gibi dişli şaft parçalarının geometrik modifikasyonları ve bu modifikasyonlar sırasında kullanılan değişkenlerin etkilerinin incelenmesi bu çalışmanın ana konusu olmuştur. Bunun sebebi de özellikle havacılıkta hafiflik ve dayanıklılık konularının çok önemli olmasıdır. Geometrik değişken olarak, parametrelerin daraltılması amacıyla bu çalışma kapsamında yalnızca rim ve ağ kalınlıklarında yapılan değişiklikler ele alınmıştır. Dişlilerde yer alan her bir dişliyi şaft geometrisine bağlayan ve yükü diştten şafta aktaran dairesel alan ağ olarak adlandırılırken, bu ağ yapısı üzerinde diş bölgesini destekleyerek rijitlik sağlayan ve görece ağ

yapısından daha kalın olan halka yapısına ise rim denmektedir. Dişli geometrilerinde yapılacak bu gibi değişikliklerle hava aracındaki toplam ağırlık hafifletilmekte ve uçuş başı maliyet düşürülmektedir. Dayanıklılık söz konusu olduğunda ise havacılık aksesuar dişli kutusu döner elemanları için yüksek devir hızları sebebiyle yorulma çerçevesinde kontak gerilmeleri ve dişli dinamik davranışları öne çıkan tasarım değişkenleri olmaktadır (Maláková vd., 2021; Açıkgoz, 2019; Li vd., 2019; Huangfu vd., 2023). Geometri optimizasyonu çalışmaları ile olabilecek en hafif ve aynı zamanda yorulma ve aşınmaya karşı en dayanıklı tasarım bulunabilecektir. Halka açık kaynaklarda yer alan pek çok çalışma incelendiğinde havacılık dişli kutularında kullanılabilecek dişli çifti için geometrik değişiklikler ile aynı anda hem gövde deformasyonlarının ve kontak kuvvet dağılımlarının ele alındığı statik davranışların hem de mod frekanslarının incelendiği bir çalışmanın eksikliği fark edilmiştir. Bu kapsamda dişlilerin önemli tasarım değişkenlerinden olan rim ve ağ kalınlıkları belli ölçülerde değiştirilerek dişli statik ve dinamik davranışları bu çalışma çıktılarında ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu sayede havacılık aksesuar dişli kutusu tasarımı alanında kılavuz olarak kullanılabilecek önemli çıktılar bu çalışma ile sunulmuştur.

Dişlilerin statik olarak incelenmesi ve anlık gövde deformasyonlarının ortaya konması, o dişlinin izafi kontak kaymalarının anlaşılması açısından faydalıdır. Bu izafi kontak kaymaları, kontakta gerçekleşecek gerilme dağılımlarını da doğrudan etkilemektedir (Eng vd., 2018). Özellikle yüksek hızlı çalışan dişli sistemlerinde kontak gerilmelerindeki dağılımlarda oluşan bozulmalar diş üzerinde aşınmaların oluşmasına yol açabilmektedir. Diş geometrisindeki bozulmalar dişli titreşim seviyelerinin artmasına ve dişlinin daha hızlı yorulmasına sebep olmaktadır (Küçükçongar, 2004; Arslan, 2011). Dişli performansının doğrudan etkilenmesi sebebiyle bu çalışmada kontak kuvvetleri altında dişli geometrilerinin nasıl deforme olduğu çalışılmıştır. İlgili kuvvetler belirlenirken aksesuar güç çekişleri ve dişli dönüş devir sayıları göz önünde bulundurulmuştur. Benzer şekilde yüksek devir hızında düşük yüklerle çalışan tasarımın yük değerleri biraz değiştirilerek bu çalışma gerçekleştirilmiş ve dişli gövde deformasyonları bulunmuştur. Bu deformasyonlar sonucunda en kötü koşulda kontaklardaki kayma miktarları ve bu kayma miktarına bağlı olarak kontakta oluşan en yüksek kuvvet dağılım tepe değerleri bu çalışma çıktıları arasında yer almıştır. İki düz dişlinin kontağındaki kuvvet dağılımı ve kuvvet

dağılımı tepe değeri o kontaktaki gerilmeleri doğrudan göstermese de buna dair bir fikir vermekte ve yapılabilecek modifikasyonlar için tasarımcıyı yönlendirebilmektedir. Tüm bu çıktılar sayesinde dişli ağ ve rim kalınlığı değişiklikleriyle kontak gerilme durumunun dişli gövde deformasyonuna bağlı değişimi tasarımın ilk aşamalarında öngörülebilecektir. Benzer tasarımların dişli şaft dönüş hızlarının otuz bin devir ile elli bin devir arasında değişebildiği bilinmektedir. Çalışma sırasında özellikle ilk tahrik sırasında dişli kontağında oluşan statik durumlar ele alındığı için devir sayılarının kontağa etkisi kapsama alınmamıştır.

Dişli şaft gibi döner sistemlerde dönme hızı veya benzer bir titreşim uyarını o dişlinin doğal mod frekansına denk geldiğinde rezonans olabilmektedir. Modun bulunduğu hızlara da bu sebeple kritik hız denmektedir. Bu sebeple, dişli yapılarındaki dinamik davranışlar özellikle kritik hız açısından ele alınır (Saxena & Parey, 2016; Jiang vd., 2019). Buna göre öncelikle ilgili aksesuar dişli kutusunun motor ve benzeri yapılar ile olan bağlantı noktalarından gelebilecek olan yükler, 50 000 dev/dk hızlara ulaşabilen farklı güç çekiş değerlerine sahip aksesuarlar için ayrı ayrı hesaplanır. Her bir aksesuarın güç çekişine ve dönüş hızına göre bu yükler çıkarılır. Böylece bu havacılık aksesuar dişli kutusunun bağlantı noktalarından uyarılacağı önemli frekanslar ortaya çıkarılmış olur. Devamında dişli tasarımlarında bu frekanslar göz önünde bulundurularak kritik hız çakışmasından kaçınılır. Bu çalışmada dişli mod frekans çıktılarının incelenmesinin ana sebebi de bir havacılık aksesuar dişli kutusu tasarımında kritik hız çakışmalarından kaçınmak için geometrik değişikliklere başvurulabileceği gerçeğidir. Çalışma çıktıları ışığında bir dişlinin rim ve ağ kalınlıklarında yapılacak ufak değişikliklerle mod frekanslarının ne ölçüde etkilenebileceği ilgili çizelgeler ile bu çalışmada gösterilmiştir. Bu çizelgeler sayesinde havacılık aksesuar dişli kutusu tasarımı sürecinde ihtiyaç duyulması durumunda en uygun geometrik değişiklikler daha hızlı belirlenebilecektir.

Bu çalışmada, havacılık aksesuar dişli kutularında kullanılan dişli şaft parçalarının rim kalınlığı ve ağ kalınlığı değişiklikleri sonrası statik ve dinamik olarak nasıl etkilendiği incelenmiştir. İlgili çalışma yapılırken birbiri ile kontakta olan iki düz dişli şaft sistemi ele alınmıştır. Farklı durumların etkilerini görebilmek adına dişli sistemlerinden birinde yük aktarımı diştten dişç olurken diğer dişli sisteminde bu aktarım spline ile diş arasında

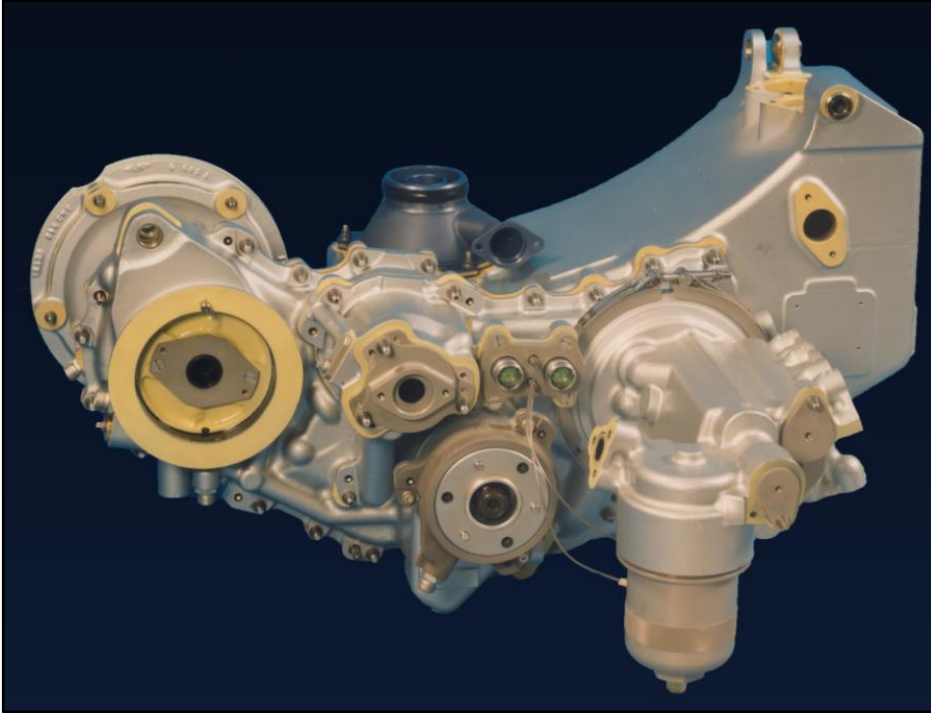
ayarlanmıştır. Modülü 1,25 ve basınç açısı 22,5 derece olarak seçilen 53 ve 76 dişe sahip dişliler için şaft ile yekpare olarak dişli şaft geometrileri oluşturulmuştur. Geometriler oluşturulurken ilk başta AGMA 2001 D04 standardına göre rim kalınlığı ve ağ kalınlığı belirlenmiştir. Standarda göre oluşturulan temel kalınlık değerleri nominal kalınlık olarak seçilmiştir. Değişken parametreler olarak belirlenen rim kalınlığı ve ağ kalınlığı beşer farklı kalınlıkta olacak şekilde her kombinasyonda geometri oluşturulmuştur. Çalışma içerisinde W3 ve R3 ile kısaca ifade edilen kalınlık değerleri sırasıyla ağ nominal kalınlığını ve rim nominal kalınlığını ifade etmektedir. Nominal kalınlığın yüzde sekseni en ince ve yüzde yüz yirmisi en kalın olacak haliyle yüzde onluk aralıklarla farklı kalınlıklar seçilmiştir. Böylece rim kalınlığı beş farklı değerde iken ağ kalınlığı da beş farklı değerde olan geometriler için ilgili değişkenler belirlenmiştir. Devamında her iki dişli şaft gövdesinden bu değişkenlerin kombinasyonu ile oluşan yirmi beşer adet geometri oluşturulmuştur. Bu geometriler oluşturulurken her iki dişlinin birbirleriyle kontakta olacakları yüzeyler AGMA 927-A01 standardındaki gibi on altı kesime ayrılmıştır. İlgili standart çalışma görseli Ek Açıklama-E bölümünde paylaşılmıştır. Buradaki amaç daha sonrasında kontaklarda oluşan deformasyonu en iyi şekilde okuyabilmektir. Oluşan toplam elli adet geometri için diş kontak kuvveti uygulanarak ve rulman yüzeyleri sınırlandırarak bir sonlu elemanlar analiz programı olan ANSYS içerisinde statik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu statik analizler sonrası kontak yüzeylerinde oluşan radyal ve eksenel kaymalar not edilmiştir. Bu kaymalar dişli sistemler için özelleşmiş olan KissSoft yazılımında girdi olarak kullanılarak kontak üzerinde kayma kaynaklı kuvvet dağılımı değişimleri incelenmiştir. Ek olarak rim kalınlığı ve ağ kalınlığı farklılaşmasının sebep olduğu katılık ve ağırlık değişimlerinin şaftların dinamik davranışlarını nasıl etkilediği incelenmiştir. Bunun için yine ANSYS yazılımı kullanılarak her bir geometrinin serbest modal analizi yapılmıştır. Çıkan doğal mod şekilleri ve frekans değerleri not edilmiştir. Sonuçta kayda alınan tüm veriler incelenerek rim kalınlığı ve ağ kalınlığı için etki değerlendirmeleri yapılmıştır.

Havacılık aksesuar dişli kutularında ciddi bir ağırlık unsuru olan paslanmaz çelik şaftlar üzerinde yapılacak hafifletmelerle tasarımın en iyi haline ulaşması amaçlanmıştır. Yük altında dişli gövde deformasyonlarını incelemek, dişli kontaklarında izafi kayma miktarlarını tespit etmek, izafi kayma kaynaklı kontak kuvvet dağılımlarını analiz etmek, bu çalışma ile ortaya

konmak istenen başlıca statik durum çalışmalarıdır. Dinamik olarak ise, dişlilerin doğal frekanslarına rim ve ağı kalınlığı değişimlerinin etkisini modal analizlerle belirlemek bu çalışmanın amacı olarak gösterilebilir. Benzer şekilde bu çalışma, tasarlanmış sistemlerin analiz ve testlerinde görülebilen rezonans durumları ile kontak aşınmalarına sebep olabilen kaymalardan kaçınmak için tasarımda yapılacak en az değişiklik, süreç yönetimi ve dolayısıyla da maliyet hesaplarında önemli rol oynayacaktır. Havacılık aksesuar dişli kutusu tasarım projelerinde özellikle kavramsal tasarım aşamasında ve ön tasarım aşamasında şaft geometrilerinin belirlenmesinde bu çalışmanın çıktılarından yararlanılması hedeflenmiştir. Rim kalınlığı ve ağı kalınlığı değişimlerinin hava araçları tasarımında önemsenen ağırlık ve güvenlik konularında doğrudan incelenmesi ile tasarım yaklaşımlarına bağlı en iyi seçeneğin sunulması sağlanmıştır. Olabildiğince ince rim ve ince ağı kullanarak istenen dinamik frekans cevaplarının ve kontak kayma çıktılarının risk teşkil etmeyecek haliyle bırakılması bu çalışma ile daha rahat sağlanabilecektir. Ek olarak, tasarımların prototip üretim ve test gibi ileri aşamalarında görülebilecek kritik hız çakışması ve kontak yüksek gerilme değerleri gibi istenmeyen durumlardan en hızlı kaçınma yolları rim ve ağı kalınlıklarındaki değişimlerin etki değerlendirmeleri ile mümkün kılınmıştır. Bu sürece dahil olabilecek üretim kaynaklı geometrik değişimlerin etki değerlendirmelerinde de (Material Review Board değerlendirmeleri) yine bu çalışma çıktılarından faydalanılabilecektir. Bu çalışma ile elde edilen tüm bulguların benzer tasarım süreçlerinde kullanılabilecek bir öngörü aracı haline getirilerek kullanılabilmesi amacı bu çalışmanın bulgularının yeterli kalite ve netlikte ortaya konması açısından önem arz etmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Havacılık aksesuar dişli kutuları hava araçlarında motor ile çeşitli yardımcı alt sistem arasında mekanik olarak güç aktarımı yapan sistemlerdir. Bu sistemler Türkçe’de genel olarak Aksesuar Dişli Kutusu olarak geçmekte ve kısaca ADK olarak adlandırılmaktadırlar. Hava araçlarının çalıştırılmasında gerekli olan ilk tahrik gücünün başlatıcı sistemden motora iletilmesinde ve motor belli bir devir hızına eriştiğinde ise motordan alınan gücün diğer sistemlere aktarılmasında bu tip aksesuar dişli kutuları görev alır. Havacılık aksesuar dişli kutuları içerisinde yer alan dişli sistemleri, hava aracının aksesuar ve motor yerleşimlerine göre, aksesuar güç çekiş ihtiyaçlarına göre değişken yapılarda ve yerleşimlerde bulunabilir. Aşağıda Şekil 2.1’de Safran-Group şirketinin Rafale avcı uçaklarında kullanılan M88 turbo fan motorları için 17 650 RPM türbin dönüş hızına göre tasarlanmış olduğu aksesuar dişli kutusu görülebilir.



Şekil 2.1 Safran-Group M88 Motoru Aksesuar Dişli Kutusu

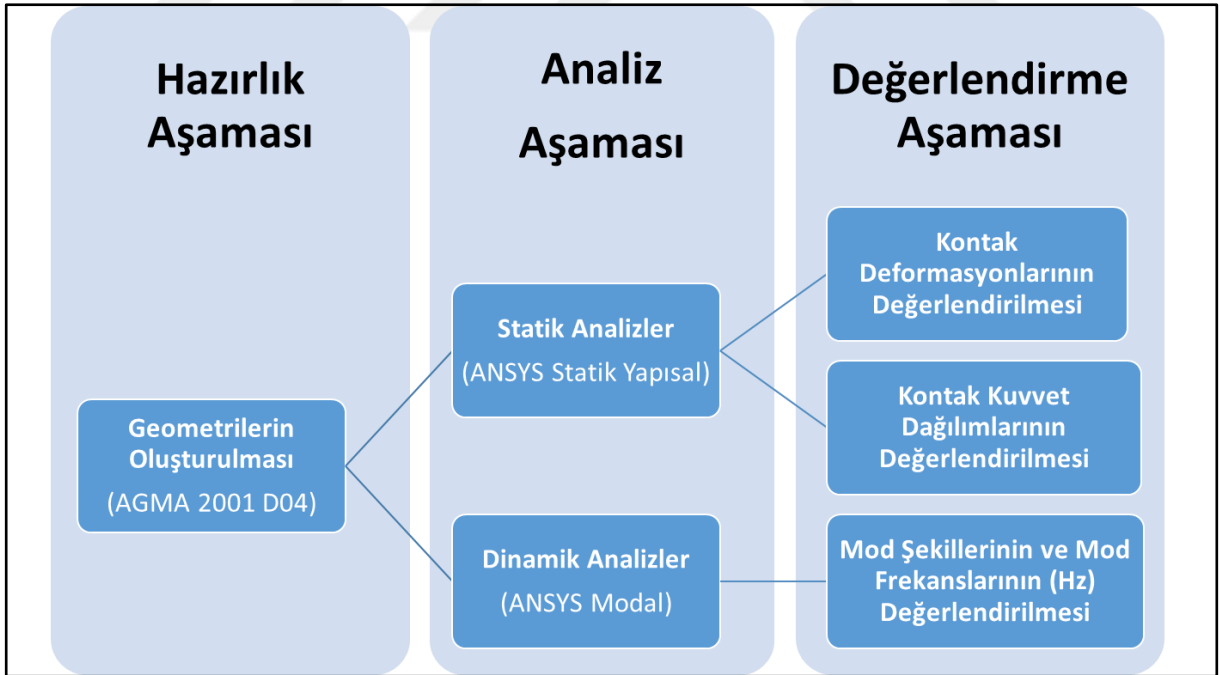
Aksesuar dişli kutuları gibi havacılık sistemlerinin tasarım süreçleri diğer pek çok sistem tasarımına nazaran uzun ve maliyeti yüksek süreçlerdir. Buradaki ana etken de aynı anda hafif, dayanıklı, performansı yüksek ve güvenilir bir tasarım ortaya çıkarma gayesidir. Havacılık aksesuar dişli kutularının tasarımları da benzer şekilde zorlu süreçleri içermektedir. Oldukça hassas ölçülerle ortaya çıkarılan bu gibi sistemlerin tasarım süreçlerinde alınan kararların geri döndürülmesi ciddi maliyet kalemlerine sebep olabilmektedir. Bunu önlemek adına daha fazla tasarımsal öngörünün süreç başından itibaren oluşturulması gerekmektedir. Bugün gerek teorik bilgilerin gelişmesi gerek saha tecrübelerinin artması ve bilgisayar destekli simülasyonların yaygınlaşması sayesinde çeşitli tasarımsal öngörüler daha tutarlı olarak oluşturulabilmektedir. Havacılık aksesuar dişli kutularının tasarımlarına dair çalışmalarda başı çeken aktörlerden biri olan NASA, helikopter güç aktarım sistemleri teknoloji programını 1970'lerde başlatmıştır (Zaretsky, 1983). Amaç da çeşitli yöntemlerle bu gibi sistemleri daha iyi hale getirmektir. Aksesuar dişli kutusu tasarımlarına bakıldığında diş boyutlandırması ve iki dişlinin kontak durumlarının incelenmesine dair pek çok çalışma mevcuttur. AGMA standartları bu çalışmaların dayandırıldığı kaynak standartlardan biridir (Shigley & Mischke, 1989; Dimarogonas, 1989; Arıkan, 1987; Ali, 2017; Farhan vd., 2015; Zhan vd., 2015; Ocak, 2020). Dişli geometrilerinin optimizasyonu ile titreşimin azaltılması alanında analitik ve sayısal çalışmalar mevcuttur (Bozca, 2018; Bozca & Fietkau, 2010; Inoue vd., 1992). Ek olarak üretim süreci kaynaklı da değişkenlik gösterebilen dişli geometrilerinin titreşim seviyelerine etkileri merak edilen konulardandır. Yapılan çalışmalara göre geometrilerdeki değişiklikler incelendiğinde bunların ağırlık azaltma uygulamaları (Özek, 2007; Maláková vd., 2021), rim kalınlığı değişikliği (Maláková vd., 2021; Açıkgöz, 2019) ve ağ kalınlığı değişikliği (Li vd., 2019) gibi çeşitlendiği görülmektedir. Ayrıca diş şekil modifikasyonları ile diş konum modifikasyonlarının titreşimlere etkileri pek çok çalışmada incelenmiştir (Ocak, 2020; Bozca, 2018; Bozca & Fietkau, 2010; Li vd., 2019). Geometrik değişikliklerin etkilerinin bu alanda ne kadar önem arz ettiği yapılan çalışmalar incelendiğinde anlaşılmıştır. Bunun yanı sıra tek bir dişli geometrisi için hem gövdenin deformasyonu hem de dişli bölgesinin deformasyonu ile ilgili de çeşitli çalışmalara rastlanılmıştır. Deformasyonlar sonucu oluşan gerilme artışları dişli ağ yapısının haricinde diş dipleri ve diş kontak bölgeleri için de incelenmiştir. Bu çalışmalarda hasara ve yorulmaya giden yolda kontak gerilmelerinin durumları ortaya konmuştur (Ali, 2017;

Ocak, 2020; Pasta & Mariotti, 2007; Maláková vd., 2021; Abert & Hammerl, 2023; Kim vd., 2016; Park & Yoo, 2004; Zhang vd., 2021; Pasta & Mariotti, 2007). Kontak bölgelerine dair araştırmalar özellikle aşınma durumları için detaylandırılmıştır. Diş modifikasyonları ile bu aşınmaların ve dolayısıyla da dişli ömrünün nasıl etkilendiği bu çalışmalarda incelenmiştir (Küçükçongar, 2004; Arslan, 2011; Huangfu vd., 2023). Tüm bu çalışmalar haricinde titreşim seviyelerinin testler ile ölçüldüğü çalışmalara da rastlanılmıştır (Açıkgöz, 2019; Yeşilyurt, 1997; Zou vd., 2023; Chen & Mou, 2021; Lisle vd., 2019; Yüksel, 2022; Mo vd., 2023; Ayçiçek, 2008; Saxena & Parey, 2016; Fadıl, 2017; Zhang vd., 2021; Soykök, 2001; Jiang vd., 2019). Bu gibi testlerin her tasarımda o tasarımın geliştirilmesi için uygulanması çok maliyetli olacağı için tutarlı hesaplama yöntemlerine başvurulmaktadır. Dişli sistemlerinin tasarım iyileştirmelerinde kullanılan pek çok analitik çözüm yönteminin yanı sıra sayısal yöntemler de yaygınlıkla kullanılmaktadır. Analitik yöntemler için dişli sistemlerinde KissSoft gibi ticari yazılımlar tercih edildiği gibi (Bozca & Fietkau, 2010; Kim vd., 2016; Yüksel, 2022) özgün hesaplayıcıların oluşturulduğu çalışmalar (Inoue vd., 1992; Ayçiçek, 2008) da mevcuttur. Sonlu elemanlar yöntemi için ise ANSYS (Zhan vd., 2015; Maláková vd., 2021; Kim vd., 2016; Lisle vd., 2019; Ayçiçek, 2008; Saxena & Parey, 2016), NASTRAN (Fadıl, 2017) PATRAN (Zhang vd., 2021) ve MASTA (Ocak, 2020) gibi yazılımlar en çok kullanılan ticari programlardır. Dişli tasarımlarında analitik çözümler detaylı geometri girdilerine sahip olmadıkları için sonlu elemanlar metodu ile çalışan programların kullanılması zorunluluk haline gelmiştir (Soykök, 2001). Bu programların ne kadar tutarlı sonuçlar verdikleri de çeşitli çalışmalarda test çıktılarıyla kıyaslanarak ortaya konmuştur (Zou vd., 2023; Jiang vd., 2019). Sonlu elemanlar yazılımları kullanılarak titreşimle ilgili öngörüler için çok sayıda modal analiz çalışmaları yapılmıştır (Zou vd., 2023; Saxena & Parey, 2016; Jiang vd., 2019). Bu çalışmalarla dişli sistemlerinde rezonans durumundan kaçınmak hedeflenirken, olası yüksek titreşim çıktılarının azaltılmasına dair de ön çalışma çıktıları elde edilmiştir. Yapılan literatür taraması sonucunda özellikle analitik yöntemlerle yürütülen çalışmalarda gerçekçi öngörülerin geometri gibi parametrelerden kaynaklı eksik kaldığı görülmüştür. Analitik çalışmaları sayısal yöntemlerle destekleyen çalışmaların ise yapılan testlerle çok daha tutarlı olduğu görülmüştür. Bu sebeplerle çalışma yöntemi belirlenirken sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal metotların çalışmaya eklenmesine karar verilmiştir. Tüm bu araştırmaların diş kontak durumu, diş ve dişli gövde

deformasyonu ve titreşim durumlarının merkezinde kümелendiği görülmüştür. Standartlara bağlı kalınan geometrilerde ağırlık boşaltılması veya şaft delik çapının değiştirilmesi gibi uygulamalar daha yaygın iken, rim kalınlığı ve ağı kalınlığı değişikliklerinin daha az uygulandığı tespit edilmiştir. Belli bir parametrenin etkileri incelenirken bunun hem kontak durumları hem dış rijitliği hem de dinamik davranışlar açısından incelendiği detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada AGMA 2001 D04 standardına bağlı oluşturulmuş düz dişli çiftinin rim ve ağı kalınlıkları belli oranlarda değiştirilerek ortaya çıkan deformasyonlar gerekli rijitlik hesaplarında kullanılabilmesi için kayda alınmıştır. Kontak kaymalarına bağlı kuvvet dağılımı değişimleri incelenmiştir. Ayrıca geometri değişikliğinin dişlilerin doğal frekanslarına ne derece ve ne şekilde etki ettikleri araştırılmıştır. Bu yönleri ile bu çalışma literatüre bu önemli etkileri sistematik şekilde kazandırmakta ve tüm bu diğer çalışmaların yöntem olarak olabilecek en ortak kümesinde, en eksik görülen yönleri ile bir derleyici görevi görmektedir. Ayrıca bu çalışma benzer dişli kutusu tasarımlarında, dişli boyutlandırması ve MRB süreci yönetimi için referans alınabilecek önemli çıktılar sunmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada havacılık aksesuar dişli kutusu içerisinde yer alan ve birbirleri ile kontakta bulunan iki dişlinin geometrilerinde yapılacak değişikliklerin statik ve dinamik olarak o sisteme etkileri incelenmiştir. Bu inceleme sırasında geometrilerin oluşturulması için ANSYS sonlu elemanlar yazılımının alt bileşeni olan SpaceClaim kullanılmıştır. Ayrıca ANSYS yazılımının statik yapısal analiz alt birimi kullanılarak dişlilerin yük altında statik davranışları incelenmiştir. Bu inceleme sırasında her dişlinin kontak alanlarında meydana gelen radyal ve eksenel kaymalar ölçülmüştür. Ek olarak SpaceClaim içerisinde oluşturulmuş her geometrinin doğal frekansı ANSYS'in modal analiz alt biriminde çalışılarak bulunmuştur. Dişli sistemlerinin kontak durumlarının analitik çözümleri ise dişliler için özelleşmiş KissSoft yazılımında yapılmıştır. Yapılan çalışmanın akış şeması aşağıda Şekil 3.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Çalışma Akış Şeması

Geometrilere oluşturulurken en başta AGMA 2001 D04 standardına göre rim kalınlıkları ve ağı kalınlıkları belirlenmiştir. Devamında SpaceClaim içerisinde her iki geometrinin rim kalınlıkları ve ağı kalınlıkları beşer farklı ölçüde olacak şekilde yirmi beşer geometri oluşturulmuştur. Toplamda elde edilen elli geometri ANSYS yazılımı kullanılarak statik ve modal analizlere tabii tutulmuştur. Analizlerde kullanılacak meş yapısına karar vermek için örnek bir geometri ile meş yakınsama çalışmaları yapılmıştır. Dişlilerden biri iki farklı dişli kontağına maruz kalacak şekilde modellenirken diğer dişli ilk dişli ile kontağı haricinde bu dişlinin ortasında bulunan spline bölgesinden yük aktaracak şekilde modellenmiştir. Her iki dişli de dönme eksenlerinde yer alan ikişer rulmandan sınırlanmıştır. Bu çalışmada her bir dişli ayrı ayrı ele alınarak yalnızca kontak durumları incelenmiş, diş kontağında oluşacak sürtünmeler, yağlama koşulları ve dişli termal etkileri çalışma kapsamına dâhil edilmemiştir. Çalışma, statik yüklenme durumlarıyla sınırlıdır. Benzer şekilde, yüksek devirli ve düşük yüklü sistemler, fazla ısınmayı engellemek için diş kontağından yağlanmaktadır. Bu yağ sistem içerisinde toplanıp özel aksesuarlarca soğutulmakta ve tekrar yağlama sistemine verilmektedir.

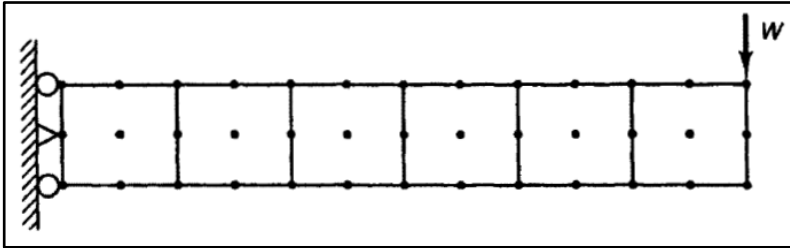
Dişlilerin rim kalınlıklarının ve ağı kalınlıklarının değişimine bağlı incelemeleri yapılmıştır. Bu incelemeler sırasında birbirleri ile olan kontaklarının bu ölçü farklılaşmalarından nasıl etkilendiği de çalışılmıştır. Modal analiz sonucu olarak çıkan frekans cevapları çizelge haline getirilerek yine bu ölçü değişimlerinin etkileri kapsamında yorumlanmıştır. Çalışma çıktıları ile bir aksesuar dişli kutusu tasarımı sürecinde bu ölçüler temel alınarak ne gibi değişiklikler ile sürecin daha az maliyetle yönetilebileceği üzerinde durulmuştur.

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve ANSYS

1906 yılı başlarında araştırmacıların gerilme analizleri için bir “örgü benzeşim” (lattice analogy) önermesi ile sonlu elemanlar yönteminin tarihi başlar. Bu yöntem, bir bütün parçanın elastik çubuklardan oluşturulmuş düzenli bir desen ile değiştirilmesi olarak tanımlanabilir. Buna göre, bütünü temsil eden desendeki her bir çubuğun katılık ve serbestlik değerleri temsil ettiği parçanın deformasyonunu da doğru tahmin edecek şekilde ayarlanır. Başlarda el hesapları ile daha basit geometrilerin çalışılması mümkün iken 1953 yılında mühendisler tarafından ilk kez

katılık denklemlerinin matris formatında dijital bilgisayarlarda yazılıp çözdürülmesi ile sonlu elemanlar yönteminde yeni bir çağ başlamıştır. 1960'lı ve 1970'li yıllarda bilgisayar teknolojisinin de gelişmesi ile sonlu elemanlar yöntemine dair çeşitli yazılımlar ortaya çıkmıştır. 1980'li yıllardan itibaren artık kişisel bilgisayarlarla da sonlu elemanlar yazılımı yapmak mümkün olmuştur. Bu gelişme de bu yöntemin ucuzlamasına ve yaygınlaşmasına imkân tanımıştır (Cook, 1989).

Sonlu elemanlar yönteminde parçayı temsil eden çubukların uç birleşim noktalarına düğüm noktaları denir. Düğüm noktaları arasında kalan kısım ise eleman olarak adlandırılır. İki boyutlu bir problemde oluşturulan sistemlerde düz bir çubuk geometrisi oluşturulursa arada kalan çubuk bölmeleri eleman olarak adlandırılır. Bir yüzey geometrisi oluşturulursa bu sefer düğüm noktaları arasında kalan yüzeyler eleman olur. Benzer şekilde üç boyutlu cisimlerin sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulması sonrası düğüm noktaları arasında kalan hacim eleman olarak adlandırılır. Tüm modelin elemanlarla ve düğüm noktaları ile örülmesine ağ yapısı, diğer adıyla meş (mesh) denir. Aşağıda Şekil 3.2'de iki boyutlu bir dikdörtgen parçanın dokuzar düğüm noktasından oluşan altı elemanlı ağ yapısı görülebilir (Bathe, 2016).



Şekil 3.2 İki Boyutlu Dikdörtgen Bir Parçanın Dokuzar Düğüm Noktalı Altı Elemanlı Ağ Yapısı [Bathe, 2016]

ANSYS yazılımı da bu prensipler üzerine çalışan bir sonlu elemanlar yazılımıdır. ANSYS firması 1970 yılında John Swanson tarafından SASI ismi ile kurulmuştur (Tascarella, 2019). Bu çalışmada ANSYS yazılımının statik yapısal analiz ve modal analiz modülleri kullanılmıştır. Bu tercihin sebebi dişli geometrileri gibi karmaşık yapıların analitik çözümlerinin hata paylarının yüksek kalması veya düşük hata payı ile çözümlenmelerinin çok zor olmasıdır.

ANSYS kendi içerisinde bulunan farklı hazırlayıcı ve çözücüler ile tasarım yapılan bütün endüstrilerin ihtiyaçlarına cevap vermektedir. SpaceClaim olarak adlandırılan alt bileşeni ile sıfırdan geometriler oluşturulabilir veya mevcut geometrilerde değişiklikler yapılabilir. Bu çalışmada da kullanılan geometriler SpaceClaim içerisinde oluşturulmuştur. ANSYS iki boyutlu geometriler oluşturulmasına imkân tanısa da çalışma çıktıları açısından tüm geometriler üç boyutlu oluşturulmuştur. Engineering Data bölümünde ise analizi yapılacak olan geometrilerin malzeme verileri analiz sırasında kullanılabilmesi için girdi yapılabilir. Statik yapısal analizlerde ve modal analizlerde malzemenin young's modulus ve poisson's ratio bilgileri kullanılarak katılık matrisleri oluşturulmaktadır. Bu çalışmada dişli endüstrisinde sıkça kullanılan 9310 çelik malzeme seçilmiş ve malzeme özellikleri ANSYS içerisinde bu kısma girilmiştir (AISI Inc.). Benzer yapılarda 9310 gibi çelikler yüksek yorulma ve akma dayanımları ile kontak bölgelerinde sertleştirmeye uygunlukları sebebiyle tercih edilmektedir. Aşağıda Çizelge 3.1 içerisinde 9310 çeliğinin malzeme özellikleri paylaşılmıştır.

Çizelge 3.1 Çelik 9310 Malzeme Özellikleri

	Büyüklik	Ölçü Birimi
Özkütle	7850	kg/m^3
Elastisite Modülü	200	GPa
Poisson Oranı	0,29	Birimsiz
Akma Sınırındaki Gerilme Direnci (YTS)	986	MPa
Azami Gerilme Direnci (UTS)	1234	MPa

Statik yapısal analiz alt kısmı ile ANSYS yazılımı tarafından statik yük altında bulunan cisimlerin deformasyon ve gerilme cevapları sunulmaktadır. Modal analiz alt kısmında ise cisimlerin doğal frekans cevapları çıkarılmaktadır. Her iki ANSYS modülü de kullanılarak hem statik hem de dinamik çıktılar bu çalışmada elde edilmiştir.

3.1.1. Statik analizler

Statik sonlu elemanlar analizi, çeşitli eleman tipleri ve yük koşulları için farklı formüller içerir. En temelde L uzunluğunda bir çubuk elemana uygulanan kuvvet sonucu ortaya çıkan deformasyon, gerilme ve kuvvetin saptanması gibi olgular formüllerle hesaplanır. Aşağıda eşitlik 3.1 – 3.4 ile bu temel formüller paylaşılmıştır (Fish & Belytschko, 2007).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.1)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.3)$$

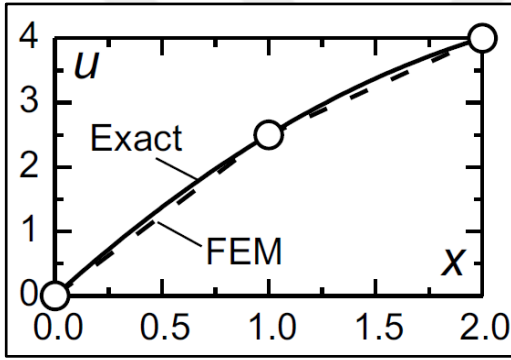
$$F = A \cdot \sigma \quad (3.4)$$

Bu formüller incelendiğinde ilk eşitlikte çubuk elemanda meydana gelen uzamanın o çubuğun ilk uzunluğuna oranından deformasyon bulunmuştur. İkinci eşitlikte ise kuvvetin çubuğun kesit alanına oranından o çubukta oluşan gerilme elde edilmiştir. Üçüncü eşitlik ise bize çubuğun deformasyonu ile malzemesinin elastisite modülünün çarpımından da gerilmenin elastik uzamalar için hesaplanabileceğini göstermiştir. Bu formül lineer elastik davranışlar için geçerli olup Hooke yasası olarak adlandırılmaktadır. Dördüncü formülde kesit alanı ile gerilme değerinin çarpımı sonucu burada uygulanan çekme kuvvetinin bulunabileceği paylaşılmıştır. Devamında Hooke yasası kullanılarak her bir elemanın rijitlik matrisi kurulur. Bir çubuk elemanın rijitlik matrisi aşağıda eşitlik 3.5 ile paylaşılmıştır. Bu eşitlikte birim matrisin elastisite modülüyle ve kesit alanıyla çarpıldığı, çubuk uzunluğuna ise bölüldüğü görülebilir.

$$[K] = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Bu formüller temel alınarak parça bütününi temsil eden bütün elemanlarda deformasyon tahmin edilmeye çalışılarak ortaya bir yakınsama çalışması çıkar. Bunun sonucunda da gerçek parçaların sayısız teste tabii tutulmasına gerek kalmaksızın güçlü tahminler oluşturulur. Sonlu elemanlar analizi bu yönüyle endüstrideki tasarım işlerine büyük ölçüde zaman ve maliyet kazancı olarak fayda sağlar.

Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.3) kesin (exact) çözüm ile ona yakınsama yapan sonlu elemanlar yöntemi (FEM) çözümü karşılaştırması gösterilmiştir (Nikishkov, 2004).



Şekil 3.3 Kesin Çözüm ve Sonlu Elemanlar Çözümü Kıyaslaması

Statik olarak elde edilen gerilmeler sünek malzemeler için von-Mises kriterine göre incelenir. Bu çalışmadaki gibi çok eksenli akma dayanımı kontrolünde de kullanılan bu kriterde tüm yönlerdeki doğrusal ve kesme gerilmeleri kullanılarak bir eşdeğer gerilme elde edilir. Çalışmaya konu olan sünek çelik malzemenin çok eksenli akma dayanımı kriteri olarak kullanılan von-Mises eşdeğer gerilme formülü aşağıdaki eşitlik 3.6 gibidir (Budynas & Nisbet, 2015).

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)]} \quad (3.6)$$

Bu eşitlikte eşdeğer (von-Mises) gerilmeyi elde etmek için, normal gerilmelerin farklarının karelerinin toplamı ile kayma gerilmelerinin karelerinin toplamının altı katının toplandığı, toplamın ikiye bölünüp çıkan sonucun karesinin alındığı görülebilir.

3.1.2. Modal analizler

Cisimlerin dinamik davranışlarını anlayabilmek adına onların titreşim frekanslarına ve mod hareketlerine bakılır. Dinamik denklemler en genel haliyle aşağıda gösterilen eşitlik 3.7'deki gibi kurulur.

$$M \cdot \ddot{q} + C \cdot \dot{q} + K \cdot q = 0 \quad (3.7)$$

Buna göre modal kütle matrisinin (M) ivme vektörü ($\ddot{q}$) ile çarpımı, modal sönümleme matrisinin (C) hız vektörü ($\dot{q}$) ile çarpımı ve modal rijitlik matrisinin (K) deplasman (q) vektörü ile çarpımı toplandığında sonuç sıfır olmaktadır. Buradaki modal kütle matrisleri aşağıdaki eşitlik 3.8 ile bulunur.

$$M_{ij} = \int_V \rho N_i N_j dV \quad (3.8)$$

Dolayısıyla modal kütle matrisi (M), N_i ve N_j eleman düğüm noktası mod fonksiyonlarına ve malzemenin özkütlesine (ρ) doğrudan bağlıdır. Modal rijitlik matrisi (K) ise aşağıdaki eşitlik 3.9'daki formül ile bulunur.

$$K_{ij} = \int_V B^T D B dV \quad (3.9)$$

Burada B ilgili elemanın gerilme deformasyon matrisini gösterirken, D ise malzeme elastisite matrisini göstermektedir. Son olarak da C ile gösterilen modal sönümleme matrisi genel olarak Rayleigh sönümleme modeliyle gösterilir. Buna göre sönüm katsayılarının kullanıldığı eşitlik 3.10 ortaya çıkar. Bu eşitlikte modal kütle matrisi ile ilk sönüm katsayısının (α) çarpımı ve modal rijitlik matrisi ile ikinci sönüm katsayısının (β) çarpımı toplanarak modal sönümleme matrisi (C) elde edilmiştir.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3.10)$$

Modal sertlik (k) ve modal kütle (m) kullanılarak ayrıca Hertz cinsinden modal frekanslar bulunabilir. Modal frekansların hesaplanması aşağıda eşitlik 3.11’de verilmiştir.

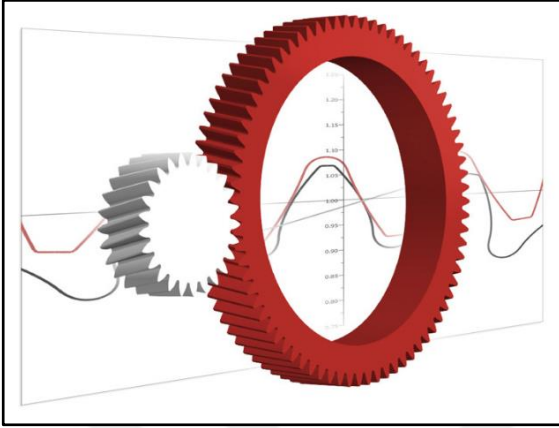
$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_i}{m_i}} \quad (3.11)$$

Böylece her bir mod frekansı ve düğüm noktalarına bağlı modal davranışlar hesaplanabilir. ANSYS gibi yazılımlar kullanılarak sayıları milyonlara varabilen düğüm noktalarından oluşan karmaşık yapılar için modal analizler gerçekleştirilebilmektedir (Han vd., 2017).

3.2. Analitik Çözüm Yöntemi ve KissSoft

Bu çalışma sırasında sonlu elemanlar analizlerinin yanı sıra analitik çözüm yöntemlerine de başvurulmuştur. Analitik çözüm yöntemi basit problemler için uygulanabilen tek adımlı çözüm yöntemleridir. Nümerik yöntemlerde tahmin ve düzeltmelerle sürekli bir yakınsama içerisinde sayısız analitik çözüm uygulanırken analitik çözümler yalnızca tek adımda doğrudan sonuca varma yöntemi olarak kullanılırlar. Bu sebeple de karmaşık problemlerde hata payı yüksek olabilmektedir. Bu çalışmada da analitik yöntem kullanılırken girdi sağlanan verilerin olabildiğince doğruya yakınsaması sonlu elemanlar nümerik yöntemi ile sağlanmıştır. Bölüm 3.4. içerisinde anlatıldığı gibi bu nümerik yöntemin en az hata ile çözdürülmesi için belirli yakınsama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

KissSoft programı 1980’li yılların başında İsviçre Zürih’te bulunan L. Kissling & Co. AG firmasının bünyesinde geliştirilmiştir. Kiss güç aktarım elemanları için geliştirilmiş bir yazılımdır. Havacılık, otomotiv, saat, enerji, yarış sporları ve tarım gibi pek çok endüstride kullanılan güç aktarım elemanlarının tasarımı bu program kullanılmaktadır. Güç aktarım elemanları kayış kasnaklı yapılar olabildiği gibi dişli bağlantılı yapılar da olabilmektedir (KissSoft). Bu çalışmada da KissSoft programının analitik olarak çözüm sağladığı kontak kayma kuvvet dağılımı hesaplama özelliği kullanılmıştır. Aşağıda Şekil 3.4’te KissSoft yazılımının dişli kontak incelemesini anlatan bir görsel paylaşılmıştır (KissSoft).



Şekil 3.4 KissSoft Yazılımı Kntak Durum İncelemesi Tanıtım Görseli

3.3. Geometrilerin Oluşturulması

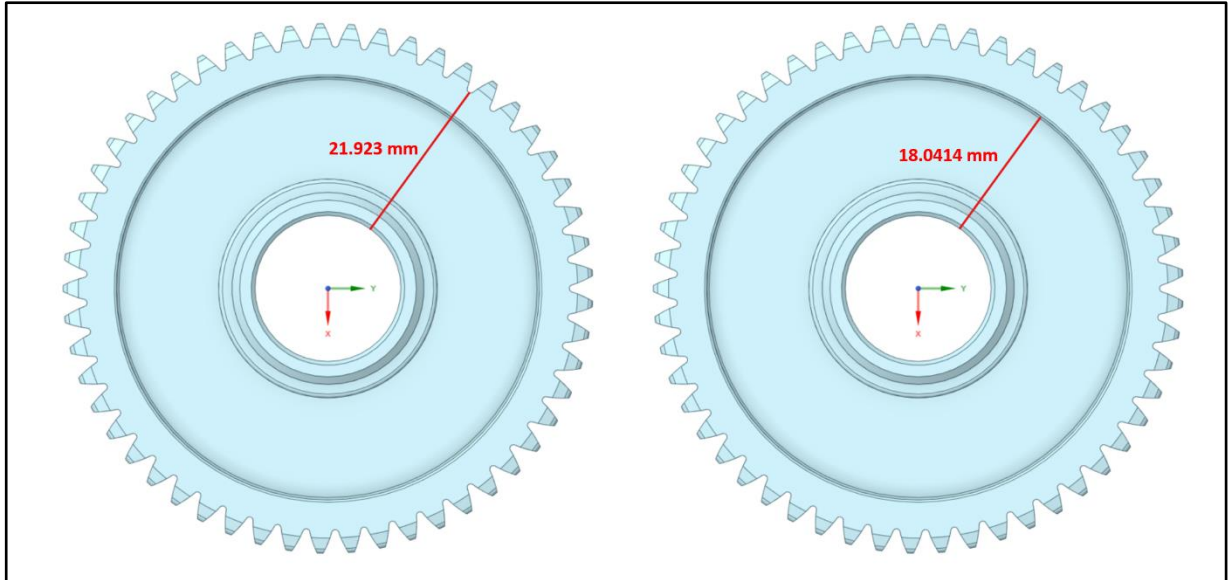
Sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS üzerinde detaylı statik ve dinamik analizler yapılabilmesi için her iki dişlinin farklılaşmış geometrileri oluşturulmuştur. İlk olarak eldeki geometrik kısıtlar sürülecek olan aksesuarlara ve onların yerleşimlerine göre ele alınmış ve dişlilerin çapları kabaca belirlenmiştir. Burada temel alınan unsurlar turboşaft motor ile aksesuarlar arasında yer alacak ve güç aktarımını sağlayacak olan aksesuar dişli kutusunun sürdüğü aksesuarların güç çekiş ihtiyaçlarıdır. Gerekli tork ve dönüş hızı bu güç çekişlerine göre hesaplanmaktadır. Devamında dişli oranı olarak da adlandırılan “*hunting ratio*” göz önünde bulundurularak her bir şaftın diş sayıları belirlenmiştir. Buradaki yaklaşım her iki dişlinin diş sayılarının aralarında asal olmasıdır. Bu şekilde seçilmesindeki amaç da her iki dişli çalışırken tüm dişlere eşit sayıda kontak dağıtılması ve herhangi bir diş grubunun daha hızlı yorulmasının engellenmesidir. Örnek olarak 24 dişe sahip bir dişli ile 48 dişe sahip bir dişli ele alınırsa, 24 dişe sahip olan dişlinin her bir dişi 48 dişe sahip olan dişlinin iki dişinden birine eşleşecektir. Diğer diş ise hiç temasa girmeyecektir. Böylece 48 dişe sahip dişlinin 24 dişi işlevsiz olacaktır. 48 dişe sahip dişlinin tüm dişlerine kontak dağıtılabilmesi durumunda her döngüde farklı bir grup kombinasyonu çalıştırılacak ve dişlinin ömrü iyileştirilmiş olacaktır. Benzer şekilde 55 diş ve 60 diş seçildiğinde yine aralarında asal olmadıkları için dişlilerin çalışmaları sırasında tüm dişlere eşit kontak sayısı dağılmamakta, bazı dişler daha çok kontağa girerken bazı dişler daha az kontağa girmektedir. Dişlerde olabildiğince eşit yeme ve hasar dağıtma sağlayabilmek için

diş sayıları aralarında asal seçilmektedir. Bu çalışmada da bir dişlinin diş sayısı 53 seçilirken diğeri 76 seçilmiştir. Ardından her iki dişlinin rim kalınlığı ve ağ kalınlığı AGMA 2001 D04 standardına göre belirlenmiştir. Kısaca Z53 ve Z76 olarak isimlendirilen, Z53 dişli şaft sistemi ile Z76 dişli şaft sistemi geometrileri bu standarda göre üç boyutlu olarak çizildiğinde aşağıdaki kalınlık değerleri elde edilmiştir (Tata, 2012). EK AÇIKLAMALAR kısmında EK 1 olarak verilen grafik üzerinde rim kalınlığının diş kalınlığına oranı olan mb değeri standarda uygunluk açısından 2 olarak seçilmiştir. Rim kalınlığına dair genel pratik bilgi olarak bu seçim yapılmıştır. Diş yapılarında ise herhangi bir profil kaydırma bulunmamakta, 22,5 derece basınç açısına sahip evolvent profiller kullanılmaktadır. Aşağıdaki Çizelge 3.2 içerisinde Z53 ve Z76 dişlilerinin bu standarda göre çizildiğinde elde edilen rim kalınlığı ve ağ kalınlığı değerleri paylaşılmıştır.

Çizelge 3.2 Z53 ve Z76 Dişlilerinin AGMA 2001 D04 Standardında Rim ve Ağ Kalınlıkları

	Nominal Rim Kalınlığı [mm]	Nominal Ağ Kalınlığı [mm]
Z53 Dişlisi	3,8816	2,0000
Z76 Dişlisi	3,8900	1,7500

Z53 dişli parçasının AGMA 2001 D04 standartlarına göre çizilmiş geometrisindeki rim kalınlığı aşağıdaki gibi gösterilmiştir (Şekil 3.5).

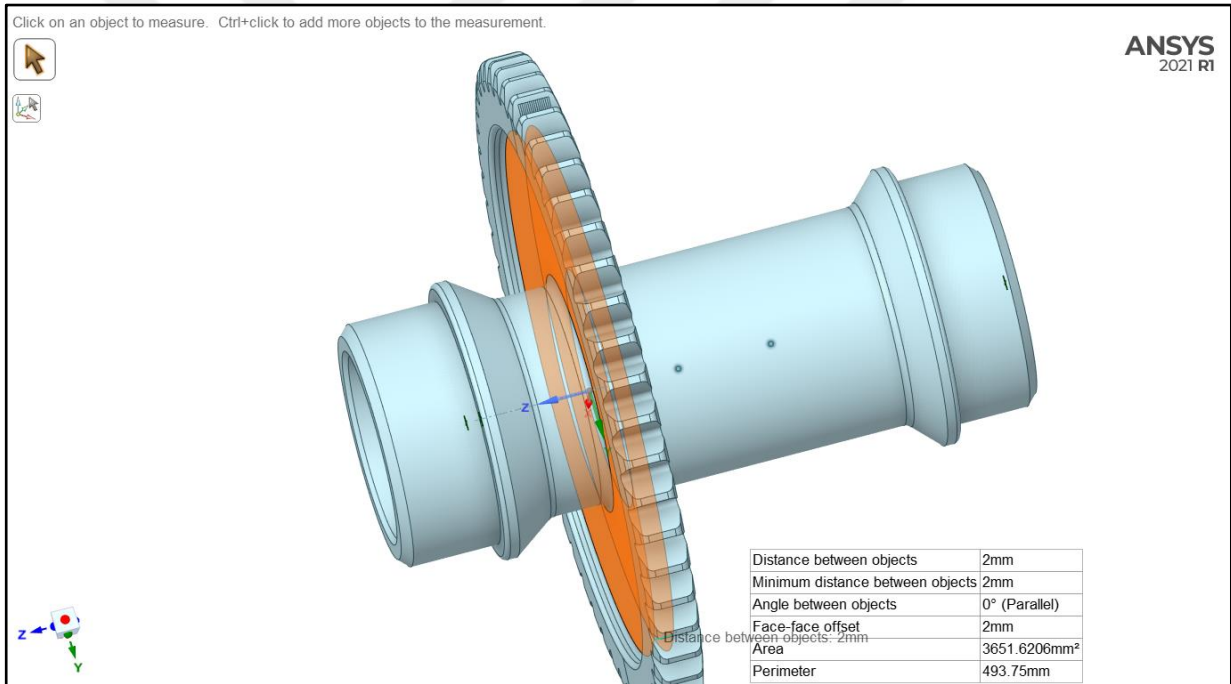


Şekil 3.5 Z53 Dişlisi Rim Kalınlığı Gösterimi

Buna göre ölçülen uzaklıklar arasında aşağıdaki eşitlik 3.12'deki gibi bir fark işlemi yapıldığında diş dibinde yer alan ve ağ yapısından daha kalın olan rim yapısının kalınlığı 3,8816 mm olarak bulunmaktadır.

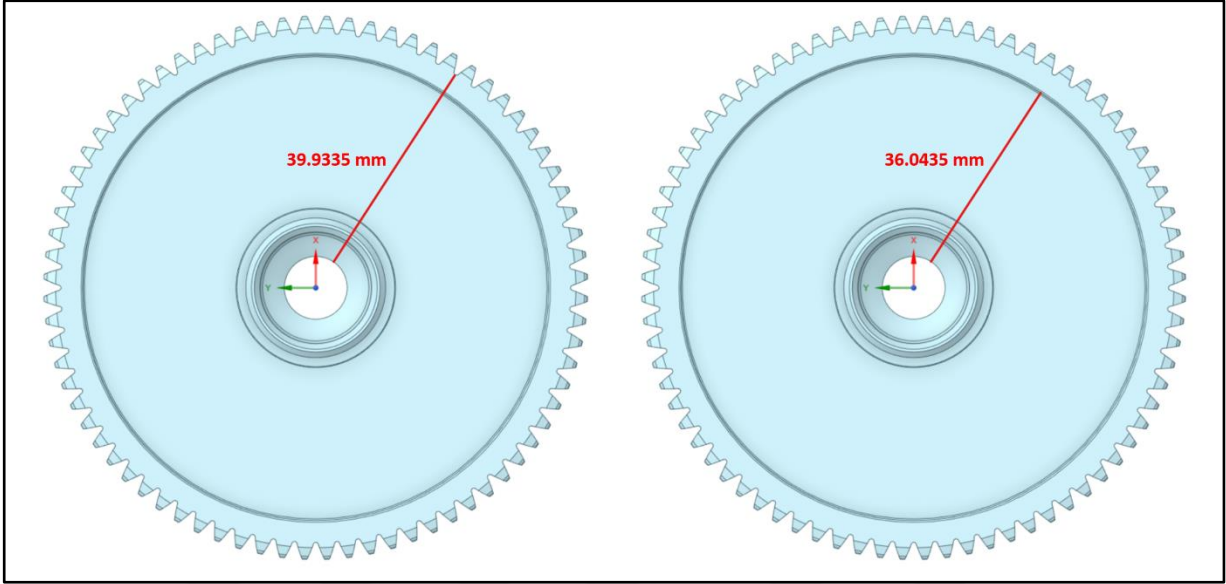
$$21,923 \text{ mm} - 18,0414 \text{ mm} = 3,8816 \text{ mm} \quad (3.12)$$

Z53 dişlisinin ilgili standarda göre çizilmiş geometrisindeki ağ kalınlığı aşağıda yer alan Şekil 3.6'daki gibi gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Z53 Dişlisi Ağ Kalınlığı Gösterimi

Benzer şekilde Z76 dişli parçasının AGMA 2001 standartlarına göre çizilmiş geometrisindeki rim kalınlığı aşağıdaki gibi Şekil 3.7 ile gösterilmiştir.

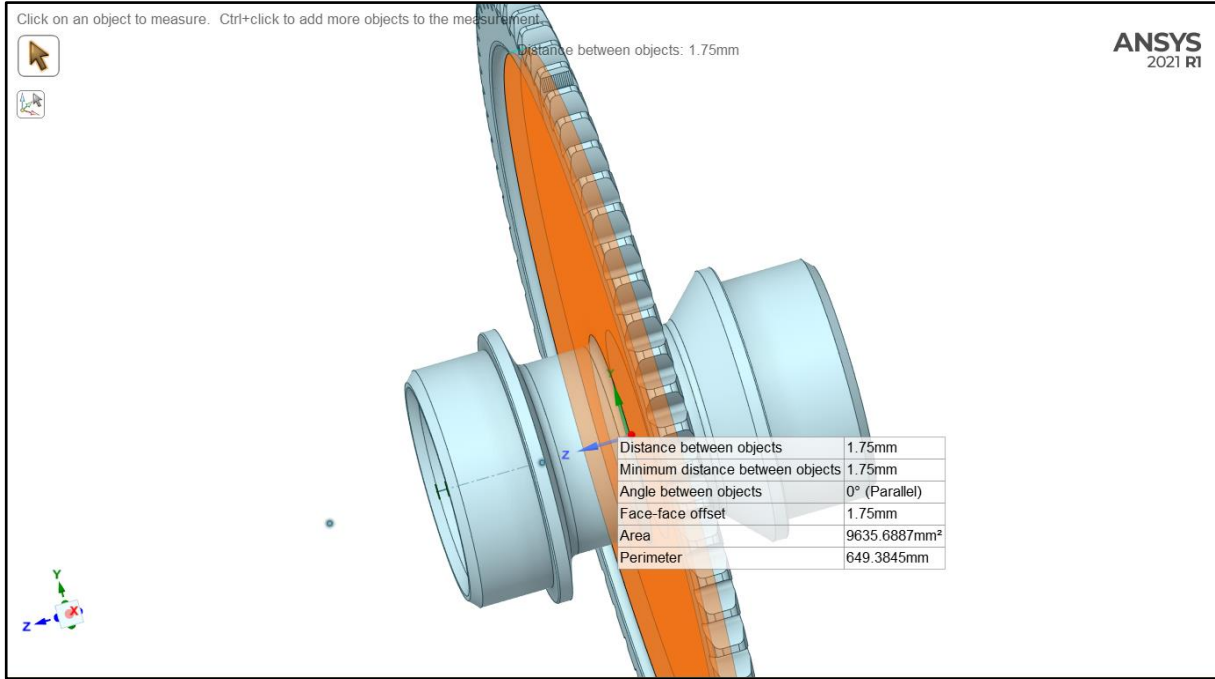


Şekil 3.7 Z76 Dişlisi Rim Kalınlığı Gösterimi

Buna göre ölçülen uzaklıklar arasında aşağıdaki eşitlik 3.13'teki gibi bir fark işlemi yapıldığında 3,89 mm rim kalınlığı değerine ulaşılmaktadır.

$$39,9335 \text{ mm} - 36,0435 \text{ mm} = 3,8816 \text{ mm} \quad (3.13)$$

Z76 dişlisinin ağ kalınlığı da Şekil 3.8 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Z76 Dişlisi Ağ Kalınlığı Gösterimi

Hem Z53 hem de Z76 dişlilerinin rim ve ağ kalınlıkları, yukarıda Çizelge 3.1 ile gösterilen standart değerlerinden %10 uzaklaşacak şekilde 2 değer altında ve 2 değer üstünde hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplama sonucunda Z53 ve Z76 dişlilerinin rim ve ağ kalınlıkları için aşağıdaki çizelgelerde gösterilen değerler elde edilmiştir (Çizelge 3.3 - Çizelge 3.6).

Çizelge 3.3 Z53 Dişlileri Ağ Kalınlıkları

	Z53 Dişlileri Ağ Kalınlık Konfigürasyonları				
	W1	W2	W3	W4	W5
	-20%	-10%	0	10%	20%
Ağ Kalınlıkları [mm]	1,6000	1,8000	2,0000	2,2000	2,4000

Çizelge 3.4 Z53 Dişlileri Rim Kalınlıkları

	Z53 Dişlileri Rim Kalınlık Konfigürasyonları				
	R1	R2	R3	R4	R5
	-20%	-10%	0	10%	20%
Rim Kalınlıkları [mm]	3,10528	3,49344	3,8816	4,26976	4,65792

Çizelge 3.5 Z76 Dişlileri Ağ Kalınlıkları

	Z76 Dişlileri Ağ Kalınlık Konfigürasyonları				
	W1	W2	W3	W4	W5
	-20%	-10%	0	10%	20%
Ağ Kalınlıkları [mm]	1,4000	1,5750	1,7500	1,9250	2,1000

Çizelge 3.6 Z76 Dişlileri Rim Kalınlıkları

	Z76 Dişlileri Rim Kalınlık Konfigürasyonları				
	R1	R2	R3	R4	R5
	-20%	-10%	0	10%	20%
Rim Kalınlıkları [mm]	3,1120	3,5010	3,8900	4,2790	4,6680

Yukarıdaki çizelgelerde de görülebileceği gibi ağ kalınlıkları adlandırılırken en inceden en kalına sırasıyla W1, W2, W3, W4 ve W5 olarak gösterimler kullanılmıştır. Bu adlandırmada W harfinin seçilmesinde İngilizce’de ‘web’ olan ağ kelimesinin ilk harfinin olması etkili olmuştur. Benzer şekilde aslen İngilizce olan ‘rim’ kelimesinin de ilk harfi rim kalınlıkları için kullanılmıştır. Rim kalınlıkları inceden kalına doğru sırasıyla R1, R2, R3, R4 ve R5 olarak adlandırılmıştır.

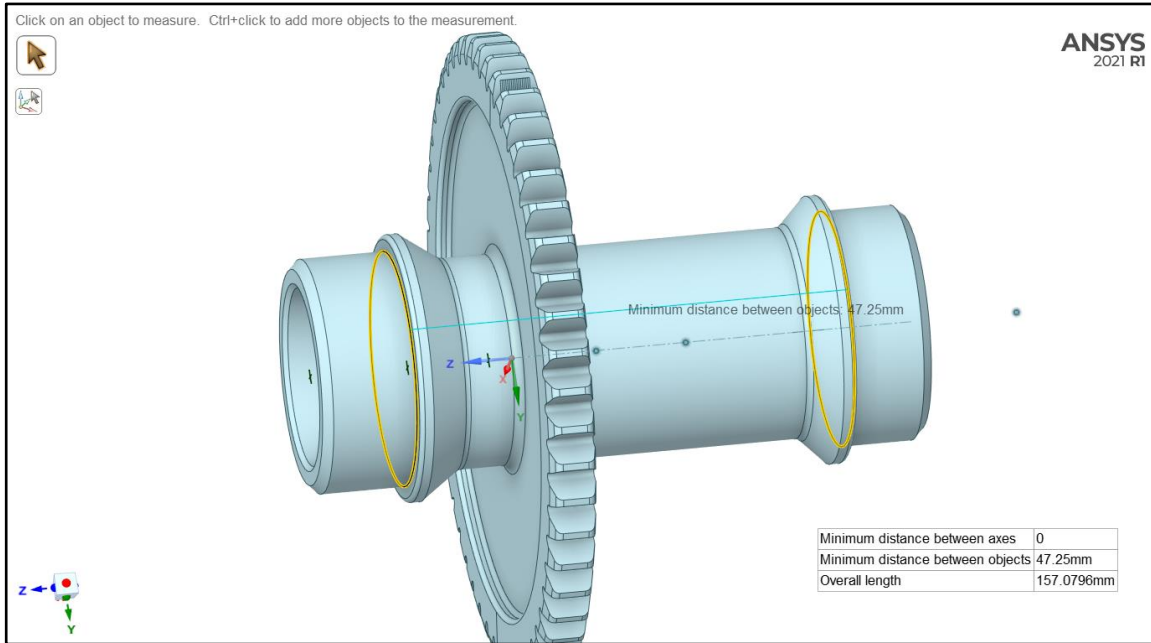
Z53 ve Z76 dişlilerinin ağ ve rim kalınlıkları beşer farklı değerde hesaplandıktan sonra (kalınlığın %80’i, %90’ı, %100’ü, %110’u ve %120’si) her iki değişkenin bir arada bulunduğu kombinasyon geometriler oluşturulmuştur. Buna göre Z53 dişlisinin ağ kalınlığı beş değişkene sahip iken rim kalınlığı da beş değişkene sahiptir. Buradan 25 farklı geometri türetilmektedir. Aynı şekilde Z76 dişlisi için de 25 farklı geometri türetilmiştir. Toplam 50 farklı geometri üç boyutlu olarak oluşturulmuştur. Bu 50 geometri isimlendirilirken yukarıda anlatıldığı gibi ağ ve rim kalınlıklarının değerlerine göre W ve R harfleri numaralandırılarak isimlendirme yapılmıştır. AGMA 2001 D04 standardına göre çizilen nominal geometrilerin isimleri sırasıyla Z53_W3_R3 ve Z76_W3_R3 şeklindedir. W ve R harflerinin yanına gelen 3 sayısı orta değer olduğunu, bir başka deyişle %100 standart değerinde olduğunu göstermektedir. Bu sayı 1 iken standart kalınlığın %80 seviyesine, 2 iken bu kalınlığın %90 seviyesine tekabül etmektedir. Benzer şekilde standarttan daha kalın olan ağ ve rim yapıları için 4 sayısı standart kalınlığın

%110 seviyesine ve 5 sayısı bu kalınlığın %120 seviyesine denk gelmektedir. Aşağıda Çizelge 3.7’de tüm 50 geometrinin isimleri bir arada verilmiştir.

Çizelge 3.7 Z53 ve Z76 Dişlilerin Tüm Geometri Konfigürasyonlarının Adlandırılması

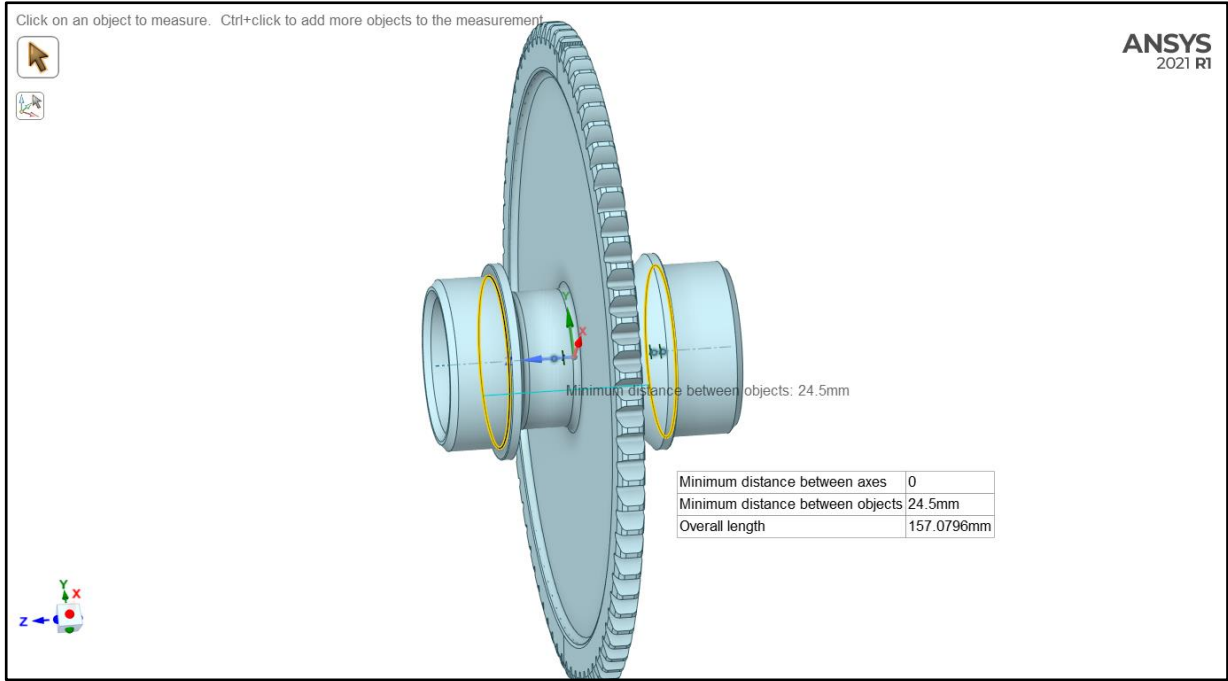
Ağ Kalınlığı Değişim Yönü	Rim Kalınlığı Değişim Yönü				
	Z53_W1_R1	Z53_W1_R2	Z53_W1_R3	Z53_W1_R4	Z53_W1_R5
	Z53_W2_R1	Z53_W2_R2	Z53_W2_R3	Z53_W2_R4	Z53_W2_R5
	Z53_W3_R1	Z53_W3_R2	Z53_W3_R3	Z53_W3_R4	Z53_W3_R5
	Z53_W4_R1	Z53_W4_R2	Z53_W4_R3	Z53_W4_R4	Z53_W4_R5
	Z53_W5_R1	Z53_W5_R2	Z53_W5_R3	Z53_W5_R4	Z53_W5_R5
Ağ Kalınlığı Değişim Yönü	Rim Kalınlığı Değişim Yönü				
	Z76_W1_R1	Z76_W1_R2	Z76_W1_R3	Z76_W1_R4	Z76_W1_R5
	Z76_W2_R1	Z76_W2_R2	Z76_W2_R3	Z76_W2_R4	Z76_W2_R5
	Z76_W3_R1	Z76_W3_R2	Z76_W3_R3	Z76_W3_R4	Z76_W3_R5
	Z76_W4_R1	Z76_W4_R2	Z76_W4_R3	Z76_W4_R4	Z76_W4_R5
	Z76_W5_R1	Z76_W5_R2	Z76_W5_R3	Z76_W5_R4	Z76_W5_R5

Ağ ve rim kalınlıkları haricinde en genel olarak bu her iki dişlinin rulman yataklama yüzeyleri arasındaki mesafeler ile kontak yüzeyleri bu çalışma için önem arz etmektedir. Buna göre Z53 dişlisinin rulman ara yüz yüzeyleri arasındaki mesafe 47,25 mm olarak aşağıda Şekil 3.9 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Z53 Dişlisi Rulman Yatakları Arası Mesafesi

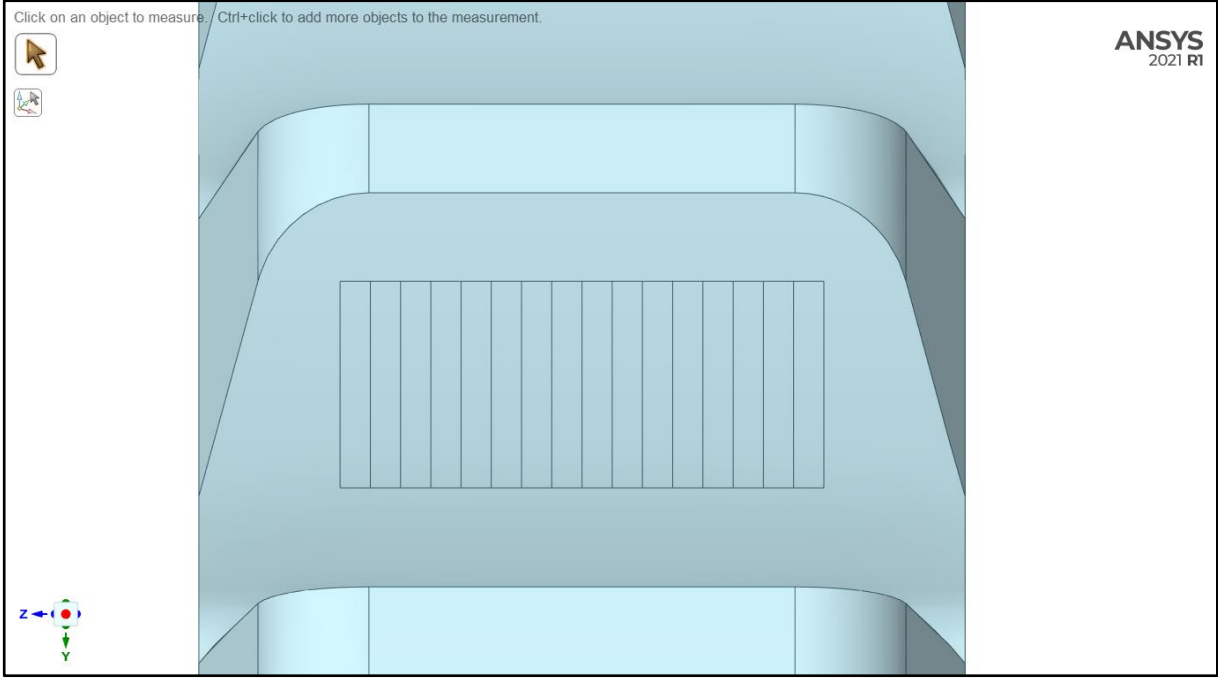
Z76 dişlisinin rulman ara yüz yüzeyleri arasındaki mesafe 24,5 mm olarak Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Z76 Dişlisi Rulman Yatakları Arası Mesafe

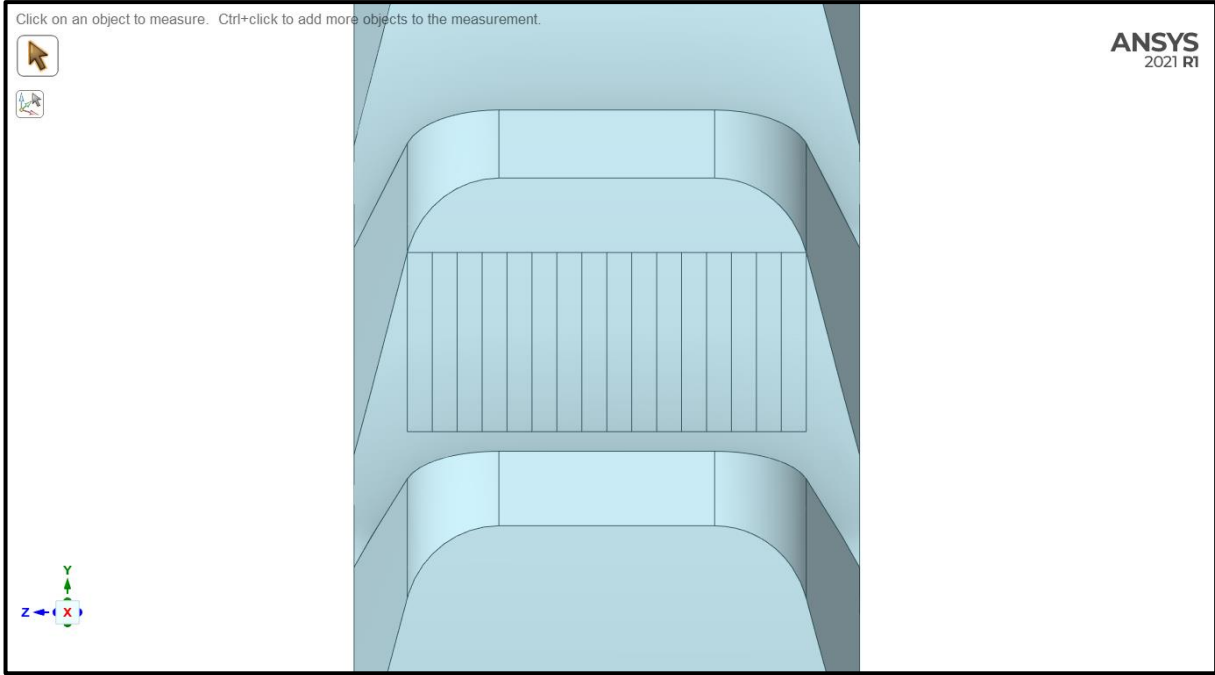
Z53 ve Z76 dişlilerinin statik analizlerinde kontak kuvvetlerini uygulayabilmek adına bu iki dişlinin anlık olarak yalnızca birer diş ile kontakta olduğu varsayımı ile daha sağlamcı bir metot izlenmiştir. Bu kuvvetlerin uygulanması için kontak temasının daha çok yoğunlaştığı dikdörtgensel bölgeler kontaktaki dişin yüzeyinde belirlenmiştir. Bu belirleme esnasında KissSoft yazılımının kontak kuvvet dağılımı görselinden de yararlanılmıştır. Devamında bu alanlar 16 dikey sütuna bölünmüştür. Alanlara bölmedeki amaç ise statik yüklenme sonucu dişli gövde deformasyonu ile ortaya çıkacak kontak kaymalarını olabildiğince doğru şekilde okuyabilmektir.

Z53 dişlisinin kontak alanı 16 farklı dikey alana bölünmüş haliyle Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Z53 Dişlisi Kontak Alanı 16 Dikey Kesit Alanına Bölünmüş Haliyle Gösterimi

Z76 dişlisinin kontak alanı 16 farklı dikey alana bölünmüş haliyle Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Z76 Dişlisi Kontak Alanı 16 Dikey Kesit Alanına Bölünmüş Haliyle Gösterimi

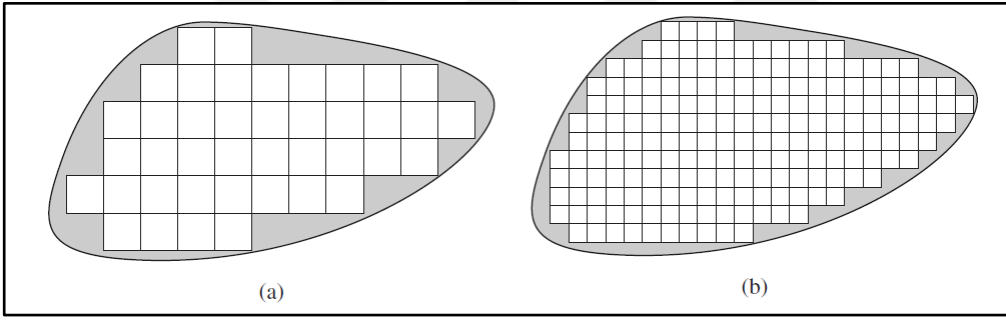
Analizlerde kullanılan modeller üzerinden ayrıca ağırlık değişimi çalışması yapılmıştır. Bu çalışmanın çıktıları Ek Açıklama-D bölümünde bir tablo olarak paylaşılmıştır. Bu tablo referans alınarak her bir rim ve ağı kalınlığı değişiminin kütlede ne kadar fark yarattığı anlaşılabilir. AGMA 2001-D04 referansı ile çizilen standart Z53 ve Z76 dişlileri (W3 ağı kalınlığı ve R3 rim kalınlığı ile) bu tablodaki kütle değişimlerini göstermede temel alınmıştır.

3.4. Meş Yakınsama Çalışmaları

Yapılacak shaft yapısal analizlerinin sonuçlarına güvenilirliğin sağlanabilmesi adına öncesinde meş yakınsama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu yakınsama çalışması yapılırken belirli yükler altında farklı meş eleman boyutları ve farklı eleman dereceleri kullanılmıştır. Eleman boyu küçüldükçe meşin daha ince yapılması meş yapısı ile temsil edilen geometriye

olabildiğince yakın bir ağ yapısı örmek için önemlidir. Aşağıdaki Şekil 3.13'te bu durum gösterilmiştir (Hutton, 2004).

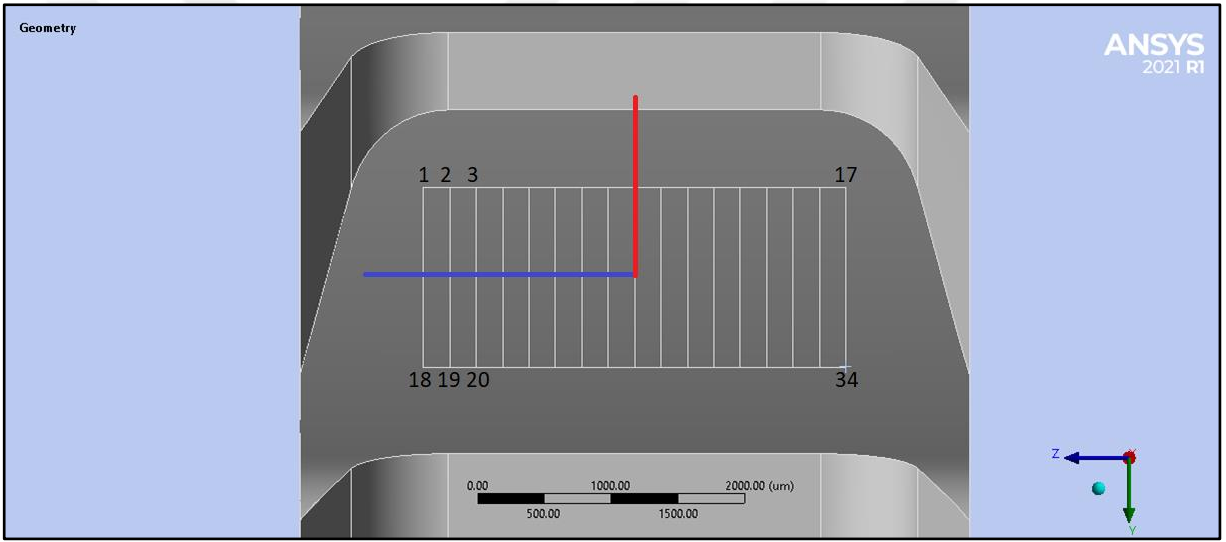
Tüm meş yakınsama çalışmasında ve kullanılması kararlaştırılan nihai meş yapısı için düzgün dörtgenli elemanlar kullanılmıştır. Bunun sebebi de görece karmaşık yapıda olan ve radyuslar barındıran geometrinin en doğru şekilde meşlenmesidir. Meş yapısı oluşturulurken “adaptive” seçeneği ile geometride ince noktaların ve ince geçişlerin iyi oluşturulması amaçlanmıştır. Eleman büyüme oranı 1,2 olarak kısıtlanmıştır. Böylece daha kaliteli bir meş yapısı oluşturulmuştur. Kullanılan elemanlar ikinci dereceden seçilerek daha hızlı yakınsama sağlanmıştır.



Şekil 3.13 (a) Kıvrımlı Bir Sınır Alanı 41 Kare Eleman ile Modelenmiş ve Taralı Alanlar Modele Dahil Değil (b) Sonlu Elemanlar Meşinin İnceltilmesi Sonucu 192 Kare Eleman ile Modele Dahil Olmayan Alanda Azalma

Çalışmalar için öncelikle doğrusal elemanlar kullanılarak meş atılmıştır. Devamında ikinci dereceden elemanlar kullanılarak meş atılmıştır. Yeterli iyileşme görülemediği için meş boyutlandırma ayarlarından “Transition” seçeneği “Slow” olarak tanımlanırken “Span Angle Center” seçeneği “Fine” olarak seçilmiştir. Düz dişli kontağından uygulanacak teğetsel kuvvet bileşeninin yaratacağı burulma ile şaftta meydana gelecek eksenel kısalma göz önünde bulundurularak rulman yüzeylerinden birine eksenel serbestlik tanımlanmıştır. Tüm bu ayarlar belirlendikten sonra meş yapısı oluşturmak için sırasıyla 3 mm, 2 mm, 1,5 mm, 1 mm, 0,8 mm, 0,6 mm, 0,4 mm eleman boyutları kullanılmıştır. Elde edilen deformasyon ve gerilme sonuçları yakınsama durumu açısından incelenmiştir. Analizler sırasıyla gerçekleştirilmiş olup her seferinde eleman boyu daha küçük seçilmiştir. Buna göre en son bakılan deformasyon ve

gerilme değerlerinde bir öncekine göre %5'ten daha yüksek bir fark görülmemesi hedeflenmiştir. Meş yakınsama çalışmalarında deformasyon miktarları kontak yüzeylerinden okunmuştur. Gerilmeler ise shaftın farklı meş yapılarıyla her adımda ağ yüzeylerinde görülen en yüksek gerilmeler seçilerek bu yakınsama çalışmasında değerlendirilmiştir. Kontak yüzeyinin köşe noktaları Şekil 3.14'teki gibi numaralandırılmıştır. Kırmızı ile gösterilen eksen radyal eksen olup dönme merkezinden dışarı doğrudur. Mavi eksen ise dönme eksenine paralel yönü göstermektedir.



Şekil 3.14 Kontak Yüzeyi Numaralandırma Yöntemi ve Deformasyon Okuma Eksenleri

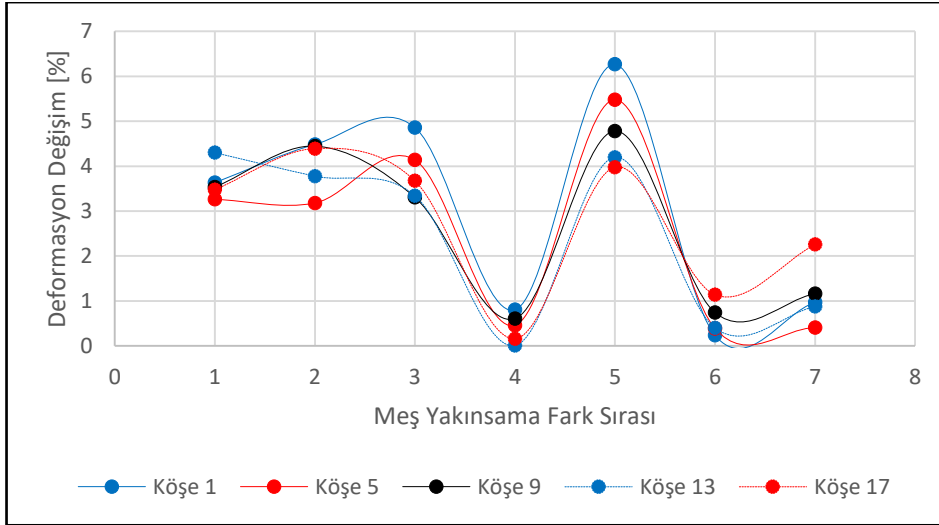
Bu şekilde 1, 5, 9, 13 ve 17 numaralı köşelerden her iki eksende okunan deformasyon miktarları yakınsama amaçlı incelenmiştir. Aksesuar güç çekişlerine göre dönüş hızı göz önünde bulundurularak statik olarak aktarılan yükler altında bu inceleme yapılmıştır. Bölüm 3.5. Sınır ve Yük Koşulları içerisinde bu yükler verilmiştir. Buna göre aşağıdaki Çizelge 3.8 oluşturulmuştur.

Çizelge 3.8 Meş Yakınsama Çalışmaları Deformasyon Çıktıları

		Köşe 1		Köşe 5		Köşe 9		Köşe 13		Köşe 17	
	Meş Eleman Boyu	Deformasyon [μm]	Değişim [%]	Deformasyon [μm]	Değişim [%]	Deformasyon [μm]	Değişim [%]	Deformasyon [μm]	Değişim [%]	Deformasyon [μm]	Değişim [%]
Radyal X Eksen	Varsayılan	-0,08409		-0,09351		-0,09457		-0,09448		-0,08687	
	3 mm	-0,08715	3,63	-0,09656	3,26	-0,09791	3,54	-0,09855	4,30	-0,08989	3,48
	2 mm	-0,08324	4,48	-0,09349	3,18	-0,09356	4,45	-0,09482	3,78	-0,08594	4,39
	1,5 mm	-0,08729	4,86	-0,09736	4,14	-0,09665	3,31	-0,09799	3,34	-0,08910	3,67
	1 mm	-0,08799	0,80	-0,09781	0,46	-0,09724	0,61	-0,09800	0,01	-0,08896	0,16
	0,8 mm	-0,08247	6,27	-0,09245	5,48	-0,09259	4,78	-0,09389	4,20	-0,08542	3,98
	0,6 mm	-0,08267	0,23	-0,09209	0,39	-0,09327	0,74	-0,09426	0,40	-0,08639	1,14
	0,4 mm	-0,08187	0,97	-0,09172	0,41	-0,09219	1,16	-0,09343	0,88	-0,08444	2,26
	Varsayılan	-0,07119		-0,05078		-0,02739		-0,00429		0,01655	
Eksenel Z Eksen	3 mm	-0,07222	1,44	-0,05091	0,27	-0,02785	1,67	-0,00492	14,57	0,01628	1,63
	2 mm	-0,07167	0,77	-0,05080	0,22	-0,02764	0,75	-0,00466	5,28	0,01640	0,73
	1,5 mm	-0,07184	0,25	-0,05062	0,35	-0,02776	0,43	-0,00494	6,14	0,01632	0,49
	1 mm	-0,07184	0,01	-0,05085	0,45	-0,02766	0,34	-0,00448	9,40	0,01608	1,46
	0,8 mm	-0,07203	0,28	-0,05136	1,00	-0,02818	1,88	-0,00490	9,32	0,01593	0,93
	0,6 mm	-0,07216	0,17	-0,05121	0,30	-0,02784	1,23	-0,00437	10,78	0,01658	4,06
	0,4 mm	-0,07258	0,59	-0,05135	0,27	-0,02785	0,06	-0,00431	1,26	0,01657	0,06

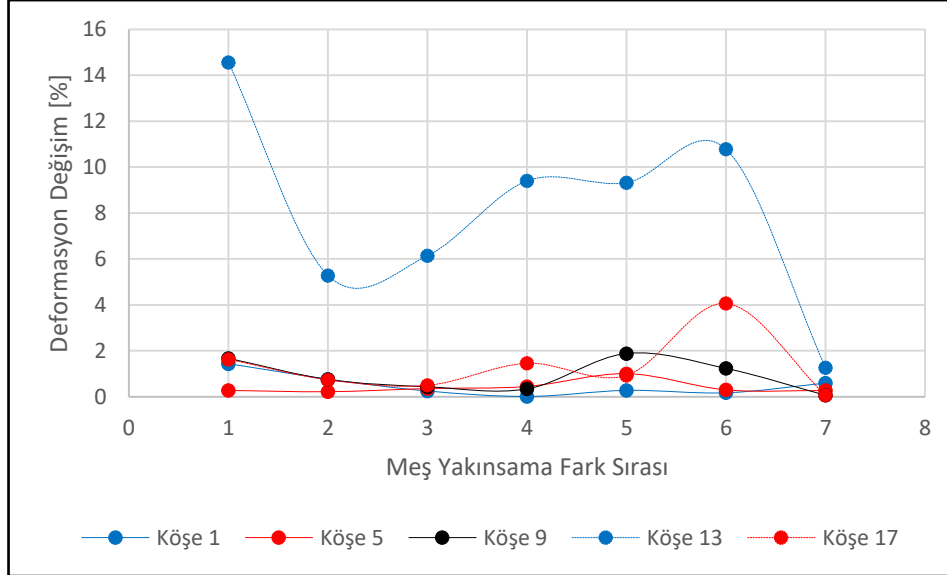
Yukarıdaki çizelgede de görülebileceği gibi radyal yönde deformasyon yakınsamasında daha fazla dalgalanma olmuştur. Öte yandan 13. köşe haricinde hiçbir köşede eksenel yönde %5'in üzerinde bir değişim bu yakınsama çalışması boyunca görülmemiştir.

Radyal eksenle yapılan her ölçüm ile bir önceki ölçümün arasındaki farkın yüzde cinsinden değerleri grafik haline getirildiğinde aşağıda Şekil 3.15'teki gibi görülmektedir.



Şekil 3.15 Radyal Deformasyon Yüzde Cinsinden Değişim Grafiği

Eksenel ekseninde yapılan her ölçüm ile bir önceki ölçümün arasındaki farkın yüzde cinsinden değerleri grafik haline getirildiğinde aşağıda Şekil 3.16'daki gibi görülmektedir.



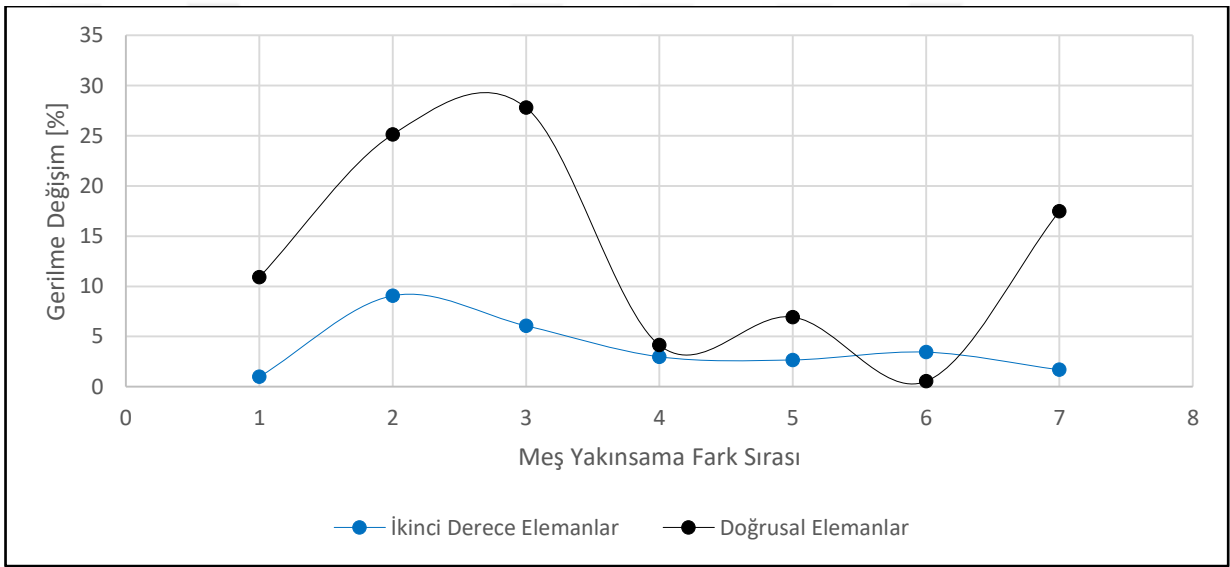
Şekil 3.16 Eksenel Deformasyon Yüzde Cinsinden Değişim Grafiği

İkinci dereceden elemanlarla yapılan deformasyonun yanı sıra dişli parçasının ağ bölgesinin her iki yüzeyinde meydana gelen gerilmeler incelenerek de bir yakınsama çalışması yapılmıştır. Hem doğrusal elemanlarla hem de ikinci dereceden elemanlarla kurulmuş olan modellerin analizleri sonucu bu ağ yüzeylerinde elde edilen gerilmeler eleman boyutu ile eşleştirilmiş şekilde aşağıdaki Çizelge 3.9'da verilmiştir. Bu gerilmeler ortalama yöntemle alınmış von-Mises gerilmeleri olup yalnızca parça üzerinde tespit edilen en yüksek değerler bu tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 3.9 Meş Yakınsama Çalışmaları Sırasında Ağ Yüzeylerinde Oluşan Gerilme Değerleri

İkinci Derece Eleman Meş Yapılı Ağ Yüzey Gerilmeleri		Doğrusal (Linear) Eleman Meş Yapılı Ağ Yüzey Gerilmeleri	
Meş Eleman Boyu	von-Mises (ortalama) Maksimum [MPa]	Meş Eleman Boyu	von-Mises (ortalama) Maksimum [MPa]
Varsayılan	54,596	Varsayılan	31,563
3 mm	54,061	3 mm	35,005
2 mm	58,959	2 mm	26,209
1,5 mm	55,382	1,5 mm	33,497
1 mm	53,732	1 mm	32,111
0,8 mm	55,164	0,8 mm	29,883
0,6 mm	57,062	0,6 mm	29,724
0,4 mm	58,021	0,4 mm	34,921

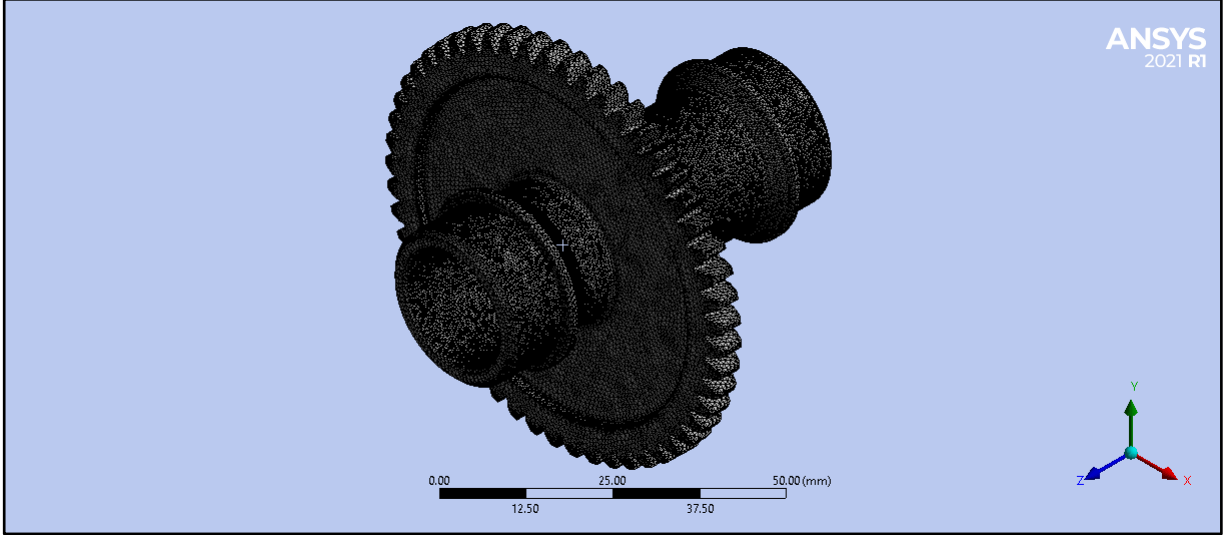
Bu çizelgede sıralanmış gerilme değerlerinin bir önceki gerilme değerinden ne kadar farklılaştığı yüzdelik cinsten hesaplanmıştır. Buna göre meş yakınsamasında %5'in altında kalınması kıstası aranmıştır. Doğrusal elemanlarla oluşturulan modelde incelenen farkların %5'in altında iki sıra üst üste kalamadığı görülmüştür. İkinci dereceden elemanlarla oluşturulan modelde ise 4. sıradan itibaren bu farkların %5'in üzerine çıkmadığı görülmüştür. Şekil 3.17'de doğrusal elemanlarla oluşturulan modelin ve ikinci dereceden elemanlarla oluşturulmuş modelin ağ yüzeylerindeki gerilme cinsinden yakınsama kıyaslaması verilmiştir.



Şekil 3.17 Ağ Gerilmeleri Cinsinden Doğrusal ve İkinci Dereceden Elemanlı Modellerin Yüzde Cinsinden Meş Yakınsama Kıyas Grafiği

Sonuç olarak ikinci dereceden elemanlarla oluşturulan ince meşli yapılar ile eleman boyutu yakınsama çalışmaları yürütülmüştür. Radyal deformasyon değişimleri incelendiğinde %5'in altında kalmaya başlanan 6. sıra bu modelin meş eleman boyutunun 0,6 mm olarak belirlenebileceğini anlatır. Ağ gerilmeleri farkları incelendiğindeyse 4. sıra bu modelin meş eleman boyutunu 1 mm olarak belirmemizde bir sakınca olmadığını göstermektedir. Öte yandan Çizelge 3.8'de yer alan eksenel deformasyonlarda oluşan farklara bakıldığında 6. sırada 13 numaralı köşede %10,78 değişim gözlenmiştir. Dolayısıyla tüm bu verilerin ortak şekilde yakınsama yaptıkları 7. sıra fark değişimine göre eleman boyutu 0,4 mm olarak belirlenmiştir.

Z53 W3 R3 olarak adlandırılan Z53 dişlisinin AGMA 2001 D04 standardına göre çizilmiş geometrisi ile yapılan meş yakınsama çalışmaları sonucunda 0,4 mm eleman boyutu kullanılması gerekliliği sonucu çıkmıştır. Aşağıda Şekil 3.18 ile bu geometrinin 0,4 mm eleman boyutu ile “Transition” seçeneğinin “Slow” olarak belirlenmiş, “Span Angle Center” seçeneğinin “Fine” olarak belirlenmiş meş geometrisi gösterilmiştir.

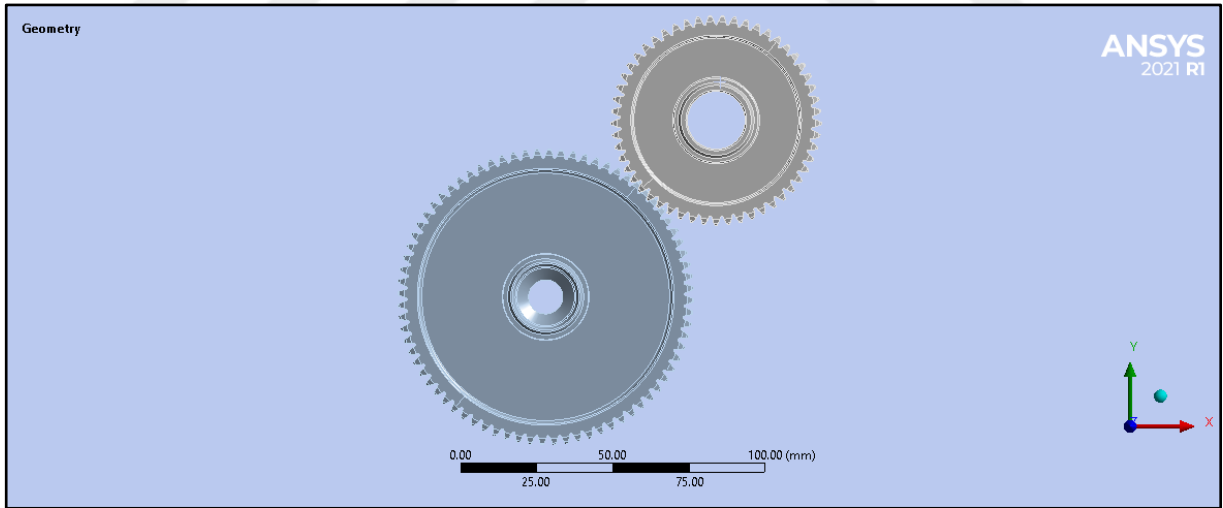


Şekil 3.18 Meş Yakınsama Çalışmaları Sonucu 0.4 mm Elemanlarla Oluşturulmuş Z53 W3 R3 Meş Yapısı

Bu meş yapısında 4 346 000 düğüm noktası bulunmaktadır. Bu geometriden türetilen diğer geometrilerde de 0,4 mm eleman boyutu kullanılmıştır ve her bir geometride 4 milyondan fazla düğüm noktası bulunmaktadır. Z53 dişlisi ile kontakta olan Z76 dişlisi aynı modülde olduğu ve her ikisi de aynı diş boyutlarına sahip oldukları için Z53 dişlisinde kullanılan mesh yakınsama kriteri aynı şekilde Z76 dişlisine de uygulanmıştır. Z76 dişlilerinde ise bu incelikte oluşturulan meş yapılarında 5 milyondan fazla düğüm noktası bulunmaktadır. Ek olarak, analizler “Large Deflection” seçeneği açılarak çözdürülmüştür. Böylece analiz modeline doğrusal olmayan deformasyon hareketi imkânı sağlanmıştır.

3.5. Sınır ve Yük Koşulları

Havacılık aksesuar dişli kutusu içerisinde yer alan ve birbiri ile kontakta çalışan iki düz dişlinin statik yapısal analizlerinde çeşitli sınır ve yük koşulları tanımlanmıştır. Her iki dişli parçası da ayrı olarak analiz edilmiştir. Z53 olarak adlandırılan dişli bir yandan Z76 olarak adlandırılan dişli ile kontaktayken bir yandan da çalışmaya konu olmayan başka bir öncül dişli ile kontakta olacak şekilde ayarlanmıştır. Böylece öncü dişliden aldığı yükü Z76 dişlisine iletmektedir. Z76 dişlisi ise Z53 dişlisi ile olan kontağı haricinde merkezinde bir spline bağlantısına sahiptir. Bu kamalı güç aktarım bağlantısı (spline) ile dişli üzerinden aksesuara güç aktarımı sağlanmaktadır. Böylece Z76 dişlisi yükü Z53 dişlisinden alarak bu spline bölgesinde bulunan aksesuara iletmektedir. Her iki dişli şaftı da dönme eksenlerinin iki ucundan rulman yataklarına sahip olacak şekilde modellenmiştir. Doğru analiz sonucu alabilmek adına bu yatak ara yüzlerinde gerekli sınırlamalar yapılmıştır. Ayrı olarak analiz edilen Z53 ve Z76 dişlileri aşağıdaki Şekil 3.19’da birbirleri ile kontak halinde görülebilir.



Şekil 3.19 Ayrı Analiz Edilen Z53 ve Z76 Dişlileri Temsilen Kontak Halindeyken Gösterimi

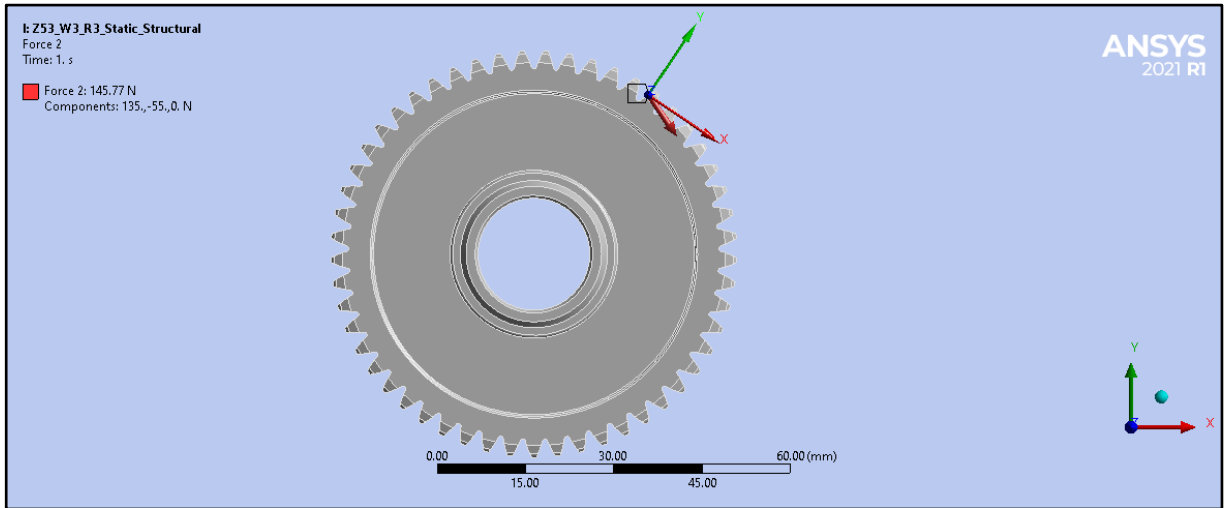
Z53 dişlisi aynı anda iki başka düz dişli ile kontakta olacak şekilde ayarlanmıştır. Buna göre bu dişlilerden biri Z76 düz dişlisidir. Seçilen kontak yüzeylerinden ilgili yükler akacak şekilde ayarlama yapılmıştır. Bu aşamada KissSoft kullanılarak kontak temaslarından iletilecek yükler hesaplanmıştır. Ardından ANSYS içerisinde yükler tanımlanmıştır. Bu yükler

hesaplanırken şaftların çapı, basınç açısı ve aksesuarlarca gereksinim duyulan tork değeri kullanılmıştır. Tüm bu değerler örnek tasarım çalışmasındaki aksesuar güç çekişleri ve aksesuar çalışma hızlarına göre de elde edilmiştir. Değerlerin çıkış noktası bu çalışmada paylaşılmamıştır. Teğetsel ve radyal kuvvetler eşitlik 3.14 - 3.15'teki gibi çıkarılmıştır (Budynas & Nisbett, 2015).

$$F_t = \frac{2T}{d} \quad (3.14)$$

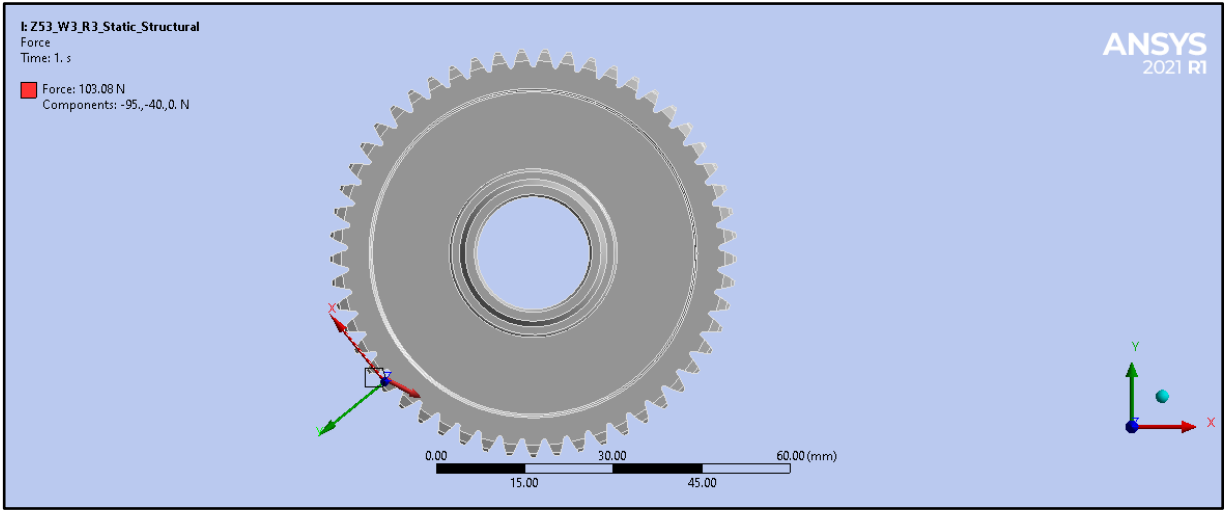
$$F_r = F_t \tan \Phi \quad (3.15)$$

Bu eşitliklerden ilkinde torkun iki katının çapa oranından teğetsel kuvvet hesaplanmıştır. Eşitlik 3.15'te ise eşitlik 3.14'te hesaplanan teğetsel kuvvet basınç açısının tanjantı ile çarpılmış ve radyal kuvvet bulunmuştur. Aşağıdaki Şekil 3.20'de Z53 dişlisinin öncül dişli ile olan kontağı görülebilir. Bu öncü dişli analize ve genel olarak çalışmaya bu kuvvet girdisi haricinde dâhil edilmemiştir. Radyal yönde içeriye doğru (eksi yönlü) 55 N ve teğetsel yönde 135 N kuvvet değerleri Kisoft programında eşitlik 3.14 - 3.15'e göre hesaplanmış kuvvet değerlerinin yuvarlanması ile elde edilmiştir.



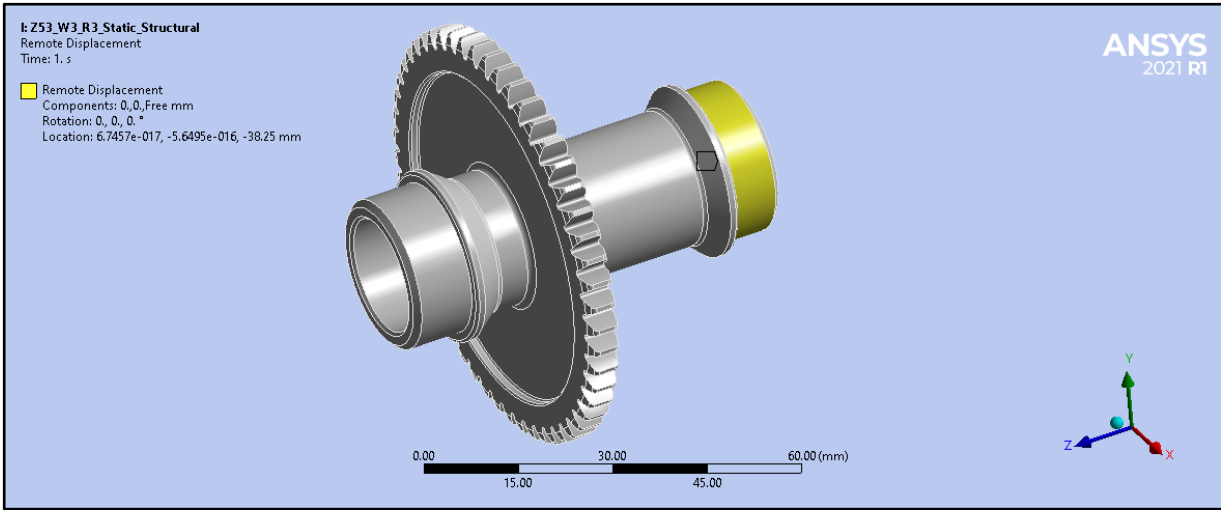
Şekil 3.20 Z53 Dişlisinin Öncü Dişli ile Olan Konağa Kuvvet Tanımlaması

Benzer şekilde Z53 dişlisinin Z76 dişlisi ile olan kontağındaki kuvvetler Şekil 3.21’de gösterilmiştir. Burada ise radyal yönde içeri doğru (eksi yönde) 40 N ve bir önceki öncül teğetsel kuvveti dengeleyecek yönde (eksi yönde) 95 N kuvvet uygulanmıştır. Bu değerler de eşitlik 3.14 ve eşitlik 3.15 içerisindeki formüllere göre Kisoft içerisinde hesaplanmış kuvvetlerin yuvarlanması ile elde edilmiştir. İlk dişliye uygulanan kuvvet ile ikinci dişlinin aktardığı kuvvet arasındaki fark dişlinin işlevi (aksesuarın sürülmesi) için harcanan enerji ile açıklanmaktadır.



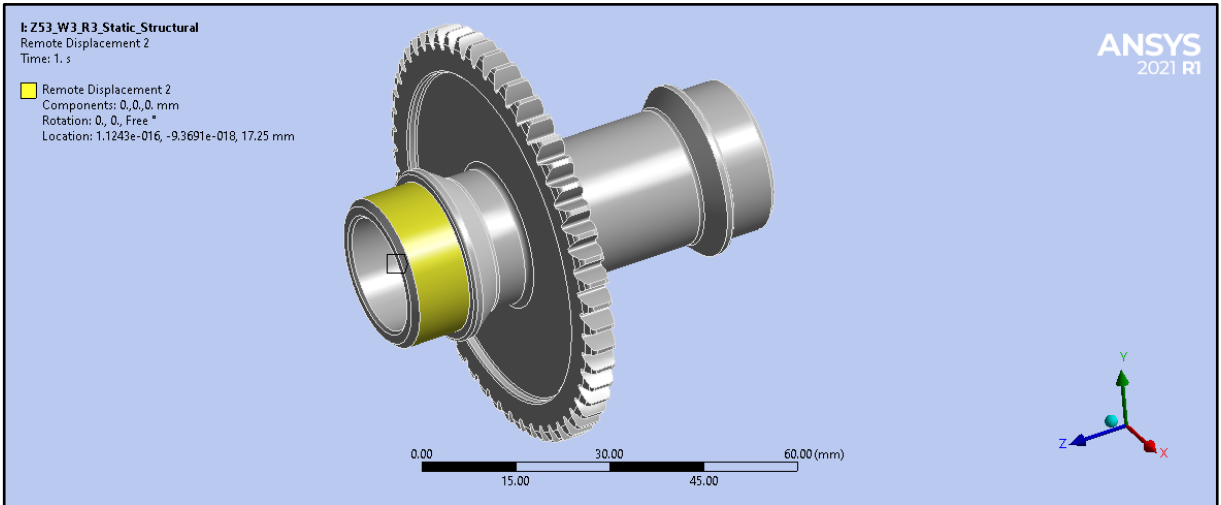
Şekil 3.21 Z53 Dişlisinin Z76 Dişlisi ile Olan Konağa Kuvvet Tanımlaması

Z53 dişlisinin rulman yataklarından eksi Z yönünde yer alan rulman yüzeyi yalnızca Z’de doğrusal hareketinde serbest bırakılmıştır. Bu sayede burulma sırasında modelin Z etrafında dönüşü buradan kısıtlanırken burulma ile modelin ihtiyaç duyacağı aksenal kısalmaya yine burada izin verilmektedir. Uygulanan bu sınır koşulu aşağıda Şekil 3.22’de görülebilir.



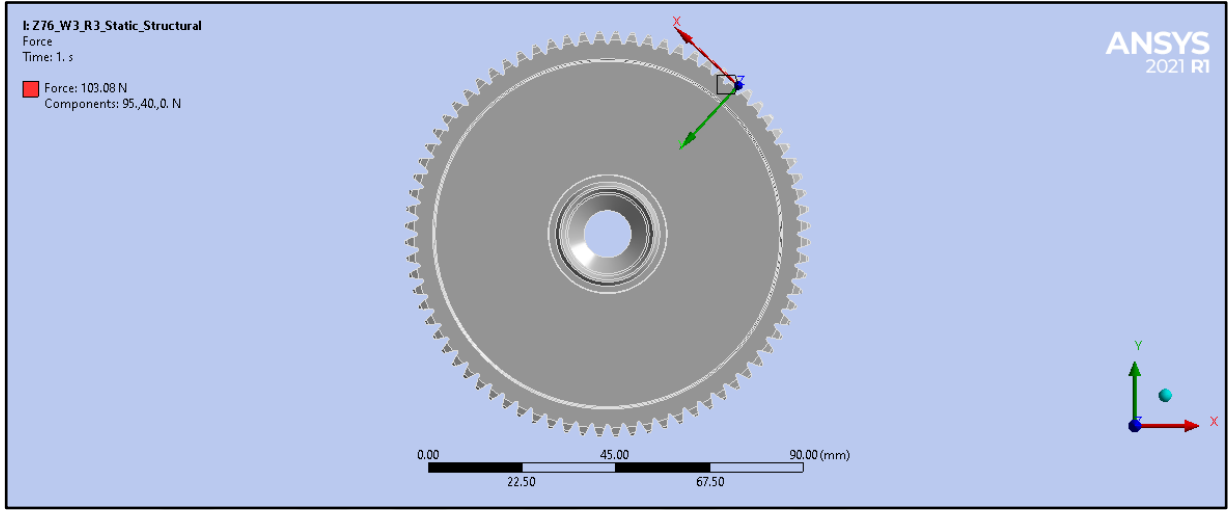
Şekil 3.22 Z53 Dişlisinin -Z Yönündeki Rulman Yatağı Kısıtlaması

Z53 dişlisinin öbür kısmında yer alan rulman yatağında ise yalnızca Z etrafında dönüşe izin verilmiştir (Şekil 3.23). Böylece diş kontağında yer alan teğetsel kuvvetin etkisi ile bu dişli serbest bir şekilde burulma hareketi yapabilecektir.



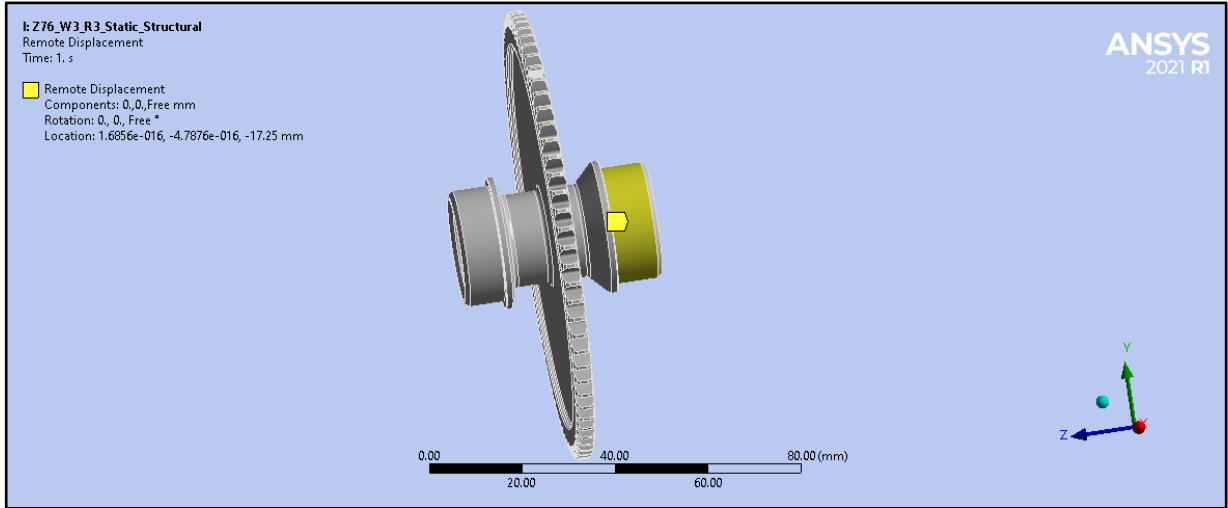
Şekil 3.23 Z53 Dişlisinin +Z Yönündeki Rulman Yatağı Kısıtlaması

Z76 dişlisinin Z53 dişlisi ile olan kontağında radyal yönde içeriye doğru (eksi yönlü) 40 N ve teğetsel yönde 95 N kuvvetler tanımlanmıştır. Bu tanımlama aşağıdaki Şekil 3.24'te görülebilir.



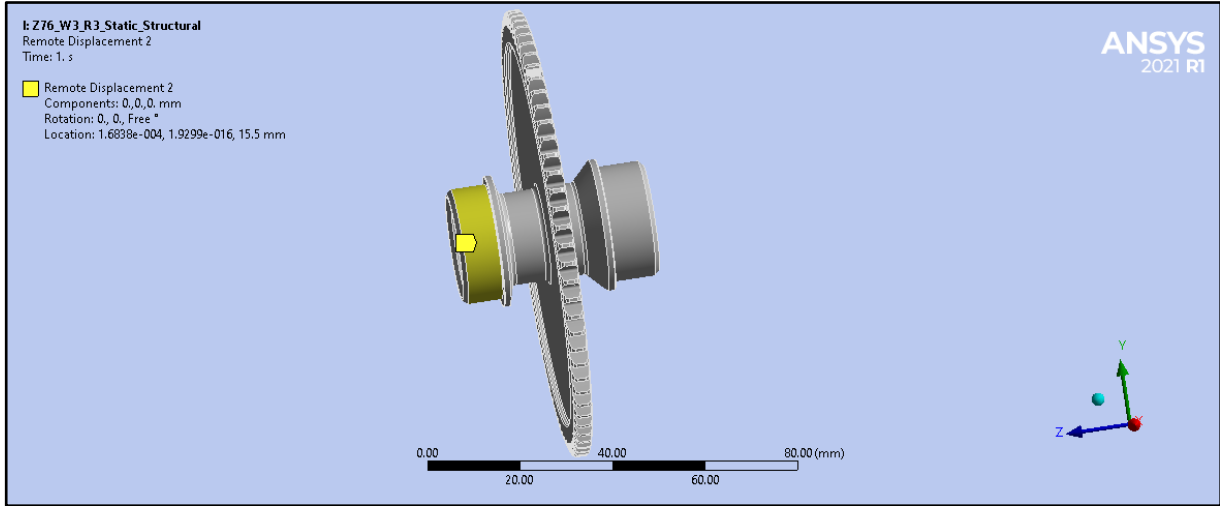
Şekil 3.24 Z76 Dişlisinin Z53 Dişlisi ile Olan Konağa Kuvvet Tanımlaması

Z76 dişlisinde aynı Z53 dişlisindeki gibi -Z yönündeki rulman ara yüzünde doğrusal Z yönü serbest bırakılmıştır (Şekil 3.25). Farklı olarak bu sefer Z dönüş yönünde de bir serbestlik tanımlanmıştır. Bunun sebebi dişlinin ortasında yer alan spline ile dönüş yönündeki yükün ilgili aksesuara iletilmesidir.



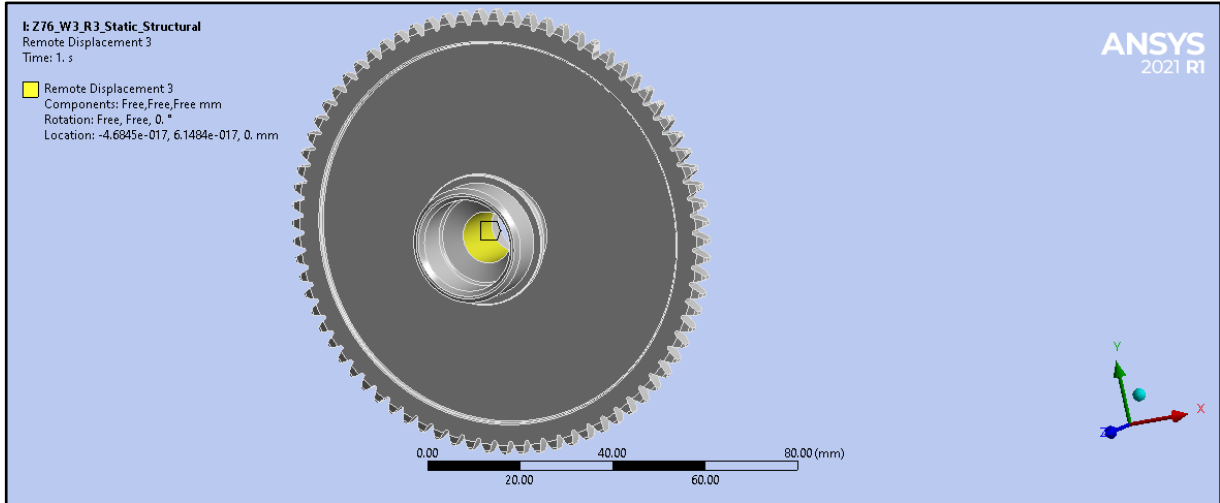
Şekil 3.25 Z76 Dişlisinin -Z Yönündeki Rulman Yatağı Kısıtlaması

Z76 dişlisinin öbür kısmında yer alan rulman yatağında ise yalnızca Z etrafında dönüş izin verilmiştir. Aşağıda Şekil 3.26 ile bu kısıtlama görülebilir.



Şekil 3.26 Z76 Dişlisinin +Z Yönündeki Rulman Yatağı Kısıtlaması

Z53 dişlisinden farklı olarak Z76 dişlisinde kullanılan spline bağlantısı bu dişlinin dönüşü ile beslenen aksesuara güç aktarımı için kullanılmaktadır. Analizde de dönüşün kısıtlandığı nokta olarak bu spline bölgesi seçilmiştir. Sadeleştirilmiş spline bölgesine uygulanan kısıt aşağıdaki Şekil 3.27 ile görülebilir.

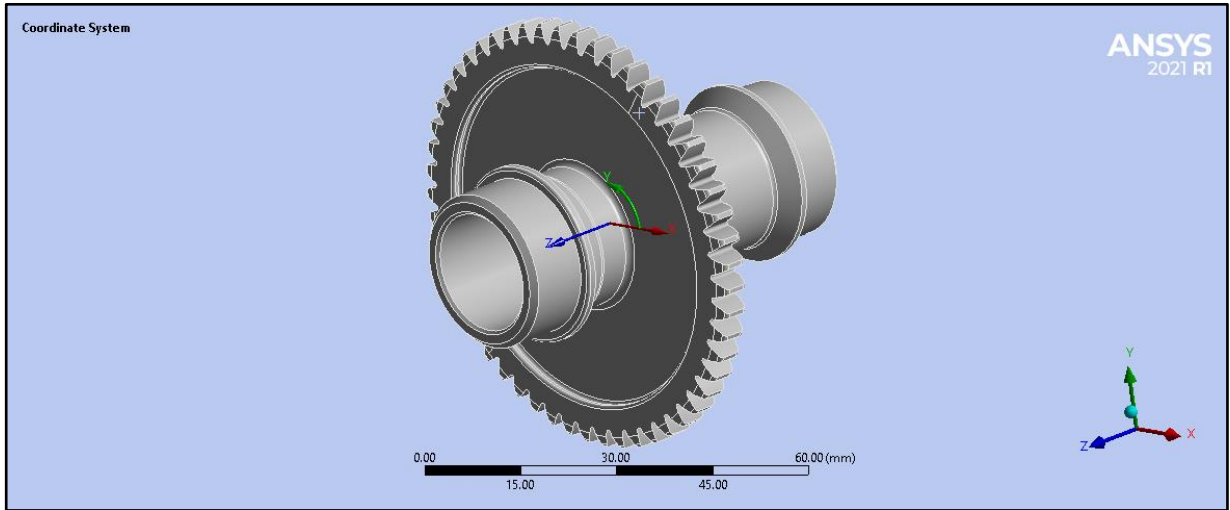


Şekil 3.27 Z76 Dişlisinin Z Dönüş Yönündeki Spline Bölgesi Kısıtlaması

3.6. Değerlendirme Yöntemleri

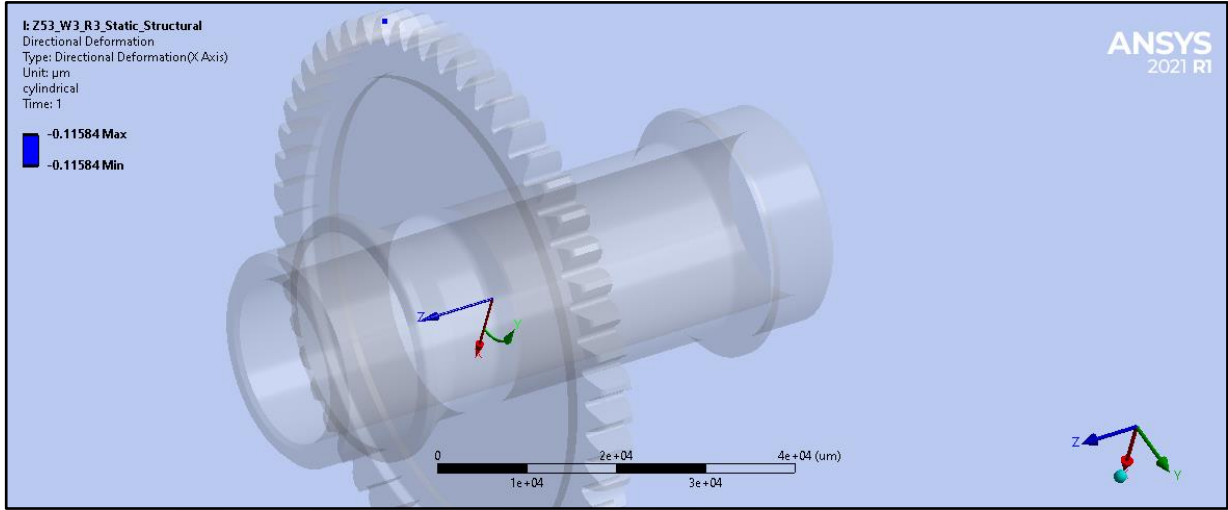
Havacılık aksesuar dişli kutuları dişli parçaları genel olarak az yüklü ama çok hızlı dönen parçalar oldukları için mikron mertebesinde oluşan değişimler kontak durumlarını ve dolayısıyla da dişli ömürlerini etkileyebilmektedir. Bu durumun tespiti için her iki dişlinin de toplam 50 geometrisinde eksenel ve radyal kayma miktarları çalışılmıştır. Z53 ve Z76 olarak adlandırılan her iki dişlinin yirmi beşer değişken geometrisinin statik analizleri sonrası 16 bölüme ayrılmış olan kontakların her bir üst ve alt köşe noktası kısım 3.4. Meş Yakınsama Çalışmaları içerisinde bulunan Şekil 3.13'te gösterildiği gibi numaralandırılmıştır. Bu numaralandırma sonrası bir kontakta bulunan 34 köşe noktasının radyal ve eksenel kayma miktarları mikron [μm] cinsinden okunmuştur. Sonuç olarak 50 geometrinin 34 köşe noktasının radyal ve eksenel olmak üzere 2 farklı durumda kaymaları kayıt altına alınmıştır. Böylelikle $50 \times 34 \times 2$ şeklinde toplam kayma veri sayısı 3 400 olarak bulunabilir.

Aşağıda Şekil 3.28 ile Z53 dişlisinin kontak kaymalarının radyal olarak da okunabilmesi için tanımlanmış silindirik koordinat sistemi görülebilir.



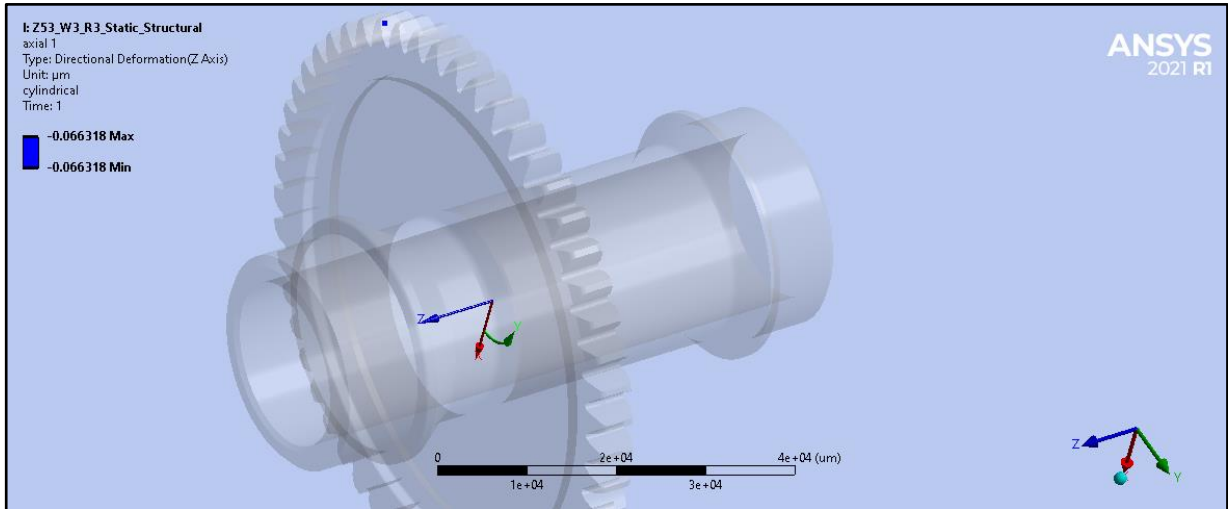
Şekil 3.28 Z53 Dişlisinin Kontak Değerlendirmesinde Kullanılan Silindirik Koordinat Sistemi

Tüm radyal (silindirik koordinat sisteminde X eksen) kontak kaymalarına örnek olarak Şekil 3.29'da yer alan (Z53 W3 R3 dişlisi 0,4 mm elemanlarla) veri okuma görseli verilebilir.



Şekil 3.29 Z53 W3 R3 Dişlisi Radyal Kontak Kayması Ölçümü

Tüm eksenel (silindirik koordinat sisteminde Z eksen) kontak kaymalarına örnek olarak Şekil 3.30’da yer alan (Z53 W3 R3 dişlisi 0,4 mm elemanlarla) veri okuma görseli verilebilir.



Şekil 3.30 Z53 W3 R3 Dişlisi Eksenel Kontak Kayma Ölçümü

Z53 ve Z76 dişlilerinin toplam 50 geometri kombinasyonları statik olarak analiz edildikten sonra dişli kontak bölgesinde AGMA 927-A01’e göre belirlenen noktalarda silindirik koordinat sistemine göre oluşan radyal ve eksenel deplasmanlar not edilmiştir. Her bir analizin

34 köşe için olan sonuçları grafiklerle ve çizelgelerle incelenmiştir. Sağlamcı bir analiz yaklaşımı sergilenmesi açısından kaymalarda meydana gelen en büyük değişimler gözetilmiştir. Buna göre her analizde 34 radyal kaymadan pozitif ve negatif en uç değerler ile 34 eksenel kaymadan pozitif ve negatif en uç değerler seçilmiştir. Amaç olarak kontakta olan bu iki dişlinin birbirlerinden, ya da başka bir deyişle kontak bölgesinden uzaklaşma durumlarına göre en etkili olan değerler bunlar arasından tekrar seçilmiştir. Örneğin Z53 dişlisinin belli bir ağ ve rim kalınlığı geometrisinin (W ve R) kontağı üzerinde bir köşe eksenel (Z) yönde 0,01 mikron kayarken bir başka köşe -0,07 mikron kaymaktadır. Benzer şekilde bu dişli ile kontakta olduğunu düşündüğümüz Z76 belli bir ağ ve rim kalınlığı geometrisinin (W ve R) kontağı üzerinde bir köşe eksenel (Z) yönde 0,05 mikron kayarken bir başka köşe -0,006 mikron kaymaktadır. Bu durumda Z53 dişlisinin bu geometrisinde meydana gelen minimum eksenel kayma negatif yönden dolayı -0,07 mikron iken Z76 dişlisinin bu geometrisinde meydana gelen maksimum eksenel kayma 0,05 mikron olmaktadır. Bu iki değer seçildiğinde her iki dişli için baştaki kontak bölgesinden toplamda 0,12 mikron uzaklaşma hesaplanmaktadır. Tüm bu deplasman çıktıları çok ufak olsa da turboşaft aksesuar dişli kutularının yüksek dönüş hızlarında kontak kuvvet dağılımlarını etkileyebilmekte ve yorulma açısından dayanım düşüşüne sebep olabilmektedir. Bu hesaplamalara göre her iki dişlinin kontakta radyal ve eksenel yönlerde ne kadar uzaklaşacağı yirmi beşer geometri için hesaplanmıştır.

Ağ ve rim kalınlığı etkilerinin incelenmesi KissSoft üzerinde kontak kayma değerlerinin girilmesi ile yapılmıştır. Bu etkileri inceleyebilmek adına bu kalınlıklardan biri AGMA 2001 D04 standardına göre sabit tutulurken diğeri değiştirilmiştir. Böylece her ikisinin de standartta oldukları geometri haricinde 48 farklı kontak kayma durumu incelenmiştir. Ek olarak Z53 ve Z76 dişlilerinin karşılıklı olarak denk gelebilecekleri en uç geometri durumları da çalışılmıştır. Buna göre Z53 dişlisinin ağ ve rim kalınlıkları olabilecek en kalın ve en ince halleriyle ve Z76 dişlisinin ağ ve rim kalınlıkları olabilecek en kalın ve en ince halleriyle karşılıklı denk getirilmiştir. Buradan da 4 farklı eşleşme durumu ortaya çıkmıştır. Toplamda 53 farklı eşleşme durumu kontaklar için incelenmiştir.

Aşağıdaki Çizelge 3.10'da Z53 ve Z76 dişlilerinin ağ ve rim kalınlıklarına bağlı kontak kayma değerleri gösterilmiştir. Bu çizelgede dişlilerin R3 standart rim kalınlık değerleri sabit tutularak her bir dişlinin ağ kalınlıkları en ince W1 değerinden en kalın W5 değerine değişkenlik gösterecek şekilde seçimler yapılmıştır. Diş kontağındaki kaymalar titreşim ve ömür açısından kritik olduğu için burada da iki dişlinin mevcut kontak noktasından yükler altında uzaklaşmaları incelenmiştir. Radyal olarak içe doğru olan hareketler bu kapsamda kontakta uzaklaşmak anlamına gelir ve kontak bölgesi daralır. Bu sebeple noktalar üzerinden okunan radyal deformasyonlarda minimum değerlerle çalışılmıştır. Eksenel kaymada ise dişlilerden daha çok eksi veya daha çok artı yönde giden belirlenmiş, buna göre bir dişlide minimum (eksi yön bazlı) diğerinde ise maksimum (artı yön bazlı) değerler okunarak dişlilerin birbirlerinden en fazla uzaklaştıkları nokta bu kontak durumunda en kötü senaryo olarak ele alınmıştır.

Çizelge 3.10 Z53 ve Z76 Dişlilerinin Ağ ve Rim Kalınlıklarına Bağlı Kontak Kayma Değerleri ve Ağ Kalınlığı Değişkenine Göre KissSoft Kontak Kayma Analiz Girdisi Seçimleri

			Radyal Min. [μ m]	Eksenel Min. [μ m]				Radyal Min. [μ m]	Eksenel Maks. [μ m]
Z53	W1	R1	-0,1220	-0,0729	Z76	W1	R1	-0,1250	0,0190
		R2	-0,1203	-0,0720			R2	-0,1229	0,0190
		R3	-0,1175	-0,0716			R3	-0,1210	0,0189
		R4	-0,1148	-0,0711			R4	-0,1182	0,0189
		R5	-0,1123	-0,0709			R5	-0,1161	0,0186
	W2	R1	-0,1079	-0,0739		W2	R1	-0,1056	0,0189
		R2	-0,1062	-0,0728			R2	-0,1040	0,0189
		R3	-0,1039	-0,0724			R3	-0,1019	0,0187
		R4	-0,1021	-0,0721			R4	-0,1002	0,0189
		R5	-0,0999	-0,0716			R5	-0,0982	0,0191
	W3	R1	-0,0962	-0,0741		W3	R1	-0,0899	0,0192
		R2	-0,0945	-0,0734			R2	-0,0883	0,0190
		R3	-0,0931	-0,0730			R3	-0,0872	0,0189
		R4	-0,0913	-0,0725			R4	-0,0854	0,0189
		R5	-0,0900	-0,0722			R5	-0,0840	0,0189
	W4	R1	-0,0861	-0,0743		W4	R1	-0,0767	0,0191
		R2	-0,0850	-0,0737			R2	-0,0758	0,0190
		R3	-0,0839	-0,0733			R3	-0,0745	0,0190
		R4	-0,0824	-0,0728			R4	-0,0736	0,0188
		R5	-0,0808	-0,0723			R5	-0,0718	0,0188
	W5	R1	-0,0774	-0,0745		W5	R1	-0,0651	0,0191
		R2	-0,0765	-0,0737			R2	-0,0645	0,0189
		R3	-0,0756	-0,0733			R3	-0,0646	0,0191
		R4	-0,0744	-0,0733			R4	-0,0637	0,0190
		R5	-0,0734	-0,0728			R5	-0,0631	0,0191

Sonuç olarak 25 farklı kontak eşleşme kombinasyonu ortaya çıkmıştır. Bu kombinasyonlardan bir tanesi olan Z53 W3 R3 ve Z76 W3 R3 arasındaki kontak her iki dişlinin de standarda göre çizilmiş ilk geometrilerinin arasında oluşmaktadır. Aşağıdaki Çizelge 3.11'de

Z53 ve Z76 dişlilerinin ağı ve rim kalınlıklarına bağlı kontak kayma değerleri bir önceki çizelgedeki aynı değerler olarak farklı bir gösterim ile verilmiştir. Bu çizelgede dişlilerin bu sefer W3 standart ağı kalınlık değerleri sabit tutularak her bir dişlinin rim kalınlıkları en ince R1 değerinden en kalın R5 değerine değişkenlik gösterecek şekilde seçimler yapılmıştır.

Çizelge 3.11 Z53 ve Z76 Dişlilerinin Ağı ve Rim Kalınlıklarına Bağlı Kontak Kayma Değerleri ve Rim Kalınlığı Değişkenine Göre KissSoft Kontak Kayma Analiz Girdisi Seçimleri

			Radyal Min. [μm]	Eksenel Min. [μm]				Radyal Min. [μm]	Eksenel Maks. [μm]
Z53	R1	W1	-0,1220	-0,0729	Z76	R1	W1	-0,1250	0,0190
		W2	-0,1079	-0,0739			W2	-0,1056	0,0189
		W3	-0,0962	-0,0741			W3	-0,0899	0,0192
		W4	-0,0861	-0,0743			W4	-0,0767	0,0191
		W5	-0,0774	-0,0745			W5	-0,0651	0,0191
	R2	W1	-0,1203	-0,0720		R2	W1	-0,1229	0,0190
		W2	-0,1062	-0,0728			W2	-0,1040	0,0189
		W3	-0,0945	-0,0734			W3	-0,0883	0,0190
		W4	-0,0850	-0,0737			W4	-0,0758	0,0190
		W5	-0,0765	-0,0737			W5	-0,0645	0,0189
	R3	W1	-0,1175	-0,0716		R3	W1	-0,1210	0,0189
		W2	-0,1039	-0,0724			W2	-0,1019	0,0187
		W3	-0,0931	-0,0730			W3	-0,0872	0,0189
		W4	-0,0839	-0,0733			W4	-0,0745	0,0190
		W5	-0,0756	-0,0733			W5	-0,0646	0,0191
	R4	W1	-0,1148	-0,0711		R4	W1	-0,1182	0,0189
		W2	-0,1021	-0,0721			W2	-0,1002	0,0189
		W3	-0,0913	-0,0725			W3	-0,0854	0,0189
		W4	-0,0824	-0,0728			W4	-0,0736	0,0188
		W5	-0,0744	-0,0733			W5	-0,0637	0,0190
	R5	W1	-0,1123	-0,0709		R5	W1	-0,1161	0,0186
		W2	-0,0999	-0,0716			W2	-0,0982	0,0191
		W3	-0,0900	-0,0722			W3	-0,0840	0,0189
		W4	-0,0808	-0,0723			W4	-0,0718	0,0188
		W5	-0,0734	-0,0728			W5	-0,0637	0,0191

Benzer şekilde buradan da 25 farklı kontak eşleşme kombinasyonu elde edilmektedir. Bunlardan bir tanesi bir önceki seçim ile ortak olan standarda göre çizilmiş Z53 W3 R3 ve Z76 W3 R3 geometrilerinin arasında oluşmaktadır. Son olarak ağı kalınlığı ile rim kalınlığının alabileceği en ince ve en kalın değerler her iki dişli için göz önünde bulundurularak aşağıdaki Çizelge 3.12 elde edilmiştir.

Çizelge 3.12 Z53 ve Z76 Dişlilerinin Ağ ve Rim Kalınlıklarının En Uç Değerlerine Bağlı Kontak Kayma Değerlerinin 2 x 2 Şeklinde Eşleştirilmiş Hali

			Radyal Min. [μ m]	Eksenel Min. [μ m]				Radyal Min. [μ m]	Eksenel Maks. [μ m]
Z53	W1	R1	-0,1220	-0,0729	Z76	W1	R1	-0,1250	0,0190
	W1	R1	-0,1220	-0,0729		W5	R5	-0,0631	0,0191
	W5	R5	-0,0734	-0,0728		W1	R1	-0,1250	0,0190
	W5	R5	-0,0734	-0,0728		W5	R5	-0,0631	0,0191

Burada ise her iki dişlinin sahip oldukları en ince rim ve ağ kalınlıklı geometrisi ile en kalın rim ve ağ kalınlıklı geometrisi arasında oluşabilecek 2 x 2 eşleşme kombinasyonu gösterilmiştir. Dolayısıyla KissSoft içerisinde bu 4 farklı kontak eşleşme kombinasyonu da çalışılmıştır.

Her iki dişli arasında standarda bağlı çizimlerden elde edilen 1 kontak kayma eşleşmesi, 24 ağ kalınlığına bağlı kontak kayma eşleşmesi, 24 rim kalınlığına bağlı kontak kayma eşleşmesi ve 4 en kalın ve en ince kalınlıklara bağlı kontak kayma eşleşmesi KissSoft yazılımı için girdi olmuştur. Toplam 53 kontak durumu kontak gerilmesi yönünden incelenmiştir. Bu inceleme sırasında radyal yönde oluşan kaymalar “inclination (eğiklik)” olarak girilirken, eksenel yönde oluşan kaymalar “deviation (sapma)” olarak girilmiştir. Her bir değer için öncesinde belirli kat sayı uygulamaları yapılmıştır. Tasarıma güvenilirlik açısından kullanılan bu kat sayılar sırasıyla atalet kaynaklı anlık yüksek yüklenmeler sebebiyle kullanılan 3 ve FEA (sonlu elemanlar analizi) çıktılarının değerlendirilmesi durumunda kullanılan 2 şeklindedir.

Z53 ve Z76 dişlilerinin kontak kaymaları incelenirken işaretçi olan radar grafik yöntemi kullanılmıştır. Bu grafikler içerisinde bulunan 1’den 5’e kadar sıralı numaralar R1’den R5’e kadar rim kalınlıklarını ifade etmektedir. Son olarak tüm geometrilerin serbest modal analizleri yapılmıştır. Sınır koşulu uygulamaksızın yapılan analizlerde ilk 6 serbestlik derecesi hareketi sonrası ortaya çıkan ilk 12 doğal frekans modu incelenmiştir. Buna göre hem oluşan mod şekilleri hem de sırası ile frekans değerleri kayıt edilmiştir. Rim ve ağ kalınlığında meydana gelen değişimlerin doğal frekans değerlerine etkileri incelenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan statik ve dinamik analizler ile her iki dişlinin AGMA 2001 D04 standardına göre çizilmiş geometrilerinin rim kalınlığı ve ağ kalınlığı %10 oranında ve %20 oranında inceltildiğinde veya kalınlaştırıldığında ortaya çıkan etkiler incelenmiştir. Buna göre statik analizler ile kontak halinde bulunan bu iki dişli için tüm geometrilerde kontak kaymaları ölçülmüştür. Bu kaymalar ile oluşabilecek kontak kuvvet dağılımı değişimleri de ayrıca incelenmiştir. Yapılan dinamik analizlerle çalışmaya konu olan iki dişliden türetilmiş çeşitli geometrilerin doğal mod hareketleri ile doğal frekans değerleri kaydedilmiştir. Çalışma sonuçlarıyla herhangi bir havacılık aksesuar dişli kutusu tasarımında ağırlık optimizasyonu süreçlerine katkı sağlanması hedeflenmiştir.

4.1. Statik Analizler

Z53 ve Z76 dişlileri ayrı ayrı statik olarak analiz edilmiştir. Analizler sırasında kullanılan sınır koşulları bölüm 3.5. Sınır ve Yük Koşulları içerisinde anlatılmıştır. Kullanılan meş yapısı için gerçekleştirilmiş olan meş yakınsama çalışmaları ise bölüm 3.4. Meş Yakınsama Çalışmaları içerisinde verilmiştir. Yapılan analizlerde kontak yüklerinin etkileri ile tüm dişli gövdesinin kısıt noktaları çevresinde deforme olduğu görülmüştür. Özellikle kontakta yer alan teğetsel kuvvetin etkisi ile dişli yapısı burulma hareketi şeklinde deforme olmuştur. Ayrıca burulma hareketi ile eksende kısalma etkisi ile kantağın eksende kayması gözlenmiştir. Radyal yönde yer alan kuvvet bileşeni de statik olarak dişli şaftını diş kantağından dönme eksenine doğru iterek ortada bir bükülme hareketine sebep olmuştur. Sonuç olarak ise kontak bölgesinde meydana gelen radyal ve eksenel kaymalar alt alta yazılarak her iki şaftın kontak durumunda oluşabilecek en kötü durumlar ortaya çıkarılmıştır. Z53 ve Z76 dişlilerinin ağ ve rim kalınlıklarının değişimlerine bağlı olarak ortaya çıkan radyal ve eksenel kaymalar dişli kantağında meydana gelen eğiklik ve sapma değerleri olarak ayrılmıştır. Aşağıdaki Çizelge 4.1’de Z53 ve Z76 dişlilerinin rim kalınlıkları standarda göre sabit bırakılırken ağ kalınlıkları

değiştirilmiş ve bu etki incelenmiştir. Çizelge 4.2’de ise Z53 ve Z76 dişlilerinin ağı kalınlıkları standarda göre sabit tutulup rim kalınlıklarında değişiklik yapılmıştır.

Çizelge 4.1 Z53 ve Z76 Dişlilerinin Ağı Kalınlığı Değişimine Bağlı Kontak Kayma Değerleri

Dişli #1		Dişli #2		Dişli #1		Dişli #2		Kontak Kayması	
Z53		Z76		Z53		Z76		Eğiklik [μm]	Sapma [μm]
Ağı Kalınlığı	Rim Kalınlığı	Ağı Kalınlığı	Rim Kalınlığı	İç Çap [mm]	Ağı Kalınlığı [mm]	İç Çap [mm]	Ağı Kalınlığı [mm]		
1 W1	R3	W1	R3	55,080	1,600	83,340	1,400	1,4306	0,5429
2 W1	R3	W2	R3	55,080	1,600	83,340	1,575	1,3164	0,5417
3 W1	R3	W3	R3	55,080	1,600	83,340	1,750	1,2278	0,5428
4 W1	R3	W4	R3	55,080	1,600	83,340	1,925	1,1359	0,5409
5 W1	R3	W5	R3	55,080	1,600	83,340	2,100	1,0616	0,5395
6 W2	R3	W1	R3	55,080	1,800	83,340	1,400	1,3495	0,5482
7 W2	R3	W2	R3	55,080	1,800	83,340	1,575	1,2353	0,5471
8 W2	R3	W3	R3	55,080	1,800	83,340	1,750	1,1467	0,5481
9 W2	R3	W4	R3	55,080	1,800	83,340	1,925	1,0705	0,5490
10 W2	R3	W5	R3	55,080	1,800	83,340	2,100	1,0115	0,5491
11 W3	R3	W1	R3	55,080	2,000	83,340	1,400	1,2846	0,5516
12 W3	R3	W2	R3	55,080	2,000	83,340	1,575	1,1704	0,5505
13 W3	R3	W3	R3	55,080	2,000	83,340	1,750	1,0818	0,5516
14 W3	R3	W4	R3	55,080	2,000	83,340	1,925	1,0056	0,5524
15 W3	R3	W5	R3	55,080	2,000	83,340	2,100	0,9466	0,5525
16 W4	R3	W1	R3	55,080	2,200	83,340	1,400	1,2292	0,5530
17 W4	R3	W2	R3	55,080	2,200	83,340	1,575	1,1151	0,5519
18 W4	R3	W3	R3	55,080	2,200	83,340	1,750	1,0265	0,5529
19 W4	R3	W4	R3	55,080	2,200	83,340	1,925	0,9503	0,5538
20 W4	R3	W5	R3	55,080	2,200	83,340	2,100	0,8913	0,5539
21 W5	R3	W1	R3	55,080	2,400	83,340	1,400	1,1792	0,5533
22 W5	R3	W2	R3	55,080	2,400	83,340	1,575	1,0650	0,5522
23 W5	R3	W3	R3	55,080	2,400	83,340	1,750	0,9765	0,5532
24 W5	R3	W4	R3	55,080	2,400	83,340	1,925	0,9003	0,5541
25 W5	R3	W5	R3	55,080	2,400	83,340	2,100	0,8413	0,5542

Çizelge 4.2 Z53 ve Z76 Dişlilerinin Rim Kalınlığı Değişimine Bağlı Kontak Kayma Değerleri

Dişli #1		Dişli #2		Dişli #1		Dişli #2		Kontak Kayması	
Z53		Z76		Z53		Z76		Eğiklik [μm]	Sapma [μm]
Rim Kalınlığı	Ağı Kalınlığı	Rim Kalınlığı	Ağı Kalınlığı	İç Çap [mm]	Ağı Kalınlığı [mm]	İç Çap [mm]	Ağı Kalınlığı [mm]		
1 R1	W3	R1	W3	56,633	2,000	84,896	1,750	1,1167	0,5593
2 R1	W3	R2	W3	56,633	2,000	84,118	1,750	1,1072	0,5585
3 R1	W3	R3	W3	56,633	2,000	83,340	1,750	1,1003	0,5578
4 R1	W3	R4	W3	56,633	2,000	82,562	1,750	1,0290	0,5597
5 R1	W3	R5	W3	56,633	2,000	81,784	1,750	0,9684	0,5605
6 R2	W3	R1	W3	55,856	2,000	84,896	1,750	1,1066	0,5555
7 R2	W3	R2	W3	55,856	2,000	84,118	1,750	1,0971	0,5546
8 R2	W3	R3	W3	55,856	2,000	83,340	1,750	1,0902	0,5540
9 R2	W3	R4	W3	55,856	2,000	82,562	1,750	1,0797	0,5542
10 R2	W3	R5	W3	55,856	2,000	81,784	1,750	1,0712	0,5542
11 R3	W3	R1	W3	55,080	2,000	84,896	1,750	1,0982	0,5531
12 R3	W3	R2	W3	55,080	2,000	84,118	1,750	1,0887	0,5522
13 R3	W3	R3	W3	55,080	2,000	83,340	1,750	1,0818	0,5516
14 R3	W3	R4	W3	55,080	2,000	82,562	1,750	1,0713	0,5518
15 R3	W3	R5	W3	55,080	2,000	81,784	1,750	1,0628	0,5518
16 R4	W3	R1	W3	54,304	2,000	84,896	1,750	1,0874	0,5499
17 R4	W3	R2	W3	54,304	2,000	84,118	1,750	1,0779	0,5491
18 R4	W3	R3	W3	54,304	2,000	83,340	1,750	1,0710	0,5484
19 R4	W3	R4	W3	54,304	2,000	82,562	1,750	1,0605	0,5487
20 R4	W3	R5	W3	54,304	2,000	81,784	1,750	1,0520	0,5486
21 R5	W3	R1	W3	53,527	2,000	84,896	1,750	1,0792	0,5478
22 R5	W3	R2	W3	53,527	2,000	84,118	1,750	1,0697	0,5470
23 R5	W3	R3	W3	53,527	2,000	83,340	1,750	1,0628	0,5463
24 R5	W3	R4	W3	53,527	2,000	82,562	1,750	1,0523	0,5466
25 R5	W3	R5	W3	53,527	2,000	81,784	1,750	1,0438	0,5465

Son olarak her iki dişli geometrisi için mümkün olan en ince ve en kalın rim kalınlığı ile en ince ve en kalın ağ kalınlığı değerleri eşleştirilmiştir. Bu şekilde kontak halinde bulunabilecek en uç kalınlık değerlerine sahip Z53 ve Z76 dişli geometrileri kontak kayma durumları bakımından incelenmiştir. Bu inceleme sonrası her iki dişlinin birbirleri ile olan kontakta radyal ve eksenel yönde en fazla uzaklaşabilecekleri değerler eğiklik ve sapma değerleri olarak ele alınmıştır. Çizelge 4.3'te Z53 ve Z76 dişlilerinin bu çalışma çerçevesinde sahip olabilecekleri en uç geometrilerin birbirleri ile kontağında ortaya çıkabilecek kontak kayma değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Z53 ve Z76 Dişlilerinin Ağ ve Rim Kalınlıklarının En Uç Değerlerine Bağlı Kontak Kayma Değerleri

	Dişli #1		Dişli #2		Dişli #1		Dişli #2		Kontak Kayması	
	Z53		Z76		Z53		Z76		Eğiklik [μ m]	Sapma [μ m]
	Ağ Kalınlığı	Rim Kalınlığı	Ağ Kalınlığı	Rim Kalınlığı	İç Çap [mm]	Ağ Kalınlığı [mm]	İç Çap [mm]	Ağ Kalınlığı [mm]		
1	W1	R1	W1	R1	56,633	1,600	84,896	1,400	1,4815	0,5514
2	W1	R1	W5	R5	56,633	1,600	81,784	2,100	1,1102	0,5519
3	W5	R5	W1	R1	53,527	2,400	84,896	1,400	1,1903	0,5506
4	W5	R5	W5	R5	53,527	2,400	81,784	2,100	0,8190	0,5510

4.1.1. Z53 dişlisi statik analizleri

Z53 dişlisinde meydana gelen kontak kaymaları radyal ve eksenel olarak incelendiğinde rim ve ağ kalınlıklarının değişimleriyle meydana gelen kayma değerleri bulunmuştur. Aşağıda Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 ile Z53 dişlisinin standart geometrisinin (W3 ve R3 kalınlıklarıyla) Şekil 3.14'te örneği gösterilen 1 numaralı köşesinin sırasıyla eksenel ve radyal kaymaları gösterilmiştir. Bu görsellerde, sonuç için seçilmiş olan köşeler görülebilmesi için ANSYS çıktısı alındıktan sonra kırmızı daire içine alınmıştır. Bu kayma değerleri EK AÇIKLAMALAR bölümünde yer alan EK 2 başlığı altındaki ilgili çizelgede (Z53 W3 R3) görülebilir.



Şekil 4.1 Z53 Dişlisi W3R3 Geometrisi 1 Numaralı Köşenin Eksenel Kayması



Şekil 4.2 Z53 Dişlisi W3R3 Geometrisi 1 Numaralı Köşenin Radyal Kayması

Çizelge 4.4'te Z53 dişlisinin rim kalınlığı ve ağı kalınlığı değişimiyle ortaya çıkan radyal kontak kayma değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.4 Ağ ve Rim Kalınlığı Değişimine Bağlı Z53 Dişlisi Radyal Kontak Kayma Değerleri

Rim Kalınlığı [mm]		W1 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μm]	W2 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μm]	W3 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μm]	W4 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μm]	W5 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μm]
R1	3,10528	-0,1220	-0,1079	-0,0962	-0,0861	-0,0774
R2	3,49344	-0,1203	-0,1062	-0,0945	-0,0850	-0,0765
R3	3,8816	-0,1175	-0,1039	-0,0931	-0,0839	-0,0756
R4	4,26976	-0,1148	-0,1021	-0,0913	-0,0824	-0,0744
R5	4,65792	-0,1123	-0,0999	-0,0900	-0,0808	-0,0734

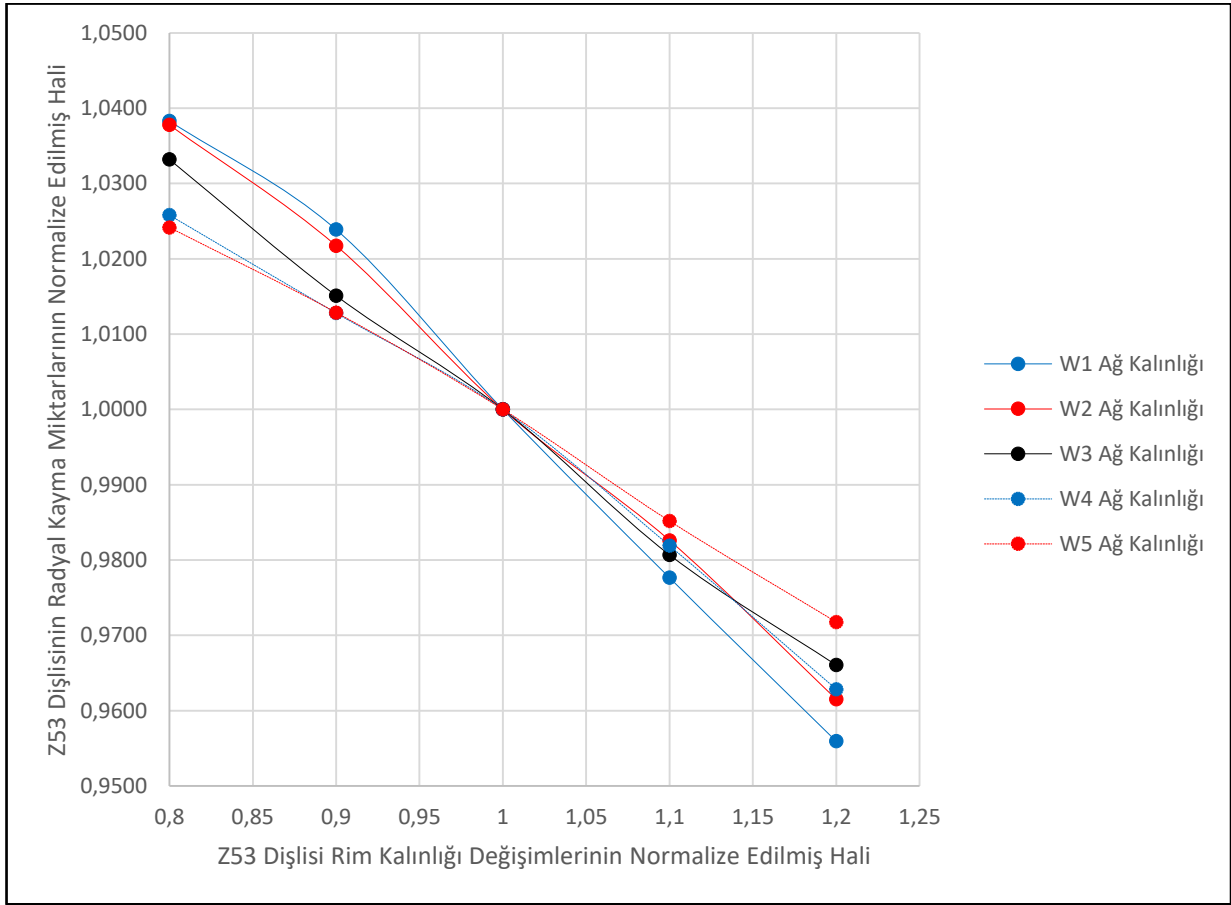
Çizelgede verilen değerlerin daha doğru incelenebilmesi ve gerektiğinde karşılaştırılabilmesi için bütün kontak kayma değerleri normalize edilmiştir.

Aşağıdaki Şekil 4.3'te yer alan grafikte bu veriler, rim kalınlığı standart R3 değerinde iken yaşanan kaymalar normalize edilmiştir. Bu normalize işlemi, standarda göre tasarlanmış geometrilere oluşan deplasman değerleri 1 birim olarak ele alınarak yapılmıştır. Böylece her geometride R3 kontak kayması normal olarak ele alınıp farklı ağ kalınlıklarında rim kalınlığının değişmesinin etkisi ortaya çıkarılmıştır (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5 Ağ ve Rim Kalınlığı Değişimine Bağlı Z53 Dişlisi Radyal Kontak Kayma Değerlerinin Standart Rim Kalınlığı Çıktılarına Normalize Edilmiş Hali

Rim Kalınlığı		W1 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W2 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W3 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W4 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W5 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması
R1	0,8	1,0383	1,0378	1,0332	1,0258	1,0242
R2	0,9	1,0239	1,0217	1,0151	1,0128	1,0129
R3	1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
R4	1,1	0,9776	0,9826	0,9807	0,9819	0,9852
R5	1,2	0,9559	0,9615	0,9660	0,9628	0,9718

Bu çizelgeye göre en ince ağ yapısında rim kalınlığına bağlı olarak %8,62'ye varan radyal kontak kayması değişimi görülmüştür. En ince rim yapısında ağ kalınlığına bağlı radyal kontak değişimi ise %1,38'de kalmıştır. En kalın ağ yapısında rim kalınlığı değişimine bağlı radyal kontak kayma oranı %5,39 olurken, en kalın rim yapısında ağ kalınlığı değişimine bağlı radyal kontak kayma oranı ise %1,66 ile sınırlı kalmıştır.



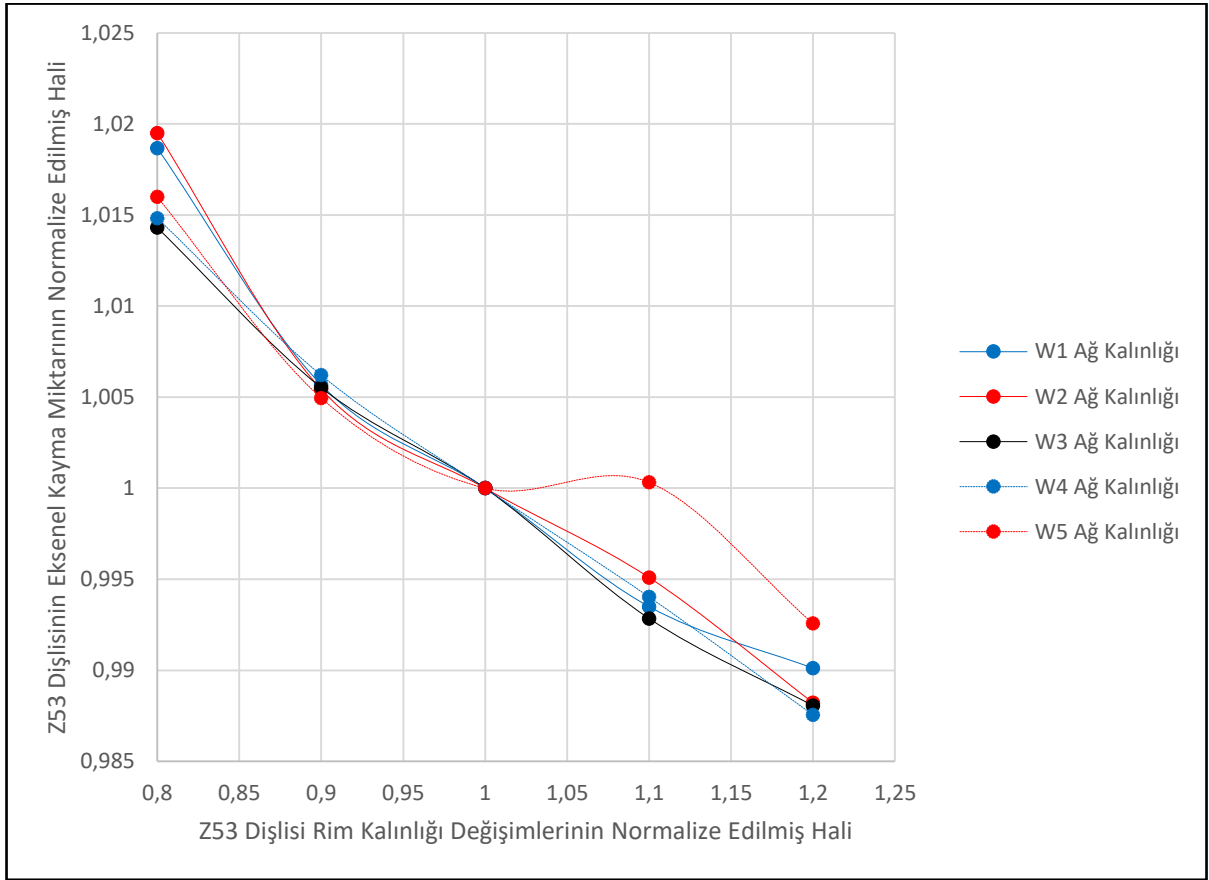
Şekil 4.3 Z53 Dişlisi Radyal Kontak Kayma Grafiği

Benzer şekilde Z53 dişlisinde meydana gelen eksenel kontak kaymaları Çizelge 4.6'daki gibidir.

Çizelge 4.6 Ağ ve Rim Kalınlığı Değişimine Bağlı Z53 Dişlisi Eksenel Kontak Kayma Değerleri

Rim Kalınlığı [mm]	W1 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μm]	W2 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μm]	W3 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μm]	W4 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μm]	W5 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μm]
R1	3,10528	-0,0729	-0,0739	-0,0741	-0,0743
R2	3,49344	-0,0720	-0,0728	-0,0734	-0,0737
R3	3,8816	-0,0716	-0,0724	-0,0730	-0,0733
R4	4,26976	-0,0711	-0,0721	-0,0725	-0,0728
R5	4,65792	-0,0709	-0,0716	-0,0722	-0,0723

Bu değerler, rim kalınlığı standart R3 değerinde iken yaşanan kaymalara göre normalize edilmiştir. Ortaya çıkan eksenel kontak kayma grafiği Şekil 4.4'dedir.



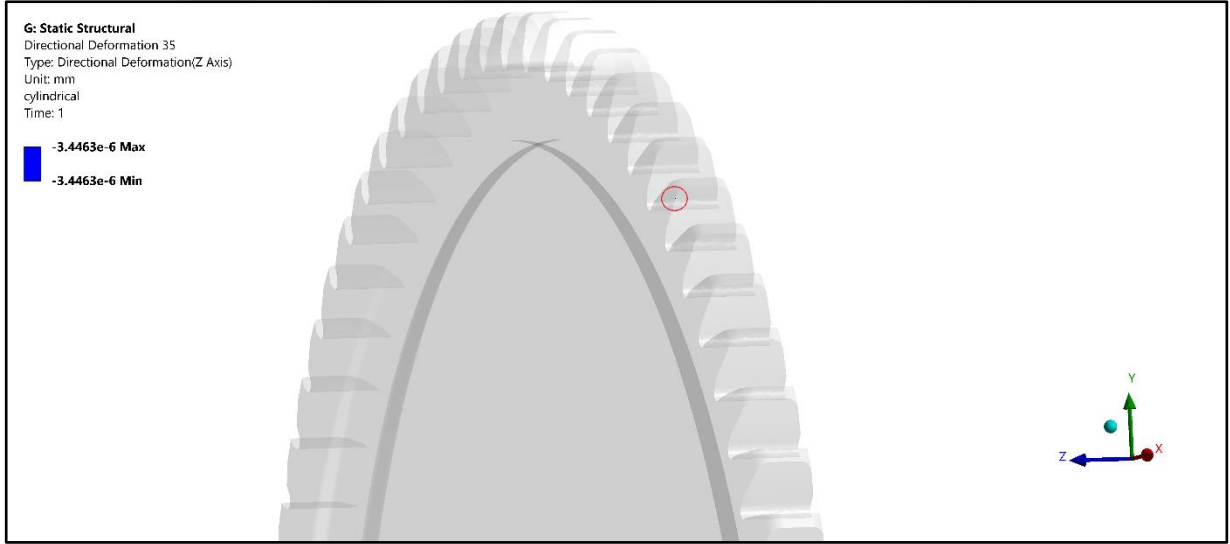
Şekil 4.4 Z53 Dişlisi Eksenel Kontak Kayma Grafiği

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.3 incelendiğinde, radyal kontak kaymasının rim kalınlığı arttıkça azaldığı görülmektedir. W1 ve W2 gibi daha ince ağ kalınlıklarında, rim kalınlığının sağladığı baskın yapısal katılık sayesinde bu kontak kaymasındaki azalma daha net görülmektedir. R1’den R5’e doğru rim kalınlığı artarken ince ağ kalınlıklarında (W1 ve W2) radyal kayma değerleri normalize edildiğinde, %4 ile %8 oranında bir düşüş görülmektedir (Çizelge 4.5). Eksenel kontak kayması açısından ise Çizelge 4.6 ve Şekil 4.4 çıktıları incelendiğinde, rim kalınlığı R1’den R5’e artırıldığında eksenel yöndeki kayma miktarında kademeli bir azalma oluşmaktadır. Bu kalınlaşma ile artan eksenel katılık sonucunda standart R3 için normalize edilmiş eksenel deformasyon değerleri R5 kalınlığında en düşük değeri göstermiştir. Rim kalınlığının hem radyal hem de eksenel yönde katılığı artırdığı söylenebilir. Bu katılık artış etkisinin ağ kalınlığına da bağlı olduğu, düşük ağ kalınlıklarında rim kalınlığına bağlı daha etkili katılık değişimlerinin yaşandığı anlaşılmaktadır. Öte yandan ağ kalınlığının artması ile shaftın

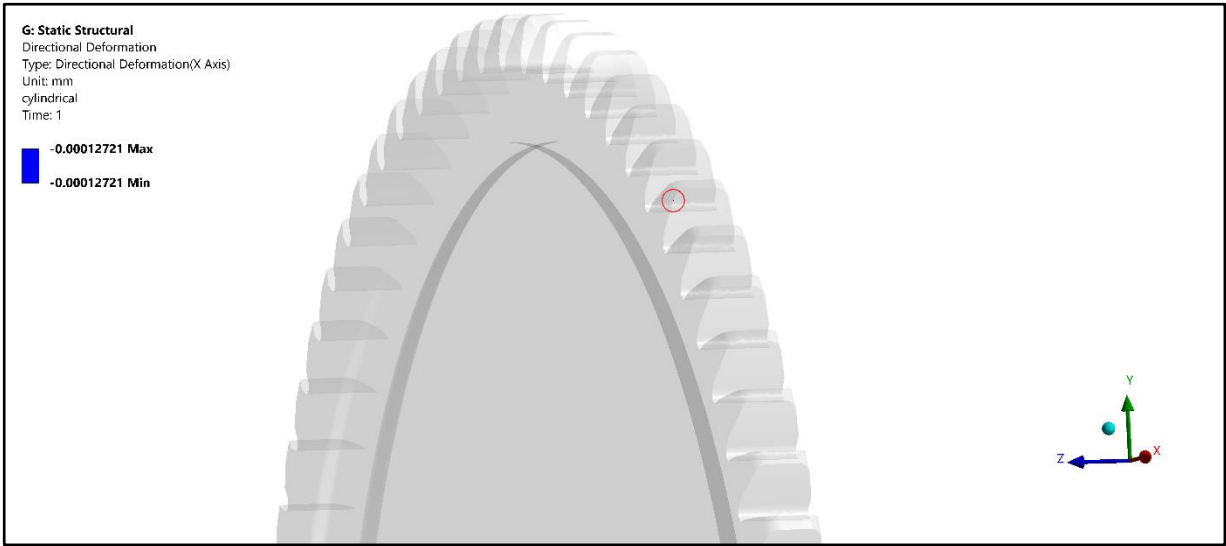
katılığı hali hazırda arttığından dolayı rim kalınlığındaki değişimin bu katılığa etkisi de azalmaktadır. Sonuç olarak daha ince ağ yapılı şaftlarda rim kalınlığının çok daha kritik bir rol oynadığı anlaşılabılır.

4.1.2. Z76 dişlisi statik analizleri

Z76 dişlisinde meydana gelen kontak kaymaları radyal ve eksenel olarak incelendiğinde rim ve ağ kalınlıklarının değişimleriyle meydana gelen kayma değerleri bulunmuştur. Aşağıda Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 ile Z76 dişlisinin standart geometrisinin (W3 ve R3 kalınlıklarıyla) Şekil 3.14'te örneği gösterilen 1 numaralı köşesinin sırasıyla eksenel ve radyal kaymaları gösterilmiştir. Bu görsellerde, sonuç için seçilmiş olan köşeler görülebilmesi için ANSYS çıktısı alındıktan sonra kırmızı daire içine alınmıştır. Bu kayma değerleri EK AÇIKLAMALAR bölümünde yer alan EK 2 başlığı altındaki ilgili çizelgede (Z76 W3 R3) görülebilir.



Şekil 4.5 Z76 Dişlisi W3R3 Geometrisi 1 Numaralı Köşenin Eksenel Kayması



Şekil 4.6 Z76 Dişlisi W3R3 Geometrisi 1 Numaralı Köşenin Radyal Kayması

Aşağıda Çizelge 4.7’de Z76 dişlisinin rim kalınlığı ve ağ kalınlığı değişimiyle ortaya çıkan radyal kontak kayma değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.7 Ağ ve Rim Kalınlığı Değişimine Bağlı Z76 Dişlisi Radyal Kontak Kayma Değerleri

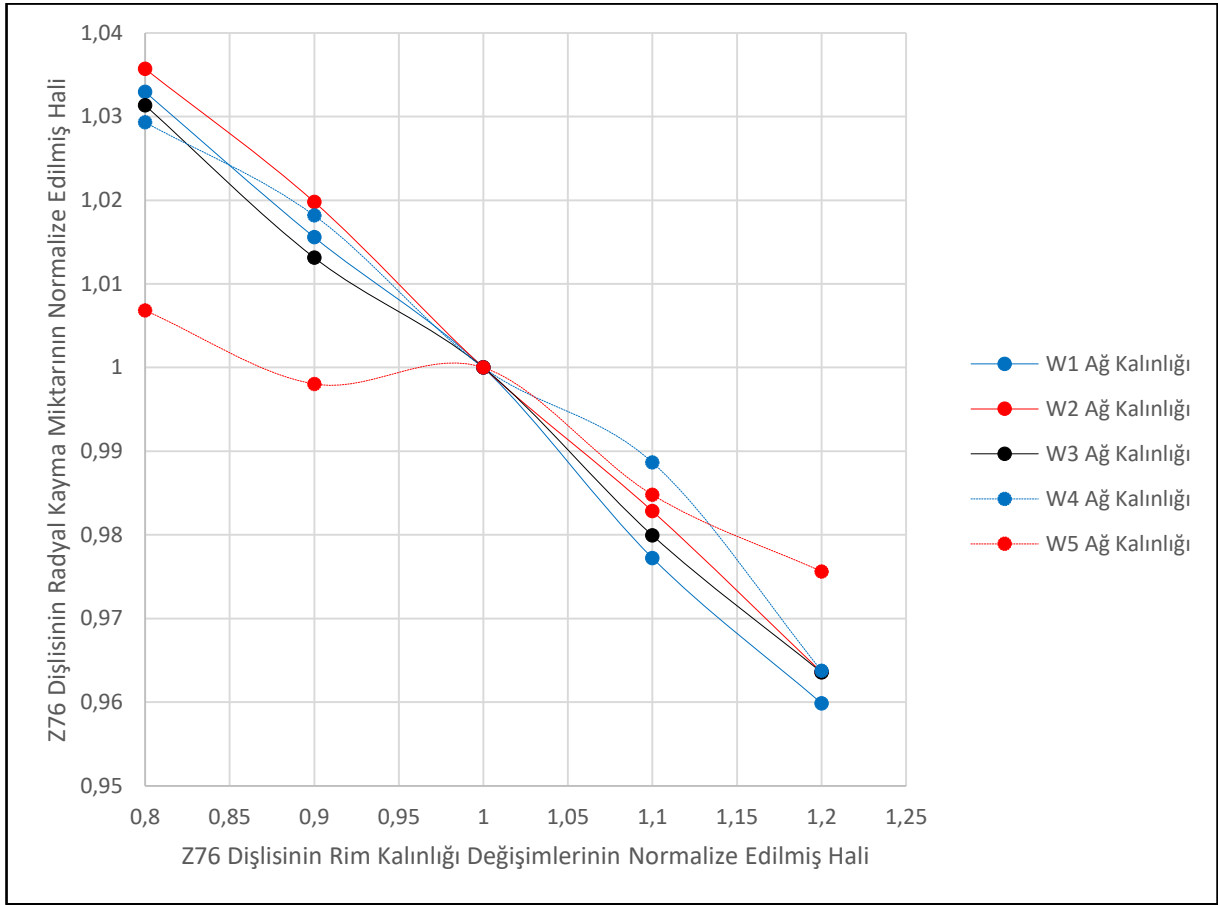
Rim Kalınlığı [mm]	W1 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μ m]	W2 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μ m]	W3 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μ m]	W4 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μ m]	W5 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μ m]
R1	3,1120	-0,1250	-0,1056	-0,0899	-0,0767
R2	3,5010	-0,1229	-0,1040	-0,0883	-0,0758
R3	3,8900	-0,1210	-0,1019	-0,0872	-0,0745
R4	4,2790	-0,1182	-0,1002	-0,0854	-0,0736
R5	4,6680	-0,1161	-0,0982	-0,0840	-0,0718

Aşağıdaki grafikte (Şekil 4.7) bu veriler, rim kalınlığı standart R3 değerinde iken yaşanan kaymalar normalize edilmiştir. Böylece her geometride R3 kontak kayması normal olarak ele alınıp farklı ağ kalınlıklarında rim kalınlığının değişmesinin etkisi ortaya çıkarılmıştır (Çizelge 4.8).

Çizelge 4.8 Ağ ve Rim Kalınlığı Değişimine Bağlı Z76 Dişlisi Radyal Kontak Kayma Değerlerinin Standart Rim Kalınlığı Çıktılarına Normalize Edilmiş Hali

Rim Kalınlığı [mm]		W1 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μ m]	W2 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μ m]	W3 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μ m]	W4 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μ m]	W5 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μ m]
R1	0,8	1,0329	1,0357	1,0313	1,0293	1,0068
R2	0,9	1,0156	1,0198	1,0131	1,0182	0,9980
R3	1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
R4	1,1	0,9772	0,9828	0,9799	0,9887	0,9848
R5	1,2	0,9599	0,9636	0,9636	0,9638	0,9756

Bu çizelgeye göre en ince ağ yapısında rim kalınlığına bağlı olarak %7,60'a varan kontak kayması değişimi görülmüştür. En ince rim yapısında ağ kalınlığına bağlı kontak değişimi ise %2,59'da kalmıştır. En kalın ağ yapısında rim kalınlığı değişimine bağlı kontak kayma oranı %3,20 olurken, en kalın rim yapısında ağ kalınlığı değişimine bağlı kontak kayma oranı ise %1,64 ile sınırlı kalmıştır. Z76 dişlisinde oluşan radyal kaymalar Z53 dişlisinde oluşan radyal kaymalar ile kıyaslandığında Z53 dişlisinde rim kalınlığının değişiminin radyal kaymalarda daha doğrusal bir eğri oluşturduğu görülmüştür. Bunun sebebi de Z76 dişlisinin çapının daha büyük olması ve dolayısıyla da rim kalınlığındaki değişimlerin etkisinin ufak kalmasıdır. Daha ufak değişimler normalize edildiğinde buradaki gibi dalgalı değişim grafiklerine sebep olabilmektedir (Şekil 4.7).



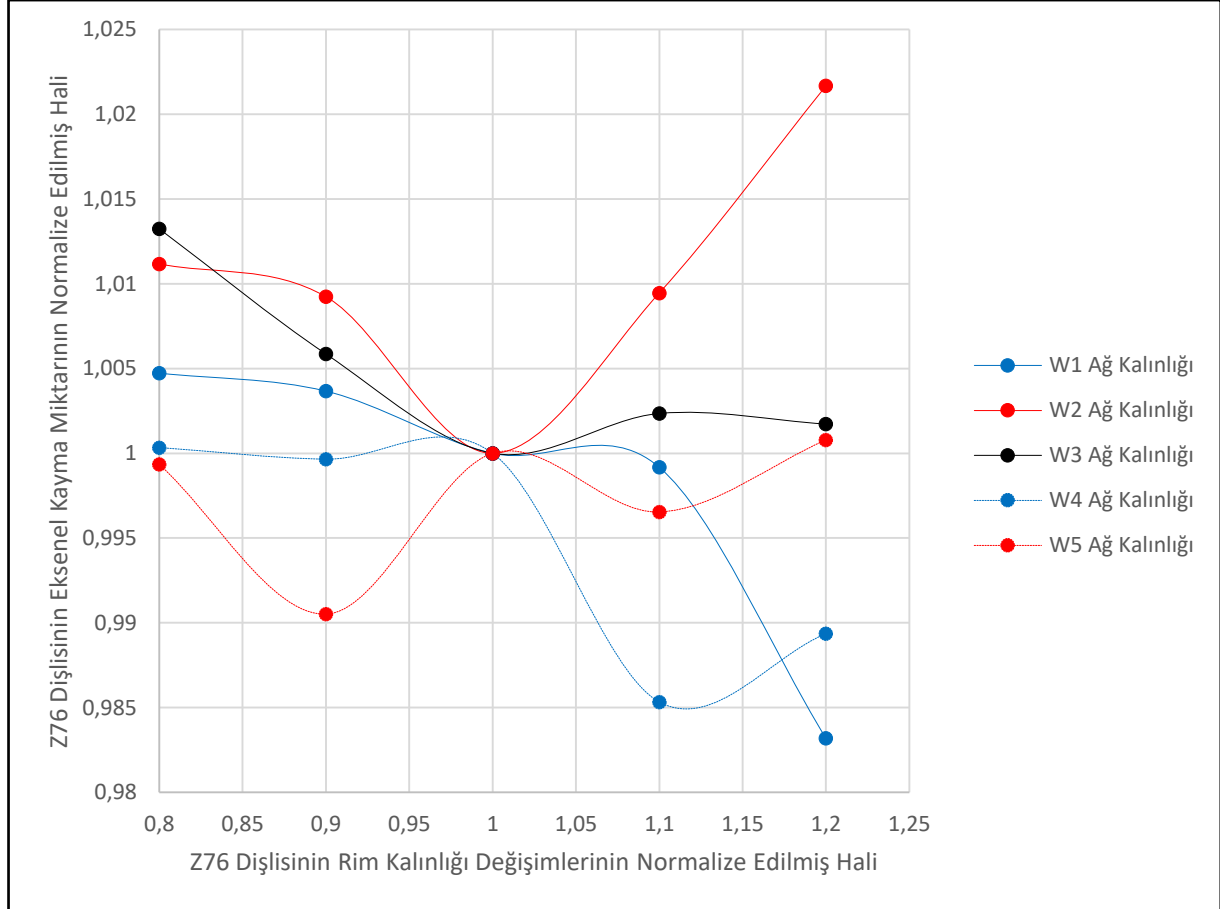
Şekil 4.7 Z76 Dişlisi Radyal Kontak Kayma Grafiği

Benzer şekilde Z76 dişlisinde meydana gelen eksenel kontak kaymaları aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.9 Ağ ve Rim Kalınlığı Değişimine Bağlı Z76 Dişlisi Eksenel Kontak Kayma Değerleri

Rim Kalınlığı [mm]	W1 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μm]	W2 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μm]	W3 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μm]	W4 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μm]	W5 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması [μm]
R1	3,1120	0,0190	0,0189	0,0192	0,0191
R2	3,5010	0,0190	0,0189	0,0190	0,0189
R3	3,8900	0,0189	0,0187	0,0189	0,0191
R4	4,2790	0,0189	0,0189	0,0189	0,0188
R5	4,6680	0,0186	0,0191	0,0189	0,0188

Bu değerler, rim kalınlığı standart R3 değerinde iken yaşanan kaymalara göre normalize edilmiştir. Ortaya çıkan eksenel kontak kayma grafiği aşağıda Şekil 4.8’teki gibidir.



Şekil 4.8 Z76 Dişlisi Eksenel Kontak Kayma Grafiği

Z76 dişlisinin eksenel kayma grafiği incelendiğinde oturmuş bir düzenin olmadığı görülebilir. Henüz ağı kalınlığı W1 seviyesindeyken, başka bir deyişle ağı kalınlığı standart 1,75 mm’den 1,40 mm’ye düşürüldüğünde rim kalınlığının etkisi görece daha yüksek olmaktadır. Bunun belirtileri de yukarıdaki grafikte ağı kalınlığı W1 iken ortaya çıkan eğrinin doğrusal olmasa da sürekli azalma yönünde olması gösterilebilir. Ağı kalınlığı W2 ve üzeri seviyelere çıktığında ise rim kalınlığı Z76 dişlisi için eksenel kaymalarda $\pm\%20$ aralığında anlamsızlaşmaktadır.

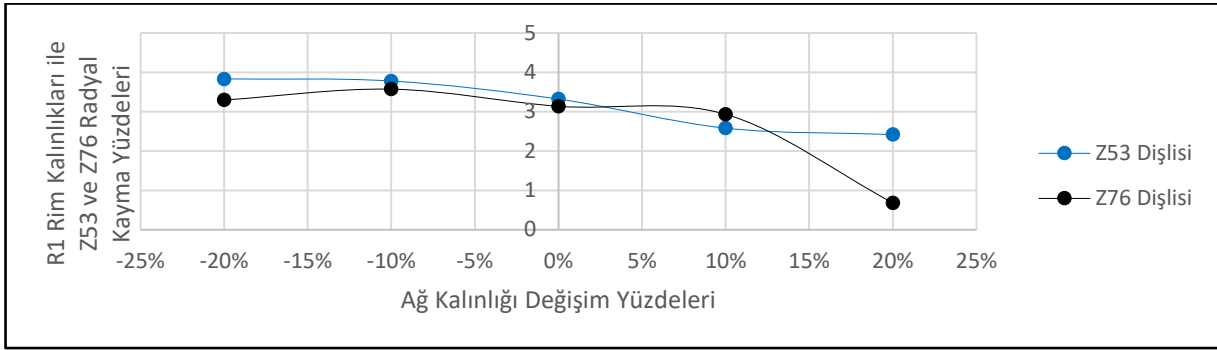
4.1.3. Z53 ve Z76 dişlisi analiz çıktıları karşılaştırması

Eksenel kaymalar geometrik değişime bağlı olarak düzenli bir yönelim göstermediği için bu bölüm içerisinde geometrik değişimlere bağlı anlamlı çıktılar veren radyal kaymalar detaylı incelenmiştir. Birbiriyle kontakta olan Z53 ve Z76 dişlilerinin farklı rim ve ağı kalınlıklarında gösterdikleri radyal kaymalar karşılaştırmalı olarak bu bölümde ele alınmıştır. Bu bölümde Z53 dişlisinin ve Z76 dişlisinin radyal kontak kayma durumları incelenirken R3 rim kalınlığına göre değişim yüzdeleri alındığında ortaya aşağıdaki Çizelge 4.10 çıkmaktadır.

Çizelge 4.10 Z53 ve Z76 Dişlilerinin Radyal Kontak Kayma Durumlarının Standart Rim Kalınlığı Çıktılarına Göre Değişim Yüzdeleri

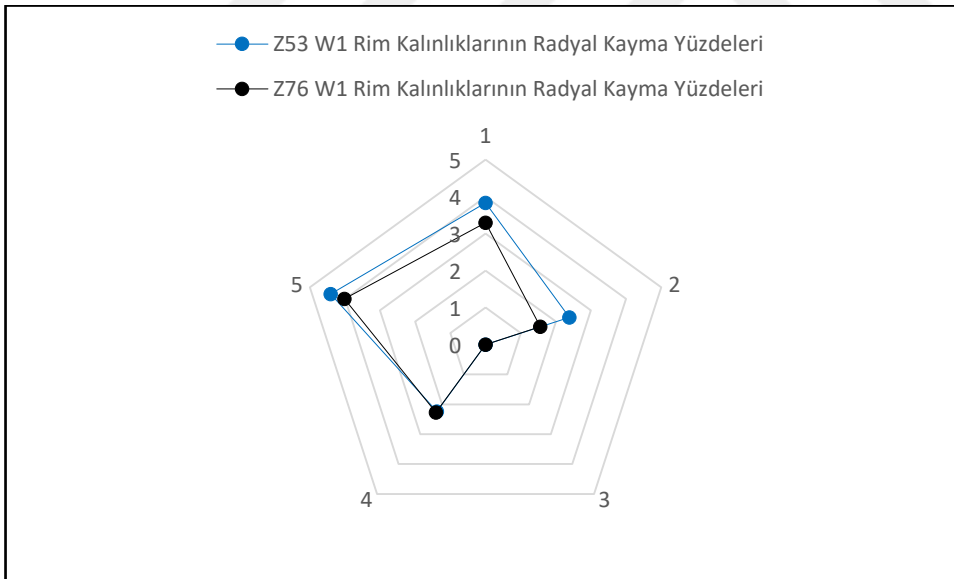
Z53 Dişlisi Kontak Kayma Değerleri Değişim Yüzdeleri	Rim Kalınlığı Değişimi [%]		W1 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W2 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W3 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W4 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W5 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması
	R1	-20%	3,8297	3,7767	3,3187	2,5792	2,4157
	R2	-10%	2,3871	2,1734	1,5098	1,2789	1,2863
	R3	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	R4	10%	2,2356	1,7395	1,9318	1,8104	1,4821
	R5	20%	4,4069	3,8493	3,3960	3,7156	2,8233
Z76 Dişlisi Kontak Kayma Değerleri Değişim Yüzdeleri	Rim Kalınlığı Değişimi [%]		W1 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W2 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W3 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W4 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W5 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması
	R1	-20%	3,2938	3,5698	3,1339	2,9311	0,6817
	R2	-10%	1,5574	1,9791	1,3134	1,8180	0,1962
	R3	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	R4	10%	2,2762	1,7162	2,0063	1,1346	1,5212
	R5	20%	4,0121	3,6404	3,6426	3,6239	2,4364

Bu değişimler incelendiğinde ağı kalınlığı azaldıkça rim kalınlığındaki değişimin Z53 dişlisinde meydana gelen radyal kaymalarda daha etkili olduğu görülmektedir. Ağı kalınlığının arttığı noktalarda ise Z76 dişlisinde meydana gelen radyal kaymalarda Z53 dişlisinde meydana gelen radyal kaymalara nazaran çok hızlı bir şekilde düşüş gözlenmektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 R1 Rim Kalınlıklarında Ağ Kalınlığı Değişimine Bağlı Radyal Kontak Kayma Yüzdeleri

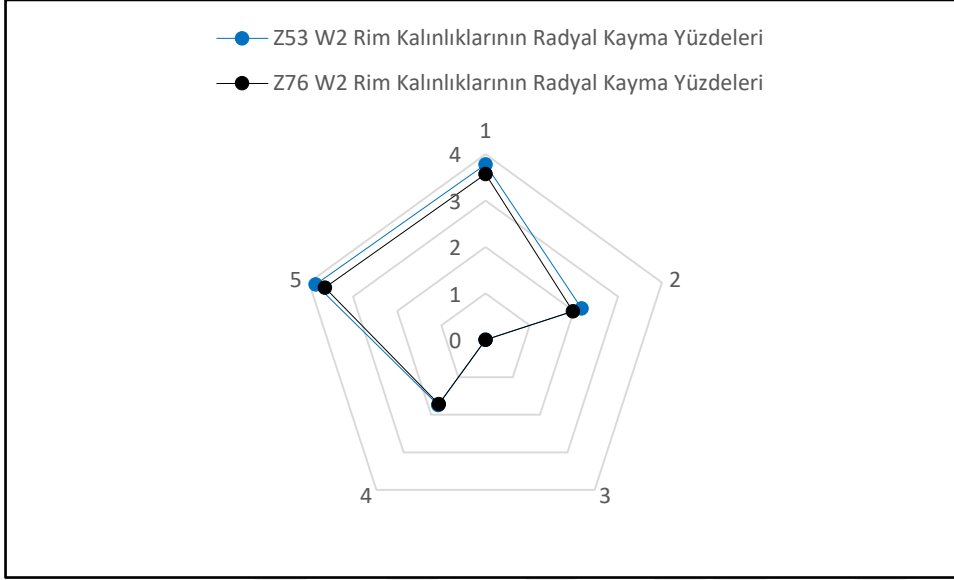
Radyal kontak kayma durumları incelenirken işaretçi olan radar grafik yöntemi ile ağ ve rim kalınlıklarının bu radyal kayma çıktılarına yüzde cinsinden etkileri aşağıdaki grafiklerde (Şekil 4.10 - Şekil 4.14) gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Z53 ve Z76 Ağ Kalınlıkları W1 İken Rim Kalınlıklarına Bağlı Radyal Kontak Kayma Yüzdeleri

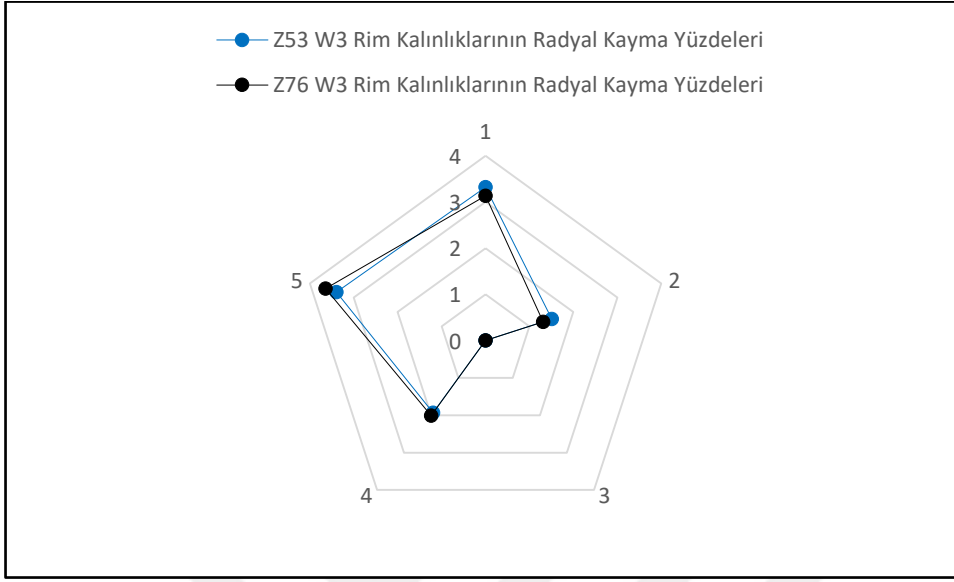
Z76 dişlisi daha büyük çapa sahip olduğu için W1 gibi ince ağ kalınlıklarında, rim kalınlığı değişimleri özellikle Z76 dişlisi için daha düşük radyal kayma yüzdeleri ile sonuçlanmıştır. Z53 dişlisinde ise negatif ve pozitif sapmalarda daha keskin artışlar

gözlemlenmiştir. Bu durum, Z53'ün küçük çaplı olması nedeniyle kenar katılığına karşı daha duyarlı olduğunu göstermektedir



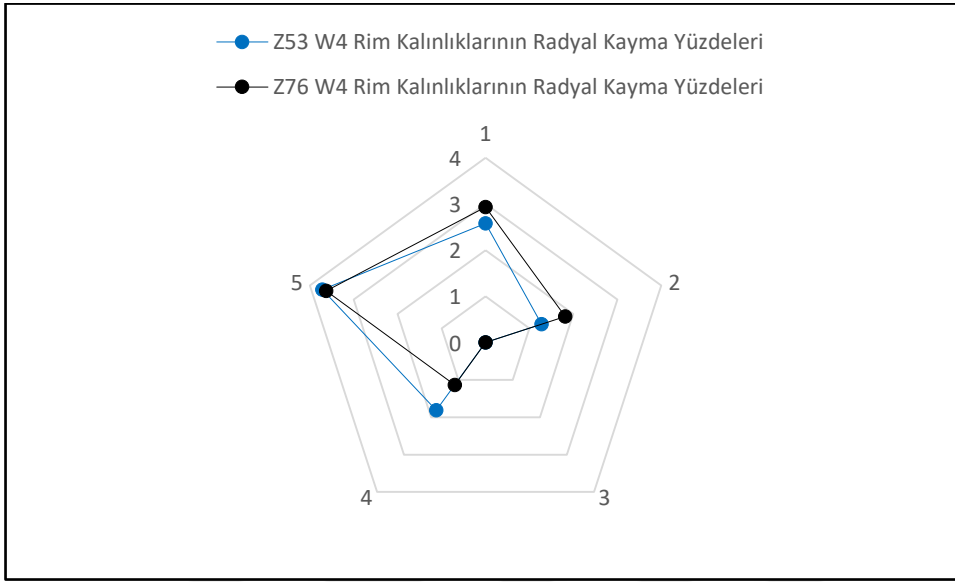
Şekil 4.11 Z53 ve Z76 Ağ Kalınlıkları W2 İken Rim Kalınlıklarına Bağlı Radyal Kontak Kayma Yüzdeleri

Ağ kalınlığı W2 seviyesine çıkarıldığında, her iki dişlide de genel kayma miktarlarında azalma gözlemlenmiştir. Ancak Z76 dişlisinde bu azalmanın daha belirgin olduğu gerçeği, W1 ağ kalınlığındaki kaymaya kıyasla Z53 ile neredeyse aynı çıktıları göstermesi ile kanıtlanabilir.



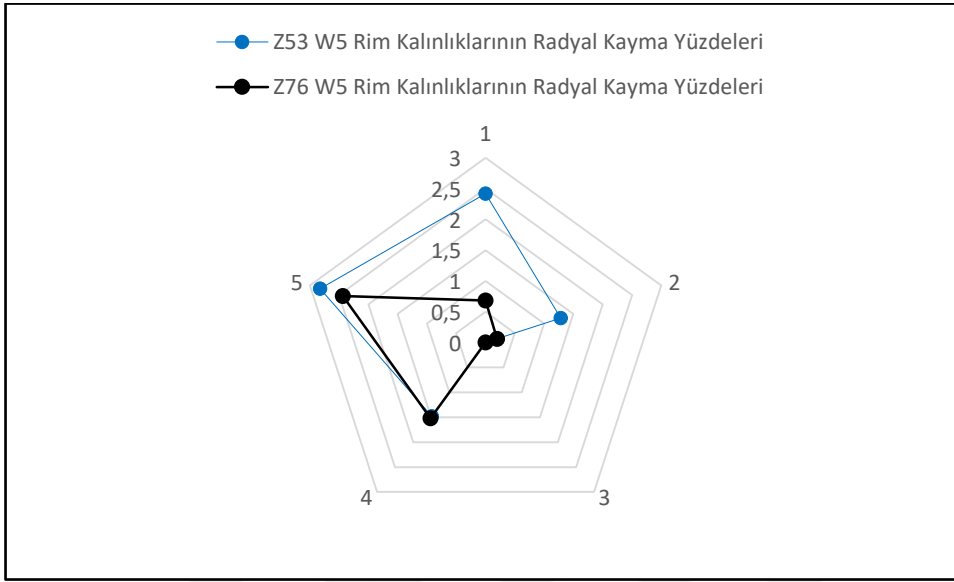
Şekil 4.12 Z53 ve Z76 Ağ Kalınlıkları W3 İken Rim Kalınlıklarına Bağlı Radyal Kontak Kayma Yüzdeleri

W3 ağ kalınlığı ile birlikte Z53 ve Z76 dişlileri arasındaki davranışlarda değişiklik gözlenmeye başlamaktadır. Öncesinde daha düşük radyal kontak kayma yüzdeleri veren Z76 dişlisi, bu noktadan itibaren daha yüksek yüzdelere kontak kayması göstermektedir. Z53 dişlisinin düşük çapta sahip olduğu görece yüksek kalınlık şaftın katılığını desteklemekte ve wim kalınlığının toplam katılığa etkisini azaltmaktadır.



Şekil 4.13 Z53 ve Z76 Ağ Kalınlıkları W4 İken Rim Kalınlıklarına Bağlı Radyal Kontak Kayma Yüzdeleri

Ağ kalınlığı W4 seviyesine geldiğinde, her iki dişli de düşük kontak kayması değerleri ile daha stabil performans göstermiştir. Z76 dişlisinin rim kalınlığı %10 artmış olarak R4 seviyesinde değerlendirilmiş ve %20 artış ile R5 seviyesine geldiğinde Z76 dişlisi için en düşük kayma yüzdesi elde edilmiştir. Geniş ağ yapısına sahip Z76 dişlisinin ağ kalınlığı arttığında rim kalınlığının artışı ile bir noktada katılık değerleri arasında çok düşük artış olması dişli yapısının geometrik artışının oransal olarak azalması ile açıklanabilir.



Şekil 4.14 Z53 ve Z76 Ağ Kalınlıkları W5 İken Rim Kalınlıklarına Bağlı Radyal Kontak Kayma Yüzdeleri

En kalın ağ yapısında ise her iki dişlide de rim kalınlığı etkisi daha da azalmıştır. Özellikle Z76 dişlisi ağ yapısının en kalın hali ile yüksek bir katılık göstermeye başladığı için rim kalınlığından çok daha az etkilenir olmuştur.

Z53 dişlisinin ve Z76 dişlisinin eksenel kontak kayma durumları incelenirken R3 rim kalınlığına göre değişim yüzdeleri alındığında ortaya aşağıdaki Çizelge 4.11 çıkmaktadır.

Çizelge 4.11 Z53 ve Z76 Dişlilerinin Eksenel Kontak Kayma Durumlarının Standart Rim Kalınlığı Çıktılarına Göre Değişim Yüzdeleri

Z53 Dişlisi Kontak Kayma Değerleri	Rim Kalınlığı		W1 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W2 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W3 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W4 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W5 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması
	R1	-20%	1,8670	1,9497	1,4304	1,4825	1,5989
	R2	-10%	0,5674	0,5425	0,5519	0,6205	0,4952
	R3	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	R4	10%	0,6505	0,4907	0,7155	0,5972	0,0321
	R5	20%	0,9887	1,1781	1,1942	1,2450	0,7428
	Rim Kalınlığı		W1 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W2 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W3 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W4 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W5 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması
Z76 Dişlisi Kontak Kayma Değerleri	R1	-20%	0,4728	1,1170	1,3237	0,0339	0,0659
	R2	-10%	0,3665	0,9235	0,5859	0,0346	0,9483
	R3	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	R4	10%	0,0827	0,9457	0,2350	1,4668	0,3460
	R5	20%	1,6810	2,1671	0,1723	1,0636	0,0787
	Rim Kalınlığı		W1 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W2 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W3 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W4 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması	W5 Ağ Kalınlığı ile Kontak Kayması

Bu değişim yüzdeleri incelendiğinde genel olarak çok küçük değerler oldukları görölmektedir. Her iki dişli için de anlamlı bir değişim eğiliminin bulunmadığı ortaya çıkmaktadır.

4.1.4. Dişli çifti KissSoft kontak analizleri

Dişli çiftlerinde meydana gelen kontak kaymaları radyal ve eksenel olarak kayıt altına alınmıştır. Kontak analizi yapabilmek adına radyal kontak kaymaları her iki dişlide farklı rim ve ağ kalınlıklarıyla elde edildikten sonra dişlilerin ortak kontak alanından uzaklaşma eğilimlerine göre eğiklik hesaplarında değerlendirilmiştir. Aynı şekilde tüm geometriler için eksenel kontak kaymaları kullanılarak dişli çiftinin kondağında oluşabilecek sapma değerleri hesaplanmıştır. Tüm deplasman değerleri milimetre cinsinden ölçölmüş olup, ön değerlendirmeler sonrası KissSoft yazılımına Şekil 4.19'daki gibi girilmiştir.

KissSoft yazılımı içerisinde eğiklik ve sapma değerleri ile birlikte her dişli geometrisinin rim bölgesine kadar olan iç çapı ve o geometrinin ağ kalınlığı gibi girdiler yapılmıştır. Yazılım içerisinde Gear A veya Gear 1 olarak adlandırılan dişli bu çalışmada Z53 olarak adlandırılan dişlidir. Aynı şekilde yazılım içerisinde Gear B veya Gear 2 olarak adlandırılan dişli bu çalışmada Z76 olarak adlandırılan dişlidir. Aşağıda Şekil 4.15'de KissSoft programında bu dişlilere dair girilen genel bilgilerin ara yüz sayfası gösterilmektedir.

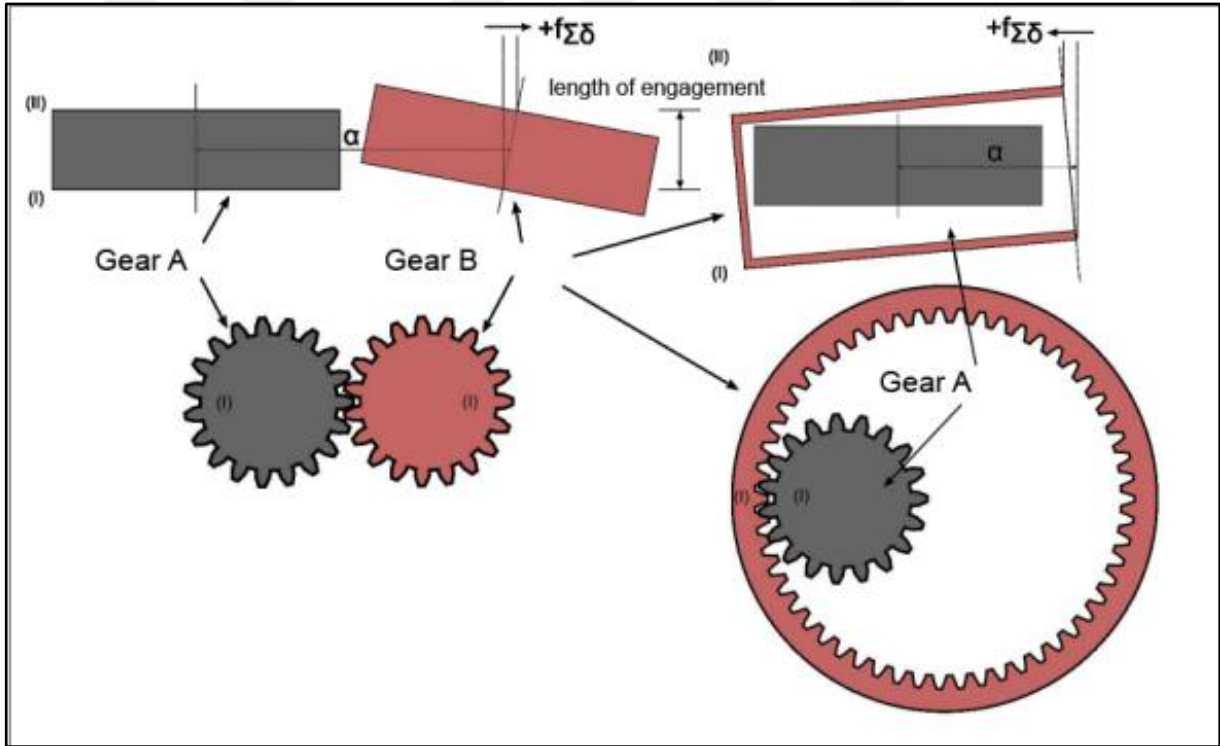
The screenshot displays the 'Basic data' tab of the KissSoft software. The interface is organized into several sections:

- Geometry Section:**
 - Tooth geometry:** Set to 'symmetric'.
 - Normal module (m_n):** Input field with 'mm' unit.
 - Normal pressure angle (α_n):** Input field with '°' unit.
 - Gear 1:** Set to 'spur gear'.
 - Helix angle at reference circle (β):** Input field with '0.0000' and '°' unit.
 - Center distance (a):** Input field with 'mm' unit.
 - Number of teeth (z):** Input fields for Gear 1 and Gear 2.
 - Facewidth (b):** Input field with 'mm' unit.
 - Profile shift coefficient (x):** Input fields for Gear 1 and Gear 2.
 - Quality (ISO 1328:2013) A:** Input fields for Gear 1 and Gear 2.
- Material and lubrication Section:**
 - Gear 1:** Material set to 'Case hardening steel'.
 - Gear 2:** Material set to 'Case hardening steel'.
 - Lubrication:** Set to 'Oil injection lubrication'.

Şekil 4.15 KissSoft Dişli Genel Veri Girişi Ara Yüz Sayfası

Her iki dişli KissSoft programına yukarıdaki gibi tanıtıldıktan sonra ilk olarak standartlara göre çizilmiş geometriler ile elde edilen sonuç incelenmiştir. Bu inceleme sonucu elde edilen kontak kuvvet dağılımı ve kontak kuvveti tepe değeri diğer geometrilerle elde edilecek çıktılara referans olması amacıyla kayıt altına alınmıştır.

Inclination (eğiklik) olarak adlandırılan ve sonlu elemanlar analiz modelinde X yönünde yer alan radyal deformasyon çıktıları ile hesaplanan kontak kayma olayı aşağıda Şekil 4.16 ile gösterilmiştir.

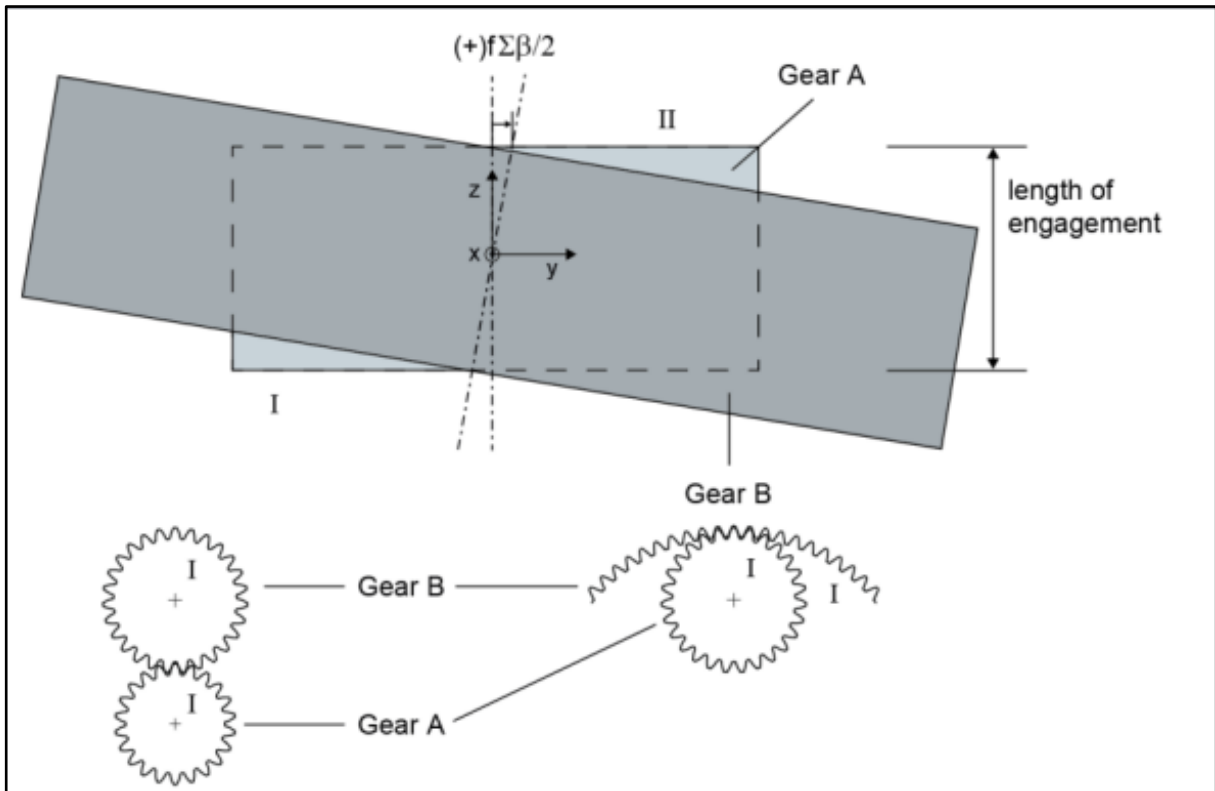


Şekil 4.16 İki Dişli Arasındaki Kontakta Meydana Gelen Eğiklik (Inclination) Olayı

Referans olacak kontak kuvvet dağılımı çalışması için Z53 W3 R3 ve Z76 W3 R3 geometrileri kullanılmıştır. Diğer kıyas çalışmaları için bölüm 3.6. Değerlendirme Yöntemleri içerisinde anlatıldığı gibi 52 farklı kontak durum hesabı kullanılmıştır. Bu 52 farklı kontak incelemesinde her iki geometrinin radyal olarak kontak bölgesinden uzaklaşma durumları

incelenmiş ve kontakta oluşabilecek en yüksek radyal kaymaya göre eğiklik değerleri hesaplanmıştır.

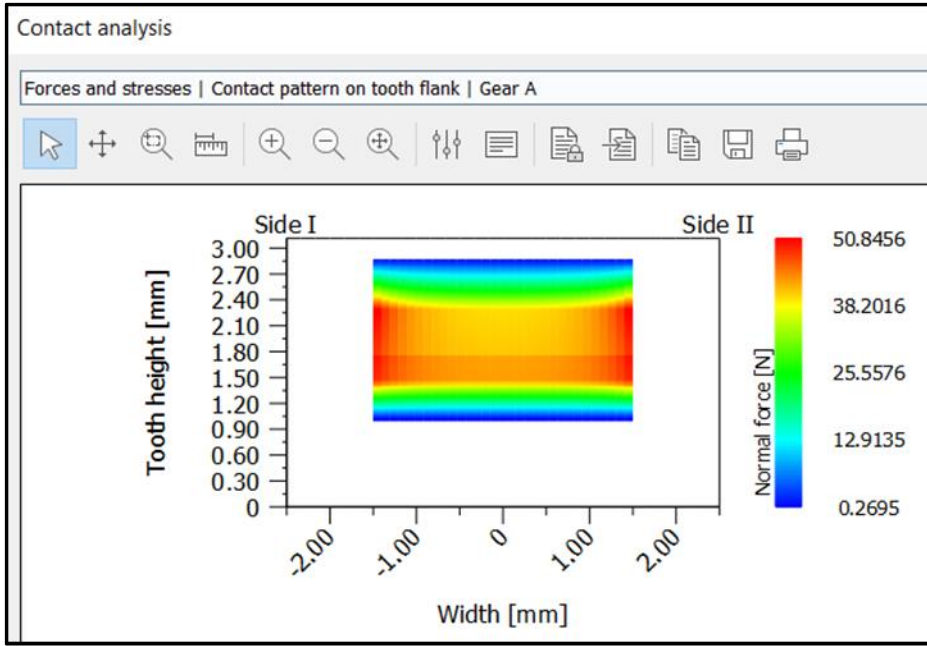
Deviation (sapma) olarak adlandırılan ve sonlu elemanlar analiz modelinde Z yönünde yer alan eksenel deformasyon çıktıları ile hesaplanan kontak kayma olayı aşağıda Şekil 4.17 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.17 İki Dişli Arasındaki Kontakta Meydana Gelen Sapma (Deviation) Olayı

Referans olacak kontak kuvvet dağılımı çalışması için Z53 W3 R3 ve Z76 W3 R3 geometrileri kullanılmıştır. Diğer kıyas çalışmaları için bölüm 3.6. Değerlendirme Yöntemleri içerisinde anlatıldığı gibi 52 farklı kontak durum hesabı kullanılmıştır. Bu 52 farklı kontak incelemesinde her iki geometrinin eksenel olarak kontak bölgesinden uzaklaşma durumları incelenmiş ve kontakta oluşabilecek en yüksek eksenel kaymaya göre sapma değerleri hesaplanmıştır.

İlk olarak herhangi bir statik analiz öncesinde Z53 ve Z76 için standarda göre çizilen geometriler ile KissSoft üzerinde kontak çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada kontak kayma değerleri eğiklik ve sapma için 0 girilmiştir. Kayma olmadığı durumda diş üzerinde oluşacak kontak kuvvet dağılımı Şekil 4.18'deki gibidir.



Şekil 4.18 Z53 ve Z76 Dişlilerinin Standart Geometrilerinin Kontak Kayması Olmadan Kontak Kuvvet Dağılımı

Yukarıda Şekil 4.18 ile verilen kuvvet dağılımı, dişlilerin çalışırken aralarında oluşturacakları kontakların izini de vermektedir. Şekil 4.18 ile gösterilen kuvvet dağılımının simetrik ve düzgün yapıda olduğu, kuvvetin diş kontağı yüzeyince yayıldığı görülebilir.

İkinci olarak yine standarda göre oluşturulmuş geometriler kullanılarak KissSoft üzerinde kontak çalışması yapılmıştır. Bu sefer eğiklik ve sapma için Z53 W3 R3 ve Z76 W3 R3 geometrileriyle yapılan statik analizlerden alınan radyal ve eksenel kaymalar kullanılmıştır. Buna göre her iki dişlinin birbirlerine göre radyal ve eksenel yönde uğradıkları deformasyonun kontakta uzaklaşma veya kontağa yaklaşma durumları gözetilerek eğiklik ve sapma hesaplamaları yapılmıştır.

Hesaplamalar ile elde edilen değerler Şekil 4.19'te gösterildiği gibi girilmiştir. 1,0818 μm eğiklik ve 0,5516 μm sapma ile oluşan kontak kuvvet dağılımı da Şekil 4.20 ile gösterilmiştir. Buradaki kontak kuvvet dağılımı tepe değeri artışı %18 seviyesindedir.

Define axis alignment (contact analysis)

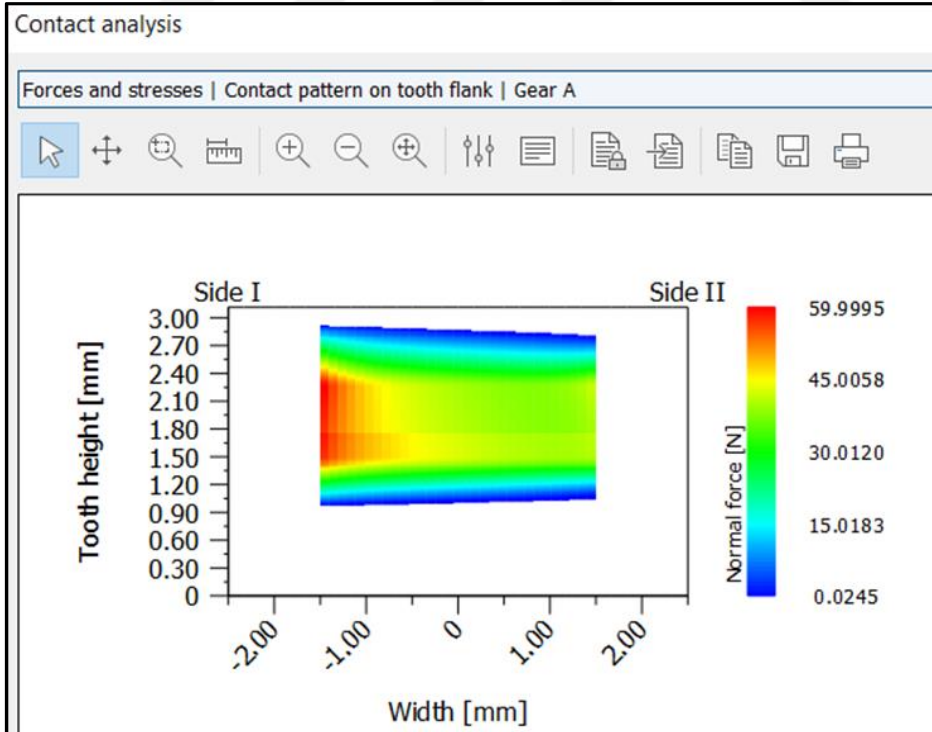
Axis alignment Gear body Torsion

Important: All inputs here refer to the nominal load Tnom defined in the "Rating" tab.

In the calculation, the inputs are scaled with: 125.0000 %

	Constant	Proportional (T ₁ = Nm)	
Shaft Gear 1 file			
Deviation error of axis Gear 1 - Gear 2 f _{2p}	0.551	0.0000	μm
Inclination error of axis Gear 1 - Gear 2 f _{2s}	0.819	0.0000	μm
Shaft Gear 2 file			
☐ Shaft/Gear suppress plausibility check			
Permissible deviation Shaft/Gear	1.0000		%

Şekil 4.19 Eğiklik ve Sapma Değerlerinin Girildiği KissSoft Ara Yüz Penceresi



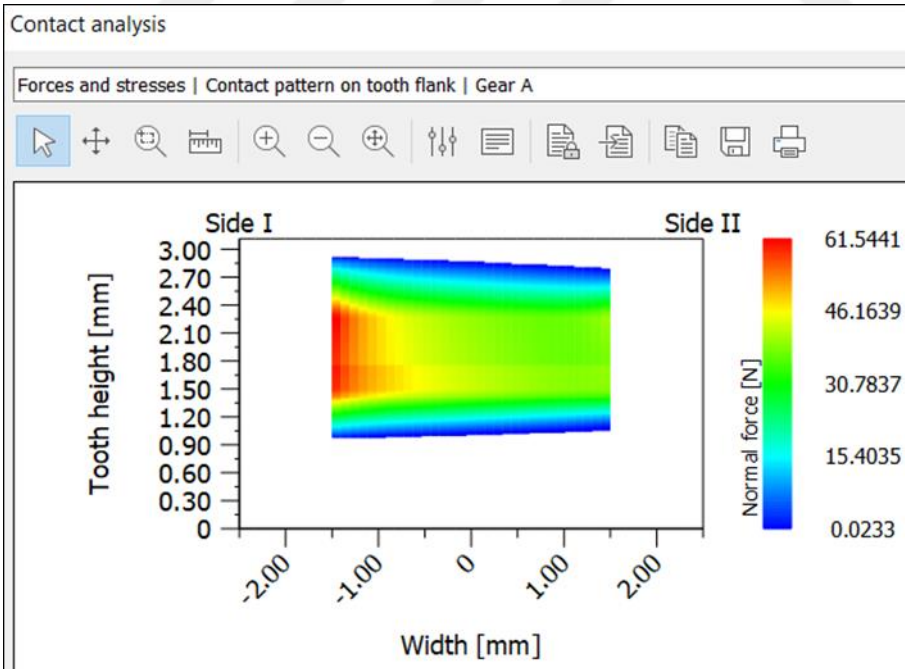
Şekil 4.20 Z53 W3 R3 ve Z76 W3 R3 Geometrilerinin Eğiklik ve Sapma ile Oluşturdukları Kontak Kuvvet Dağılımı

Z53 W1 R1 ve Z76 W1 R1 dişlilerinin geometrileri KissSoft'a Şekil 4.21'deki gibi girilmiştir. Şekil 4.18'de ise bu dişli çiftinin 1,4815 μm eğiklik ve 0,5514 μm sapma ile oluşan kontak kuvvet dağılımı gösterilmiştir. Buradaki kontak kuvvet tepe değeri artışı %21 seviyesindedir.

Gear 1		Gear 2	
Drawing number	Spur	Spur	
Rim definition	Gear body without rim (B)	Gear body without rim (B)	
Rim thickness coefficient	$s_{e1}' = s_{e1}/m_{n1}$		
Inner diameter	d_i	56.632	mm
Inner diameter of gear rim	d_{iR}		mm
Web thickness factor	$b_{e1}' = b_{e1}/b$		
Web thickness	b_e	1.6000	mm
Tooth runout (documentation only)	None	None	

OK Cancel

Şekil 4.21 Z53 W1 R1 ve Z76 W1 R1 Geometrilerinin KissSoft İçerisinde Boyutsal Girdileri



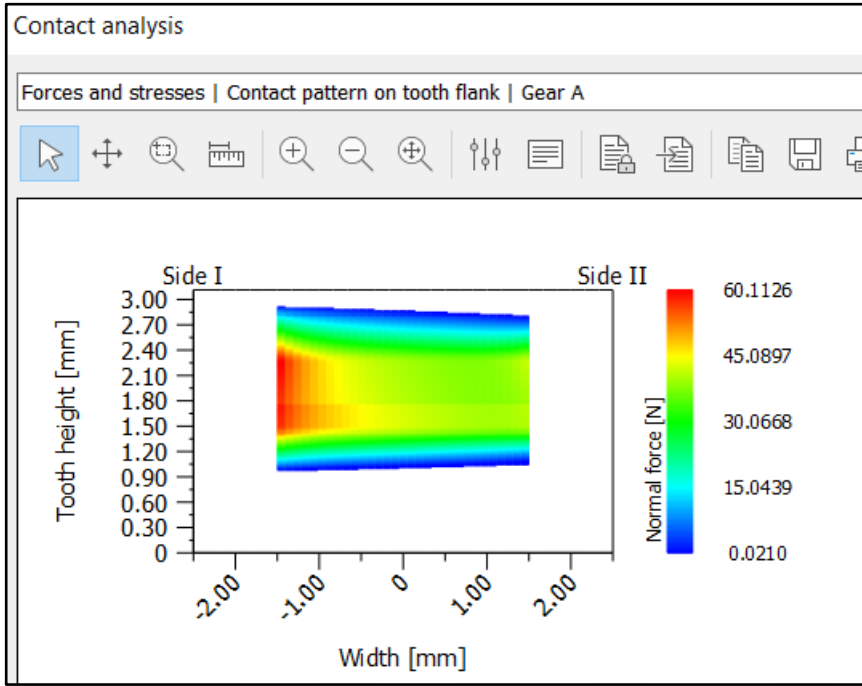
Şekil 4.22 Z53 W1 R1 ve Z76 W1 R1 Geometrilerinin Eğiklik ve Sapma ile Oluşturdukları Kontak Kuvvet Dağılımı

Z53 ve Z76 dişlileri için hem ağ hem de rim kalınlıklarının düşük olduğu bu kombinasyonda kuvvet dağılımı en düzensiz yapıdadır. En yüksek normal kuvvet değeri de bu kombinasyonda görülmüştür. Bunun sebebi de dişlilerin olabilecek en esnek yapıda olmaları ve yük aktarımı sırasında en yüksek defromasyon değerlerine ulaşmaları sonucu kuvvet dağılımında lokal birikmelerin olması gösterilebilir. Z53 W1 R1 ve Z76 W5 R5 dişlilerinin geometrileri KissSoft'a Şekil 4.23'deki gibi girilmiştir. Şekil 4.24'de ise bu dişli çiftinin 1,1102 μm eğiklik ve 0,5519 μm sapma ile oluşan kontak kuvvet dağılımı gösterilmiştir.

	Gear 1	Gear 2
Drawing number	Spur	Spur
Rim definition	Gear body without rim (B)	Gear body without rim (B)
Rim thickness coefficient	$s_{0.1} = s_0 / m_n$	
Inner diameter	d_i 56.6320 mm	81.7840 mm
Inner diameter of gear rim	d_{i0}	
Web thickness factor	$b_{0.1} = b_0 / b$	
Web thickness	b_0 1.6000 mm	2.1000 mm
Tooth runout (documentation only)	None	None

Şekil 4.23 Z53 W1 R1 ve Z76 W5 R5 Geometrilerinin KissSoft İçerisinde Boyutsal Girdileri

Şekil 4.23'te gösterilen dişli diş kalınlıklarının farklı olması pratikte kontak kuvvet dağılımının sağlıklı olması ve köşe kontakların oluşmaması için faydalıdır. Bu farklılık özellikle rulman boşluğu ve montaj kaynaklı eksenel yönde oluşabilecek ufak kaymalarda her iki dişin olabilecek en fazla kontak alanı ile çalışmasını ve kontak kuvvet tepe değerinin düşük tutulmasını sağlar.



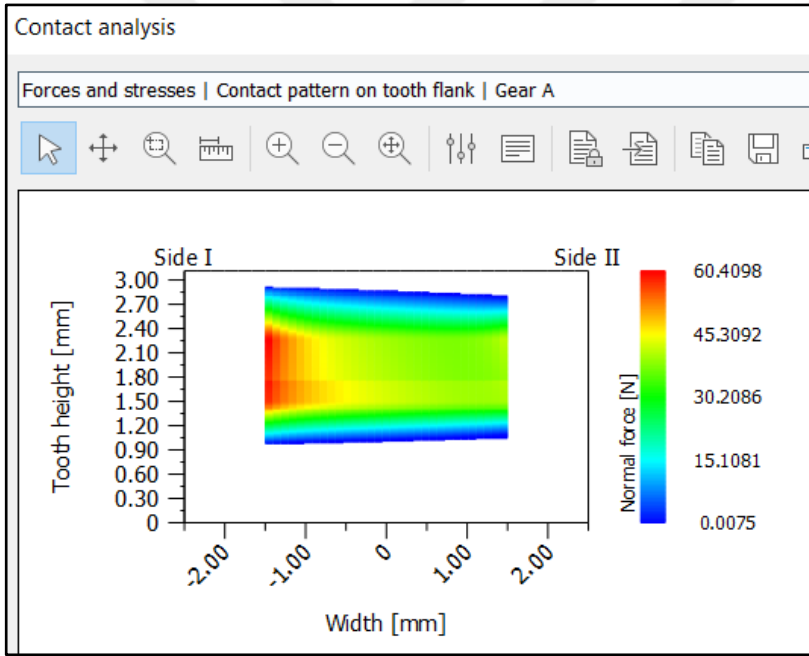
Şekil 4.24 Z53 W1 R1 ve Z76 W5 R5 Geometrilerinin Eğiklik ve Sapma ile Oluşturdukları Kontak Kuvvet Dağılımı

Burada Z53 en ince ağ ve rim kalınlığındayken Z76 en kalın ağ ve rim yapısına sahiptir. Z53'ün sahip olduğu düşük katılık ile Z76'nın sahip olduğu yüksek katılık eşleştirilmiştir. Beklendiği gibi dengesiz bir kontak kuvvet dağılımı ortaya çıkmıştır. Buradaki kontak kuvvet dağılımı tepe değeri artışı %18,2 seviyesindedir.

Z53 W5 R5 ve Z76 W1 R1 dişlilerinin geometrileri KissSoft'a aşağıda Şekil 4.25'de gösterildiği gibi girilmiştir. Şekil 4.26'te ise bu dişli çiftinin 1,1903 μm eğiklik ve 0,5506 μm sapma ile oluşan kontak kuvvet dağılımı gösterilmiştir. Buradaki kontak kuvvet dağılımı tepe değeri artışı %18,8 seviyesindedir.

		Gear 1	Gear 2
Drawing number		Spur	Spur
Rim definition		Gear body without rim (B)	Gear body without rim (B)
Rim thickness coefficient	$s_{a1}^* = s_{a2}/m_n$		
Inner diameter	d_i	53.527	84.896
Inner diameter of gear rim	d_{i2}		
Web thickness factor	$b_{s1}^* = b_{s2}/b$		
Web thickness	b_s	2.4000	1.4000
Toothing runout (documentation only)		None	None

Şekil 4.25 Z53 W5 R5 ve Z76 W1 R1 Geometrilerinin KissSoft İçerisinde Boyutsal Girdileri



Şekil 4.26 Z53 W5 R5 ve Z76 W1 R1 Geometrilerinin Eğiklik ve Sapma ile Oluşturdukları Kontak Kuvvet Dağılımı

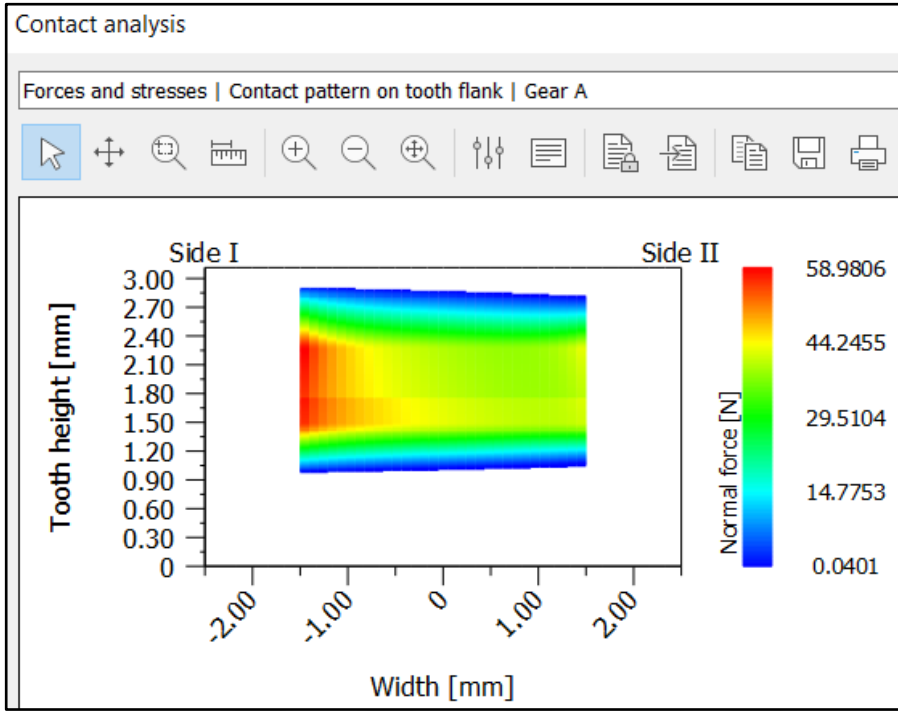
Burada Z53 en kalın ağ ve rim kalınlığındayken Z76 en ince ağ ve rim yapısına sahiptir. Z53'ün sahip olduğu en yüksek katılık ile Z76'nın sahip olduğu en düşük katılık eşleştirilmiştir. Beklendiği gibi dengesiz bir kontak kuvvet dağılımı ortaya çıkmıştır. Tam tersi kontak durumu (Şekil 4.24) ile bu kontak durumu (Şekil 4.26) kıyaslandığında Z76 dişlisinin düşük katılığa sahip olup Z53 dişlisinin yüksek katılığa sahip olduğu durumda görece daha yüksek kontak kuvveti elde edilmiştir. Düşük ve yüksek katılığa sahip dişlilerin eşleştirildiği her iki durum

arasındaki farka bakılarak, düşük çaplı (Z53) dişlinin yüksek ağ ve rim kalınlıklarıyla daha yüksek katılığa, büyük çaplı (Z76) dişlinin düşük ağ ve rim kalınlıklarıyla daha düşük katılığa ulaştığı söylenebilir.

Z53 W5 R5 ve Z76 W1 R1 dişlilerinin geometrileri KissSoft'a aşağıda Şekil 4.27'de gösterildiği gibi girilmiştir. Şekil 4.28'de ise bu dişli çiftinin 0,819 μm eğiklik ve 0,551 μm sapma ile oluşan kontak kuvvet dağılımı gösterilmiştir. Buradaki kontak kuvvet dağılımı tepe değeri artışı %16 seviyesindedir.

		Gear 1	Gear 2
Drawing number		Spur	Spur
Rim definition		Gear body without rim (B)	Gear body without rim (B)
Rim thickness coefficient	$s_{r1}^* = s_{r2}/m_n$		
Inner diameter	d_i	53.5270	81.7840 mm
Inner diameter of gear rim	d_{i2}		mm
Web thickness factor	$b_{s1}^* = b_{s2}/b$		
Web thickness	b_s	2.4000	2.1000 mm
Tooth runout (documentation only)		None	None

Şekil 4.27 Z53 W5 R5 ve Z76 W5 R5 Geometrilerinin KissSoft İçerisinde Boyutsal Girdileri



Şekil 4.28 Z53 W5 R5 ve Z76 W5 R5 Geometrilerinin Eğiklik ve Sapma ile Oluşturdukları Kontak Kuvvet Dağılımı

Şekil 4.20 ile kıyaslandığında görece daha düşük kontak kuvvetinin görülmesi düşük eğiklik ve sapma değerleriyle açıklanabilir. Buan sebep olan etken de yüksek ağ ve rim kalınlığı ile elde edilen yüksek katlıklar olarak gösterilebilir. En kalın dişli yapılarının eşleştirildiği bu vakada en düşük kontak kuvvet değeri elde edilmiştir. Statik dayanım anlamında en ideal tasarım her iki dişlinin de en kalın olduğu durumda ortaya çıkmaktadır. Ancak en ideal tasarıma ulaşmak için statik değerlendirmelerin yanı sıra dinamik değerlendirmeler de yapılmalıdır.

4.2. Modal Analizler

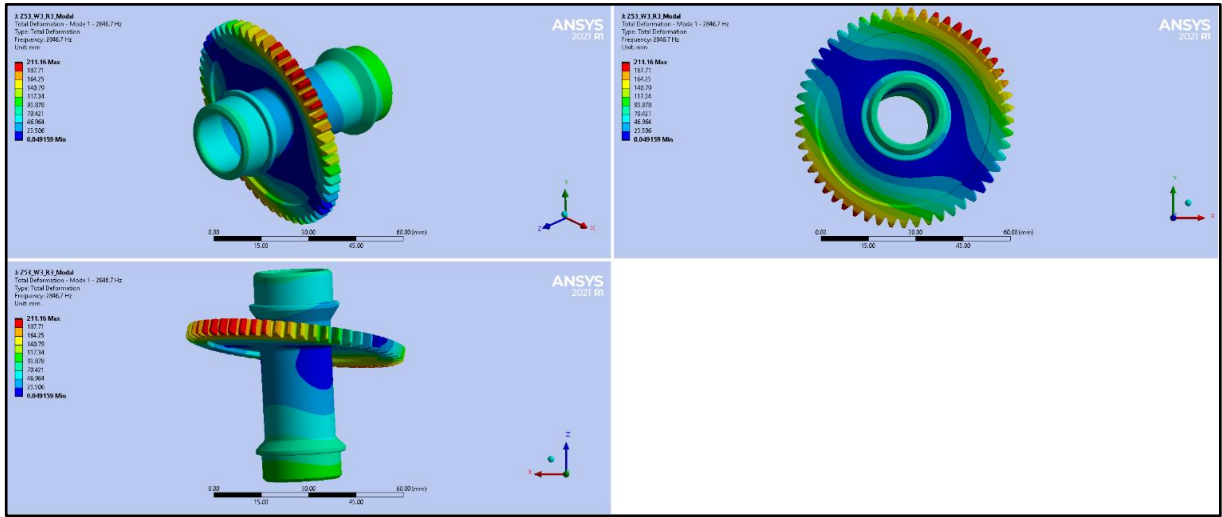
Z53 ve Z76 dişlileri ayrı ayrı dinamik olarak analiz edilmiştir. Analizler sırasında herhangi bir sınır koşulu kullanılmamış olup ilgili geometrilerin serbest durumda doğal frekans analizleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan meş yapısı için gerçekleştirilmiş olan meş yakınsama çalışmaları ise bölüm 3.4. Meş Yakınsama Çalışmaları içerisinde verilmiştir.

Dinamik analizlerin gerçekleştirilmesindeki asıl amaç harici titreşimlerden veya diş kontak durumlarından ortaya çıkan titreşimlerden dolayı yaşanabilecek kritik hız çakışmalarından kaçınma yollarını tespit etmektir. Havacılık aksesuar dişli kutularında bulunan dişliler birbirleri ile kontaklarından kaynaklı olarak, kendi dönüş hızlarının kendi üzerlerindeki diş sayılarıyla çarpımı ile bulunan frekanslarda da titreşim yaymaktadırlar. Şayet bir diş üzerinde sorun olduğunda ise o diş ilgili kontağa üzerinde bulunduğu şaftın her turunda bir kez uğrayacağı için yine dişli şaftının frekansında bir titreşime sebep olmaktadır. Yataklama problemi veya şaft kaçıklığı gibi durumlar da havacılık aksesuar dişli kutularında titreşimlere sebep olmaktadır. Titreşimler, dişli kutusunun içerisinde bulunan döner elemanlardan kaynaklanabileceği gibi doğrudan temasta olunan motor döner elemanlarından, aksesuarlardan veya yakın diğer güç aktarım sistemlerinden kaynaklanabilmektedir. Bu denli fazla sayıda titreşim kaynağının bulunduğu sistemlerde aksesuar dişli kutusunda bulunan dişlilerin bir kritik hız çakışması ile rezonansa girmemesi için pek çok müdahale ile tasarım iyileştirmeleri yapılmaktadır. Bu iyileştirme yollarından biri de şaft geometrileri üzerinde oynamalar yapmaktır. Bu modifikasyonlar sırasında ağırlık da olabildiğince düşük tutulmaya çalışılmaktadır. Sonuç olarak yapılan dinamik analizlerle muhtemel bir kritik hız çakışmasından en az müdahale ile ne ölçüde kaçınılabileceği gösterilmiştir.

Yapılan analizlerde tüm 50 geometrinin ilk 6 serbest modu haricinde ortaya çıkan sonraki ilk 12 modu için analiz ayarı kurulmuştur. Analizler sonucunda tüm mod hareketleri incelenerek literatüre göre adlandırılmıştır (Hayes & Davidson, 2014). Modların oluştuğu frekanslar kaydedilerek şaftlarda yapılan ağ kalınlığı ve rim kalınlığı etkileri incelenmiştir. İncelemeler sonucu bazı kalınlık değişimlerinin frekans modlarının sıralamasına etki edebildiği de görülmüştür. 4.2.1. Z53 dişlisi modal analizleri ve 4.2.2. Z76 dişlisi modal analizleri başlıkları altında paylaşılan frekans değerlerinin dişli kutusu çalışma aralığına (30 000 dev/dk – 50 000 dev/dk) kıyasla genel olarak yüksek olduğu görülebilir. Bu noktada motor harmonik mertebeleri de önem arz etmektedir. Özellikle çift yönlü eksantriklik, dişli temas hataları ve rulman kusurları gibi sebeplerden dolayı ortaya çıkan ikinci motor harmonik mertebesi, çalışma hızının 2 katı frekanslarda uyarımlara sebep olabilmektedir.

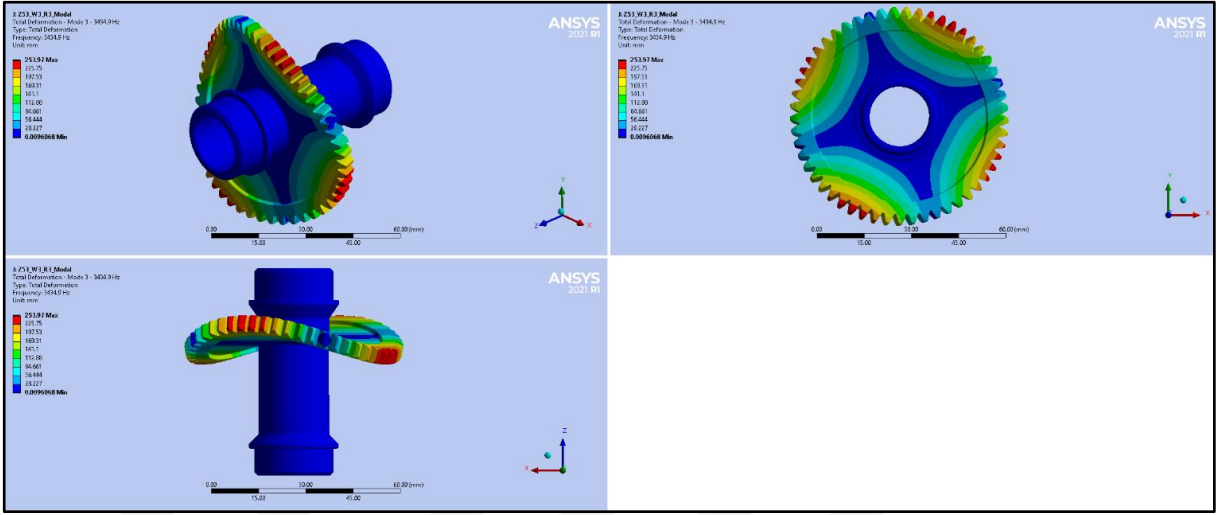
4.2.1. Z53 dişlisi modal analizleri

Serbest modları haricindeki ilk 12 modu bulunan Z53 dişlisinin standarda göre çizilmiş Z53 W3 R3 geometrisinin tüm modları aşağıda (Şekil 4.29–Şekil 4.36) gösterilmiştir. İlk modu ağ yapısının şaft etrafında yalpa hareketi yapması şeklinde olan Ağ Sallanma Modu olarak 2846,7 Hz frekansta çıkmıştır.



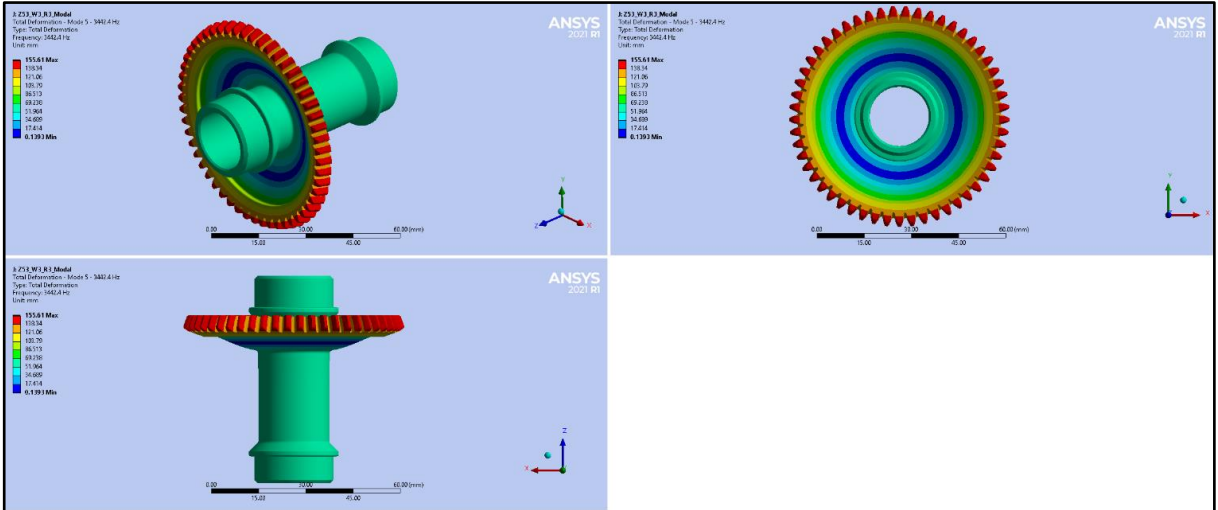
Şekil 4.29 Z53 W3 R3 Dişlisinin İlk Modu: Ağ Sallanma Modu 2846,7 Hz

Dişli geometrisinin ikinci modu şaft kısmı sabit iken ağ yapısının karşılıklı çift noktalardan büküldüğü Birinci Ağ Modu olarak 3434,95 Hz frekansta çıkmıştır. Bu mod hareketinin görülmesi durumunda diş kontaklarında kaymalar meydana gelir. Ayrıca yüksek titreşimlere sebep olabilmektedir.

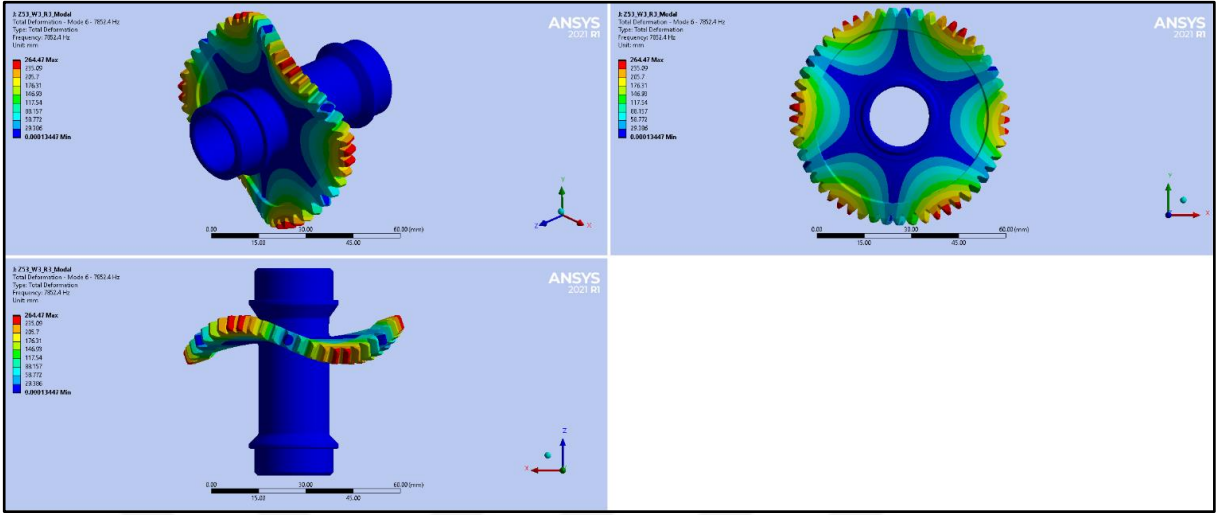


Şekil 4.30 Z53 W3 R3 Dişlisinin İkinci Modu: Birinci Ağ Modu 3434,95 Hz

Dişli geometrisinin üçüncü modu shaft kısmı ile ağ kısmının ekseninde ters yönlere doğrusal şekilde kaydığı Şemsiye Modu olarak 3442,4 Hz frekansta çıkmıştır. Dördüncü mod ise kıvrım noktalarının karşılıklı üçer adede çıktığı İkinci Ağ Modu olarak 7852,4 Hz frekansta çıkmıştır.

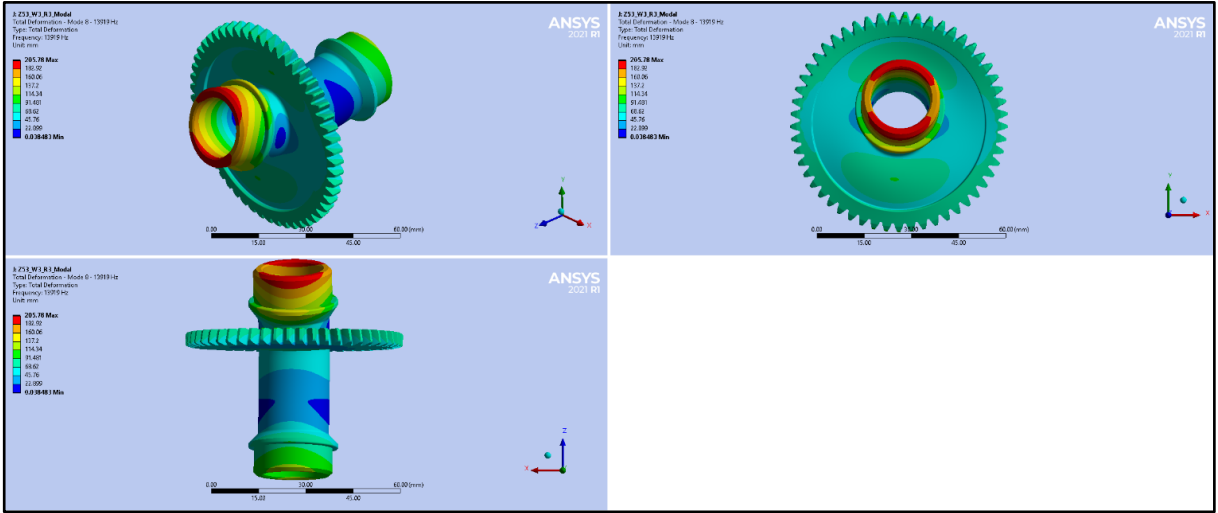


Şekil 4.31 Z53 W3 R3 Dişlisinin Üçüncü Modu: Şemsiye Modu 3442,4 Hz



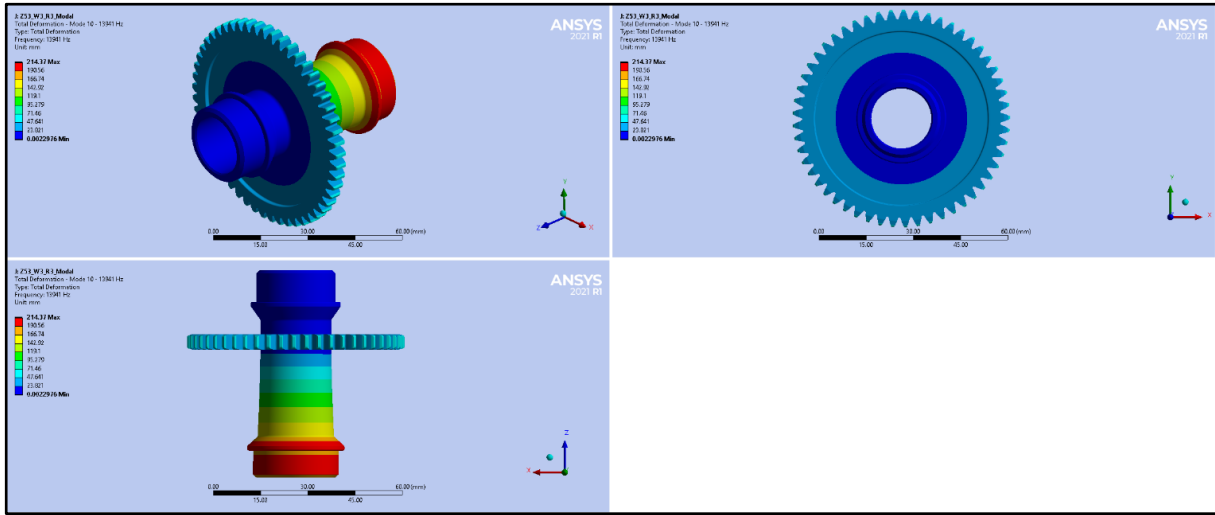
Şekil 4.32 Z53 W3 R3 Dişlisinin Dördüncü Modu: İkinci Ağ Modu 7852,4 Hz

Dişli geometrisinin dördüncü modunda ağ kısmı ekseninde karşılıklı üçer zıt yönlü noktadan dalgalanmaktadır. Bu dişlinin beşinci modu ise tüm yapının eğilme hareketi yaptığı Birinci Bükülme Modu olarak 13 919 Hz frekansta çıkmıştır.



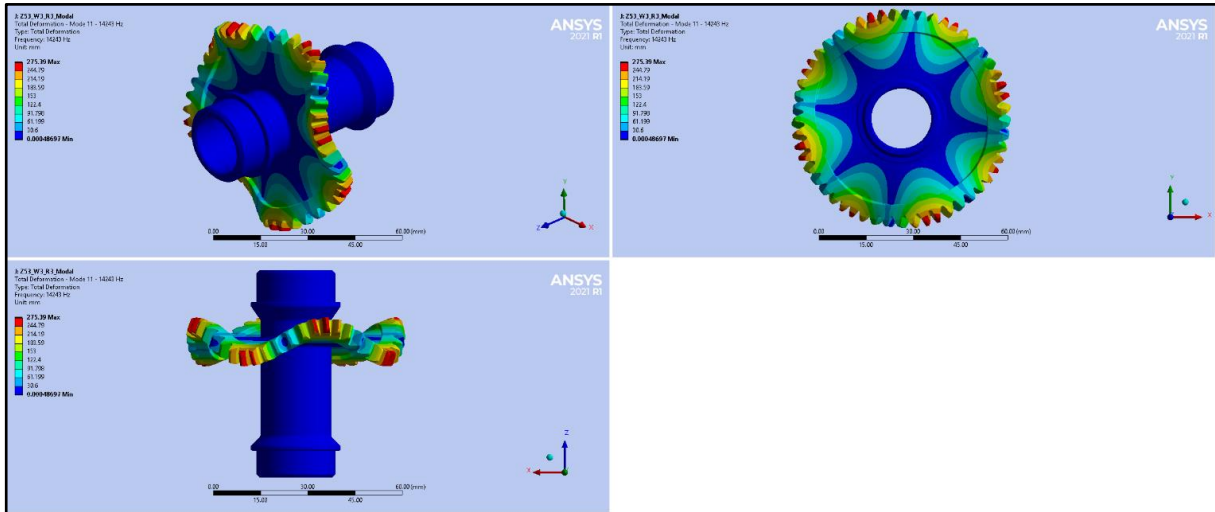
Şekil 4.33 Z53 W3 R3 Dişlisinin Beşinci Modu: Birinci Bükülme Modu 13 919 Hz

Dişli geometrisinin altıncı modu ağ kısmı ile şaft kısmının rotasyon hareketiyle burulduğu Birinci Burulma Modu olarak 13 941 Hz frekansta çıkmıştır.



Şekil 4.34 Z53 W3 R3 Dişlisinin Altıncı Modu: Birinci Burulma Modu 13 941 Hz

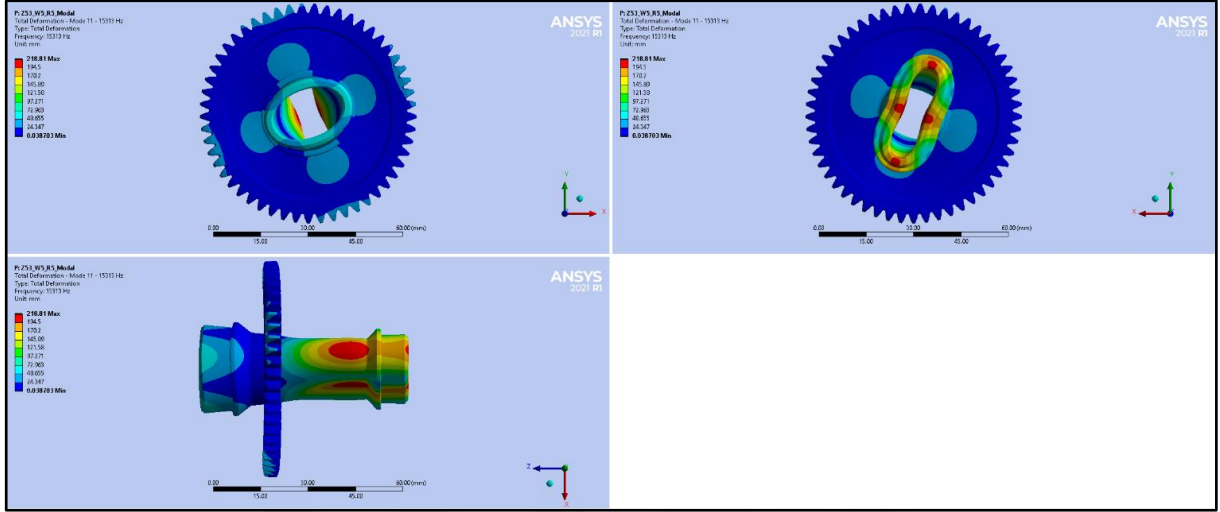
Z53 W3 R3 dişlisinin görülen son modu olan yedinci modu şaft kısmı sabit iken ağı yapısının karşılıklı dört noktadan zıt eksenlerde dalgalandığı Üçüncü Ağ Modu olarak 14 243 Hz frekansta çıkmıştır.



Şekil 4.35 Z53 W3 R3 Dişlisinin Yedinci Modu: Üçüncü Ağ Modu 14 243 Hz

Z53 dişlisinde ağı kalınlığı ve rim kalınlığı değiştirilerek elde edilen diğer geometrilerde de bu yedi mod hareketi farklı frekanslarda görülmüştür. Burada yalnızca Z53 W5 R5 geometrisi ile diğer tüm geometrilerde görülen modlardan farklı bir mod hareketi yakalanmıştır. Aşağıda

15 313 Hz frekansta oluşan şaftın radyal yönde kendi içine çöküp ardından dışarı genişlediği Şaft Radyal Modu gösterilmiştir.



Şekil 4.36 Z53 W5 R5 Dişlisinin Yedinci Modu: Şaft Radyal Modu 15 313 Hz

Z53 dişlisinin tüm dinamik analizleri gerçekleştirildikten sonra kaydedilen tüm mod frekans bilgileri ağ kalınlığı ve rim kalınlığı değişimlerine göre çizelgeler haline getirilmiştir. Aşağıdaki ilk çizelgede (Çizelge 4.12) soldan sağa doğru W1, W2 ve W3 ağ kalınlıklı üç grup halinde her grupta ağ kalınlıkları sabit olacak ve rim kalınlıkları R1’den R5’e kadar değişecek şekilde tüm geometrilerin mod hareketleri ve frekans değerleri verilmiştir. Bir sonraki çizelgede (Çizelge 4.13) de W3, W4 ve W5 ağ kalınlıklı üç grup içerisinde rim kalınlıkları R1’den R5’e kadar değişecek şekilde tüm geometrilerin mod hareketleri ve frekans değerleri verilmiştir.

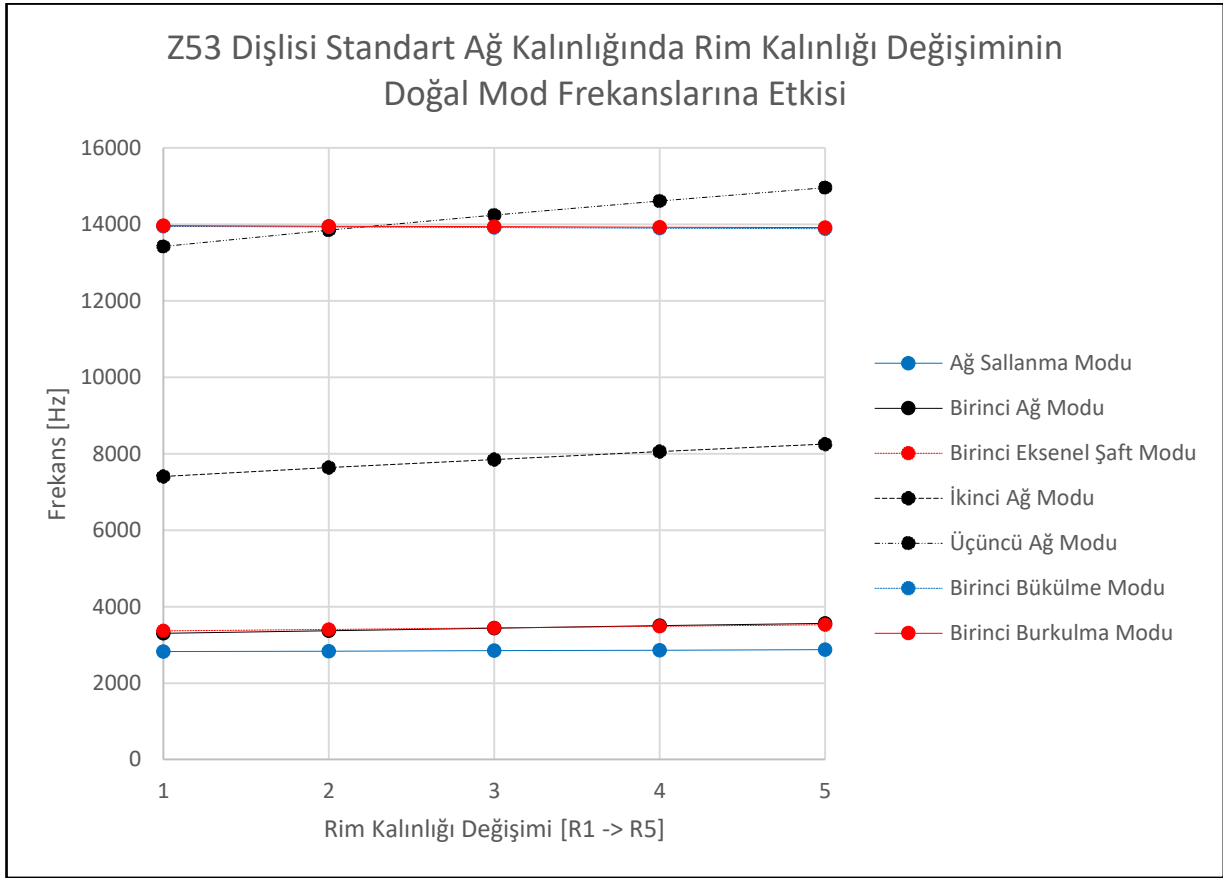
Çizelge 4.12 Z53 Dişlisi Ağ Kalınlıkları W1’den W3’e Kadar Çıkan Mod Hareketleri ve Frekansları

	Z53_W1_R1	Z53_W1_R2	Z53_W1_R3	Z53_W1_R4	Z53_W1_R5	Z53_W2_R1	Z53_W2_R2	Z53_W2_R3	Z53_W2_R4	Z53_W2_R5	Z53_W3_R1	Z53_W3_R2	Z53_W3_R3	Z53_W3_R4	Z53_W3_R5
1 Ağ Sallanma Modu	2261.1	2273.1	2287.4	2303.7	2321.9	2546.7	2557.2	2570.1	2585.3	2602.6	2828.1	2836	2846.7	2859.9	2875.2
2	2261.1	2273.1	2287.4	2303.7	2321.9	2546.7	2557.2	2570.1	2585.3	2602.6	2828.1	2836	2846.7	2859.9	2875.2
3 Birinci Ağ Modu	2813.6	2855.9	2899.3	2944.5	2990.9	3090.5	3131.4	3173.6	3217.6	3263.2	3302.95	3369.1	3434.95	3483.8	3526.6
4	2954.8	3039.1	3120.3	3199.1	3274.4	3122	3197.3	3271	3343.4	3413.6	3302.95	3369.1	3434.95	3500.5	3564.8
5 Birinci Eksenel Şaft Modu	2954.8	3039.1	3120.3	3199.1	3274.4	3122	3197.3	3271	3343.4	3413.6	3365.4	3403.1	3442.4	3500.5	3564.8
6 İkinci Ağ Modu	7118.9	7371.7	7606.5	7828	8034	7246.75	7489	7715.5	7930.25	8132.4	7406.3	7636.1	7852.4	8058.6	8253.6
7	7118.9	7371.7	7606.5	7828	8034	7246.75	7489	7715.5	7930.25	8132.4	7406.3	7636.1	7852.4	8058.6	8253.6
8 Birinci Bükülme Modu	13114	13566	13733	13716	13700	13247	13687	13848	13832	13819	13424	13849	13919	13903	13889
9	13114	13566	13836.5	13823	13807	13247	13687	13880	13865	13849	13424	13849	13919	13903	13889
10 Birinci Burkulma Modu	13775	13753	13836.5	13823	13807	13885	13865	13880	13865	13849	13949.5	13934	13941	13927	13915
11 Üçüncü Ağ Modu	13851	13847	13982	14372	14731	13907	13894	14094	14476	14832	13949.5	13934	14243	14615	14962
12	13851	13847	13982	14372	14731	13907	13894	14094	14476	14832	13973	13956	14243	14615	14962

Çizelge 4.13 Z53 Dişlisi Ağ Kalınlıkları W3'ten W5'e Kadar Çıkan Mod Hareketleri ve Frekansları

	Z53_W3_R1	Z53_W3_R2	Z53_W3_R3	Z53_W3_R4	Z53_W3_R5	Z53_W4_R1	Z53_W4_R2	Z53_W4_R3	Z53_W4_R4	Z53_W4_R5	Z53_W5_R1	Z53_W5_R2	Z53_W5_R3	Z53_W5_R4	Z53_W5_R5
1 Ağ Sallanma Modu	2828.1	2836	2846.7	2859.9	2875.2	3105.35	3110.4	3118.4	3128.95	3141.85	3378.05	3380.25	3385.35	3393.1	3403.3
2	2828.1	2836	2846.7	2859.9	2875.2	3105.35	3110.4	3118.4	3128.95	3141.85	3378.05	3380.25	3385.35	3393.1	3403.3
3 Birinci Ağ Modu	3302.95	3369.1	3434.95	3483.8	3526.6	3493.9	3551.3	3609.3	3667.9	3726	3692.05	3741.2	3791.7	3843.35	3895.2
4	3302.95	3369.1	3434.95	3500.5	3564.8	3493.9	3551.3	3609.3	3667.9	3726	3692.05	3741.2	3791.7	3843.35	3895.2
5 Birinci Eksenel Saft Modu	3365.4	3403.1	3442.4	3500.5	3564.8	3642.5	3676	3711.4	3748.9	3788.2	3923.2	3952	3983.1	4016.4	4051.5
6 İkinci Ağ Modu	7406.3	7636.1	7852.4	8058.6	8253.6	7597.2	7812.8	8017.2	8213.2	8399.5	7818.4	8018.4	8209.5	8393.9	8570
7	7406.3	7636.1	7852.4	8058.6	8253.6	7597.2	7812.8	8017.2	8213.2	8399.5	7818.4	8018.4	8209.5	8393.9	8570
8 Birinci Bükülme Modu	13424	13849	13919	13903	13889	13646	13972	13957	13943	13929	13914	14011	13997	13984	13972
9	13424	13849	13919	13903	13889	13646	13972	13957	13943	13929	13914	14011	13997	13984	13972
10 Birinci Burkulma Modu	13949.5	13934	13941	13927	13915	13987	14032	14019	14007	13996	14026	14097	14085	14075	14065
11 Üçüncü Ağ Modu	13949.5	13934	14243	14615	14962	13987	14053	14431	14789	15125.5	14026	14298.5	14659	15001	15313
12	13973	13956	14243	14615	14962	14047	14053	14431	14789	15125.5	14110	14298.5	14659	15001	15313

Ağ en ince halinde (W1) iken rim kalınlığı değişimi yapıldığında, İkinci Ağ Modu 7118,9 Hz ile 8034 Hz arasında değişmektedir. Z53 dişlisinin rim kalınlığı değişimine bağlı en fazla etkilenen modu bu koşulda bu mod olmuştur. Yine W1 koşulunda Üçüncü Ağ Modu frekansı 13 114 Hz ile 14 731 Hz arasında, Birinci Ağ Modu frekansı ise 2954,8 Hz ile 3274,4 Hz arasında değişiklik göstermiştir. Birinci Burulma ve Birinci Bükülme Mod frekansları rim kalınlığı arttıkça azalma eğiliminde olmuştur. Bu mod hareketleri için gerekli eksenel rijitlik değerinin artışından daha fazla kütle artışı sebebiyle bu yönde bir değişim olduğu tahmin edilebilir.



Şekil 4.37 Z53 Dişlisi Standart Ağ Kalınlığında Rim Kalınlığı Değişiminin Doğal Mod Frekanslarına Etkisi

Şekil 4.37’de standart ağ kalınlığı (W3) sabitken rim kalınlığı değişiminin doğal frekanslara etkisi gösterilmiştir. Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13 incelendiğinde, rim kalınlığının R1’den R5’e geçişinde tüm modlarda frekans artışı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, rim kalınlığı arttıkça dişli yapısının genel rijitliğinin yükseldiğini ve dolayısıyla titreşim karakteristiklerinin daha üst frekanslara kaydığını göstermektedir. Ağ modu frekanslarında daha kayda değer değişimler görülürken, diğer modlarda değişim sınırlı kalmıştır.

Aşağıdaki ilk çizelgede (Çizelge 4.14) soldan sağa doğru R1, R2 ve R3 rim kalınlıklı üç grup halinde her grupta rim kalınlıkları sabit olacak ve ağ kalınlıkları W1’den W5’e kadar değişecek şekilde tüm geometrilerin mod hareketleri ve frekans değerleri verilmiştir. Bir sonraki çizelgede (Çizelge 4.15) de R3, R4 ve R5 rim kalınlıklı üç grup içerisinde ağ kalınlıkları W1’den

W5'e kadar değişecek şekilde tüm geometrilerin mod hareketleri ve frekans değerleri verilmiştir.

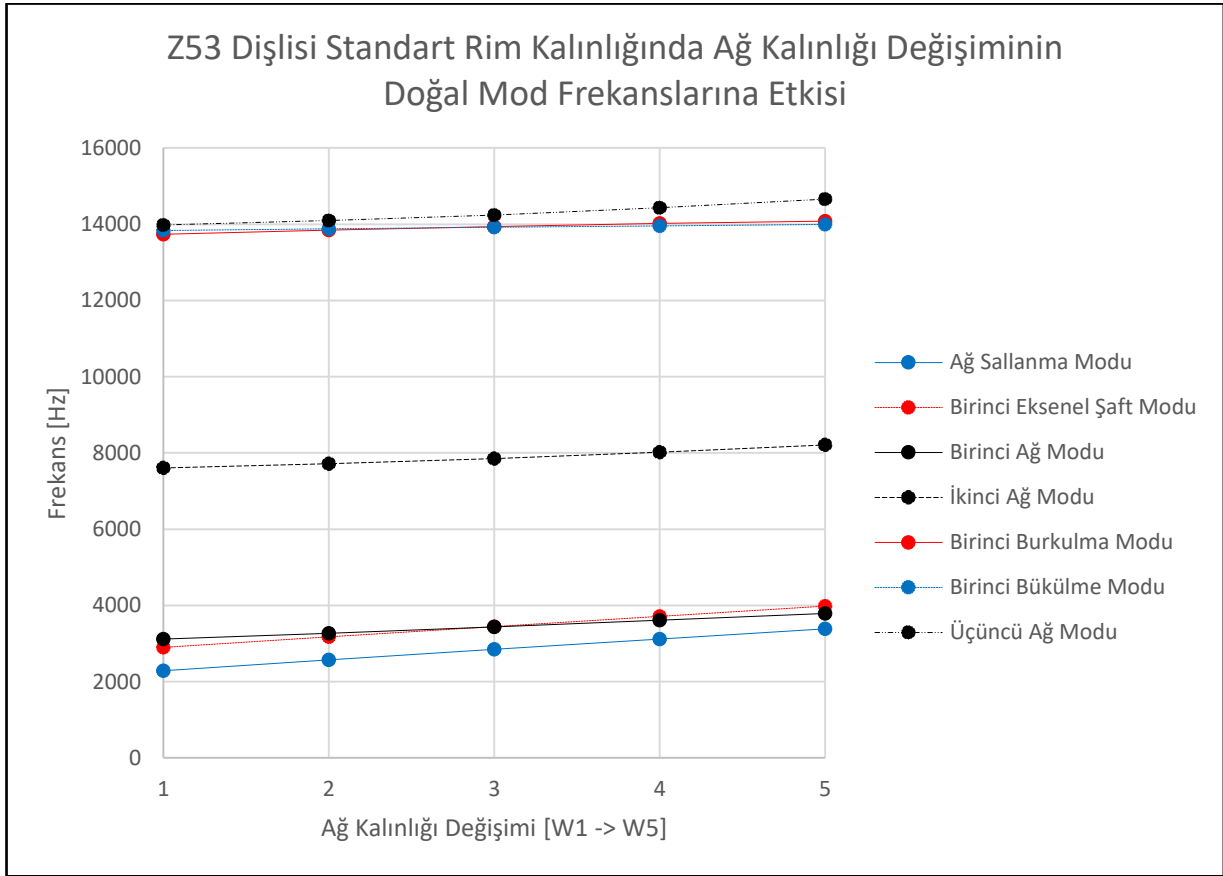
Çizelge 4.14 Z53 Dişlisi Rim Kalınlıkları R1'den R3'e Kadar Çıkan Mod Hareketleri ve Frekansları

	Z53_W1_R1	Z53_W2_R1	Z53_W3_R1	Z53_W4_R1	Z53_W5_R1	Z53_W1_R2	Z53_W2_R2	Z53_W3_R2	Z53_W4_R2	Z53_W5_R2	Z53_W1_R3	Z53_W2_R3	Z53_W3_R3	Z53_W4_R3	Z53_W5_R3
1 Ağ Sallanma Modu	2261.1	2546.7	2828.1	3105.35	3378.05	2273.1	2557.2	2836	3110.4	3380.25	2287.4	2570.1	2846.7	3118.4	3385.35
2	2261.1	2546.7	2828.1	3105.35	3378.05	2273.1	2557.2	2836	3110.4	3380.25	2287.4	2570.1	2846.7	3118.4	3385.35
3 Birinci Ağ Modu	2813.6	3090.5	3302.95	3493.9	3692.05	2855.9	3131.4	3369.1	3551.3	3741.2	2899.3	3173.6	3434.95	3609.3	3791.7
4	2954.8	3122	3302.95	3493.9	3692.05	3039.1	3197.3	3369.1	3551.3	3741.2	3120.3	3271	3434.95	3609.3	3791.7
5 Birinci Eksenel Şaft Modu	2954.8	3122	3365.4	3642.5	3923.2	3039.1	3197.3	3403.1	3676	3952	3120.3	3271	3442.4	3711.4	3983.1
6 İkinci Ağ Modu	7118.9	7246.75	7406.3	7597.2	7818.4	7371.7	7489	7636.1	7812.8	8018.4	7606.5	7715.5	7852.4	8017.2	8209.5
7	7118.9	7246.75	7406.3	7597.2	7818.4	7371.7	7489	7636.1	7812.8	8018.4	7606.5	7715.5	7852.4	8017.2	8209.5
8 Birinci Bükülme Modu	13114	13247	13424	13646	13914	13566	13687	13849	13972	14011	13733	13848	13919	13957	13997
9	13114	13247	13424	13646	13914	13566	13687	13849	13972	14011	13836.5	13880	13919	13957	13997
10 Birinci Burkulma Modu	13775	13885	13949.5	13987	14026	13753	13865	13934	14032	14097	13836.5	13880	13941	14019	14085
11 Üçüncü Ağ Modu	13851	13907	13949.5	13987	14026	13847	13894	13934	14053	14298.5	13982	14094	14243	14431	14659
12	13851	13907	13973	14047	14110	13847	13894	13956	14053	14298.5	13982	14094	14243	14431	14659

Çizelge 4.15 Z53 Dişlisi Rim Kalınlıkları R3'ten R5'e Kadar Çıkan Mod Hareketleri ve Frekansları

	Z53_W1_R3	Z53_W2_R3	Z53_W3_R3	Z53_W4_R3	Z53_W5_R3	Z53_W1_R4	Z53_W2_R4	Z53_W3_R4	Z53_W4_R4	Z53_W5_R4	Z53_W1_R5	Z53_W2_R5	Z53_W3_R5	Z53_W4_R5	Z53_W5_R5
1 Ağ Sallanma Modu	2287.4	2570.1	2846.7	3118.4	3385.35	2303.7	2585.3	2859.9	3128.95	3393.1	2321.9	2602.6	2875.2	3141.85	3403.3
2	2287.4	2570.1	2846.7	3118.4	3385.35	2303.7	2585.3	2859.9	3128.95	3393.1	2321.9	2602.6	2875.2	3141.85	3403.3
3 Birinci Ağ Modu	2899.3	3173.6	3434.95	3609.3	3791.7	2944.5	3217.6	3483.8	3667.9	3843.35	2990.9	3263.2	3526.6	3726	3895.2
4	3120.3	3271	3434.95	3609.3	3791.7	3199.1	3343.4	3500.5	3667.9	3843.35	3274.4	3413.6	3564.8	3726	3895.2
5 Birinci Eksenel Şaft Modu	3120.3	3271	3442.4	3711.4	3983.1	3199.1	3343.4	3500.5	3748.9	4016.4	3274.4	3413.6	3564.8	3788.2	4051.5
6 İkinci Ağ Modu	7606.5	7715.5	7852.4	8017.2	8209.5	7828	7930.25	8058.6	8213.2	8393.9	8034	8132.4	8253.6	8399.5	8570
7	7606.5	7715.5	7852.4	8017.2	8209.5	7828	7930.25	8058.6	8213.2	8393.9	8034	8132.4	8253.6	8399.5	8570
8 Birinci Bükülme Modu	13733	13848	13919	13957	13997	13716	13832	13903	13943	13984	13700	13819	13889	13929	13972
9	13836.5	13880	13919	13957	13997	13823	13865	13903	13943	13984	13807	13849	13889	13929	13972
10 Birinci Burkulma Modu	13836.5	13880	13941	14019	14085	13823	13865	13927	14007	14075	13807	13849	13915	13996	14065
11 Üçüncü Ağ Modu	13982	14094	14243	14431	14659	14372	14476	14615	14789	15001	14731	14832	14962	15125.5	15313
12	13982	14094	14243	14431	14659	14372	14476	14615	14789	15001	14731	14832	14962	15125.5	15313

Rim en ince kalınlıkta iken (R1) ağ kalınlığı W1'den W5'e artırıldığında, Ağ Sallanma Modu doğal frekansı 2261,1 Hz'den 3378,05 Hz'e çıkmıştır. Aynı koşulda en fazla artış gösteren diğer mod frekansları sırasıyla Birinci Eksenel Şaft Modu ve Birinci Ağ Modu'nun frekansı olmuştur. Rim kalınlığı en kalın halinde (R5) iken ağ kalınlığı artışından kaynaklı aynı modların frekansları daha az artmıştır. Birinci Bükülme Modu standart rim kalınlığında (R3) ağ kalınlığına bağlı en düşük frekans artışı (13 836,5 Hz'den 13 997 Hz'e) göstermiştir. Bu modun diğer rim kalınlıklarında görece ufak fark ile daha fazla artış göstermesi, bu mod özelinde optimum rim kalınlığının standart kalınlık (R3) olduğu, veya diğer kalınlıklarda ağ kalınlığı değişimi ile daha fazla manipüle edilebileceği anlamına gelmektedir.



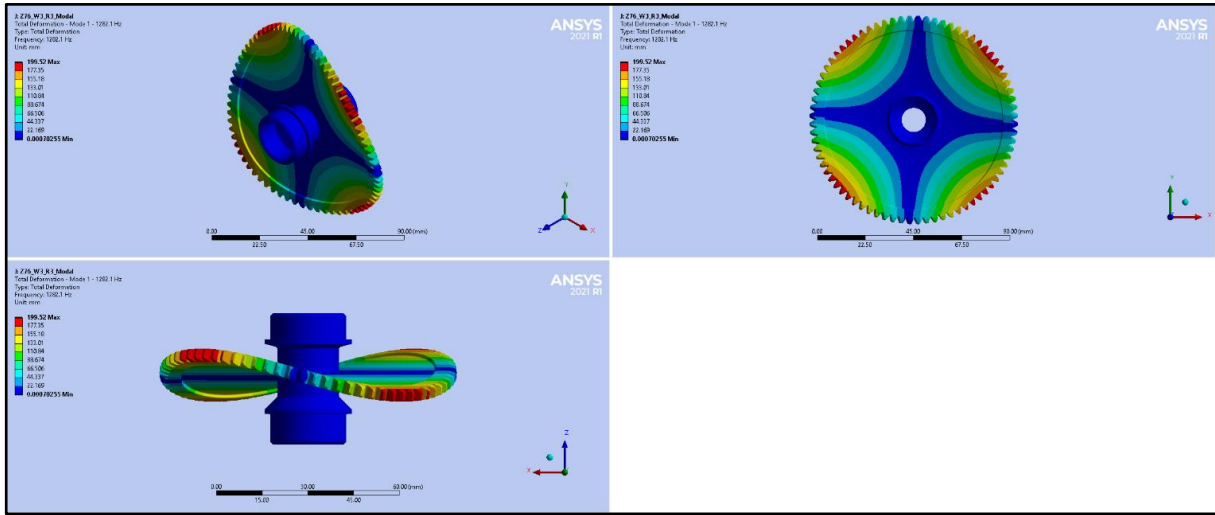
Şekil 4.38 Z53 Dişlisi Standart Rim Kalınlığında Ağ Kalınlığı Değişiminin Doğal Mod Frekanslarına Etkisi

Şekil 4.38’te R3 rim kalınlığı sabitken ağ kalınlığı değişiminin doğal frekanslara etkisi verilmiştir. Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15 incelendiğinde, ağ kalınlığının artışıyla tüm modlarda frekans artışı olmuştur denebilir. Frekanslar üzerinde ağ kalınlığı değişimi, rim kalınlığı değişimine göre daha etkili olmuştur. Tüm frekanslardaki bu kayda değer değişim yukarıda Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15’e ek olarak Şekil 4.38’te de görülebilir.

Sonuçlar, rim kalınlığı değişiminin özellikle ince ağ kalınlığı modellerindeki mod frekanslarında etkili olduğunu, ancak ağ kalınlığı değişimi kadar mod frekansları üzerinde kuvvetli bir etki yaratmadığını ortaya koymaktadır. Tüm bu Z53 dişlisi mod frekans değişimlerinin geometriye bağlı durumları önceki sayfalarda detaylı olarak aktarılmıştır.

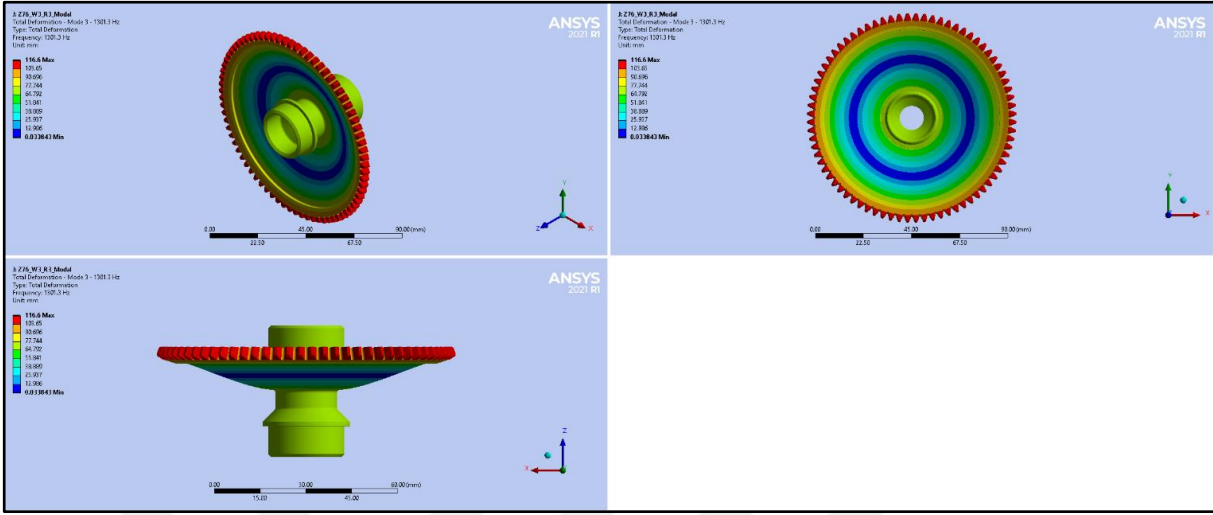
4.2.2. Z76 dişlisi modal analizleri

Serbest modları haricindeki ilk 12 modu bulunan Z76 dişlisinin standarda göre çizilmiş Z76 W3 R3 geometrisinin tüm modları aşağıda (Şekil 4.39 - Şekil 4.45) gösterilmiştir. İlk modu şaft kısmı sabit iken ağ yapısının karşılıklı çift noktadan büküldüğü Birinci Ağ Modu olarak 1282,1 Hz’te çıkmıştır.

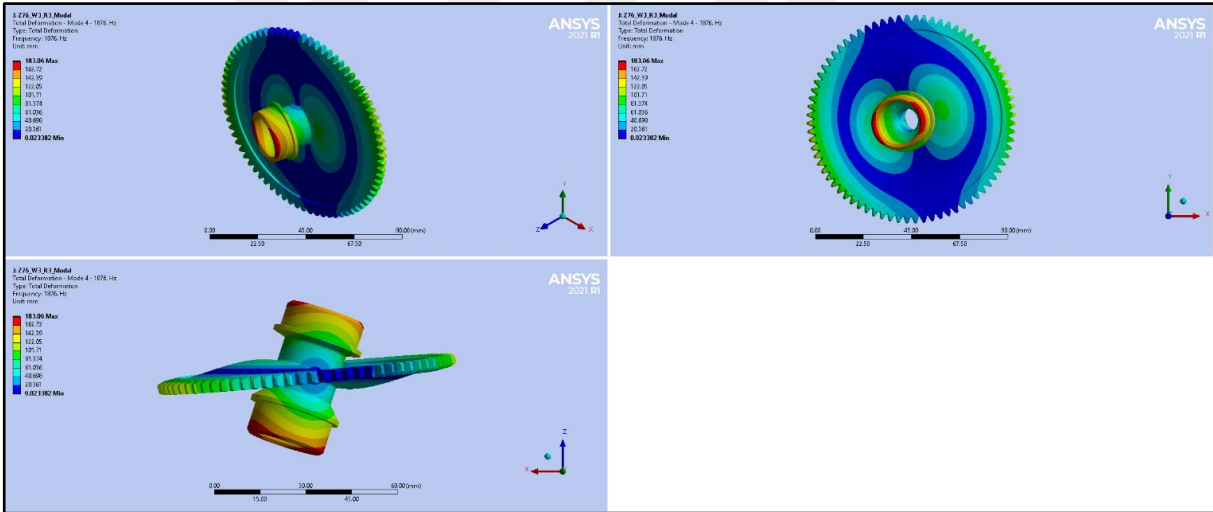


Şekil 4.39 Z76 W3 R3 Dişlisinin Birinci Modu: Birinci Ağ Modu 1282,1 Hz

Dişli geometrisinin ikinci modu şaft kısmı ile ağ kısmının ekseninde ters yönlere doğrusal şekilde kaydığı Şemsiye Modu olarak 1301,3 Hz frekansta çıkmıştır. Üçüncü mod ise ağ bölgesinin sabit kalırken şaft bölgesinin çan gibi sallandığı Çan Modu olarak 1876 Hz frekansta çıkmıştır.

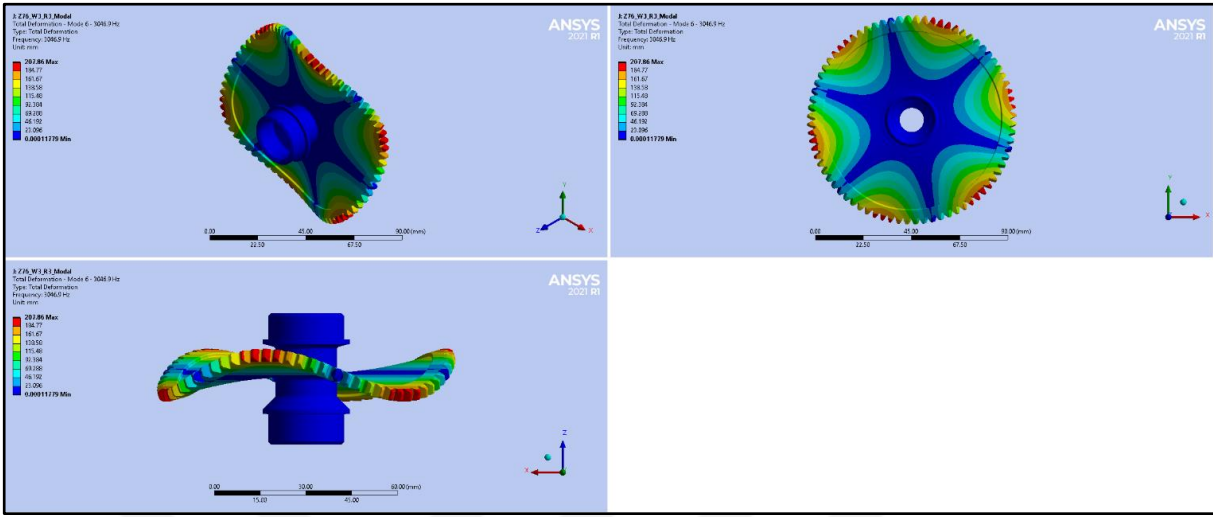


Şekil 4.40 Z76 W3 R3 Dişlisinin İkinci Modu: Şemsiye Modu 1301,3 Hz



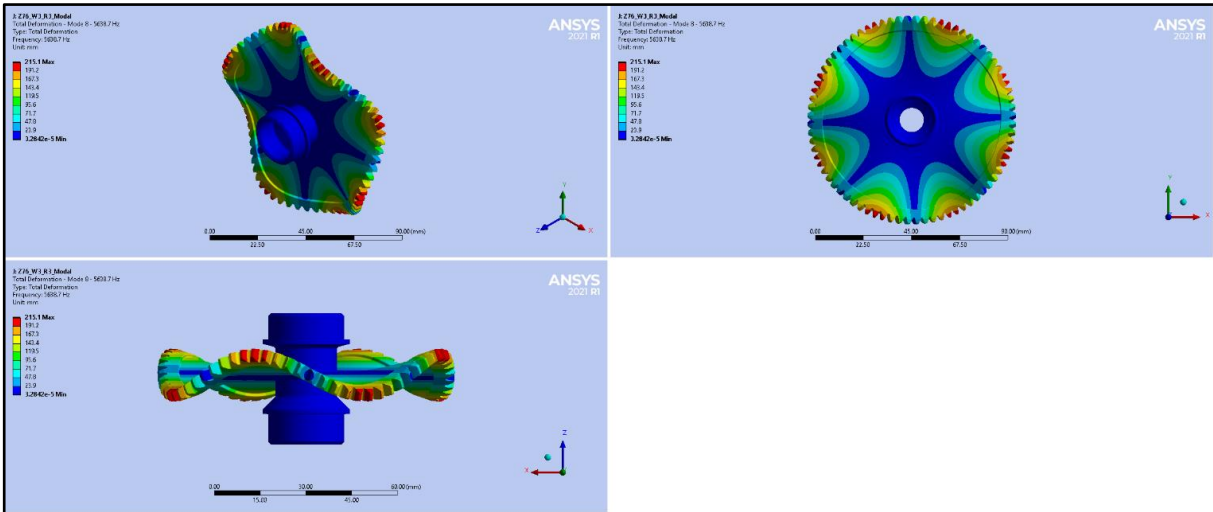
Şekil 4.41 Z76 W3 R3 Dişlisinin Üçüncü Modu: Çan Modu 1876 Hz

Dişli geometrisinin üçüncü modunda şaft kısmı çan gibi sallanmaktadır. Bu dişlinin dördüncü modu ise kıvrım noktalarının karşılıklı üzer adede çıktığı İkinci Ağ Modu olarak 3046,9 Hz frekansta çıkmıştır.



Şekil 4.42 Z76 W3 R3 Dişlisinin Dördüncü Modu: İkinci Ağ Modu 3046,9 Hz

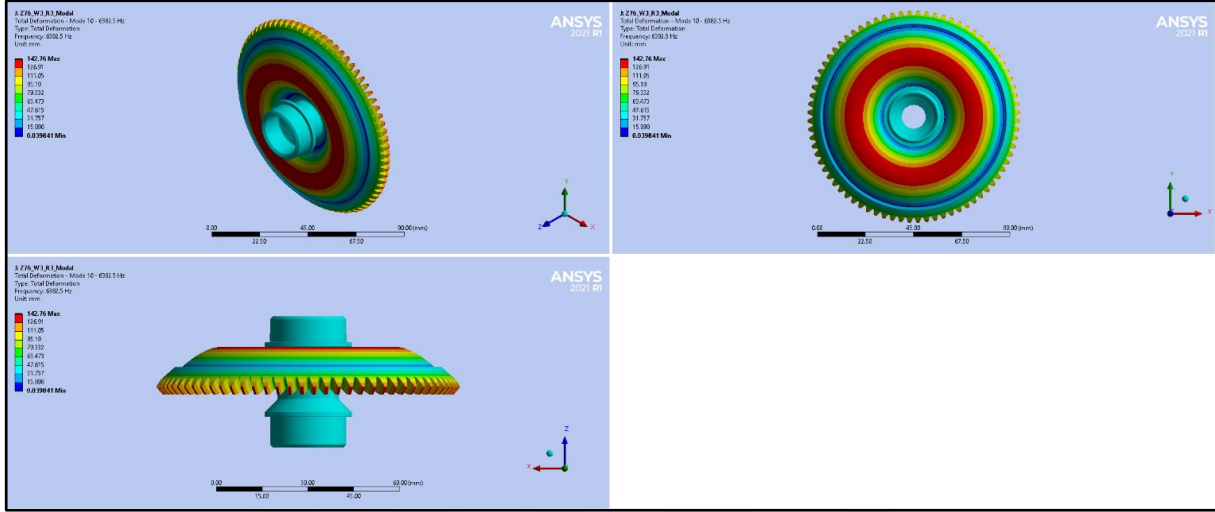
Dişli geometrisinin dördüncü modunda ağ kısmı ekseninde karşılıklı üçer zıt yönlü noktadan dalgalanmaktadır. Bu dişlinin beşinci modu ise dördüncü modun bir sonraki versiyonu olan, şaft kısmı sabit iken ağ yapısının karşılıklı dört noktadan zıt eksenlerde dalgalandığı Üçüncü Ağ Modu olarak 5638,7 Hz frekansta çıkmıştır.



Şekil 4.43 Z76 W3 R3 Dişlisinin Beşinci Modu: Üçüncü Ağ Modu 5638,7 Hz

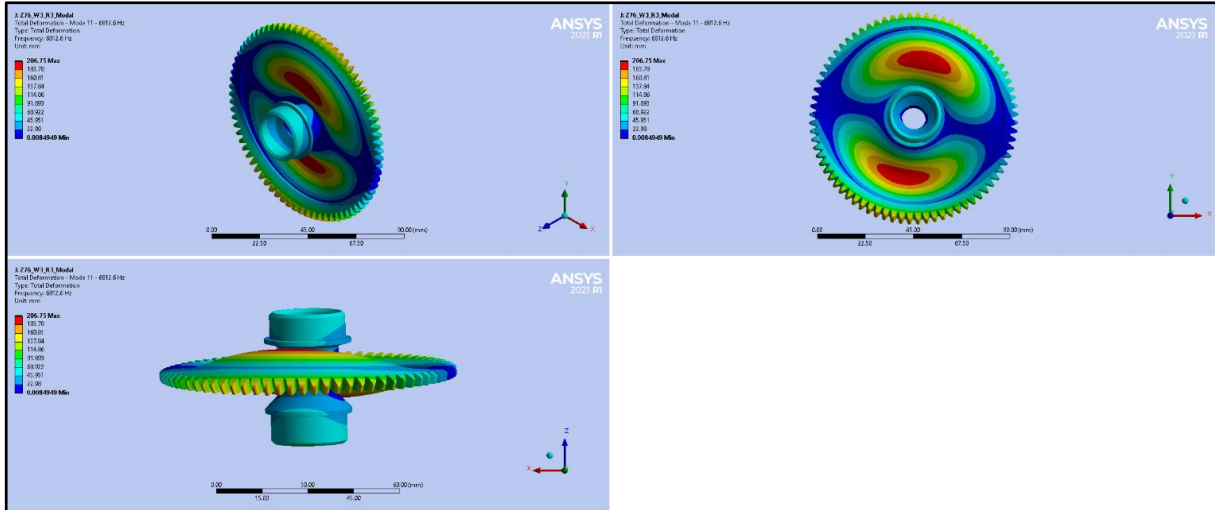
Dişli geometrisinin beşinci modunda ağ kısmı ekseninde karşılıklı dörder zıt yönlü noktadan dalgalanmaktadır. Bu dişlinin altıncı modu ise şaft kısmı ile ağ kısmının ekseninde ters

yönlere doğrusal şekilde ikinci dereceden hareketle kaydığı İkinci Şemsiye Modu olarak 6382,5 Hz frekansta çıkmıştır.



Şekil 4.44 Z76 W3 R3 Dişlisinin Altıncı Modu: İkinci Şemsiye Modu 6382,5 Hz

Z76 W3 R3 dişlisinin görülen son modu olan yedinci modu şaft kısmı sabit iken ağ yapısının kendi içine doğru büküldüğü Ağ Sallanma Modu olarak 6812,6 Hz frekansta çıkmıştır.



Şekil 4.45 Z76 W3 R3 Dişlisinin Yedinci Modu: Ağ Sallanma Modu 6812,6 Hz

Z76 dişlisinin tüm dinamik analizleri gerçekleştirildikten sonra kaydedilen tüm mod frekans bilgileri ağ kalınlığı ve rim kalınlığı değişimlerine göre çizelgeler haline getirilmiştir. Aşağıdaki ilk çizelgede (Çizelge 4.16) soldan sağa doğru W1, W2 ve W3 ağ kalınlıklı üç grup halinde her grupta ağ kalınlıkları sabit olacak ve rim kalınlıkları R1’den R5’e kadar değişecek şekilde tüm geometrilerin mod hareketleri ve frekans değerleri verilmiştir. Bir sonraki çizelgede (Çizelge 4.17) de W3, W4 ve W5 ağ kalınlıklı üç grup içerisinde rim kalınlıkları R1’den R5’e kadar değişecek şekilde tüm geometrilerin mod hareketleri ve frekans değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.16 Z76 Dişlisi Ağ Kalınlıkları W1’den W3’e Kadar Çıkan Mod Hareketleri ve Frekansları

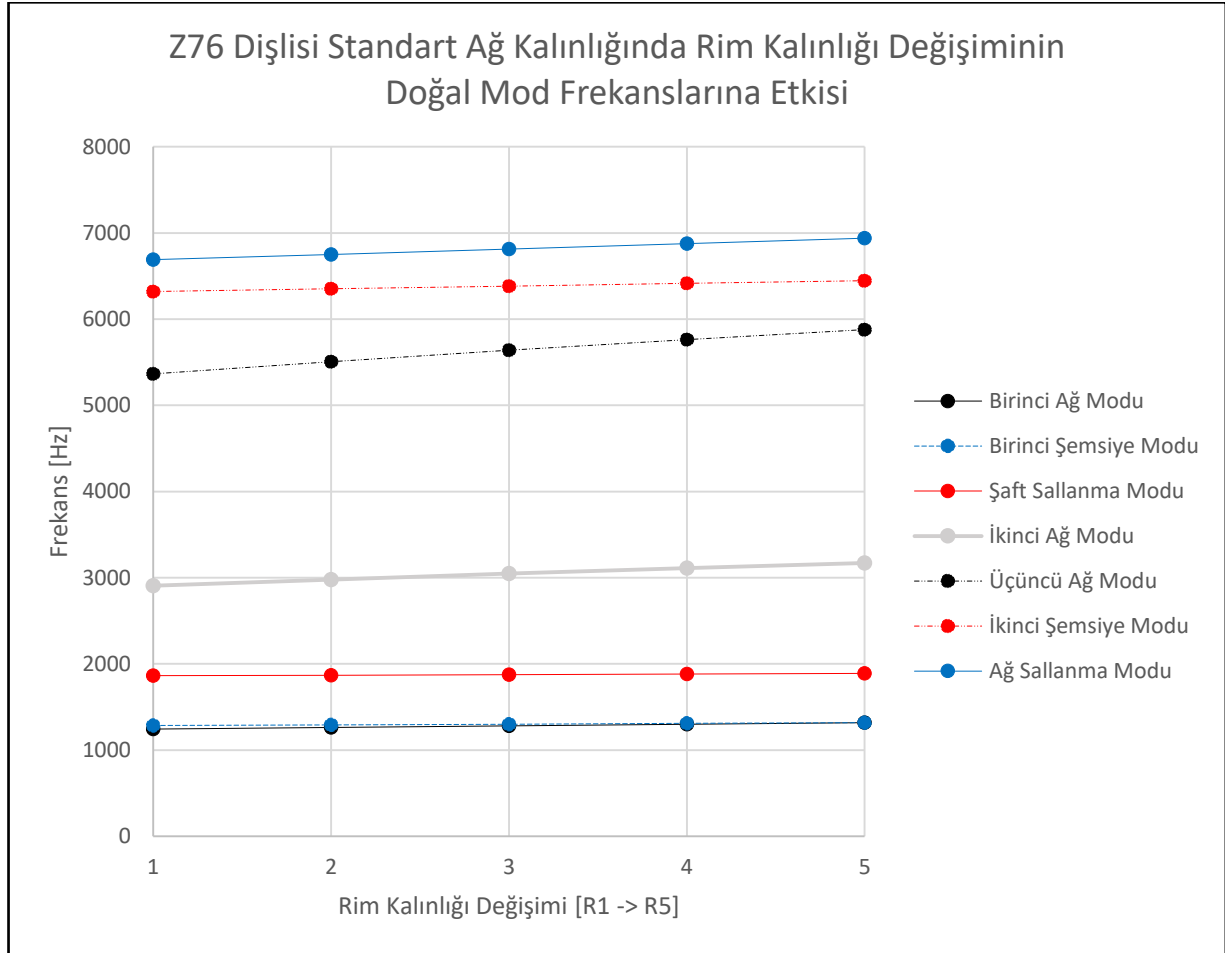
	Z76_W1_R1	Z76_W1_R2	Z76_W1_R3	Z76_W1_R4	Z76_W1_R5	Z76_W2_R1	Z76_W2_R2	Z76_W2_R3	Z76_W2_R4	Z76_W2_R5	Z76_W3_R1	Z76_W3_R2	Z76_W3_R3	Z76_W3_R4	Z76_W3_R5
1 Birinci Ağ Modu	1029.3	1038.6	1048	1057.5	1067.1	1155.2	1163.9	1172.8	1181.9	1191.3	1245.5	1263.9	1282.1	1299.8	1317.2
2	1099.3	1124.6	1148.9	1172	1194.1	1167.7	1189.5	1210.7	1231.1	1250.9	1245.5	1263.9	1282.1	1299.8	1317.2
3 Birinci Şemsiye Modu	1099.3	1124.6	1148.9	1172	1194.1	1167.7	1189.5	1210.7	1231.1	1250.9	1285.9	1293.4	1301.3	1309.6	1318.2
4 Şaft Sallanma Modu	1404.6	1412.2	1420.1	1428.1	1436.5	1629.5	1636.7	1644.5	1652.6	1661	1862.3	1868.8	1876	1883.6	1891.6
5	1404.6	1412.2	1420.1	1428.1	1436.5	1629.5	1636.7	1644.5	1652.6	1661	1862.3	1868.8	1876	1883.6	1891.6
6 İkinci Ağ Modu	2743.3	2826.1	2903.5	2975.5	3043.5	2815.9	2893.4	2966.4	3034.7	3099.5	2907.6	2979	3046.9	3110.8	3171.8
7	2743.3	2826.1	2903.5	2975.5	3043.5	2815.9	2893.4	2966.4	3034.7	3099.5	2907.6	2979	3046.9	3110.8	3171.8
8 Üçüncü Ağ Modu	5146.6	5203.6	5248.7	5293.1	5337	5242.2	5391.4	5530.65	5659.9	5782.1	5365.7	5506.5	5638.7	5762	5878.9
9	5146.6	5302.6	5447.55	5581.6	5707.9	5242.2	5391.4	5530.65	5659.9	5782.1	5365.7	5506.5	5638.7	5762	5878.9
10 İkinci Şemsiye Modu	5158.8	5302.6	5447.55	5581.6	5707.9	5727.8	5764.7	5802.3	5839.8	5877.3	6321.1	6351.2	6382.5	6414.2	6446.3
11 Ağ Sallanma Modu	5544.1	5627.1	5711.8	5796.6	5881.9	6106.4	6177.2	6250.25	6324	6398.6	6690.95	6750.5	6812.6	6876	6940.5
12	5544.1	5627.1	5711.8	5796.6	5881.9	6106.4	6177.2	6250.25	6324	6398.6	6690.95	6750.5	6812.6	6876	6940.5

Çizelge 4.17 Z76 Dişlisi Ağ Kalınlıkları W3’ten W5’e Kadar Çıkan Mod Hareketleri ve Frekansları

	Z76_W3_R1	Z76_W3_R2	Z76_W3_R3	Z76_W3_R4	Z76_W3_R5	Z76_W4_R1	Z76_W4_R2	Z76_W4_R3	Z76_W4_R4	Z76_W4_R5	Z76_W5_R1	Z76_W5_R2	Z76_W5_R3	Z76_W5_R4	Z76_W5_R5
1 Birinci Ağ Modu	1245.5	1263.9	1282.1	1299.8	1317.2	1331.1	1346.3	1361.6	1376.6	1391.6	1435.4	1441.6	1447.9	1454.2	1460.5
2	1245.5	1263.9	1282.1	1299.8	1317.2	1331.1	1346.3	1361.6	1376.6	1391.6	1435.4	1441.6	1447.9	1454.2	1460.5
3 Birinci Şemsiye Modu	1285.9	1293.4	1301.3	1309.6	1318.2	1422.1	1428.2	1434.9	1441.9	1449.5	1568.5	1571.1	1573.9	1576.7	1579.7
4 Şaft Sallanma Modu	1862.3	1868.8	1876	1883.6	1891.6	2102.9	2108.4	2114.7	2121.5	2128.8	2355.05	2357.6	2360.3	2363.15	2366.2
5	1862.3	1868.8	1876	1883.6	1891.6	2102.9	2108.4	2114.7	2121.5	2128.8	2355.05	2357.6	2360.3	2363.15	2366.2
6 İkinci Ağ Modu	2907.6	2979	3046.9	3110.8	3171.8	3017.3	3082.1	3144.3	3203.2	3259.8	3201.7	3229.8	3257.7	3284.6	3311.2
7	2907.6	2979	3046.9	3110.8	3171.8	3017.3	3082.1	3144.3	3203.2	3259.8	3201.7	3229.8	3257.7	3284.6	3311.2
8 Üçüncü Ağ Modu	5365.7	5506.5	5638.7	5762	5878.9	5516.5	5647.5	5771.5	5887.6	5998.15	5813.8	5871.5	5928.2	5982.6	6036.1
9	5365.7	5506.5	5638.7	5762	5878.9	5516.5	5647.5	5771.5	5887.6	5998.15	5813.8	5871.5	5928.2	5982.6	6036.1
10 İkinci Şemsiye Modu	6321.1	6351.2	6382.5	6414.2	6446.3	6933.1	6957.4	6983.4	7010	7037.7	7578.8	7589.3	7600.2	7611.2	7622.7
11 Ağ Sallanma Modu	6690.95	6750.5	6812.6	6876	6940.5	7292.6	7342.1	7394.6	7448.65	7503.95	7947.25	7968.75	7991	8013.55	8036.65
12	6690.95	6750.5	6812.6	6876	6940.5	7292.6	7342.1	7394.6	7448.65	7503.95	7947.25	7968.75	7991	8013.55	8036.65

Ağ en ince halinde (W1) iken rim kalınlığı değişimi yapıldığında, İkinci Ağ Modu frekansı 2743,3 Hz ile 3043,5 Hz arasında değişmektedir. Z76 dişlisinin rim kalınlığı değişimine bağlı en fazla etkilenen modu bu koşulda bu mod olmuştur. Yine W1 koşulunda Üçüncü Ağ Modu frekansı 5146,6 Hz ile 5707,9 Hz arasında, Birinci Ağ Modu frekansı ise 1099,3 Hz ile 1194,1 Hz arasında değişkenlik göstermiştir. Ağ en kalın halinde (W5) iken bu mod frekanslarındaki değişimler daha az olmuştur. Rim kalınlığı değişimine bağlı Birinci Ağ Modu frekans değişim eğilimi ile İkinci Ağ Modu frekans değişim eğiliminin çok yakın olduğu, ağ kalınlığı arttıkça Birinci Ağ Modu frekansının görece daha fazla etkilendiği söylenebilir. Şaft

Sallanma Modu tüm ağı kalınlıklarında rim kalınlığı değişiminden en az etkilenen mod frekansı olmuştur. İkinci Şemsiye Modu frekansı ve Birinci Şemsiye Modu sabit ağı kalınlığında rim kalınlığı değişiminden en az etkilenen ikinci ve üçüncü mod frekansları olmuştur.



Şekil 4.46 Z76 Dişlisi Standart Ağ Kalınlığında Rim Kalınlığı Değişiminin Doğal Mod Frekanslarına Etkisi

Şekil 4.46’de standart ağ kalınlığı (W3) sabitken rim kalınlığı değişiminin doğal frekanslara etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.20 ve Çizelge 4.17 incelendiğinde, rim kalınlığının R1’den R5’e geçişinde tüm modlarda frekans artışı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, rim kalınlığı arttıkça dişli yapısının rijitliğinin yükseldiğini ve mod frekanslarının arttığını göstermektedir.

Aşağıdaki ilk çizelgede (Çizelge 4.18) soldan sağa doğru R1, R2 ve R3 rim kalınlıklı üç grup halinde her grupta rim kalınlıkları sabit olacak ve ağ kalınlıkları W1’den W5’e kadar

değişecek şekilde tüm geometrilerin mod hareketleri ve frekans değerleri verilmiştir. Bir sonraki çizelgede (Çizelge 4.19) de R3, R4 ve R5 rim kalınlıklı üç grup içerisinde ağ kalınlıkları W1'den W5'e kadar değişecek şekilde tüm geometrilerin mod hareketleri ve frekans değerleri verilmiştir.

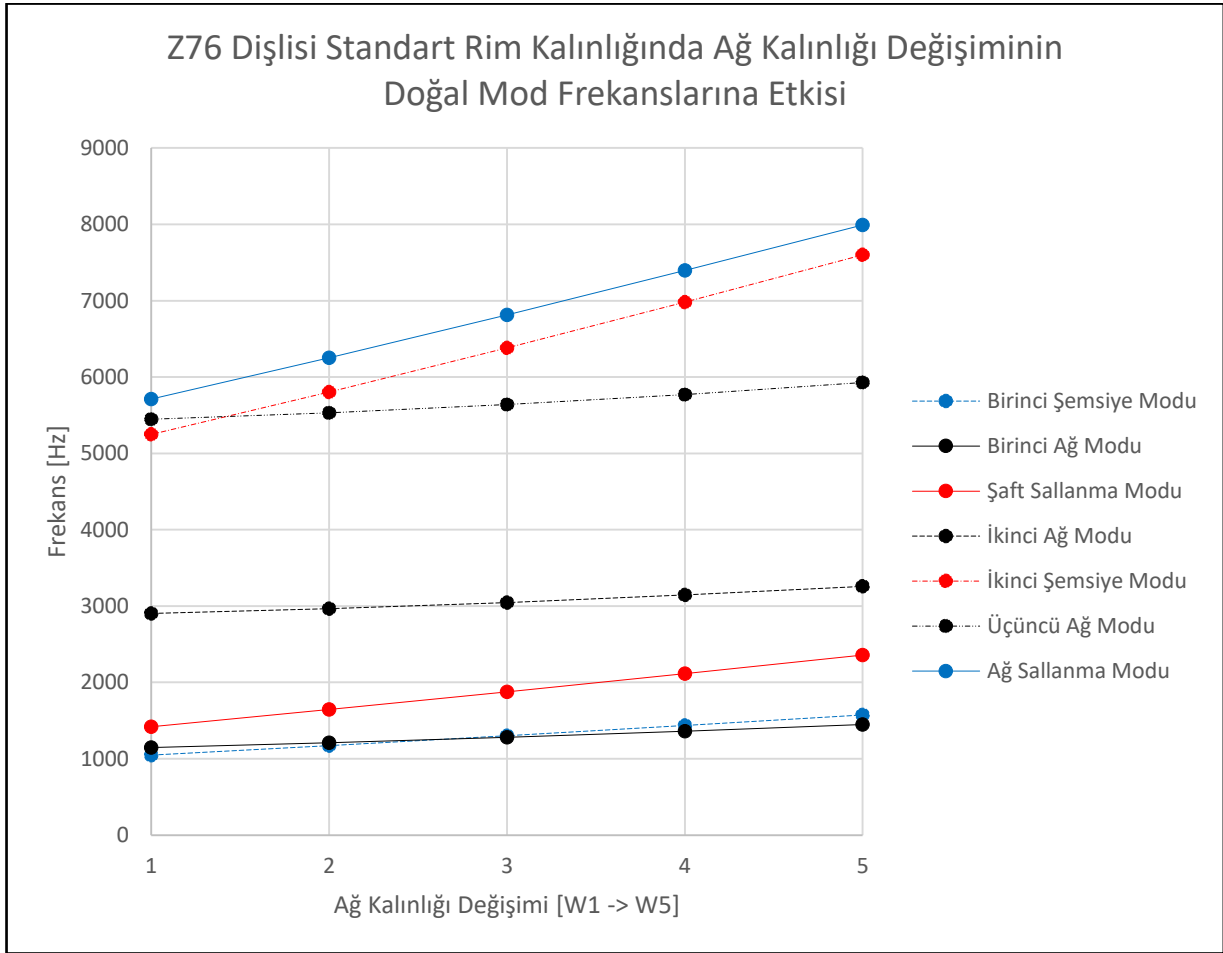
Çizelge 4.18 Z76 Dişlisi Rim Kalınlıkları R1'den R3'e Kadar Çıkan Mod Hareketleri ve Frekansları

	Z76_W1_R1	Z76_W2_R1	Z76_W3_R1	Z76_W4_R1	Z76_W5_R1	Z76_W1_R2	Z76_W2_R2	Z76_W3_R2	Z76_W4_R2	Z76_W5_R2	Z76_W1_R3	Z76_W2_R3	Z76_W3_R3	Z76_W4_R3	Z76_W5_R3
1 Birinci Ağ Modu	1029.3	1155.2	1245.5	1331.1	1435.4	1038.6	1163.9	1263.9	1346.3	1441.6	1048	1172.8	1282.1	1361.6	1447.9
2	1099.3	1167.7	1245.5	1331.1	1435.4	1124.6	1189.5	1263.9	1346.3	1441.6	1148.9	1210.7	1282.1	1361.6	1447.9
3 Birinci Şemsiye Modu	1099.3	1167.7	1285.9	1422.1	1568.5	1124.6	1189.5	1293.4	1428.2	1571.1	1148.9	1210.7	1301.3	1434.9	1573.9
4 Şaft Sallanma Modu	1404.6	1629.5	1862.3	2102.9	2355.05	1412.2	1636.7	1868.8	2108.4	2357.6	1420.1	1644.5	1876	2114.7	2360.3
5	1404.6	1629.5	1862.3	2102.9	2355.05	1412.2	1636.7	1868.8	2108.4	2357.6	1420.1	1644.5	1876	2114.7	2360.3
6 İkinci Ağ Modu	2743.3	2815.9	2907.6	3017.3	3201.7	2826.1	2893.4	2979	3082.1	3229.8	2903.5	2966.4	3046.9	3144.3	3257.7
7	2743.3	2815.9	2907.6	3017.3	3201.7	2826.1	2893.4	2979	3082.1	3229.8	2903.5	2966.4	3046.9	3144.3	3257.7
8 Üçüncü Ağ Modu	5146.6	5242.2	5365.7	5516.5	5813.8	5203.6	5391.4	5506.5	5647.5	5871.5	5447.55	5530.65	5638.7	5771.5	5928.2
9	5146.6	5242.2	5365.7	5516.5	5813.8	5203.6	5391.4	5506.5	5647.5	5871.5	5447.55	5530.65	5638.7	5771.5	5928.2
10 İkinci Şemsiye Modu	5158.8	5727.8	6321.1	6933.1	7578.8	5302.6	5764.7	6351.2	6957.4	7589.3	5447.55	5802.3	6382.5	6983.4	7600.2
11 Ağ Sallanma Modu	5544.1	6106.4	6690.95	7292.6	7947.25	5627.1	6177.2	6750.5	7342.1	7968.75	5711.8	6250.25	6812.6	7394.6	7991
12	5544.1	6106.4	6690.95	7292.6	7947.25	5627.1	6177.2	6750.5	7342.1	7968.75	5711.8	6250.25	6812.6	7394.6	7991

Çizelge 4.19 Z76 Dişlisi Rim Kalınlıkları R3'ten R5'e Kadar Çıkan Mod Hareketleri ve Frekansları

	Z76_W1_R3	Z76_W2_R3	Z76_W3_R3	Z76_W4_R3	Z76_W5_R3	Z76_W1_R4	Z76_W2_R4	Z76_W3_R4	Z76_W4_R4	Z76_W5_R4	Z76_W1_R5	Z76_W2_R5	Z76_W3_R5	Z76_W4_R5	Z76_W5_R5
1 Birinci Ağ Modu	1048	1172.8	1282.1	1361.6	1447.9	1057.5	1181.9	1299.8	1376.6	1454.2	1067.1	1191.3	1317.2	1391.6	1460.5
2	1148.9	1210.7	1282.1	1361.6	1447.9	1172	1231.1	1299.8	1376.6	1454.2	1194.1	1250.9	1317.2	1391.6	1460.5
3 Birinci Şemsiye Modu	1148.9	1210.7	1301.3	1434.9	1573.9	1172	1231.1	1309.6	1441.9	1576.7	1194.1	1250.9	1318.2	1449.5	1579.7
4 Şaft Sallanma Modu	1420.1	1644.5	1876	2114.7	2360.3	1428.1	1652.6	1883.6	2121.5	2363.15	1436.5	1661	1891.6	2128.8	2366.2
5	1420.1	1644.5	1876	2114.7	2360.3	1428.1	1652.6	1883.6	2121.5	2363.15	1436.5	1661	1891.6	2128.8	2366.2
6 İkinci Ağ Modu	2903.5	2966.4	3046.9	3144.3	3257.7	2975.5	3034.7	3110.8	3203.2	3284.6	3043.5	3099.5	3171.8	3259.8	3311.2
7	2903.5	2966.4	3046.9	3144.3	3257.7	2975.5	3034.7	3110.8	3203.2	3284.6	3043.5	3099.5	3171.8	3259.8	3311.2
8 Üçüncü Ağ Modu	5248.7	5530.65	5638.7	5771.5	5928.2	5293.1	5659.9	5762	5887.6	5982.6	5337	5782.1	5878.9	5998.15	6036.1
9	5447.55	5530.65	5638.7	5771.5	5928.2	5581.6	5659.9	5762	5887.6	5982.6	5707.9	5782.1	5878.9	5998.15	6036.1
10 İkinci Şemsiye Modu	5447.55	5802.3	6382.5	6983.4	7600.2	5581.6	5839.8	6414.2	7010	7611.2	5707.9	5877.3	6446.3	7037.7	7622.7
11 Ağ Sallanma Modu	5711.8	6250.25	6812.6	7394.6	7991	5796.6	6324	6876	7448.65	8013.55	5881.9	6398.6	6940.5	7503.95	8036.65
12	5711.8	6250.25	6812.6	7394.6	7991	5796.6	6324	6876	7448.65	8013.55	5881.9	6398.6	6940.5	7503.95	8036.65

Rim en ince kalınlıkta iken (R1) ağ kalınlığı W1'den W5'e artırıldığında, Şaft Sallanma Modu doğal frekansı 1404,6 Hz'den 2355,05 Hz'e çıkmıştır. Aynı koşulda (R1) en fazla artış gösteren diğer mod frekansları sırasıyla Birinci Şemsiye Modu, İkinci Şemsiye Modu ve Ağ Sallanma Modu'nun frekansları olmuştur. Rim kalınlığı en kalın halinde (R5) iken ağ kalınlığı artışından kaynaklı aynı modların frekansları daha az artmıştır. İncelenen diğer mod frekanslarında da ağ kalınlığı değişiminden etkilenmenin kayda değer olduğu saptanmıştır. Genel olarak geniş ağ yapısına sahip Z76 dişlisinde incelenen frekans bandında ağ ile ilgili modların ağırlıkta olduğu ve frekansların ağ kalınlığı değişiminden tüm rim kalınlıklarında ciddi anlamda etkilendiği söylenebilir.



Şekil 4.47 Z76 Dişlisi Standart Rim Kalınlığında Ağ Kalınlığı Değişiminin Doğal Mod Frekanslarına Etkisi

Şekil 4.47’de R3 rim kalınlığı sabitken ağ kalınlığı değişiminin doğal frekanslara etkisi verilmiştir. Çizelge 4.18 ve Çizelge 4.19 incelendiğinde, ağ kalınlığının artışıyla tüm modlarda frekans artışı olduğu söylenebilir. Frekanslar üzerinde ağ kalınlığı değişimi, rim kalınlığı değişimine göre daha etkili olmuştur. Tüm frekanslardaki bu kayda değer değişim yukarıda Çizelge 4.18 ve Çizelge 4.19’a ek olarak Şekil 4.47’de de görülebilir.

Sonuçlar, rim kalınlığı değişiminin özellikle ince ağ kalınlığı modellerindeki mod frekanslarında etkili olduğunu, ancak genel olarak rim kalınlığı değişiminin frekanslar üzerinde etkisinin sınırlı kaldığı söylenebilir. Bunun sebebi olarak, Z76 dişlisinin sahip olduğu geniş çap ve ağ yapısı sebebiyle rim kalınlığı değişiminin mod frekanslarına daha az etkili olduğu

açıklaması yapılabilir. Ağ kalınlığının ise bu durumda mod frekansları üzerinde çok daha etkili olduğu açık şekilde görülmektedir. Tüm bu Z76 dişlisi mod frekans değişimlerinin geometriye bağlı durumları önceki sayfalarda detaylı olarak aktarılmıştır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile havacılık aksesuar dişli kutusu dişlileri için geometri parametrelerinin etkisi sistematik bir biçimde ortaya koyulmuştur. Çalışmada ele alınan Z53 ve Z76 düz dişli çifti için, ağ ve rim kalınlığı olmak üzere iki temel geometrik parametrenin %10 ve %20 oranlarında artırılıp azaltılmasıyla toplam 50 farklı geometri elde edilmiştir. Elde edilen geometriler kullanılarak dişlilerin statik ve dinamik davranışları değerlendirilmiş, performans üzerindeki etkileri yüzdelik değişimlerle sayısal olarak ortaya konmuştur. Havacılık aksesuar dişli kutusu tasarımında, özellikle kavramsal ve ön tasarım aşamalarında shaft geometrilerinde çok daha hızlı değişiklik yapılabilmesi ve tasarım süreçlerinde dişlilerin statik ve dinamik durumlarından kaynaklanan problemlerin hızlıca çözülebilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, tasarım maliyetinin düşürülmesi ve süreçlerin daha etkin yönetilebilmesi amacıyla elde edilen sonuçlar ve ortaya konan öneriler aşağıda maddeler hâlinde sıralanmıştır.

1. Dişili çifti için kontak kaymalarında geometriye bağlı ciddi farklılıklar gözlenmiştir. Z53 dişlisinde ağ ve rim kalınlığına bağlı olarak kontak kayma oranı %8,62'ye kadar, Z76 dişlisinde ise %7,60'a kadar ulaşmıştır. Bu değerler, kontak bölgesinde aşınma riskinin geometrik değişikliklerle anlamlı şekilde değişebileceğini göstermektedir.
2. Dişli çifti için geometriye bağlı kontak kuvvet dağılımları incelenmiştir. Her iki dişlide de en ince yapılarda kontak kuvvet dağılımı tepe değerinde %21'e kadar artış tespit edilmiştir. Bu durum, ağırlık azaltımı hedeflenirken dayanım açısından dikkatli olunması gerektiğini ortaya koymaktadır.

3. Geometri değişimine bağlı olarak doğal mod frekanslarında yüksek değişimler yakalanmıştır. Rim ve ağ kalınlığı değişimlerine bağlı olarak her bir mod frekansında görülen değişimler ortaya konmuştur. Bununla, özellikle bu modlara dair rezonans riski barındıran tasarımlarda ilgili geometri değişimlerinin önemi gösterilmiştir. Benzer tasarım süreçlerinde frekansların değişimi ile rezonans durumundan kaçınmak bir avantaj sağlarken yapılan geometrik değişimlerle tam tersi yönde kritik hıza yaklaşmak bir dezavantaj sağlayabilmektedir ve geometrik değişimlerin bu yönde yürütölmesi gerekmektedir. Ayrıca havacılıkta önem arz eden kütle değişimi de, bu çalışmanın Ek Açıklama-D bölümünde detaylı bir tablo ile verilmiştir.
4. Z53 ve Z76 dişlileri için ağ kalınlığı değişiminin rim kalınlığı değişimine göre daha baskın etkilere sahip olduğu görölmüştür. Özellikle Z76 dişlisi daha büyük çapa sahip olduğu için ağ kalınlığının en inceden en kalına değişimi (W1→W5) bu dişli için yüksek doğal frekans değişimleri gösterirken, rim kalınlığının en inceden en kalına değişimi (R1→R5) bu dişlinin doğal frekanslarını daha az etkilemiştir.
5. Rim kalınlığının değişiminin doğal mod frekanslarına etkisi düşük olsa da ince ağ kalınlığına sahip geometrilerde rim kalınlığı değişimi daha yüksek etkiler yaratmıştır. Z53 ve Z76 dişlisi incelendiğinde en ince ağ kalınlığında (W1) rim kalınlığı değişiminin mod frekanslarına etkisi en fazla %12,85 olmuştur. Ağ kalınlığı en kalın durumda (W5) iken bu etki Z76 dişlisi için %3,82 civarlarında kalmıştır.
6. Geometri parametrelerinin aynı dişlide farklı modlardaki etkilerinin farklı olduğu, aynı zamanda farklı dişliler için aynı modlarda etki oranının da farklı olduğu görölmüştür. Buna göre bazı modlar %1-3 gibi sınırlı etkilenirken, özellikle “Ağ Sallanma” gibi karmaşık modlarda mod frekans değişimi Z53 dişlisi için %49,40 ve Z76 dişlisi için %43,35 olarak tespit edilmiştir.

7. Tüm bu sonuçlar ışığında benzer bir havacılık aksesuar dişli kutusu tasarımında henüz kavramsal tasarım aşamasından itibaren geometrik esnekliğin tasarıma uygulanması önerilebilir. Böylece ağ ve rim kalınlığı değişimleri gibi değişkenlerle tasarımın ilerleyen aşamalarında görülebilecek mod frekans çakışmaları ve dişli çifti kontak aşınma problemleri büyük tasarım değişimleri yapılmaksızın giderilebilir.
8. Benzer tasarımlarda özellikle ağ kalınlığı azaltmalarında dikkatli olunması önerilebilir. Gerekçe olarak da bu çalışma ile ortaya konan, ağ kalınlığı düşüşünün mod frekanslarında büyük değişimler yaratması ve dişli çifti kontak kuvvet dağılımı tepe değerinde görece yüksek artışlara yol açarak dişlinin titreşim ve ömür değerlerini büyük ölçüde saptırabilme potansiyeli gösterilebilir.
9. Bu çalışma ile iki farklı çapta Z53 ve Z76 dişlisi ele alınmıştır. Sonuç olarak bu gibi farklı çaptaki dişlilerin geometri optimizasyonu çalışmalarında dinamik durumları göz önünde bulundururken ayrı ayrı ele alınarak çalışılması önerilebilir. Örnek olarak Z76 gibi daha geniş ağ yapısındaki bir dişlinin rim kalınlığı değişiminden Z53 dişlisine kıyasla daha az etkilenmesi ortada tüm dişliler için aynı etkiyi veren sabit bir optimizasyon yöntemi olmadığını kanıtlar niteliktedir.
10. Bu çalışmadaki yüzde değişimler örnek alınarak benzer tasarım süreçlerinde kütle, kontak kaymaları, kontak kuvvet dağılımı ve dinamik davranışları içeren veri tabanlı karar setleri oluşturulabilir. Böylece testlerde görülebilecek titreşim ve aşınma gibi problemler daha erken fark edilirken tüm tasarım süreci istenen yönde daha hızlı sonuçlar alınmasıyla daha verimli bir şekilde yürütülebilir.

11. Farklı sıcaklıkların etkisini de göstermek için elastik modül değeri değiştirilebilir. Ayrıca genleşme kaynaklı radyal kontak kaymaları ve sınır koşulu rijitlik değişimleri düşünülerek çalışma zenginleştirilebilir.
12. Ek çalışmalar ile dönüş hızının merkezci (santrifüj) etkisinin kontak kayma durumuna ve kuvvet dağılımına etkisi incelenebilir. Bu etki ile bu çalışma kapsamında kontakların radyal yönde birbirlerinden uzaklaşması etkisi azalabilir veya tersine dönebileceği değerlendirilmektedir.
13. Daha ince rim ve ağı kalınlıkları ile çalışılarak benzer havacılık aksesuar dişlilerinin çalışma frekanslarını daha fazla kapsayan aralıkta sonuçlar ile bu çalışma ileriye taşınabilir.
14. Farklı yüklenme değerlerine ve diş sayılarına göre yapılacak daha fazla analiz ile bulgular zenginleştirilebilir.
15. Farklı yüksek dayanımlı çelik malzemeler kullanılarak çalışma kapsamı genişletilebilir.
16. Ağı yapısında ağırlık boşaltma delikleri oluşturularak veya rim çevresinde oluşturulan radyus geçişleri çeşitlendirilerek farklı çalışmalar ortaya konabilir.
17. Rulman rijitlik değerleri ve dişliye eksenel uzaklığı ek parametre olarak değerlendirilebilir. Böylece çalışma ile oluşturulması amaçlanan veri seti zenginleştirilebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abert B., & Hammerl, G. (2023). *A Model for Considering Wheel Body Deformation in Tooth Contact Load Distribution*. Power Transmission Engineering. <https://doi.org/10.51202/9783181024225>
- Açıkgöz, A. (2019). *Bending Stress Analysis and Fatigue Life Estimation of Involute Spur Gears by Finite Element Method (FEM)*. Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/423949>
- Ali, M. M. (2017). *Contact Stresses Analysis in Spur Gears by Finite Element Method*. Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/425765>
- Arıkan, S. M. A. (1987). *Computer Aided Dynamic Modelling of Spur Gears*. ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi. <https://hdl.handle.net/11511/11930>
- Arslan, M. (2011). *Bilgisayar Destekli Diferansiyel Dişli Kutusu Tasarımı, Modelleme ve Animasyonu*. Fırat Üniversitesi Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/415295>
- ASM Inc., *AISI E 9310 Steel, mock carburized 790°C reheat, 150°C temper, 13 mm round*. <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=M931AL>
- Ayçiçek, M. (2008). *İki Kademeli Düz Dişli Hız Kutusu Tasarımı*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/301394>
- Bathe. K. J., (2016). *Finite Element Procedures*, c. 02, sy. 11, Watertown, MA.
- Bozca, M. (2018). *Transmission Error Model-Based Optimisation of the Geometric Design Parameters of an Automotive Transmission Gearbox to Reduce Gear-Rattle Noise*. Applied Acoustics, 130, 247-259. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.10.005>
- Bozca, M., Fietkau, P. (2010). *Empirical Model Based Optimization of Gearbox Geometric Design Parameters to Reduce Rattle Noise in an Automotive Transmission*. Mechanism and Machine Theory, 45(11), 1599-1612. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2010.06.013>
- Budynas, R. G., Nisbett, J. K. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. (10th ed.). McGraw-Hill Education.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Chen, Y., Mou, X. (2021). *Natural Characteristics Analysis and Experimental Test of Spiral Bevel Gear Pair in the Tractor Transmission System*. Advances in Mechanical Engineering, 13(8). <https://doi.org/10.1177/16878140211037120>
- Cook R. D. vd. (1989). *Concepts and Applications of Finite Element Alaysis*, c. 03, sy. 14
- Dimarogonas, D.A. (1989). *Computer Aided Machine Design*. Prentice-Hall.
- Doğruer, C. U. (1999). *Dynamic Analysis of Spur Gears*. ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
<https://www.proquest.com/openview/245ce8decf072791fcbd1889e3c42115/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Eng, J., Karuppanan, S., Patil, S. (2018). *Frictional Stress Analysis of Spur Gear with Misalignments*. Journal of Mechanical Engineering and Sciences.
<https://doi.org/10.15282/jmes.12.2.2018.4.0316>
- EPI Inc. (2023). *Turbine Helicopter Power Transmission System*.
https://www.epi-eng.com/gearbox_products/mark-25_gearbox.htm
- Fadıl, D. A. (2017). *Analysis of Tooth Stiffness of Spur Gears by Finite Element Method*. Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
<https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/425899>
- Farhan, M., Karuppanan, S., & Patil, S. S. (2015). *Frictional Contact Stress Analysis of Spur Gear by Using Finite Element Method*. Applied Mechanics and Materials, 772, 159-163.
<https://www.scientific.net/AMM.772.159>
- Fish, J., Belytschko, T. (2007). *A First Course in Finite Elements*, John Wiley & Sons.
- Han, Q., Wei, J., Han, Q., Zhang, H. (2017). *Dynamics and Vibration Analyses of Gearbox in Wind Turbine*, Springer Nature, Singapore <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2747-5>
- Hayes J. D., Davidson S. R. (2014). *Gear Resonance Analysis and Experimental Verification Using Rapid Prototyped Gears*. <https://gearsolutions.com/features/gear-resonance-analysis-and-experimental-verification-using-rapid-prototyped-gears/>
- Huangfu, Y., Dong, X., Chen, K. (2023). *Coupling Mechanism Between Systematic Elastic Deformation and Gear Surface Damage*. International Journal of Mechanical Sciences, 238, 107850. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107850>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Hutton, D. V. (2004). *Fundamentals of Finite Element Analysis*, New York, sy. 4
- Inoue, K., Townsend, D. P., Coy, J. J. (1992). *Optimum Design of a Gearbox for Low Vibration*. Sixth International Power Transmission and Gearing Conference, NASA.
<https://ntrs.nasa.gov/citations/19920019233>
- Jiang, X., Li, B., Mao, X. (2019). *New Approach Based on Operational Strain Modal Analysis to Identify Dynamical Properties of the High-Speed Reciprocating Operation Mechanism*. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 38(3-4), 1345-1362. <https://doi.org/10.1177/1461348418821203>
- Kim, J., Park, N., Lee, H. (2016). *Tooth Modification for Optimizing Gear Contact of a Wind-Turbine Gearbox*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 230(7-8), 1318-1330.
<https://doi.org/10.1177/0954406215622656>
- KissSoft. *Our History*. <https://www.kisssoft.com/en/a-gleason-company/our-history>
- KissSoft. *Product Overview*. <https://www.kisssoft.com/en/products/product-overview>
- Küçükçongar, B. (2004). *Metalik Düz Dişli Çarklarda Diş Genişlik Modifikasyonu ile Aşınma Arasındaki İlişkinin DeneySEL Olarak İncelenmesi*. Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
<https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/467239>
- Li, Z., Wang, H., Zhu, R. (2019). *Effect Predictions of Web Active Control on Dynamic Behaviors of Face Gear Drives*. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 38(2), 753-764. <https://doi.org/10.1177/1461348418821587>
- Lisle, T.J., Shaw, B.A., & Frazer, R.C. (2019). *Internal Spur Gear Root Bending Stress: A Comparison of ISO 6336:1996, ISO 6336:2006, VDI 2737:2005, AGMA, ANSYS Finite Element Analysis and Strain Gauge Techniques*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 233, 1713-1720. <https://doi.org/10.1177/0954406218774364>
- Maláková S, Puškár M, Frankovský P, Sivák S, Harachová D. (2021). *Influence of the Shape of Gear Wheel Bodies in Marine Engines on the Gearing Deformation and Meshing Stiffness*. Journal of Marine Science and Engineering.
<https://doi.org/10.3390/jmse9101060>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Mo, S., Li, Y., Wang, D., Hu, X., Bao, H., Cen, G., Huang, Y. (2023). *An Analytical Method for the Meshing Characteristics of Asymmetric Helical Gears With Tooth Modifications*. Mechanism and Machine Theory, 185, 105321.
<https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2023.105321>
- Nikishkov G. P. (2004). *Introduction to the Finite Element Method*, Lecture Notes. University of Aizu, Aizu-Wakamatsu 965-8580, Japan, sy. 8, şekil 1.2
- Ocak, B. (2020). *Contact Analysis for Modified Spur Gears*. ODTÜ Mühendislik Bilimleri, Yüksek Lisans Tezi.
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=2YxxXt6LHkcknb2-QurFIQ&no=2n8QZXZy5NcNwXlp8Qoiwg>
- Özek, F. (2007). *Optimum Ağırlıklı Düz Dişli Çark Tasarımı ve Gerilme Analizi*. Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=_G0bN-OEqVryHNtneKwEyA&no=sI1z0RCplL_oVSFa-_VF_w
- Öztürk, H. (2006). *Gearbox Health Monitoring and Fault Detection Using Vibration Analysis*. Dokuz Eylül Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Yüksek Okulu, Doktora Tezi.
<https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/560778>
- Park, S. J., Yoo, W. S. (2004). *Deformation Overlap in the Design of Spur and Helical Gear Pair*. Finite Elements in Analysis and Design, 40(11), 1361-1378.
<https://doi.org/10.1016/j.finel.2003.10.003>
- Pasta, A., Mariotti, GV. (2007). *Finite Element Method Analysis of a Spur Gear With a Corrected Profile*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 42(5), 281 - 292. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA284>
- SAFRAN, *Accessory gearbox for the M88, which Powers the Rafale fighter*.
<https://www.safran-group.com/products-services/accessory-gearbox-m88-which-powers-rafale-fighter>
- Saxena, A., Parey, A. (2016). *Chouksey, M. Study of Modal Characteristics of a Geared Rotor System*. Procedia Technology, 23, 225-231.
<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.03.021>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Shigley, J.E., Mischke, C.R. (1989). *Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill Book Company.
- Soykök, İ. F. (2001). *Mathcad Programı Ortamında Sonlu Elemanlar Metodu Kullanılarak Silindirik Düz Dişliçark Dişlerinde Meydana Gelen Gerilme ve Şekil Değişimlerinin Hesabı*. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=bf4VWMteV-por9W2n4W2zw&no=OWu6vg9g5NmiTeBq2P1iNw>
- Tascarella, P. (2019). *Ansys becoming part of Nasdaq-100 Index*.
<https://www.bizjournals.com/pittsburgh/news/2019/12/16/ansys-becoming-part-of-nasdaq-100-index.html>
- Tata, R. P., (2012). *Basic Gear Fundamentals*, CED Engineering, NJ 07677, USA
- TEI. (2022). *TEI TS-1400 Aksesuar Dişli Kutusu TEI'ye Teslim Edildi*.
<https://www.tei.com.tr/tr/medya/basin-bultenleri/tei-ts1400-aksesuar-disli-kutusu-teiye-teslim-edildi>
- Yeşilyurt, İ. (1997). *Gearbox Fault Detection and Severity Assessment Using Vibration Analysis*. The University of Manchester Faculty of Science and Engineering, Doktora Tezi.
- Yıldırım, G. (2023). *Milli hava platformalarını Türk mühendisleri donatıyor*.
<https://www.aa.com.tr/tr/savunma-sanayisi/milli-hava-platformlarini-turk-muhendisleri-donatiyor/3070219#>
- Yüksel, A. E. (2022). *Havacılıkta Hibrit İtke Sistemleri ve Uygun Dişli Kutusu Tasarımı*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Zachary S. Henry, (1995). *Bell Helicopter Advanced Rotorcraft Transmission (ART) Program*, NASA, sy. 5 <https://ntrs.nasa.gov/citations/19950023117>
- Zaretsky, E.V. (1983). *NASA Helicopter Transmission System Technology Program*.
<https://ntrs.nasa.gov/citations/19830011849>
- Zhan, J., Fard, M., & Jazar, R. (2015). *A Quasi-Static FEM For Estimating Gear Load Capacity*. Measurement, 75, 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.07.036>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Zhang, S.R., Wang, L.J., Du, X.J. vd. (2021). *Research of Fatigue Life Prediction for Optimization of the Gearbox Design Based on MSC. Patran*. Strength Mater 53, 636–645. <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00326-7>
- Zou, D., Wang, L., Yang, L. (2023). *Dynamic characteristics of a Spur Gear Pair Under the Coupled Effects of Angular Misalignment Fault and Tooth Modification*. International Journal of Non-Linear Mechanics, 155, 104453. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2023.104453>

EK AÇIKLAMALAR

Ek Açıklama-A: Bölüm 3.3.'te Kullanılan AGMA 2001 D04 Standardı Rim Kalınlığı Grafiği

Ek Açıklama-B: Bölüm 4.1.1.'de Kullanılan Z53 Dişli Kontak Kayma Çizelgeleri

Ek Açıklama-C: Bölüm 4.1.2.'de Kullanılan Z76 Dişli Kontak Kayma Çizelgeleri

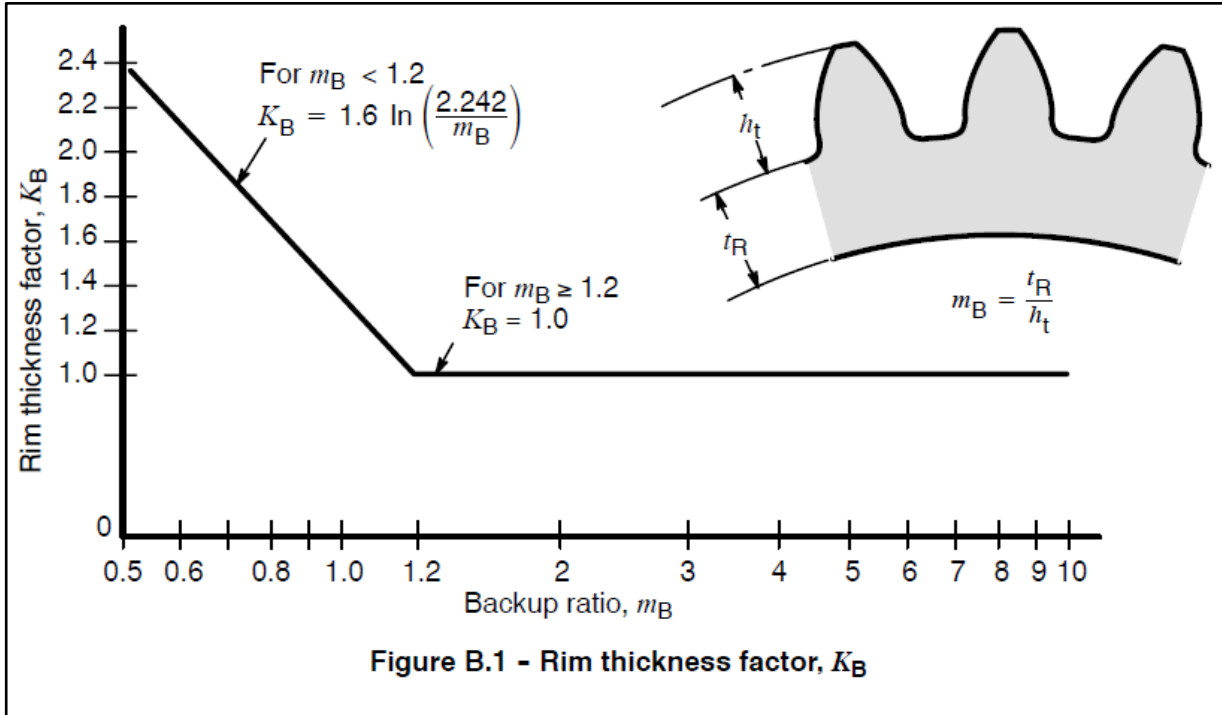
Ek Açıklama-D: Bölüm 3.3.'te Açıklanan Kütle Değişim Tablosu

Ek Açıklama-E: Bölüm 1.'de Kullanılan AGMA 927 A01 Standart Çalışma Görseli



Ek Açıklama-A

Bölüm 3.3.'te Kullanılan AGMA 2001 D04 Standardı Rim Kalınlığı Grafiği



Ek Açıklama-B

Bölüm 4.1.1.'de Kullanılan Z53 Dişli Kontak Kayma Çizelgeleri

Z53 W1 R1																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [µm]	-0.14735	-0.15661	-0.16032	-0.16394	-0.16483	-0.16681	-0.16683	-0.16825	-0.16763	-0.16806	-0.16731	-0.16811	-0.1664	-0.16571	-0.16265	-0.15789	-0.14992
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [µm]	-7.31E-02	-7.50E-02	-7.60E-02	-7.57E-02	-7.52E-02	-7.47E-02	-7.50E-02	-7.44E-02	-7.47E-02	-7.54E-02	-7.62E-02	-7.58E-02	-7.72E-02	-7.77E-02	-7.78E-02	-7.84E-02	-7.67E-02
ave	-0.11025	-0.11581	-0.11818	-0.11981	-0.12001	-0.12076	-0.12091	-0.12131	-0.12115	-0.12174	-0.12174	-0.12196	-0.1218	-0.1217	-0.12023	-0.11816	-0.11332
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [µm]	-6.61E-02	-6.31E-02	-5.87E-02	-5.39E-02	-4.88E-02	-4.36E-02	-3.79E-02	-3.23E-02	-2.66E-02	-2.05E-02	-1.48E-02	-9.44E-03	-4.14E-03	9.66E-04	5.88E-03	1.00E-02	1.34E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [µm]	-7.97E-02	-7.38E-02	-6.70E-02	-6.04E-02	-5.40E-02	-4.78E-02	-4.15E-02	-3.55E-02	-2.93E-02	-2.31E-02	-1.69E-02	-1.07E-02	-4.45E-03	1.87E-03	8.48E-03	1.53E-02	2.09E-02
ave	-0.0729	-0.06844	-0.06284	-0.05715	-0.05139	-0.04569	-0.03972	-0.03386	-0.02793	-0.02182	-0.01587	-0.01007	-0.00429	0.00142	0.007177	0.012667	0.017161

Z53 W1 R2																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [µm]	-0.14392	-0.1528	-0.1578	-0.15966	-0.16263	-0.16341	-0.16449	-0.16401	-0.16414	-0.16521	-0.1641	-0.16519	-0.16345	-0.16172	-0.16036	-0.15452	-0.14681
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [µm]	-7.20E-02	-7.44E-02	-7.47E-02	-7.46E-02	-7.46E-02	-7.36E-02	-7.40E-02	-7.40E-02	-7.35E-02	-7.43E-02	-7.46E-02	-7.53E-02	-7.60E-02	-7.62E-02	-7.70E-02	-7.68E-02	-7.53E-02
ave	-0.10794	-0.1136	-0.11627	-0.11712	-0.1186	-0.11853	-0.11925	-0.11899	-0.11882	-0.11978	-0.11934	-0.12027	-0.11973	-0.11894	-0.11869	-0.11564	-0.11103
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [µm]	-6.52E-02	-6.22E-02	-5.81E-02	-5.33E-02	-4.82E-02	-4.30E-02	-3.73E-02	-3.16E-02	-2.57E-02	-1.99E-02	-1.42E-02	-8.61E-03	-3.32E-03	1.82E-03	6.49E-03	1.11E-02	1.41E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [µm]	-7.87E-02	-7.33E-02	-6.64E-02	-5.97E-02	-5.35E-02	-4.72E-02	-4.09E-02	-3.48E-02	-2.86E-02	-2.24E-02	-1.62E-02	-9.98E-03	-3.71E-03	2.63E-03	9.22E-03	1.57E-02	2.16E-02
ave	-0.07197	-0.06776	-0.06224	-0.0565	-0.05082	-0.04507	-0.03911	-0.03316	-0.02713	-0.02116	-0.01519	-0.00929	-0.00351	0.002222	0.007854	0.013388	0.017856

Z53 W1 R3																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [µm]	-0.14101	-0.14982	-0.15482	-0.15708	-0.15901	-0.16054	-0.16112	-0.16104	-0.16151	-0.16139	-0.16139	-0.16125	-0.16058	-0.15834	-0.15685	-0.15169	-0.14347
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [µm]	-7.10E-02	-7.30E-02	-7.31E-02	-7.33E-02	-7.23E-02	-7.28E-02	-7.23E-02	-7.16E-02	-7.24E-02	-7.29E-02	-7.25E-02	-7.35E-02	-7.43E-02	-7.46E-02	-7.48E-02	-7.58E-02	-7.33E-02
ave	-0.10602	-0.1114	-0.11397	-0.1152	-0.11564	-0.11667	-0.11672	-0.1163	-0.11696	-0.11714	-0.11694	-0.11736	-0.11746	-0.11649	-0.11582	-0.11373	-0.10838
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [µm]	-6.50E-02	-6.18E-02	-5.75E-02	-5.27E-02	-4.75E-02	-4.23E-02	-3.67E-02	-3.10E-02	-2.51E-02	-1.92E-02	-1.36E-02	-7.97E-03	-2.66E-03	2.50E-03	7.23E-03	1.16E-02	1.46E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [µm]	-7.81E-02	-7.26E-02	-6.58E-02	-5.92E-02	-5.29E-02	-4.65E-02	-4.03E-02	-3.42E-02	-2.80E-02	-2.18E-02	-1.56E-02	-9.35E-03	-3.17E-03	3.27E-03	9.76E-03	1.68E-02	2.27E-02
ave	-0.07156	-0.06717	-0.06165	-0.05592	-0.05018	-0.04443	-0.03848	-0.0326	-0.02655	-0.0205	-0.0146	-0.00866	-0.00291	0.002885	0.008496	0.014215	0.018653

Z53 W1 R4																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [µm]	-0.13774	-0.14741	-0.15105	-0.15469	-0.15535	-0.15734	-0.15788	-0.15869	-0.15771	-0.15886	-0.15787	-0.15841	-0.15713	-0.15521	-0.15343	-0.14894	-0.13987
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [µm]	-6.87E-02	-7.14E-02	-7.16E-02	-7.12E-02	-7.12E-02	-7.08E-02	-7.01E-02	-7.04E-02	-7.00E-02	-7.01E-02	-7.18E-02	-7.13E-02	-7.20E-02	-7.30E-02	-7.29E-02	-7.40E-02	-7.15E-02
ave	-0.1032	-0.1094	-0.11134	-0.11295	-0.11327	-0.11409	-0.11401	-0.11456	-0.11383	-0.1145	-0.11484	-0.11484	-0.11457	-0.11408	-0.11316	-0.11148	-0.10569
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [µm]	-6.44E-02	-6.13E-02	-5.69E-02	-5.22E-02	-4.70E-02	-4.18E-02	-3.61E-02	-3.04E-02	-2.46E-02	-1.87E-02	-1.30E-02	-7.45E-03	-2.15E-03	3.03E-03	7.72E-03	1.20E-02	1.50E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [µm]	-7.78E-02	-7.24E-02	-6.53E-02	-5.87E-02	-5.24E-02	-4.60E-02	-3.98E-02	-3.36E-02	-2.75E-02	-2.12E-02	-1.51E-02	-8.75E-03	-2.57E-03	3.86E-03	1.04E-02	1.71E-02	2.32E-02
ave	-0.07109	-0.06688	-0.06111	-0.05542	-0.0497	-0.04392	-0.03795	-0.03202	-0.02601	-0.01998	-0.01404	-0.0081	-0.00236	0.003445	0.009065	0.01452	0.019071

Z53 W1 R5																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [µm]	-0.13483	-0.14373	-0.14793	-0.15095	-0.15294	-0.15414	-0.15481	-0.1558	-0.15509	-0.15545	-0.15519	-0.15515	-0.15421	-0.15207	-0.15091	-0.14582	-0.13691
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [µm]	-6.65E-02	-6.93E-02	-6.88E-02	-6.93E-02	-6.86E-02	-6.89E-02	-6.79E-02	-6.86E-02	-6.75E-02	-6.87E-02	-6.94E-02	-6.88E-02	-6.98E-02	-7.08E-02	-7.12E-02	-7.17E-02	-6.94E-02
ave	-0.10069	-0.1065	-0.10837	-0.11011	-0.11076	-0.1115	-0.11135	-0.11219	-0.11132	-0.11207	-0.11229	-0.11198	-0.112	-0.11146	-0.11103	-0.10874	-0.10314
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [µm]	-6.42E-02	-6.08E-02	-5.65E-02	-5.16E-02	-4.66E-02	-4.13E-02	-3.56E-02	-2.99E-02	-2.41E-02	-1.82E-02	-1.24E-02	-7.01E-03	-1.62E-03	3.48E-03	8.23E-03	1.25E-02	1.56E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [µm]	-7.75E-02	-7.17E-02	-6.49E-02	-5.82E-02	-5.19E-02	-4.55E-02	-3.93E-02	-3.32E-02	-2.69E-02	-2.07E-02	-1.45E-02	-8.31E-03	-2.04E-03	4.29E-03	1.10E-02	1.78E-02	2.39E-02
ave	-0.07085	-0.06625	-0.06069	-0.05492	-0.04924	-0.04341	-0.03746	-0.03154	-0.0255	-0.01945	-0.01346	-0.00766	-0.00183	0.003884	0.009603	0.015181	0.019741

Z53 W2 R1																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.13269	-0.14122	-0.14612	-0.14818	-0.15071	-0.15146	-0.15235	-0.15276	-0.153	-0.15307	-0.15306	-0.15315	-0.15168	-0.15002	-0.14832	-0.14334	-0.13544
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-5.93E-02	-6.15E-02	-6.17E-02	-6.18E-02	-6.12E-02	-6.14E-02	-6.09E-02	-6.06E-02	-6.08E-02	-6.16E-02	-6.18E-02	-6.26E-02	-6.27E-02	-6.35E-02	-6.44E-02	-6.43E-02	-6.23E-02
ave	-0.09597	-0.10135	-0.10393	-0.10498	-0.10595	-0.10643	-0.10664	-0.10666	-0.10692	-0.10733	-0.10744	-0.10787	-0.10721	-0.10674	-0.10637	-0.1038	-0.09885
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.72E-02	-6.38E-02	-5.93E-02	-5.47E-02	-4.95E-02	-4.44E-02	-3.86E-02	-3.30E-02	-2.71E-02	-2.13E-02	-1.55E-02	-1.02E-02	-4.82E-03	2.66E-04	5.12E-03	9.45E-03	1.24E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-8.05E-02	-7.44E-02	-6.78E-02	-6.11E-02	-5.48E-02	-4.85E-02	-4.23E-02	-3.61E-02	-3.00E-02	-2.38E-02	-1.76E-02	-1.14E-02	-5.13E-03	1.19E-03	7.92E-03	1.47E-02	2.06E-02
ave	-0.07386	-0.06909	-0.06354	-0.05794	-0.05213	-0.04642	-0.04046	-0.03456	-0.02856	-0.02252	-0.01656	-0.01076	-0.00498	0.000726	0.00652	0.012073	0.016511

Z53 W2 R2																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.12963	-0.13839	-0.14371	-0.14571	-0.14816	-0.14939	-0.14941	-0.15053	-0.14983	-0.15097	-0.15028	-0.14985	-0.14938	-0.14772	-0.14501	-0.14096	-0.13258
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-5.85E-02	-6.09E-02	-6.10E-02	-6.13E-02	-6.02E-02	-6.09E-02	-6.02E-02	-6.08E-02	-6.05E-02	-6.01E-02	-6.21E-02	-6.12E-02	-6.22E-02	-6.24E-02	-6.36E-02	-6.36E-02	-6.16E-02
ave	-0.09407	-0.09964	-0.10237	-0.10349	-0.10417	-0.10513	-0.10481	-0.10566	-0.10518	-0.10555	-0.1062	-0.10554	-0.10581	-0.10504	-0.10432	-0.10229	-0.09707
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.61E-02	-6.32E-02	-5.88E-02	-5.41E-02	-4.89E-02	-4.37E-02	-3.80E-02	-3.24E-02	-2.65E-02	-2.07E-02	-1.50E-02	-9.30E-03	-4.07E-03	1.00E-03	5.88E-03	1.04E-02	1.34E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-7.96E-02	-7.41E-02	-6.71E-02	-6.05E-02	-5.42E-02	-4.78E-02	-4.16E-02	-3.55E-02	-2.93E-02	-2.31E-02	-1.69E-02	-1.06E-02	-4.46E-03	1.93E-03	8.49E-03	1.52E-02	2.13E-02
ave	-0.07284	-0.06862	-0.06296	-0.05733	-0.05157	-0.04574	-0.03984	-0.03391	-0.02792	-0.02188	-0.01598	-0.00997	-0.00427	0.001465	0.007182	0.012791	0.01735

Z53 W2 R3																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.12727	-0.1363	-0.14112	-0.14349	-0.14581	-0.14614	-0.1474	-0.14794	-0.14779	-0.14798	-0.14736	-0.14718	-0.14686	-0.14517	-0.14299	-0.13841	-0.12982
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-5.73E-02	-5.94E-02	-5.93E-02	-5.98E-02	-5.96E-02	-5.89E-02	-5.86E-02	-5.94E-02	-5.88E-02	-5.95E-02	-5.98E-02	-5.97E-02	-6.10E-02	-6.18E-02	-6.21E-02	-6.21E-02	-6.07E-02
ave	-0.09227	-0.09787	-0.10022	-0.10164	-0.10272	-0.10254	-0.10301	-0.10367	-0.10328	-0.10372	-0.10358	-0.10346	-0.10394	-0.10347	-0.10255	-0.10023	-0.09525
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.57E-02	-6.29E-02	-5.82E-02	-5.34E-02	-4.84E-02	-4.31E-02	-3.74E-02	-3.18E-02	-2.59E-02	-2.01E-02	-1.44E-02	-8.74E-03	-3.49E-03	1.57E-03	6.51E-03	1.08E-02	1.36E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-7.92E-02	-7.31E-02	-6.65E-02	-6.00E-02	-5.36E-02	-4.73E-02	-4.12E-02	-3.49E-02	-2.87E-02	-2.25E-02	-1.63E-02	-1.01E-02	-3.84E-03	2.51E-03	9.01E-03	1.57E-02	2.18E-02
ave	-0.07245	-0.06799	-0.06238	-0.05673	-0.05099	-0.04521	-0.0393	-0.03334	-0.02734	-0.02129	-0.01535	-0.00943	-0.00366	0.002041	0.007757	0.013242	0.017669

Z53 W2 R4																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.12485	-0.13317	-0.13852	-0.13974	-0.14322	-0.14489	-0.14448	-0.1449	-0.14534	-0.14515	-0.14518	-0.14558	-0.14425	-0.14224	-0.14034	-0.13551	-0.12737
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-5.55E-02	-5.79E-02	-5.87E-02	-5.85E-02	-5.75E-02	-5.80E-02	-5.75E-02	-5.72E-02	-5.74E-02	-5.81E-02	-5.84E-02	-5.87E-02	-5.93E-02	-6.00E-02	-5.99E-02	-6.06E-02	-5.90E-02
ave	-0.09018	-0.09552	-0.09859	-0.09911	-0.10038	-0.10143	-0.10101	-0.10107	-0.10136	-0.10164	-0.10181	-0.10213	-0.10175	-0.10114	-0.10014	-0.09806	-0.09318
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.54E-02	-6.19E-02	-5.77E-02	-5.30E-02	-4.78E-02	-4.25E-02	-3.70E-02	-3.13E-02	-2.53E-02	-1.96E-02	-1.38E-02	-8.18E-03	-2.91E-03	2.29E-03	6.92E-03	1.13E-02	1.46E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-7.88E-02	-7.27E-02	-6.60E-02	-5.95E-02	-5.31E-02	-4.67E-02	-4.06E-02	-3.44E-02	-2.82E-02	-2.20E-02	-1.58E-02	-9.57E-03	-3.28E-03	3.14E-03	9.68E-03	1.66E-02	2.22E-02
ave	-0.07209	-0.06731	-0.06187	-0.0562	-0.05045	-0.04464	-0.03877	-0.03283	-0.02676	-0.02076	-0.01476	-0.00888	-0.0031	0.002715	0.008301	0.013933	0.018397

Z53 W2 R5																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.12222	-0.13118	-0.13562	-0.1379	-0.14033	-0.14231	-0.1418	-0.14325	-0.14283	-0.14238	-0.14254	-0.14209	-0.14148	-0.14059	-0.13721	-0.13314	-0.12485
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-5.43E-02	-5.66E-02	-5.64E-02	-5.68E-02	-5.60E-02	-5.61E-02	-5.56E-02	-5.58E-02	-5.54E-02	-5.52E-02	-5.73E-02	-5.64E-02	-5.84E-02	-5.79E-02	-5.94E-02	-5.85E-02	-5.74E-02
ave	-0.08825	-0.09389	-0.09603	-0.09733	-0.09817	-0.09922	-0.0987	-0.09953	-0.0991	-0.09877	-0.09992	-0.09922	-0.09994	-0.09924	-0.09831	-0.09581	-0.09114
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.48E-02	-6.18E-02	-5.72E-02	-5.25E-02	-4.74E-02	-4.21E-02	-3.65E-02	-3.07E-02	-2.50E-02	-1.90E-02	-1.34E-02	-7.70E-03	-2.50E-03	2.67E-03	7.48E-03	1.18E-02	1.53E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-7.84E-02	-7.24E-02	-6.55E-02	-5.90E-02	-5.26E-02	-4.64E-02	-4.01E-02	-3.39E-02	-2.76E-02	-2.15E-02	-1.53E-02	-9.16E-03	-2.79E-03	3.56E-03	1.01E-02	1.67E-02	2.30E-02
ave	-0.07159	-0.06711	-0.06139	-0.05578	-0.04999	-0.04421	-0.03832	-0.03233	-0.02631	-0.02027	-0.01433	-0.00843	-0.00265	0.003117	0.008811	0.014289	0.01918

Z53 W3 R1																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.11984	-0.12951	-0.13266	-0.13683	-0.13808	-0.13975	-0.13972	-0.14076	-0.14082	-0.14113	-0.14063	-0.1406	-0.14045	-0.13781	-0.13543	-0.13123	-0.12306
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-4.76E-02	-4.99E-02	-5.08E-02	-5.03E-02	-4.97E-02	-4.92E-02	-4.94E-02	-4.89E-02	-4.98E-02	-4.95E-02	-5.07E-02	-5.07E-02	-5.20E-02	-5.22E-02	-5.28E-02	-5.35E-02	-5.14E-02
ave	-0.08372	-0.08969	-0.09175	-0.09355	-0.09387	-0.09447	-0.09456	-0.09483	-0.09531	-0.0953	-0.09566	-0.09566	-0.09622	-0.09502	-0.09412	-0.09236	-0.08721
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.76E-02	-6.42E-02	-5.99E-02	-5.51E-02	-5.00E-02	-4.48E-02	-3.91E-02	-3.35E-02	-2.76E-02	-2.18E-02	-1.61E-02	-1.05E-02	-5.23E-03	-4.56E-04	4.61E-03	9.20E-03	1.21E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-8.06E-02	-7.50E-02	-6.83E-02	-6.16E-02	-5.52E-02	-4.90E-02	-4.27E-02	-3.65E-02	-3.03E-02	-2.42E-02	-1.80E-02	-1.18E-02	-5.53E-03	9.12E-04	7.49E-03	1.44E-02	2.04E-02
ave	-0.07407	-0.0696	-0.06407	-0.05834	-0.0526	-0.04688	-0.04092	-0.03503	-0.02897	-0.023	-0.01707	-0.01114	-0.00538	0.000433	0.006047	0.011814	0.016244

Z53 W3 R2																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.11805	-0.12667	-0.13147	-0.13485	-0.13609	-0.13792	-0.13801	-0.13832	-0.13882	-0.13895	-0.13885	-0.13817	-0.13731	-0.1366	-0.13292	-0.1291	-0.12076
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-4.73E-02	-4.96E-02	-5.02E-02	-4.93E-02	-4.92E-02	-4.92E-02	-4.87E-02	-4.91E-02	-4.87E-02	-4.94E-02	-5.02E-02	-4.97E-02	-5.09E-02	-5.15E-02	-5.26E-02	-5.19E-02	-5.04E-02
ave	-0.08269	-0.08811	-0.09086	-0.09209	-0.09266	-0.09357	-0.09335	-0.0937	-0.09377	-0.0942	-0.09453	-0.09396	-0.0941	-0.09403	-0.09275	-0.0905	-0.08559
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.69E-02	-6.37E-02	-5.94E-02	-5.45E-02	-4.94E-02	-4.42E-02	-3.86E-02	-3.29E-02	-2.70E-02	-2.12E-02	-1.55E-02	-9.81E-03	-4.63E-03	5.42E-04	5.36E-03	9.49E-03	1.30E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-8.00E-02	-7.45E-02	-6.76E-02	-6.11E-02	-5.47E-02	-4.83E-02	-4.22E-02	-3.60E-02	-2.98E-02	-2.36E-02	-1.73E-02	-1.12E-02	-4.89E-03	1.47E-03	8.07E-03	1.49E-02	2.04E-02
ave	-0.07343	-0.06908	-0.06348	-0.05778	-0.05204	-0.04626	-0.04038	-0.03444	-0.02836	-0.02239	-0.01642	-0.01052	-0.00476	0.001008	0.006716	0.012193	0.016677

Z53 W3 R3																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.11584	-0.12488	-0.1297	-0.13188	-0.13436	-0.13513	-0.13665	-0.13547	-0.13626	-0.13711	-0.13621	-0.13594	-0.13607	-0.1334	-0.13208	-0.12644	-0.11797
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-4.69E-02	-4.83E-02	-4.91E-02	-4.86E-02	-4.85E-02	-4.81E-02	-4.84E-02	-4.84E-02	-4.76E-02	-4.83E-02	-4.94E-02	-5.02E-02	-5.02E-02	-5.06E-02	-5.12E-02	-5.17E-02	-4.99E-02
ave	-0.08138	-0.08659	-0.08938	-0.09022	-0.09141	-0.09162	-0.09253	-0.09194	-0.09193	-0.09271	-0.09282	-0.09309	-0.09313	-0.092	-0.09164	-0.08905	-0.08395
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.63E-02	-6.31E-02	-5.87E-02	-5.41E-02	-4.89E-02	-4.37E-02	-3.80E-02	-3.23E-02	-2.64E-02	-2.06E-02	-1.49E-02	-9.27E-03	-3.97E-03	1.17E-03	5.92E-03	1.04E-02	1.28E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-7.97E-02	-7.41E-02	-6.70E-02	-6.05E-02	-5.41E-02	-4.78E-02	-4.16E-02	-3.55E-02	-2.92E-02	-2.30E-02	-1.68E-02	-1.06E-02	-4.24E-03	1.99E-03	8.63E-03	1.55E-02	2.14E-02
ave	-0.07302	-0.0686	-0.06287	-0.05729	-0.05149	-0.04576	-0.03982	-0.03386	-0.02782	-0.0218	-0.01588	-0.00993	-0.0041	0.001579	0.007275	0.012946	0.017081

Z53 W3 R4																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.11358	-0.12298	-0.12671	-0.13053	-0.13181	-0.1331	-0.1337	-0.13415	-0.13449	-0.13407	-0.1341	-0.13434	-0.13341	-0.13223	-0.12876	-0.12535	-0.11628
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-4.50E-02	-4.79E-02	-4.70E-02	-4.76E-02	-4.77E-02	-4.75E-02	-4.63E-02	-4.72E-02	-4.64E-02	-4.77E-02	-4.84E-02	-4.82E-02	-4.92E-02	-4.89E-02	-5.06E-02	-4.96E-02	-4.86E-02
ave	-0.0793	-0.08542	-0.08684	-0.08909	-0.08973	-0.09028	-0.09001	-0.09065	-0.09043	-0.0909	-0.09125	-0.09125	-0.09133	-0.09055	-0.08969	-0.08748	-0.08244
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.57E-02	-6.27E-02	-5.84E-02	-5.34E-02	-4.83E-02	-4.32E-02	-3.75E-02	-3.18E-02	-2.59E-02	-2.01E-02	-1.44E-02	-8.78E-03	-3.47E-03	1.59E-03	6.44E-03	1.08E-02	1.38E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-7.93E-02	-7.34E-02	-6.66E-02	-6.00E-02	-5.37E-02	-4.74E-02	-4.11E-02	-3.49E-02	-2.88E-02	-2.25E-02	-1.63E-02	-1.01E-02	-3.80E-03	2.55E-03	9.23E-03	1.59E-02	2.18E-02
ave	-0.0725	-0.06804	-0.06246	-0.05674	-0.05099	-0.04527	-0.03931	-0.03334	-0.02733	-0.02128	-0.01538	-0.00942	-0.00363	0.00207	0.007836	0.013331	0.017784

Z53 W3 R5																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.11163	-0.1207	-0.12562	-0.12738	-0.12994	-0.13106	-0.13149	-0.13273	-0.13197	-0.13209	-0.13242	-0.13166	-0.13083	-0.13005	-0.12648	-0.12321	-0.11378
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-4.37E-02	-4.61E-02	-4.58E-02	-4.60E-02	-4.62E-02	-4.58E-02	-4.58E-02	-4.51E-02	-4.59E-02	-4.57E-02	-4.75E-02	-4.66E-02	-4.76E-02	-4.75E-02	-4.93E-02	-4.87E-02	-4.69E-02
ave	-0.07766	-0.08338	-0.08572	-0.08667	-0.08808	-0.08841	-0.08866	-0.08894	-0.08896	-0.08888	-0.08996	-0.08914	-0.08921	-0.08878	-0.08787	-0.08597	-0.08034
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.55E-02	-6.21E-02	-5.79E-02	-5.30E-02	-4.80E-02	-4.27E-02	-3.70E-02	-3.13E-02	-2.55E-02	-1.96E-02	-1.40E-02	-8.27E-03	-3.05E-03	2.17E-03	6.95E-03	1.13E-02	1.44E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-7.88E-02	-7.32E-02	-6.61E-02	-5.96E-02	-5.32E-02	-4.69E-02	-4.07E-02	-3.45E-02	-2.82E-02	-2.21E-02	-1.59E-02	-9.61E-03	-3.37E-03	3.07E-03	9.66E-03	1.63E-02	2.23E-02
ave	-0.07215	-0.06764	-0.06199	-0.05628	-0.05059	-0.04479	-0.03884	-0.0329	-0.02687	-0.02083	-0.01493	-0.00894	-0.00321	0.002621	0.008304	0.013826	0.018369

Z53 W4 R1																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.10973	-0.11874	-0.1228	-0.12655	-0.12801	-0.12877	-0.12985	-0.13045	-0.1305	-0.13026	-0.13063	-0.13099	-0.12943	-0.12767	-0.12588	-0.12085	-0.11297
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-3.79E-02	-4.10E-02	-4.08E-02	-4.06E-02	-3.99E-02	-4.02E-02	-3.96E-02	-4.03E-02	-3.96E-02	-4.05E-02	-4.07E-02	-4.11E-02	-4.22E-02	-4.23E-02	-4.35E-02	-4.39E-02	-4.18E-02
ave	-0.07383	-0.07988	-0.08178	-0.0836	-0.08394	-0.08449	-0.08474	-0.08535	-0.08505	-0.08537	-0.08566	-0.08607	-0.0858	-0.08498	-0.08471	-0.08236	-0.07736
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.76E-02	-6.45E-02	-6.03E-02	-5.53E-02	-5.03E-02	-4.50E-02	-3.93E-02	-3.37E-02	-2.78E-02	-2.20E-02	-1.63E-02	-1.08E-02	-5.50E-03	-3.66E-04	4.44E-03	8.76E-03	1.21E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-8.11E-02	-7.51E-02	-6.84E-02	-6.19E-02	-5.55E-02	-4.91E-02	-4.30E-02	-3.68E-02	-3.06E-02	-2.43E-02	-1.82E-02	-1.20E-02	-5.72E-03	6.40E-04	7.35E-03	1.41E-02	1.97E-02
ave	-0.07434	-0.06983	-0.06436	-0.05858	-0.05287	-0.04708	-0.04114	-0.03526	-0.0292	-0.02319	-0.01721	-0.01137	-0.00561	0.000137	0.005894	0.011423	0.015916

Z53 W4 R2																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.10785	-0.11744	-0.12101	-0.12412	-0.12648	-0.12722	-0.12774	-0.12811	-0.12882	-0.12877	-0.12845	-0.12806	-0.12784	-0.12605	-0.12359	-0.12027	-0.11063
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-3.80E-02	-4.02E-02	-4.05E-02	-3.98E-02	-4.00E-02	-4.00E-02	-3.99E-02	-3.93E-02	-3.99E-02	-4.05E-02	-4.02E-02	-4.08E-02	-4.21E-02	-4.20E-02	-4.31E-02	-4.37E-02	-4.10E-02
ave	-0.07293	-0.07883	-0.08073	-0.08196	-0.08324	-0.08359	-0.0838	-0.08369	-0.08438	-0.08462	-0.08434	-0.08445	-0.08498	-0.08404	-0.08337	-0.08198	-0.07581
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.71E-02	-6.40E-02	-5.96E-02	-5.48E-02	-4.97E-02	-4.45E-02	-3.89E-02	-3.32E-02	-2.72E-02	-2.15E-02	-1.58E-02	-1.01E-02	-4.91E-03	2.54E-04	4.98E-03	9.34E-03	1.27E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-8.03E-02	-7.46E-02	-6.79E-02	-6.14E-02	-5.50E-02	-4.87E-02	-4.25E-02	-3.62E-02	-3.00E-02	-2.39E-02	-1.77E-02	-1.15E-02	-5.11E-03	1.25E-03	7.89E-03	1.47E-02	2.03E-02
ave	-0.07371	-0.0693	-0.06374	-0.05807	-0.05235	-0.04657	-0.04066	-0.0347	-0.02864	-0.02266	-0.01674	-0.01079	-0.00501	0.000753	0.006435	0.012043	0.016469

Z53 W4 R3																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.1063	-0.1148	-0.11967	-0.12251	-0.12457	-0.12511	-0.12678	-0.12637	-0.12744	-0.12662	-0.12657	-0.1277	-0.12574	-0.12394	-0.12159	-0.11708	-0.10929
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-3.74E-02	-3.94E-02	-3.95E-02	-4.01E-02	-3.95E-02	-3.93E-02	-3.89E-02	-3.90E-02	-3.87E-02	-3.98E-02	-4.02E-02	-4.01E-02	-4.16E-02	-4.09E-02	-4.24E-02	-4.22E-02	-4.06E-02
ave	-0.07187	-0.07708	-0.0796	-0.08129	-0.08202	-0.08222	-0.08282	-0.08268	-0.08305	-0.08319	-0.08339	-0.0839	-0.08366	-0.08244	-0.08197	-0.07966	-0.07494
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.67E-02	-6.36E-02	-5.92E-02	-5.44E-02	-4.92E-02	-4.40E-02	-3.83E-02	-3.26E-02	-2.68E-02	-2.09E-02	-1.52E-02	-9.64E-03	-4.27E-03	6.49E-04	5.56E-03	9.99E-03	1.28E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-7.98E-02	-7.43E-02	-6.75E-02	-6.09E-02	-5.45E-02	-4.82E-02	-4.20E-02	-3.58E-02	-2.95E-02	-2.32E-02	-1.71E-02	-1.09E-02	-4.68E-03	1.75E-03	8.36E-03	1.50E-02	2.09E-02
ave	-0.07325	-0.06895	-0.06331	-0.05762	-0.05183	-0.04606	-0.04015	-0.03418	-0.02813	-0.02207	-0.01617	-0.01025	-0.00447	0.001202	0.006957	0.012473	0.016857

Z53 W4 R4																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.10468	-0.11329	-0.1182	-0.12063	-0.12229	-0.12405	-0.12407	-0.12459	-0.12505	-0.12488	-0.12491	-0.12523	-0.12435	-0.1228	-0.12	-0.11537	-0.10722
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-3.62E-02	-3.87E-02	-3.90E-02	-3.89E-02	-3.82E-02	-3.87E-02	-3.77E-02	-3.78E-02	-3.84E-02	-3.86E-02	-3.86E-02	-3.95E-02	-3.97E-02	-4.07E-02	-4.17E-02	-4.05E-02	-3.98E-02
ave	-0.07044	-0.07598	-0.07861	-0.07978	-0.08027	-0.08137	-0.08088	-0.08122	-0.08174	-0.08174	-0.08176	-0.08238	-0.08201	-0.08173	-0.08083	-0.07792	-0.07351
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.63E-02	-6.33E-02	-5.86E-02	-5.39E-02	-4.88E-02	-4.35E-02	-3.80E-02	-3.22E-02	-2.63E-02	-2.05E-02	-1.46E-02	-9.20E-03	-3.95E-03	1.23E-03	6.12E-03	1.06E-02	1.34E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-7.93E-02	-7.37E-02	-6.70E-02	-6.04E-02	-5.40E-02	-4.77E-02	-4.14E-02	-3.53E-02	-2.91E-02	-2.29E-02	-1.66E-02	-1.05E-02	-4.14E-03	2.24E-03	8.96E-03	1.54E-02	2.09E-02
ave	-0.07282	-0.06847	-0.06282	-0.05715	-0.05138	-0.04561	-0.0397	-0.03375	-0.02767	-0.02171	-0.01562	-0.00985	-0.00405	0.001734	0.00754	0.012978	0.017167

Z53 W4 R5																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.10263	-0.11185	-0.11585	-0.11948	-0.12102	-0.12198	-0.12247	-0.1235	-0.12317	-0.12321	-0.12386	-0.12302	-0.12237	-0.12066	-0.11796	-0.11394	-0.10531
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-3.57E-02	-3.74E-02	-3.81E-02	-3.78E-02	-3.75E-02	-3.64E-02	-3.69E-02	-3.65E-02	-3.71E-02	-3.71E-02	-3.76E-02	-3.76E-02	-3.92E-02	-3.89E-02	-4.05E-02	-4.02E-02	-3.80E-02
ave	-0.06918	-0.07461	-0.07699	-0.07865	-0.07924	-0.07918	-0.07969	-0.08001	-0.08014	-0.08014	-0.08075	-0.0803	-0.08079	-0.07977	-0.07925	-0.07705	-0.07167
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.56E-02	-6.26E-02	-5.83E-02	-5.34E-02	-4.83E-02	-4.31E-02	-3.74E-02	-3.19E-02	-2.58E-02	-2.01E-02	-1.43E-02	-8.62E-03	-3.40E-03	1.62E-03	6.46E-03	1.08E-02	1.42E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-7.91E-02	-7.31E-02	-6.65E-02	-5.99E-02	-5.36E-02	-4.73E-02	-4.10E-02	-3.48E-02	-2.86E-02	-2.25E-02	-1.63E-02	-9.94E-03	-3.71E-03	2.64E-03	9.33E-03	1.60E-02	2.22E-02
ave	-0.07234	-0.06784	-0.06243	-0.05664	-0.05094	-0.0452	-0.03921	-0.03333	-0.02719	-0.02128	-0.01531	-0.00928	-0.00355	0.002132	0.007899	0.013408	0.018203

Z53 W5 R1																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.10069	-0.10975	-0.11481	-0.11644	-0.11923	-0.1206	-0.12108	-0.1213	-0.12098	-0.12217	-0.12118	-0.12121	-0.12135	-0.11885	-0.11659	-0.11205	-0.10407
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-2.98E-02	-3.21E-02	-3.25E-02	-3.20E-02	-3.23E-02	-3.19E-02	-3.13E-02	-3.19E-02	-3.23E-02	-3.17E-02	-3.31E-02	-3.36E-02	-3.32E-02	-3.53E-02	-3.52E-02	-3.48E-02	-3.36E-02
ave	-0.06525	-0.07093	-0.07364	-0.07422	-0.07575	-0.07627	-0.0762	-0.07659	-0.07662	-0.07694	-0.07715	-0.07739	-0.0773	-0.07707	-0.07589	-0.07344	-0.06881
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.77E-02	-6.44E-02	-6.01E-02	-5.54E-02	-5.03E-02	-4.51E-02	-3.95E-02	-3.36E-02	-2.78E-02	-2.20E-02	-1.63E-02	-1.08E-02	-5.44E-03	-3.45E-04	4.28E-03	8.81E-03	1.18E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-8.12E-02	-7.52E-02	-6.85E-02	-6.19E-02	-5.55E-02	-4.92E-02	-4.30E-02	-3.67E-02	-3.07E-02	-2.44E-02	-1.82E-02	-1.20E-02	-5.67E-03	7.84E-04	7.24E-03	1.39E-02	2.01E-02
ave	-0.07447	-0.06978	-0.0643	-0.05864	-0.05291	-0.04713	-0.04123	-0.03519	-0.02925	-0.0232	-0.01726	-0.01139	-0.00556	0.000219	0.00576	0.011358	0.015932

Z53 W5 R2																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-9.97E-02	-0.10756	-0.1135	-0.1154	-0.11779	-0.11928	-0.11949	-0.12022	-0.11976	-0.12066	-0.11929	-0.12065	-0.11908	-0.11692	-0.11576	-0.1099	-0.10282
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-3.02E-02	-3.16E-02	-3.21E-02	-3.23E-02	-3.20E-02	-3.18E-02	-3.09E-02	-3.17E-02	-3.11E-02	-3.23E-02	-3.36E-02	-3.24E-02	-3.38E-02	-3.40E-02	-3.49E-02	-3.49E-02	-3.29E-02
ave	-0.06494	-0.0696	-0.07282	-0.07384	-0.07489	-0.07552	-0.07522	-0.07597	-0.07545	-0.07646	-0.07644	-0.07654	-0.07645	-0.07548	-0.07534	-0.07241	-0.06788
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.72E-02	-6.40E-02	-5.97E-02	-5.50E-02	-4.98E-02	-4.45E-02	-3.89E-02	-3.32E-02	-2.73E-02	-2.16E-02	-1.58E-02	-1.03E-02	-4.87E-03	2.68E-04	4.94E-03	9.36E-03	1.25E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-8.01E-02	-7.46E-02	-6.80E-02	-6.14E-02	-5.51E-02	-4.87E-02	-4.25E-02	-3.63E-02	-3.01E-02	-2.39E-02	-1.77E-02	-1.15E-02	-5.15E-03	1.23E-03	7.77E-03	1.44E-02	2.07E-02
ave	-0.07367	-0.0693	-0.06385	-0.05817	-0.05242	-0.04661	-0.04069	-0.03472	-0.02873	-0.02273	-0.01678	-0.01088	-0.00501	0.000747	0.006355	0.011866	0.016571

Z53 W5 R3																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-9.78E-02	-0.10704	-0.11119	-0.1149	-0.11609	-0.11767	-0.11758	-0.11866	-0.11887	-0.11935	-0.11871	-0.11816	-0.11731	-0.11648	-0.11315	-0.10972	-0.10062
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-2.90E-02	-3.14E-02	-3.22E-02	-3.12E-02	-3.13E-02	-3.13E-02	-3.08E-02	-3.12E-02	-3.13E-02	-3.13E-02	-3.24E-02	-3.16E-02	-3.28E-02	-3.36E-02	-3.42E-02	-3.40E-02	-3.21E-02
ave	-0.06341	-0.06922	-0.0717	-0.07307	-0.07372	-0.0745	-0.07418	-0.07493	-0.07506	-0.0753	-0.07557	-0.07486	-0.07507	-0.07506	-0.07369	-0.07188	-0.06636
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.65E-02	-6.36E-02	-5.93E-02	-5.45E-02	-4.93E-02	-4.41E-02	-3.85E-02	-3.28E-02	-2.69E-02	-2.11E-02	-1.55E-02	-9.69E-03	-4.52E-03	6.52E-04	5.44E-03	9.81E-03	1.27E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-8.01E-02	-7.42E-02	-6.76E-02	-6.10E-02	-5.46E-02	-4.83E-02	-4.21E-02	-3.59E-02	-2.97E-02	-2.35E-02	-1.73E-02	-1.10E-02	-4.78E-03	1.67E-03	8.19E-03	1.51E-02	2.07E-02
ave	-0.0733	-0.06893	-0.06348	-0.05773	-0.05196	-0.0462	-0.04032	-0.03435	-0.0283	-0.0223	-0.01635	-0.01036	-0.00465	0.001162	0.006814	0.012475	0.016716

Z53 W5 R4																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-9.66E-02	-0.10536	-0.11019	-0.11221	-0.11503	-0.11596	-0.11565	-0.11615	-0.11704	-0.11772	-0.11678	-0.11671	-0.11644	-0.11379	-0.11259	-0.10699	-9.93E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-2.81E-02	-3.08E-02	-3.13E-02	-3.06E-02	-3.08E-02	-3.02E-02	-3.10E-02	-3.06E-02	-2.96E-02	-3.10E-02	-3.21E-02	-3.12E-02	-3.25E-02	-3.26E-02	-3.39E-02	-3.41E-02	-3.16E-02
ave	-0.06235	-0.06806	-0.07075	-0.0714	-0.07292	-0.07309	-0.07331	-0.07338	-0.0733	-0.07437	-0.07443	-0.07393	-0.07445	-0.07319	-0.07322	-0.07056	-0.06548
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.65E-02	-6.32E-02	-5.87E-02	-5.42E-02	-4.89E-02	-4.37E-02	-3.81E-02	-3.23E-02	-2.64E-02	-2.07E-02	-1.49E-02	-9.28E-03	-3.96E-03	1.15E-03	5.85E-03	1.02E-02	1.31E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-8.01E-02	-7.38E-02	-6.71E-02	-6.06E-02	-5.42E-02	-4.78E-02	-4.16E-02	-3.55E-02	-2.92E-02	-2.30E-02	-1.69E-02	-1.06E-02	-4.34E-03	2.10E-03	8.75E-03	1.56E-02	2.17E-02
ave	-0.07333	-0.0685	-0.06291	-0.05738	-0.05155	-0.04577	-0.03986	-0.03389	-0.02782	-0.02184	-0.0159	-0.00994	-0.00415	0.001628	0.007297	0.012861	0.017427

Z53 W5 R5																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-9.50E-02	-0.10404	-0.10837	-0.11179	-0.11272	-0.11448	-0.11527	-0.1152	-0.11601	-0.11537	-0.11623	-0.11523	-0.11462	-0.11275	-0.11085	-0.10648	-9.79E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-2.75E-02	-3.02E-02	-2.99E-02	-3.02E-02	-2.93E-02	-2.95E-02	-2.90E-02	-2.94E-02	-2.95E-02	-2.94E-02	-3.06E-02	-3.00E-02	-3.16E-02	-3.20E-02	-3.28E-02	-3.20E-02	-3.08E-02
ave	-0.06126	-0.06713	-0.06914	-0.07098	-0.07103	-0.07201	-0.07215	-0.07231	-0.07278	-0.07236	-0.07343	-0.07261	-0.07312	-0.07237	-0.07185	-0.06922	-0.06438
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-6.63E-02	-6.28E-02	-5.84E-02	-5.37E-02	-4.85E-02	-4.33E-02	-3.77E-02	-3.20E-02	-2.61E-02	-2.02E-02	-1.45E-02	-8.67E-03	-3.70E-03	1.51E-03	6.23E-03	1.06E-02	1.41E-02
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-7.93E-02	-7.35E-02	-6.68E-02	-6.02E-02	-5.38E-02	-4.74E-02	-4.12E-02	-3.51E-02	-2.88E-02	-2.26E-02	-1.64E-02	-1.02E-02	-3.86E-03	2.47E-03	9.01E-03	1.57E-02	2.14E-02
ave	-0.07276	-0.06819	-0.0626	-0.05692	-0.05112	-0.04533	-0.03946	-0.03352	-0.02746	-0.02141	-0.01546	-0.00944	-0.00378	0.001992	0.007615	0.013149	0.017725

Ek Açıklama-C

Bölüm 4.1.2.'de Kullanılan Z76 Dışlı Kontak Kayma Çizelgeleri

Z76 W1 R1																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [µm]	-0.16771	-0.17424	-0.17741	-0.18063	-0.18047	-0.18234	-0.18253	-0.18291	-0.18403	-0.18284	-0.18306	-0.18229	-0.18116	-0.18026	-0.17722	-0.175	-0.16755
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [µm]	-6.35E-02	-6.46E-02	-6.43E-02	-6.49E-02	-6.61E-02	-6.54E-02	-6.57E-02	-6.60E-02	-6.59E-02	-6.60E-02	-6.51E-02	-6.60E-02	-6.47E-02	-6.49E-02	-6.49E-02	-6.49E-02	-6.37E-02
ave	-0.11562	-0.11943	-0.12088	-0.12277	-0.12329	-0.12387	-0.1241	-0.12444	-0.12496	-0.1244	-0.12406	-0.12414	-0.12293	-0.12257	-0.12106	-0.11995	-0.11565
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [µm]	-3.53E-03	-5.66E-03	-6.91E-03	-7.30E-03	-7.19E-03	-6.44E-03	-5.22E-03	-3.67E-03	-2.07E-03	-5.55E-04	1.01E-03	2.23E-03	2.98E-03	3.11E-03	2.65E-03	1.36E-03	-5.07E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [µm]	-4.27E-02	-3.70E-02	-3.04E-02	-2.49E-02	-1.99E-02	-1.52E-02	-1.07E-02	-6.35E-03	-2.12E-03	2.13E-03	6.44E-03	1.10E-02	1.56E-02	2.07E-02	2.63E-02	3.28E-02	3.85E-02
ave	-0.02314	-0.02131	-0.01868	-0.01611	-0.01355	-0.0108	-0.00796	-0.00501	-0.0021	0.000789	0.003724	0.006604	0.009305	0.011918	0.01448	0.017063	0.019007

Z76 W1 R2																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.16473	-0.17168	-0.17478	-0.17664	-0.17816	-0.17944	-0.17898	-0.18014	-0.17965	-0.18026	-0.17987	-0.17866	-0.17803	-0.17708	-0.17468	-0.17154	-0.16491
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-6.28E-02	-6.43E-02	-6.41E-02	-6.33E-02	-6.44E-02	-6.51E-02	-6.42E-02	-6.56E-02	-6.55E-02	-6.47E-02	-6.50E-02	-6.43E-02	-6.44E-02	-6.42E-02	-6.42E-02	-6.43E-02	-6.29E-02
ave	-0.11377	-0.11798	-0.11943	-0.11999	-0.12127	-0.12228	-0.12158	-0.12285	-0.1226	-0.12249	-0.12244	-0.12146	-0.12121	-0.12066	-0.11946	-0.11793	-0.1139
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.55E-03	-5.46E-03	-6.74E-03	-7.27E-03	-7.05E-03	-6.37E-03	-5.15E-03	-3.67E-03	-2.06E-03	-4.11E-04	1.11E-03	2.31E-03	3.07E-03	3.12E-03	2.77E-03	1.45E-03	-5.40E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.26E-02	-3.68E-02	-3.04E-02	-2.48E-02	-1.97E-02	-1.50E-02	-1.05E-02	-6.31E-03	-2.03E-03	2.19E-03	6.53E-03	1.10E-02	1.57E-02	2.08E-02	2.63E-02	3.27E-02	3.85E-02
ave	-0.02305	-0.02113	-0.01859	-0.01603	-0.01339	-0.0107	-0.00782	-0.00499	-0.00205	0.00089	0.003819	0.006644	0.009374	0.011941	0.014514	0.01707	0.018987

Z76 W1 R3																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.16163	-0.16891	-0.17151	-0.17332	-0.17521	-0.17627	-0.17655	-0.17661	-0.17757	-0.17615	-0.1759	-0.17658	-0.17524	-0.17393	-0.17129	-0.16841	-0.16185
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-6.13E-02	-6.21E-02	-6.28E-02	-6.27E-02	-6.24E-02	-6.29E-02	-6.35E-02	-6.30E-02	-6.44E-02	-6.34E-02	-6.39E-02	-6.30E-02	-6.30E-02	-6.31E-02	-6.26E-02	-6.26E-02	-6.15E-02
ave	-0.11148	-0.11549	-0.11717	-0.118	-0.11881	-0.11959	-0.12004	-0.11982	-0.12097	-0.11977	-0.1199	-0.11977	-0.11914	-0.1185	-0.11694	-0.1155	-0.11167
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.56E-03	-5.51E-03	-6.81E-03	-7.32E-03	-7.14E-03	-6.39E-03	-5.23E-03	-3.69E-03	-2.15E-03	-5.09E-04	1.00E-03	2.24E-03	2.95E-03	3.12E-03	2.68E-03	1.33E-03	-6.17E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.27E-02	-3.69E-02	-3.04E-02	-2.48E-02	-1.97E-02	-1.50E-02	-1.07E-02	-6.36E-03	-2.10E-03	2.13E-03	6.39E-03	1.09E-02	1.56E-02	2.06E-02	2.63E-02	3.26E-02	3.85E-02
ave	-0.02315	-0.02119	-0.01862	-0.01607	-0.01344	-0.01069	-0.00797	-0.00502	-0.00213	0.000808	0.003697	0.006576	0.009269	0.011875	0.014482	0.016986	0.018919

Z76 W1 R4																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [µm]	-0.15868	-0.16541	-0.16853	-0.16999	-0.17243	-0.17316	-0.17343	-0.17422	-0.17431	-0.17417	-0.17308	-0.17376	-0.17188	-0.17083	-0.16832	-0.16593	-0.15873
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [µm]	-5.91E-02	-6.18E-02	-6.02E-02	-6.12E-02	-6.15E-02	-6.11E-02	-6.19E-02	-6.16E-02	-6.21E-02	-6.14E-02	-6.14E-02	-6.16E-02	-6.17E-02	-6.04E-02	-6.09E-02	-6.11E-02	-5.97E-02
ave	-0.10891	-0.11359	-0.11436	-0.11562	-0.11699	-0.11711	-0.11765	-0.11792	-0.11822	-0.1178	-0.11724	-0.11767	-0.11681	-0.1156	-0.11461	-0.11353	-0.10922
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [µm]	-3.53E-03	-5.64E-03	-6.80E-03	-7.32E-03	-7.15E-03	-6.37E-03	-5.21E-03	-3.68E-03	-2.09E-03	-4.85E-04	1.01E-03	2.14E-03	2.96E-03	3.12E-03	2.63E-03	1.33E-03	-6.36E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [µm]	-4.26E-02	-3.73E-02	-3.04E-02	-2.48E-02	-1.98E-02	-1.50E-02	-1.07E-02	-6.35E-03	-2.17E-03	2.24E-03	6.41E-03	1.09E-02	1.56E-02	2.07E-02	2.63E-02	3.27E-02	3.84E-02
ave	-0.02308	-0.02148	-0.01862	-0.01608	-0.01345	-0.01068	-0.00793	-0.00501	-0.00213	0.000877	0.00371	0.006536	0.009276	0.011888	0.014488	0.016993	0.018902

Z76 W1 R5																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [µm]	-0.15538	-0.16205	-0.16615	-0.16713	-0.16872	-0.16945	-0.17105	-0.17063	-0.17125	-0.17041	-0.17105	-0.16957	-0.16988	-0.16722	-0.1653	-0.1628	-0.15531
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [µm]	-5.75E-02	-5.87E-02	-5.82E-02	-5.92E-02	-5.93E-02	-5.94E-02	-5.91E-02	-5.95E-02	-6.10E-02	-6.03E-02	-5.94E-02	-5.98E-02	-5.85E-02	-5.88E-02	-5.88E-02	-6.01E-02	-5.77E-02
ave	-0.10644	-0.11038	-0.11219	-0.11318	-0.114	-0.11444	-0.11509	-0.11504	-0.11612	-0.11533	-0.11523	-0.11467	-0.1142	-0.11302	-0.11203	-0.11147	-0.10653
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [µm]	-3.50E-03	-5.57E-03	-6.80E-03	-7.25E-03	-7.10E-03	-6.37E-03	-5.15E-03	-3.71E-03	-2.02E-03	-5.37E-04	9.45E-04	2.24E-03	2.90E-03	3.17E-03	2.56E-03	1.31E-03	-5.44E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [µm]	-4.26E-02	-3.68E-02	-3.04E-02	-2.48E-02	-1.97E-02	-1.50E-02	-1.06E-02	-6.24E-03	-2.07E-03	2.12E-03	6.44E-03	1.09E-02	1.56E-02	2.06E-02	2.63E-02	3.29E-02	3.77E-02
ave	-0.02305	-0.02116	-0.01859	-0.01602	-0.01342	-0.01069	-0.00788	-0.00497	-0.00205	0.000792	0.003693	0.006554	0.009228	0.011909	0.014418	0.017101	0.0186

Z76 W2 R1																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.14748	-0.15477	-0.15754	-0.15961	-0.16113	-0.16215	-0.16259	-0.16234	-0.16298	-0.16374	-0.16253	-0.1624	-0.16098	-0.15956	-0.15732	-0.15441	-0.14777
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-4.46E-02	-4.61E-02	-4.56E-02	-4.63E-02	-4.60E-02	-4.70E-02	-4.63E-02	-4.71E-02	-4.66E-02	-4.74E-02	-4.66E-02	-4.68E-02	-4.65E-02	-4.57E-02	-4.59E-02	-4.64E-02	-4.48E-02
ave	-0.09603	-0.10046	-0.10156	-0.10295	-0.10356	-0.10459	-0.10445	-0.10471	-0.10478	-0.10558	-0.10456	-0.1046	-0.10373	-0.10264	-0.10163	-0.10041	-0.09628
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.59E-03	-5.52E-03	-6.75E-03	-7.30E-03	-7.12E-03	-6.35E-03	-5.16E-03	-3.69E-03	-2.13E-03	-4.14E-04	1.06E-03	2.25E-03	2.97E-03	3.07E-03	2.74E-03	1.40E-03	-5.61E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.30E-02	-3.70E-02	-3.06E-02	-2.49E-02	-1.97E-02	-1.51E-02	-1.05E-02	-6.35E-03	-2.13E-03	2.17E-03	6.50E-03	1.10E-02	1.57E-02	2.07E-02	2.64E-02	3.27E-02	3.84E-02
ave	-0.0438	-0.04159	-0.03806	-0.01608	-0.01343	-0.01074	-0.00783	-0.00502	-0.00213	0.000877	0.003783	0.006621	0.009341	0.011894	0.014559	0.017071	0.018939

Z76 W2 R2																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.14527	-0.15177	-0.15499	-0.15731	-0.1592	-0.15884	-0.16022	-0.16061	-0.16067	-0.16062	-0.16005	-0.15979	-0.1588	-0.15725	-0.15549	-0.15227	-0.14537
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-4.39E-02	-4.57E-02	-4.52E-02	-4.56E-02	-4.55E-02	-4.62E-02	-4.56E-02	-4.68E-02	-4.65E-02	-4.73E-02	-4.55E-02	-4.68E-02	-4.60E-02	-4.57E-02	-4.55E-02	-4.58E-02	-4.42E-02
ave	-0.09456	-0.09876	-0.1001	-0.10146	-0.10235	-0.10254	-0.1029	-0.10371	-0.10358	-0.10396	-0.10278	-0.10328	-0.10242	-0.1015	-0.10051	-0.09903	-0.09479
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.49E-03	-5.52E-03	-6.83E-03	-7.31E-03	-7.12E-03	-6.38E-03	-5.19E-03	-3.71E-03	-2.07E-03	-4.41E-04	1.06E-03	2.23E-03	2.96E-03	3.16E-03	2.71E-03	1.24E-03	-5.87E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.28E-02	-3.69E-02	-3.05E-02	-2.49E-02	-1.97E-02	-1.52E-02	-1.06E-02	-6.30E-03	-2.10E-03	2.13E-03	6.50E-03	1.10E-02	1.57E-02	2.07E-02	2.63E-02	3.28E-02	3.84E-02
ave	-0.02316	-0.02122	-0.01866	-0.01609	-0.01343	-0.01078	-0.00791	-0.005	-0.00209	0.000844	0.003778	0.006615	0.00933	0.011937	0.014512	0.017007	0.018903

Z76 W2 R3																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.14243	-0.14947	-0.15235	-0.15439	-0.15645	-0.15663	-0.15731	-0.15802	-0.15804	-0.15808	-0.1573	-0.15688	-0.1562	-0.15507	-0.15164	-0.1493	-0.14274
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-4.28E-02	-4.47E-02	-4.45E-02	-4.43E-02	-4.42E-02	-4.52E-02	-4.51E-02	-4.50E-02	-4.55E-02	-4.58E-02	-4.53E-02	-4.49E-02	-4.48E-02	-4.46E-02	-4.43E-02	-4.48E-02	-4.30E-02
ave	-0.09264	-0.0971	-0.09844	-0.09935	-0.10035	-0.1009	-0.10122	-0.10153	-0.10175	-0.10194	-0.10131	-0.10087	-0.1005	-0.09983	-0.09795	-0.09706	-0.09285
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.50E-03	-5.56E-03	-6.83E-03	-7.29E-03	-7.06E-03	-6.36E-03	-5.16E-03	-3.69E-03	-2.05E-03	-4.66E-04	1.05E-03	2.12E-03	3.02E-03	3.16E-03	2.75E-03	1.43E-03	-6.88E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.27E-02	-3.72E-02	-3.06E-02	-2.49E-02	-1.97E-02	-1.51E-02	-1.06E-02	-6.33E-03	-2.03E-03	2.19E-03	6.37E-03	1.10E-02	1.56E-02	2.07E-02	2.63E-02	3.28E-02	3.81E-02
ave	-0.02309	-0.02136	-0.01871	-0.01607	-0.0134	-0.01074	-0.00789	-0.00501	-0.00204	0.000863	0.003711	0.006537	0.009318	0.011937	0.014549	0.017131	0.01873

Z76 W2 R4																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.14022	-0.14677	-0.15007	-0.15181	-0.15444	-0.1544	-0.15527	-0.15524	-0.15644	-0.15519	-0.15506	-0.15465	-0.15292	-0.15239	-0.15034	-0.14716	-0.14033
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-4.17E-02	-4.24E-02	-4.35E-02	-4.25E-02	-4.35E-02	-4.37E-02	-4.35E-02	-4.35E-02	-4.39E-02	-4.43E-02	-4.35E-02	-4.42E-02	-4.34E-02	-4.29E-02	-4.28E-02	-4.28E-02	-4.16E-02
ave	-0.09096	-0.09456	-0.09677	-0.09717	-0.09896	-0.09904	-0.09936	-0.09936	-0.10019	-0.09977	-0.09928	-0.0994	-0.09818	-0.09765	-0.09659	-0.09498	-0.09098
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.46E-03	-5.45E-03	-6.80E-03	-7.31E-03	-7.04E-03	-6.39E-03	-5.15E-03	-3.60E-03	-2.06E-03	-5.05E-04	9.79E-04	2.28E-03	2.96E-03	3.14E-03	2.62E-03	1.34E-03	-6.26E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.25E-02	-3.67E-02	-3.04E-02	-2.48E-02	-1.98E-02	-1.51E-02	-1.06E-02	-6.30E-03	-2.03E-03	2.17E-03	6.40E-03	1.10E-02	1.56E-02	2.07E-02	2.62E-02	3.25E-02	3.84E-02
ave	-0.02297	-0.02108	-0.01861	-0.01605	-0.01341	-0.01074	-0.00788	-0.00495	-0.00204	0.000834	0.003689	0.006619	0.009291	0.01192	0.014407	0.016928	0.018907

Z76 W2 R5																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.13765	-0.14455	-0.14748	-0.14959	-0.15123	-0.15241	-0.15274	-0.15258	-0.15379	-0.15192	-0.15322	-0.15182	-0.15123	-0.14959	-0.14781	-0.1444	-0.13773
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-4.01E-02	-4.16E-02	-4.13E-02	-4.15E-02	-4.20E-02	-4.19E-02	-4.23E-02	-4.19E-02	-4.27E-02	-4.26E-02	-4.19E-02	-4.27E-02	-4.09E-02	-4.14E-02	-4.17E-02	-4.25E-02	-3.99E-02
ave	-0.08887	-0.09306	-0.0944	-0.09556	-0.09663	-0.09714	-0.09752	-0.09722	-0.09823	-0.09728	-0.09756	-0.09726	-0.09608	-0.09547	-0.09476	-0.09347	-0.08881
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.51E-03	-5.44E-03	-6.76E-03	-7.26E-03	-7.05E-03	-6.35E-03	-5.13E-03	-3.66E-03	-2.01E-03	-5.00E-04	8.97E-04	2.23E-03	2.94E-03	3.15E-03	2.66E-03	1.34E-03	-5.49E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.27E-02	-3.68E-02	-3.04E-02	-2.48E-02	-1.98E-02	-1.50E-02	-1.06E-02	-6.40E-03	-2.03E-03	2.17E-03	6.41E-03	1.10E-02	1.56E-02	2.07E-02	2.64E-02	3.30E-02	3.88E-02
ave	-0.02309	-0.02114	-0.0186	-0.01605	-0.0134	-0.0107	-0.00785	-0.00503	-0.00202	0.000835	0.003655	0.006598	0.009279	0.011919	0.014519	0.01717	0.019136

Z76 W3 R1																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.1312	-0.13832	-0.14119	-0.14326	-0.14548	-0.14543	-0.14671	-0.14547	-0.14741	-0.14679	-0.1461	-0.14546	-0.14513	-0.14306	-0.14126	-0.1378	-0.13133
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-2.95E-02	-3.08E-02	-3.07E-02	-3.09E-02	-3.13E-02	-3.11E-02	-3.12E-02	-3.17E-02	-3.24E-02	-3.14E-02	-3.15E-02	-3.11E-02	-3.11E-02	-3.14E-02	-2.99E-02	-3.07E-02	-2.95E-02
ave	-0.08034	-0.08456	-0.08594	-0.0871	-0.08837	-0.08825	-0.08893	-0.08857	-0.08991	-0.08909	-0.08882	-0.08826	-0.08811	-0.08722	-0.08557	-0.08424	-0.08041
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.50E-03	-5.52E-03	-6.76E-03	-7.28E-03	-7.06E-03	-6.43E-03	-5.08E-03	-3.64E-03	-2.08E-03	-4.78E-04	1.08E-03	2.20E-03	2.98E-03	3.20E-03	2.72E-03	1.53E-03	-6.64E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.28E-02	-3.68E-02	-3.05E-02	-2.48E-02	-1.98E-02	-1.51E-02	-1.07E-02	-6.29E-03	-2.09E-03	2.22E-03	6.51E-03	1.10E-02	1.57E-02	2.08E-02	2.64E-02	3.26E-02	3.90E-02
ave	-0.02315	-0.02116	-0.01862	-0.01606	-0.01343	-0.01074	-0.00788	-0.00497	-0.00209	0.00087	0.003796	0.006606	0.009356	0.012018	0.014537	0.017059	0.019154

Z76 W3 R2																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.1292	-0.13626	-0.13946	-0.14112	-0.14241	-0.14449	-0.14405	-0.1453	-0.14414	-0.14512	-0.14382	-0.14409	-0.14272	-0.14128	-0.13929	-0.13666	-0.1294
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-2.94E-02	-3.06E-02	-3.05E-02	-3.01E-02	-3.05E-02	-3.14E-02	-3.08E-02	-3.13E-02	-3.17E-02	-3.11E-02	-3.14E-02	-3.14E-02	-3.10E-02	-3.01E-02	-3.03E-02	-3.17E-02	-2.89E-02
ave	-0.07929	-0.08344	-0.08497	-0.08563	-0.08646	-0.08793	-0.08743	-0.08832	-0.08791	-0.08811	-0.08774	-0.08686	-0.0857	-0.0848	-0.08417	-0.07916	-0.07916
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.53E-03	-5.52E-03	-6.74E-03	-7.30E-03	-7.08E-03	-6.35E-03	-5.18E-03	-3.68E-03	-2.09E-03	-4.96E-04	1.08E-03	2.23E-03	3.00E-03	3.16E-03	2.62E-03	1.35E-03	-5.86E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.27E-02	-3.70E-02	-3.05E-02	-2.49E-02	-1.98E-02	-1.51E-02	-1.06E-02	-6.31E-03	-2.14E-03	2.16E-03	6.44E-03	1.10E-02	1.56E-02	2.07E-02	2.64E-02	3.30E-02	3.86E-02
ave	-0.02313	-0.02128	-0.01863	-0.01607	-0.01345	-0.01071	-0.0079	-0.005	-0.00211	0.000831	0.003759	0.006635	0.009285	0.011942	0.014512	0.017177	0.019014

Z76 W3 R3																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.12721	-0.13387	-0.13728	-0.13933	-0.14151	-0.14165	-0.14178	-0.14325	-0.14264	-0.14291	-0.14254	-0.14213	-0.13995	-0.13952	-0.13707	-0.13383	-0.12734
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-2.85E-02	-2.98E-02	-2.95E-02	-2.95E-02	-3.02E-02	-3.05E-02	-2.99E-02	-3.11E-02	-3.11E-02	-3.02E-02	-3.05E-02	-3.08E-02	-2.98E-02	-2.98E-02	-3.00E-02	-2.93E-02	-2.86E-02
ave	-0.07785	-0.08181	-0.08338	-0.08443	-0.08585	-0.08607	-0.08583	-0.08718	-0.08689	-0.08656	-0.08651	-0.08645	-0.08487	-0.08468	-0.08355	-0.08158	-0.07797
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.45E-03	-5.56E-03	-6.77E-03	-7.25E-03	-7.04E-03	-6.36E-03	-5.21E-03	-3.61E-03	-2.03E-03	-4.36E-04	1.06E-03	2.33E-03	3.07E-03	3.12E-03	2.70E-03	1.48E-03	-7.08E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.26E-02	-3.72E-02	-3.04E-02	-2.48E-02	-1.97E-02	-1.51E-02	-1.06E-02	-6.29E-03	-2.10E-03	2.25E-03	6.42E-03	1.09E-02	1.56E-02	2.08E-02	2.63E-02	3.26E-02	3.85E-02
ave	-0.02302	-0.02136	-0.0186	-0.01603	-0.01338	-0.01075	-0.0079	-0.00495	-0.00206	0.000907	0.00374	0.006636	0.009351	0.011936	0.014513	0.017057	0.018904

Z76 W3 R4																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.12516	-0.13245	-0.13504	-0.13677	-0.13865	-0.14038	-0.13995	-0.14073	-0.14053	-0.14069	-0.13996	-0.13937	-0.13913	-0.13723	-0.13445	-0.13251	-0.12527
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-2.73E-02	-2.83E-02	-2.90E-02	-2.88E-02	-2.86E-02	-2.95E-02	-2.98E-02	-2.95E-02	-3.03E-02	-2.94E-02	-3.01E-02	-2.90E-02	-2.90E-02	-2.84E-02	-2.86E-02	-2.85E-02	-2.75E-02
ave	-0.07622	-0.08039	-0.082	-0.08278	-0.08361	-0.08495	-0.08485	-0.08509	-0.08543	-0.08504	-0.08502	-0.08419	-0.08407	-0.08281	-0.08155	-0.08051	-0.07641
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.47E-03	-5.43E-03	-6.72E-03	-7.22E-03	-7.15E-03	-6.32E-03	-5.14E-03	-3.68E-03	-2.06E-03	-4.35E-04	1.04E-03	2.23E-03	2.96E-03	3.10E-03	2.71E-03	1.38E-03	-6.30E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.25E-02	-3.65E-02	-3.05E-02	-2.49E-02	-1.97E-02	-1.51E-02	-1.06E-02	-6.29E-03	-2.09E-03	2.14E-03	6.51E-03	1.10E-02	1.56E-02	2.07E-02	2.63E-02	3.25E-02	3.85E-02
ave	-0.02299	-0.02097	-0.01861	-0.01604	-0.01344	-0.0107	-0.00787	-0.00498	-0.00207	0.000855	0.003777	0.006635	0.009288	0.011877	0.014497	0.016957	0.018948

Z76 W3 R5																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.12313	-0.12963	-0.13306	-0.13466	-0.13649	-0.13766	-0.13788	-0.1392	-0.13843	-0.13925	-0.13785	-0.13728	-0.13654	-0.13487	-0.13287	-0.13048	-0.12328
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-2.65E-02	-2.71E-02	-2.68E-02	-2.76E-02	-2.78E-02	-2.78E-02	-2.78E-02	-2.88E-02	-2.90E-02	-2.79E-02	-2.83E-02	-2.83E-02	-2.74E-02	-2.72E-02	-2.75E-02	-2.74E-02	-2.63E-02
ave	-0.07483	-0.07837	-0.07991	-0.08113	-0.08216	-0.08273	-0.08286	-0.084	-0.08372	-0.08355	-0.08309	-0.0828	-0.08196	-0.08102	-0.08019	-0.07895	-0.07477
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.50E-03	-5.48E-03	-6.73E-03	-7.19E-03	-7.12E-03	-6.29E-03	-5.18E-03	-3.63E-03	-2.02E-03	-3.85E-04	1.10E-03	2.15E-03	2.99E-03	3.15E-03	2.68E-03	1.37E-03	-6.10E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.21E-02	-3.64E-02	-3.03E-02	-2.48E-02	-1.97E-02	-1.50E-02	-1.06E-02	-6.23E-03	-2.05E-03	2.16E-03	6.50E-03	1.10E-02	1.56E-02	2.07E-02	2.64E-02	3.27E-02	3.85E-02
ave	-0.02278	-0.02096	-0.01853	-0.01598	-0.01343	-0.01065	-0.00787	-0.00493	-0.00204	0.000888	0.003802	0.00657	0.009316	0.01194	0.014515	0.01703	0.018936

Z76 W4 R1																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.11768	-0.12474	-0.12727	-0.12925	-0.13167	-0.13199	-0.13346	-0.13284	-0.13418	-0.13269	-0.13279	-0.13233	-0.13085	-0.12951	-0.12735	-0.12442	-0.11783
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-1.69E-02	-1.76E-02	-1.85E-02	-1.78E-02	-1.87E-02	-1.86E-02	-1.93E-02	-1.95E-02	-1.91E-02	-1.94E-02	-1.91E-02	-1.81E-02	-1.85E-02	-1.85E-02	-1.76E-02	-1.88E-02	-1.68E-02
ave	-0.06729	-0.07118	-0.07289	-0.07351	-0.07521	-0.07531	-0.07638	-0.07617	-0.07666	-0.07603	-0.07595	-0.07521	-0.07466	-0.07399	-0.07247	-0.07159	-0.06731
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.44E-03	-5.47E-03	-6.79E-03	-7.22E-03	-7.03E-03	-6.33E-03	-5.05E-03	-3.53E-03	-1.96E-03	-4.67E-04	1.10E-03	2.28E-03	3.06E-03	3.27E-03	2.81E-03	1.37E-03	-5.68E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.27E-02	-3.67E-02	-3.04E-02	-2.49E-02	-1.98E-02	-1.50E-02	-1.06E-02	-6.25E-03	-2.01E-03	2.25E-03	6.61E-03	1.10E-02	1.58E-02	2.08E-02	2.64E-02	3.29E-02	3.87E-02
ave	-0.02307	-0.0211	-0.01861	-0.01605	-0.01341	-0.01068	-0.0078	-0.00489	-0.00199	0.000892	0.003854	0.006649	0.009411	0.012054	0.014594	0.01712	0.019054

Z76 W4 R2																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.11622	-0.1235	-0.12616	-0.1278	-0.12968	-0.1314	-0.13111	-0.13113	-0.13216	-0.13092	-0.13104	-0.13094	-0.12941	-0.12848	-0.12585	-0.12353	-0.11632
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-1.70E-02	-1.76E-02	-1.82E-02	-1.84E-02	-1.89E-02	-1.89E-02	-1.83E-02	-1.88E-02	-1.95E-02	-1.88E-02	-1.92E-02	-1.90E-02	-1.87E-02	-1.83E-02	-1.79E-02	-1.84E-02	-1.70E-02
ave	-0.0666	-0.07056	-0.07219	-0.07311	-0.07427	-0.07515	-0.07469	-0.07494	-0.07583	-0.07487	-0.07511	-0.07495	-0.07404	-0.07338	-0.07189	-0.07098	-0.06666
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.45E-03	-5.35E-03	-6.70E-03	-7.19E-03	-7.11E-03	-6.27E-03	-5.09E-03	-3.55E-03	-2.02E-03	-4.27E-04	1.08E-03	2.33E-03	2.97E-03	3.17E-03	2.70E-03	1.42E-03	-5.70E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.26E-02	-3.68E-02	-3.04E-02	-2.48E-02	-1.97E-02	-1.51E-02	-1.06E-02	-6.30E-03	-2.01E-03	2.26E-03	6.51E-03	1.10E-02	1.57E-02	2.09E-02	2.64E-02	3.28E-02	3.87E-02
ave	-0.02304	-0.02106	-0.01855	-0.01599	-0.01342	-0.01069	-0.00783	-0.00493	-0.00201	0.000915	0.003792	0.006666	0.009345	0.012009	0.014539	0.017106	0.019041

Z76 W4 R3																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.11446	-0.12175	-0.1245	-0.12596	-0.12761	-0.1292	-0.12977	-0.12977	-0.12988	-0.13004	-0.1295	-0.12874	-0.12797	-0.12631	-0.12478	-0.1216	-0.11431
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-1.60E-02	-1.80E-02	-1.78E-02	-1.70E-02	-1.80E-02	-1.84E-02	-1.87E-02	-1.82E-02	-1.91E-02	-1.83E-02	-1.85E-02	-1.84E-02	-1.77E-02	-1.79E-02	-1.79E-02	-1.75E-02	-1.63E-02
ave	-0.06525	-0.06986	-0.07117	-0.07148	-0.07279	-0.07381	-0.07423	-0.07401	-0.07448	-0.07417	-0.07402	-0.07355	-0.07284	-0.07212	-0.07135	-0.06956	-0.0653
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.49E-03	-5.44E-03	-6.69E-03	-7.16E-03	-7.08E-03	-6.29E-03	-5.12E-03	-3.65E-03	-2.00E-03	-3.90E-04	1.10E-03	2.31E-03	3.00E-03	3.19E-03	2.70E-03	1.32E-03	-5.47E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.29E-02	-3.71E-02	-3.05E-02	-2.48E-02	-1.98E-02	-1.51E-02	-1.06E-02	-6.19E-03	-2.03E-03	2.18E-03	6.56E-03	1.10E-02	1.57E-02	2.08E-02	2.64E-02	3.25E-02	3.86E-02
ave	-0.0232	-0.02125	-0.01858	-0.01597	-0.01343	-0.01067	-0.00787	-0.00492	-0.00201	0.000893	0.003828	0.006643	0.009344	0.011985	0.014558	0.016929	0.019048

Z76 W4 R4																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.11256	-0.1194	-0.12268	-0.12481	-0.12635	-0.1269	-0.12812	-0.12784	-0.12912	-0.12787	-0.12842	-0.12672	-0.12648	-0.12469	-0.1226	-0.1194	-0.11292
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-1.56E-02	-1.67E-02	-1.69E-02	-1.67E-02	-1.72E-02	-1.74E-02	-1.72E-02	-1.77E-02	-1.81E-02	-1.74E-02	-1.76E-02	-1.74E-02	-1.72E-02	-1.65E-02	-1.69E-02	-1.75E-02	-1.56E-02
ave	-0.0641	-0.06806	-0.06977	-0.07073	-0.07175	-0.07214	-0.07265	-0.07279	-0.07363	-0.07264	-0.07299	-0.07204	-0.07184	-0.07062	-0.06976	-0.06846	-0.06425
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.42E-03	-5.47E-03	-6.77E-03	-7.16E-03	-6.95E-03	-6.30E-03	-5.09E-03	-3.56E-03	-2.07E-03	-4.79E-04	1.04E-03	2.31E-03	3.02E-03	3.17E-03	2.60E-03	1.49E-03	-6.71E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.26E-02	-3.66E-02	-3.04E-02	-2.48E-02	-1.97E-02	-1.51E-02	-1.05E-02	-6.25E-03	-2.00E-03	2.23E-03	6.43E-03	1.10E-02	1.57E-02	2.07E-02	2.64E-02	3.31E-02	3.82E-02
ave	-0.02303	-0.02101	-0.01857	-0.01596	-0.01333	-0.01069	-0.0078	-0.0049	-0.00203	0.000874	0.003738	0.006667	0.009347	0.011951	0.014477	0.01728	0.018768

Z76 W4 R5																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.11101	-0.11803	-0.12095	-0.12292	-0.12449	-0.12567	-0.12557	-0.12627	-0.12638	-0.12674	-0.12606	-0.12587	-0.12418	-0.1232	-0.12072	-0.11838	-0.11112
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-1.45E-02	-1.58E-02	-1.55E-02	-1.58E-02	-1.57E-02	-1.65E-02	-1.65E-02	-1.66E-02	-1.72E-02	-1.66E-02	-1.65E-02	-1.62E-02	-1.57E-02	-1.61E-02	-1.58E-02	-1.55E-02	-1.48E-02
ave	-0.06277	-0.06691	-0.06823	-0.06934	-0.07008	-0.0711	-0.07105	-0.07142	-0.07178	-0.07167	-0.07128	-0.07103	-0.06992	-0.06966	-0.06827	-0.06693	-0.06296
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.49E-03	-5.41E-03	-6.67E-03	-7.20E-03	-7.01E-03	-6.32E-03	-5.13E-03	-3.65E-03	-1.99E-03	-4.35E-04	1.05E-03	2.25E-03	2.98E-03	3.17E-03	2.65E-03	1.34E-03	-6.19E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.26E-02	-3.68E-02	-3.03E-02	-2.48E-02	-1.97E-02	-1.51E-02	-1.06E-02	-6.25E-03	-1.99E-03	2.20E-03	6.39E-03	1.09E-02	1.56E-02	2.07E-02	2.62E-02	3.27E-02	3.83E-02
ave	-0.02304	-0.02112	-0.01849	-0.016	-0.01334	-0.0107	-0.00784	-0.00495	-0.00199	0.000881	0.003718	0.006599	0.00929	0.011952	0.014448	0.017006	0.018845

Z76 W5 R1																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.10509	-0.11194	-0.11502	-0.11724	-0.11831	-0.11943	-0.11957	-0.1208	-0.12073	-0.12111	-0.11973	-0.11923	-0.11874	-0.11699	-0.11528	-0.11192	-0.10526
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-6.62E-03	-7.88E-03	-7.00E-03	-7.78E-03	-8.03E-03	-9.16E-03	-8.16E-03	-9.07E-03	-8.29E-03	-9.05E-03	-8.62E-03	-8.47E-03	-7.83E-03	-8.28E-03	-7.85E-03	-7.93E-03	-6.42E-03
ave	-0.05586	-0.05991	-0.06101	-0.06251	-0.06317	-0.0643	-0.06387	-0.06493	-0.06451	-0.06508	-0.06417	-0.06385	-0.06329	-0.06264	-0.06156	-0.05993	-0.05584
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.46E-03	-5.39E-03	-6.71E-03	-7.18E-03	-7.05E-03	-6.27E-03	-5.14E-03	-3.51E-03	-2.09E-03	-4.22E-04	1.14E-03	2.33E-03	3.06E-03	3.20E-03	2.72E-03	1.49E-03	-5.20E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.25E-02	-3.68E-02	-3.04E-02	-2.47E-02	-1.98E-02	-1.51E-02	-1.05E-02	-6.21E-03	-2.05E-03	2.19E-03	6.56E-03	1.10E-02	1.57E-02	2.09E-02	2.64E-02	3.29E-02	3.86E-02
ave	-0.02299	-0.02107	-0.01856	-0.01593	-0.01341	-0.0107	-0.00783	-0.00486	-0.00207	0.000882	0.003853	0.006689	0.009375	0.012036	0.014538	0.017193	0.019054

Z76 W5 R2																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.10443	-0.1107	-0.11495	-0.11564	-0.11787	-0.11941	-0.11908	-0.11981	-0.12	-0.11989	-0.11921	-0.11975	-0.11778	-0.11723	-0.11422	-0.11098	-0.10459
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-6.40E-03	-7.74E-03	-7.79E-03	-7.39E-03	-8.30E-03	-8.10E-03	-8.21E-03	-8.88E-03	-8.27E-03	-9.14E-03	-9.05E-03	-8.67E-03	-7.92E-03	-7.82E-03	-7.83E-03	-7.72E-03	-6.12E-03
ave	-0.05541	-0.05922	-0.06137	-0.06152	-0.06309	-0.06375	-0.06365	-0.06434	-0.06413	-0.06451	-0.06413	-0.06421	-0.06285	-0.06253	-0.06102	-0.05935	-0.05535
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.34E-03	-5.46E-03	-6.73E-03	-7.28E-03	-7.02E-03	-6.23E-03	-5.09E-03	-3.60E-03	-1.99E-03	-3.75E-04	1.15E-03	2.24E-03	3.05E-03	3.17E-03	2.75E-03	1.48E-03	-5.96E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.26E-02	-3.68E-02	-3.05E-02	-2.48E-02	-1.98E-02	-1.50E-02	-1.05E-02	-6.31E-03	-2.02E-03	2.22E-03	6.43E-03	1.10E-02	1.57E-02	2.07E-02	2.65E-02	3.28E-02	3.84E-02
ave	-0.02299	-0.02115	-0.0186	-0.01603	-0.01339	-0.01063	-0.00779	-0.00496	-0.00201	0.00092	0.003791	0.006644	0.009356	0.011928	0.014611	0.017161	0.018886

Z76 W5 R3																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.10401	-0.10962	-0.1136	-0.11553	-0.11714	-0.11864	-0.11809	-0.11827	-0.12007	-0.11837	-0.11853	-0.11751	-0.11667	-0.11606	-0.11358	-0.11028	-0.10395
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-6.02E-03	-8.00E-03	-6.60E-03	-8.11E-03	-7.48E-03	-8.24E-03	-8.12E-03	-8.65E-03	-9.21E-03	-8.05E-03	-8.24E-03	-8.19E-03	-8.23E-03	-7.49E-03	-7.72E-03	-7.46E-03	-6.26E-03
ave	-0.05502	-0.05881	-0.0601	-0.06182	-0.06231	-0.06344	-0.0631	-0.06346	-0.06464	-0.06321	-0.06338	-0.06285	-0.06245	-0.06177	-0.06065	-0.05887	-0.0551
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.41E-03	-5.50E-03	-6.70E-03	-7.20E-03	-6.98E-03	-6.36E-03	-5.12E-03	-3.54E-03	-1.98E-03	-4.52E-04	1.08E-03	2.27E-03	3.05E-03	3.19E-03	2.70E-03	1.42E-03	-6.21E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.25E-02	-3.68E-02	-3.02E-02	-2.48E-02	-1.97E-02	-1.50E-02	-1.05E-02	-6.29E-03	-2.03E-03	2.21E-03	6.46E-03	1.10E-02	1.57E-02	2.08E-02	2.63E-02	3.26E-02	3.88E-02
ave	-0.02297	-0.02116	-0.01847	-0.01601	-0.01334	-0.0107	-0.00783	-0.00491	-0.002	0.000877	0.003767	0.006653	0.009375	0.012007	0.014498	0.017007	0.019067

Z76 W5 R4																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.10309	-0.10957	-0.11297	-0.11547	-0.11612	-0.11822	-0.1178	-0.11787	-0.11902	-0.11806	-0.11782	-0.11765	-0.11606	-0.11501	-0.11266	-0.11032	-0.10306
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-5.82E-03	-7.35E-03	-7.16E-03	-6.73E-03	-7.65E-03	-8.15E-03	-7.26E-03	-7.94E-03	-8.30E-03	-7.79E-03	-8.27E-03	-8.15E-03	-7.51E-03	-6.85E-03	-7.50E-03	-6.81E-03	-6.00E-03
ave	-0.05446	-0.05846	-0.06006	-0.0611	-0.06189	-0.06318	-0.06253	-0.06291	-0.06366	-0.06293	-0.06305	-0.0629	-0.06178	-0.06093	-0.06008	-0.05857	-0.05453
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.41E-03	-5.44E-03	-6.72E-03	-7.22E-03	-7.05E-03	-6.27E-03	-5.09E-03	-3.58E-03	-2.04E-03	-4.65E-04	1.05E-03	2.27E-03	3.05E-03	3.15E-03	2.68E-03	1.41E-03	-5.59E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.29E-02	-3.68E-02	-3.04E-02	-2.47E-02	-1.97E-02	-1.50E-02	-1.06E-02	-6.33E-03	-1.99E-03	2.20E-03	6.54E-03	1.10E-02	1.57E-02	2.07E-02	2.63E-02	3.28E-02	3.86E-02
ave	-0.02313	-0.02113	-0.01856	-0.01598	-0.01338	-0.01063	-0.00783	-0.00495	-0.00201	0.000869	0.003795	0.006622	0.009364	0.011931	0.014506	0.017123	0.019001

Z76 W5 R5																	
Radial X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
x [μm]	-0.10236	-0.1091	-0.11221	-0.11411	-0.1157	-0.11687	-0.11727	-0.11775	-0.11793	-0.11801	-0.11718	-0.11681	-0.1155	-0.11428	-0.11227	-0.10904	-0.10244
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
x [μm]	-5.36E-03	-6.86E-03	-6.67E-03	-7.00E-03	-7.16E-03	-6.69E-03	-6.57E-03	-7.93E-03	-8.20E-03	-7.57E-03	-7.04E-03	-7.78E-03	-7.47E-03	-6.01E-03	-6.75E-03	-6.68E-03	-5.45E-03
ave	-0.05386	-0.05798	-0.05944	-0.06055	-0.06143	-0.06178	-0.06192	-0.06284	-0.06307	-0.06279	-0.06211	-0.06229	-0.06148	-0.06015	-0.05951	-0.05786	-0.05395
Axial Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
z [μm]	-3.32E-03	-5.51E-03	-6.66E-03	-7.19E-03	-6.98E-03	-6.30E-03	-5.07E-03	-3.61E-03	-1.99E-03	-4.08E-04	1.12E-03	2.27E-03	3.06E-03	3.20E-03	2.72E-03	1.44E-03	-4.58E-04
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
z [μm]	-4.26E-02	-3.68E-02	-3.04E-02	-2.48E-02	-1.97E-02	-1.50E-02	-1.05E-02	-6.24E-03	-1.98E-03	2.26E-03	6.56E-03	1.11E-02	1.57E-02	2.07E-02	2.63E-02	3.26E-02	3.86E-02
ave	-0.02298	-0.02116	-0.01851	-0.01601	-0.01333	-0.01066	-0.00778	-0.00493	-0.00198	0.000927	0.00384	0.006661	0.009385	0.011947	0.014519	0.016997	0.019082

Ek Açıklama-D

Bölüm 3.3.'te Açıklanan Kütle Değişim Tablosu

Dişli	Ağ	Rim	Hacim [mm ³]	Kütle [gr]	Kütle Değişimi [%]		Dişli	Ağ	Rim	Hacim [mm ³]	Kütle [gr]	Kütle Değişimi [%]
Z53	W1	R1	18619.54	146.16	-6.32		Z76	W1	R1	21745.78	170.70	-9.70
		R2	18852.74	147.99	-5.15				R2	22014.29	172.81	-8.58
		R3	19081.87	149.79	-4.00				R3	22281.34	174.91	-7.47
		R4	19309.53	151.58	-2.85				R4	22543.90	176.97	-6.38
		R5	19533.07	153.33	-1.73				R5	22805.09	179.02	-5.30
Z53	W2	R1	19043.95	149.49	-4.19		Z76	W2	R1	22681.48	178.05	-5.81
		R2	19263.26	151.22	-3.08				R2	22931.94	180.02	-4.77
		R3	19479.04	152.91	-2.00				R3	23181.08	181.97	-3.74
		R4	19693.11	154.59	-0.92				R4	23425.98	183.89	-2.72
		R5	19903.49	156.24	0.14				R5	23669.50	185.81	-1.71
Z53	W3	R1	19468.15	152.82	-2.05		Z76	W3	R1	23617.21	185.40	-1.92
		R2	19673.80	154.44	-1.02				R2	23849.58	187.22	-0.96
		R3	19876.00	156.03	0.00				R3	24080.67	189.03	0.00
		R4	20076.79	157.60	1.01				R4	24307.90	190.82	0.94
		R5	20274.03	159.15	2.00				R5	24533.84	192.59	1.88
Z53	W4	R1	19892.31	156.15	0.08		Z76	W4	R1	24552.84	192.74	1.96
		R2	20084.35	157.66	1.05				R2	24766.86	194.42	2.85
		R3	20273.07	159.14	2.00				R3	24980.26	196.10	3.74
		R4	20460.48	160.61	2.94				R4	25189.81	197.74	4.61
		R5	20644.57	162.06	3.87				R5	25398.18	199.38	5.47
Z53	W5	R1	20316.58	159.49	2.22		Z76	W5	R1	25684.70	201.62	6.66
		R2	20494.90	160.88	3.11				R2	25782.13	202.39	7.07
		R3	20670.15	162.26	4.00				R3	25879.84	203.16	7.47
		R4	20844.23	163.63	4.87				R4	25975.64	203.91	7.87
		R5	21015.28	164.97	5.73				R5	26071.72	204.66	8.27

Ek Açıklama-E

Bölüm 1’de Kullanılan AGMA 927 A01 Standart Çalışma Görseli

