BİNEK ARAÇLARDA DEBRİYAJIN TİTREŞİM SÖNÜMLEME PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ VE PROTOTİP ÜRETİMİ

Murat AVCI

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİNEK ARAÇLARDA DEBRİYAJIN TİTREŞİM SÖNÜMLEME PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ VE PROTOTİP ÜRETİMİ

Murat AVCI
0000-0001-7654-0925

Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA– 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİNEK ARAÇLARDA DEBRİYAJIN TİTREŞİM SÖNÜMLEME PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ VE PROTOTİP ÜRETİMİ

Murat AVCI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL

Araç üreticileri, araç kullanıcılarının artan araç konforu talepleri nedeniyle histerisiz değişimlerinin hassas bir şekilde kontrol altına alınmasını ve iyileştirilmesini ön plana çıkarmıştır. Disk komplesinde ilerleyen kilometrelerde aranan histerisiz değerlerinin, başlangıç kilometreleri içinde sağlanması beklenmektedir. Bu nedenle, konfor değişimine etki eden parametrelerin değişkenliğini minimuma indirmek ve histerisiz değişimini etkileyen alt bileşenlerin fonksiyonlarının kararlı olması gerekmektedir.
Bu yüksek lisans tez çalışmasının amacı, debriyajın titreşim sönümleme performansını (konforunu) garanti edilen çalışma ömrü boyunca kabul edilebilir seviyede tutmaktır. Histerisizi etkileyen alt bileşenlerin malzeme özellikleri, geometrik değerleri ve metal rondelâların kaplama metotları değiştirilerek yapılacak araştırmalarla sonuca ulaşmak hedeflenmektedir. Çalışmalar testlerle doğrulanacak ve mevcut durum ile karşılaştırmalar yapılarak çalışma sonucunun doğruluk seviyesi tespit edilecektir. Çıktıları karşılaştırmak için çalışmaya etki eden parametreler bir metodoloji tanımlamasında kullanılacaktır. Böylece, debriyaj disk komplesinin araçta çalıştığı süre boyunca histerisiz değişimi ve istenilen konforu sağlayıp sağlayamayacağı incelenecektir.

Anahtar Kelimeler: Debriyaj, kavrama, disk, histerisiz, sürtünme, titreşim, sönümleme

2022, xiv +94 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

IMPROVEMENT OF VIBRATION DAMPING PERFORMANCE FOR AUTOMOBILE CLUTCHES AND PROTOTYPE MANUFACTURING

Murat AVCI

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. M.İhsan KARAMANGİL

Vehicle manufacturers have emphasized the sensitive control and improvement of hysteresis changes due to the increasing vehicle comfort demands of vehicle users. It is expected that the hysteresis values sought in the further kilometers of the disc assembly will be achieved within the starting kilometers. For this reason, it is necessary to minimize the variability of the parameters affecting the comfort change and the component functions affecting the hysteresis change should be stable.

The aim of this master thesis is to keep the vibration damping performance (comfort) of the clutch at an acceptable level during the guaranteed working life. It is aimed to reach the result with the researches to be done by changing the material proporties, geometric values and coating methods of the metal washers that affect the hysteresis. Studies will be verified with tests and the accuracy level of the result of the study will be determined by making comparisons with the current situation. Parameters affecting the study will be formulated to define a methodology to compare ouptups. Thus, it will be examined whether the clutch disc assembly can provide hysteresis change and the desired comfort during the period of operation in the vehicle.

Key words: Clutch, clutch disc, driven disc, hysteresis, friction, vibration, dampening, damper

2022, xiv +94 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim boyunca yardımlarını esirgemeyen ve bana yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. M. İhsan Karamangil'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde deneysel çalışmalarımı ve çalışmamı yapmama imkân sağlayan Valeo Otomotiv Sistemleri ve Sanayi A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca yanımda olan eşime ve aileme, desteklerinden dolayı değerli arkadaşım Dr. M. Onur Genç'e teşekkürlerimi sunarım.

Murat AVCI
27/05/2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET....vi
ABSTRACT....vii
TEŞEKKÜR....viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ....x
ŞEKİLLER DİZİNİ....xi
ÇİZELGELER DİZİNİ....xiv
1. GİRİŞ…...……..1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI....7
2.1. Doğal frekans ve Modal Analiz Üzerinde Çalışmalar....7
2.2. Debriyaj Sönümleme Sistemi Üerine Çalışmalar....9
2.3. Matematiksel Model, Tasarım ve Sönümleme İlişkisi Üzerine Çalışmalar....12
2.4. Debriyaj Disk Komplesinde Histerisiz ve Etkisinin İncelenmesi....15
2.5. Metal Malzemelerde Kaplama Etkilerinin İncelenmesi....17
2.6. Debriyaj Diyafram Yayı ve Tork İletme Kapasitesi Etkilerinin İncelenmesi....21
3. MATERYAL ve YÖNTEM....22
3.1. Esnek Rondelalar ve Özellikleri....22
3.1.1. Esnek Rondela Teorik Hesaplamaları....26
3.1.2. Esnek Rondela Üretim Prosesleri ve Malzeme Bilgileri....30
3.2. Metal Rondelalar, Kaplama Özellikleri ve Histerisize Etkileri....32
3.2.1. Alkali Çinko Forfat Kaplama....34
3.2.2. Nikel Kaplama....35
3.2.3. Titanyum Nitrür Kaplama....37
3.2.4. Nitrürleme (Nitrür Kaplama)....38
3.3. Histerisiz ve Etkilerinin İncelenmesi....39
3.4. Debriyaj Diskinin Modellenmesi....42
3.5. Debriyajda Tork İletimi....44
3.6. Titreşim....44
3.6.1. Doğal Frekans ve Rezonans....46
3.6.2. Sönümleme....47
3.6.3. Motor Zorlama Frekansı....49
3.7. Histerisiz ve Hesaplanması....53
4. BULGULAR....57
4.1. Test Öncesi Esnek Rondelâ Analizi....57
4.2. Prototip Üretimi ve Proses Parametreleri....59
4.3. Test Öncesi Histerisiz Eğrisi Analizleri....62
4.4. Test Şartlarının Oluşturulması....64
4.5. Test Sonrası Histerisiz Eğrisi Analizleri....66
4.6. Test Sonrası Esnek Rondela Analizi....72
4.7. Test Sonrası Metal Kaplamalı Rondela Analizi....77
4.8. Histerisize Etki Eden Faktörlerin Analiz ve İncelenmesi....83
5. TARTIŞMA ve SONUÇ....89
KAYNAKLAR....91
ÖZGEÇMİŞ....94

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
f	Frekans
k	Rijitlik
m	Kütle
c	Sönümleme oranı
ς	Kritik sönüm oranı
fd	Sönümlü doğal frekans
fn	Sönümsüz doğal frekans
N	Sürtünme yüzey sayısı
Rm	İletim yapılan ortalama çap
fs	Sürtünme katsayısı
T	Tork
I	Atalet moment
fz	Motor zorlama frekansı
a	İvme
Al	Alüminyum
L	Yük

Kısaltmalar	**Açıklama**
Min	Minimum
Max	Maksimum
Nom	Nominal
Ort	Ortalama
TiN	Titanyüm Nitrit
NVH	Noise & Vibration & Harshness (Gürültü&Titreşim&Sertlik)
H1,H2, H3	Histerisiz
S1,S2,S3	Yay sabiti katsayısı
1D	Birinci dereceden
FFT	Fast Fourier Transformation
rpm	Revolutions per Minute (1dk içindeki dönüş/devir sayısı)

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 1.1.	Güç aktarım sistemi……..	1
Şekil 1.2.	Araç motoru……..……	2
Şekil 1.3.	Debriyaj kiti (Rulman komplesi + Baskı komplesi + Disk komplesi)…….……..	3
Şekil 1.4.	NX tipi debriyaj diski……..……..…	3
Şekil 1.5.	Debriyaj disk komplesi bileşenleri…….…….….....	4
Şekil 1.6.	a. Tırnaklı esnek rondela, b. Metal rondela, c. Plastik rondela ……..…….	5
Şekil 2.1.	Debriyaj modal analizi…….....…….	7
Şekil 2.2.	LMS AMESin modal analizleri.……	8
Şekil 2.3.	Titreşim analizi için FFT (Fast Fourier Transformation) metodu….	8
Şekil 2.4.	Değişiklik öncesi ve sonrası histerisiz değişimi karşılaştırma eğrisi…….....……	9
Şekil 2.5.	Tipik debriyaj diski histerisiz karakteristiği, b. Açısal değişime göre dinamik tork değişimi……	10
Şekil 2.6.	a. 2 kademeli non-lineer histerisiz karakteristiği, b. 3 kademeli non-lineer histerisiz karakteristiği…….	10
Şekiş 2.7.	Dişli kutusu gürültü analizi……	11
Şekil 2.8.	5.viteste ivmelenme esnasında maks histerisizli debriyaj diski ile yapılan testte renklendirilmiş dişli kutusundaki titreşim ölçümü……...	11
Şekil 2.9.	Güç aktarım sistem modeli……..…….	12
Şekil 2.10.	Histerisize ile ilişkili tork değişimi (Ön-amortisör + Ana amortisör) ……..	13
Şekil 2.11.	Araç sürüş sistem modeli……...	14
Şekil 2.12.	Taşıt gürültü optimizasyonu……..	14
Şekil 2.13.	Güç aktarım sistemi iletim fonksiyonları……..	15
Şekil 2.14.	a. Kuru yüzeylerdeki sürtünme kaynaklı histerisiz eğrisi, b. Sürtünen hafıza ve c. Geri dönüşümsüz sürtünme karakteristikleri……..	15
Şekil 2.15.	Kuru yüzey sürtünmesini simule eden basitleştirilmiş model……....	16
Şekil 2.16.	Kuru yüzeyli debriyaj diski fiziksel modeli……...	17
Şekil 2.17.	Kuru yüzeyli debriyaj disk için statik histerisiz döngüsü……..	17
Şekil 2.18.	Önişlem proses akışlarının karşılaştırılması……..	18
Şekil 2.19.	EDS (X-Ray enerji dağıtım spektroskopy) Spektra analiz metodu ile çinko oksit (üstte) ve çinko-fosfat kaplama metotlarının karşılaştırılması……..	18
Şekil 2.20.	Çinko-Fosfat proses adımları…….……	19
Şekil 2.21.	Yeni geliştirilen prosesin işlem adımları……...	19
Şekil 2.22.	Püskürtme yöntemi ile TIN kaplama proses metodu…….	20
Şekil 2.23.	Diyaframın yeni ve aşınmış durumdaki rulman kursu uygulanma kuvvetinin niteliksel değişimi……	21
Şekil 3.1.	Esnek rondelâ istifleme grubu……...	23
Şekil 3.2.	Aynı boyutta farklı adette istiflenmiş esnek rondelâ karakteristikleri……..……	24

Şekil 3.3.	Tırnaklı esnek rondelâ yük ölçüm eğrisi……...……	25
Şekil 3.4.	Teorik hesap için gerekli bilgiler……...……	26
Şekil 3.5.	Gerçek açının hesaplanması için gerekli bilgiler…….…..	27
Şekil 3.6.	Θ' değerini hesaplama için gerekli bilgiler……	28
Şekil 3.7.	Belleville yüksekliği……..	28
Şekil 3.8.	Esnek rondelâ stres hesabı bölgeleri……..	29
Şekil 3.9.	Tırnaklı esnek rondelâ üretim prosesi……	31
Şekil 3.10.	C67S malzeme Gerilim - Uzama eğrisi grafiği…….	32
Şekil 3.11.	Metal - Metal sürtünme yüzey animasyonu……..	32
Şekil 3.12.	Fosfat kaplamalarda görülen fosfat bileşimleri ve kristal yapı görünümü……...	35
Şekil 3.13.	Akımsız Nikel kaplama kalınlığı eşit dağılım gösterimi……...	36
Şekil 3.14.	Zamana bağlı olarak nitrürasyon derinliği…….	39
Şekil 3.15.	Histerisiz değişimine etki eden parametreler…….	40
Şekil 3.16.	Metal-metal sürtünmeli debriyaj diski teorik histerisiz değişimi grafiği…….	41
Şekil 3.17.	Debriyaj diski histerisiz grafiği…….	41
Şekil 3.18.	AMESim 1D damper modeli…….	42
Şekil 3.19.	AMESim nominal histerisiz grafik eğrisi……..	43
Şekil 3.20.	Dört zamanlı motor çalışma prensibi…….	45
Şekil 3.21.	FFT yöntemi ile alınan titreşim sinyalleri…….……	45
Şekil 3.22.	Sönümleme oranı karşılaştırma grafiği…….…….……	47
Şekil 3.23.	Sönümlü titreşim……	47
Şekil 3.24.	Karşılaştırmalı sönümleme oranları……...……	49
Şekil 3.25.	Taşıt motoru……...…	49
Şekil 3.26.	AMESim frekans haritası……..……	51
Şekil 3.27.	Harmonik seçimi……	52
Şekil 3.28.	Titreşim – RPM grafiği……..……	52
Şekil 3.29.	Debriyaj disk komponent kesiti…….……	54
Şekil 4.1.	Esnek rondelâ yük ölçüm eğri modeli……...……	57
Şekil 4.2.	Test öncesi H1 esnek rondelâ yükseklik ölçüm değişimi...……..…..	58
Şekil 4.3.	Test öncesi H2 esnek rondelâ yükseklik ölçüm değişimi...……...	58
Şekil 4.4.	100 Ton H tipi hidrolik prototip debriyaj diski üretim presi...……..	59
Şekil 4.5.	Debriyaj disk komplesi alt bileşenleri...……	60
Şekil 4.6.	NX tipi prototip debriyaj diski montaj kalıbı...…….…	61
Şekil 4.7.	Pres tonaj-basınç eşlemle değer tablosu……..……..	61
Şekil 4.8.	Test öncesi histerisiz ölçüm grafiği…….……..	64
Şekil 4.9	Açısal yorma test makinesi……..……..	65
Şekil 4.10.	H1 histerisiz değişimi - Titanyum Nitrür kaplam……..……	66
Şekil 4.11.	H2 histerisiz değişimi - Titanyum Nitrür kaplama……..……..…	67
Şekil 4.12.	H1 histerisiz değişimi - Nikel kaplama……...……...……...	67
Şekil 4.13.	H2 histerisiz değişimi - Nikel kaplama……....……	68
Şekil 4.14.	H1 histerisiz değişimi - Çinko Fosfat……	69
Şekil 4.15.	H2 histerisiz değişimi - Çinko Fosfat……...…	69
Şekil 4.16.	H1 histerisiz değişimi – Nitrürleme……...……	70
Şekil 4.17.	H2 histerisiz değişimi – Nitrürleme……...……	71
Şekil 4.18.	H1 esnek rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi - Titanyum Nitrür……..……	72

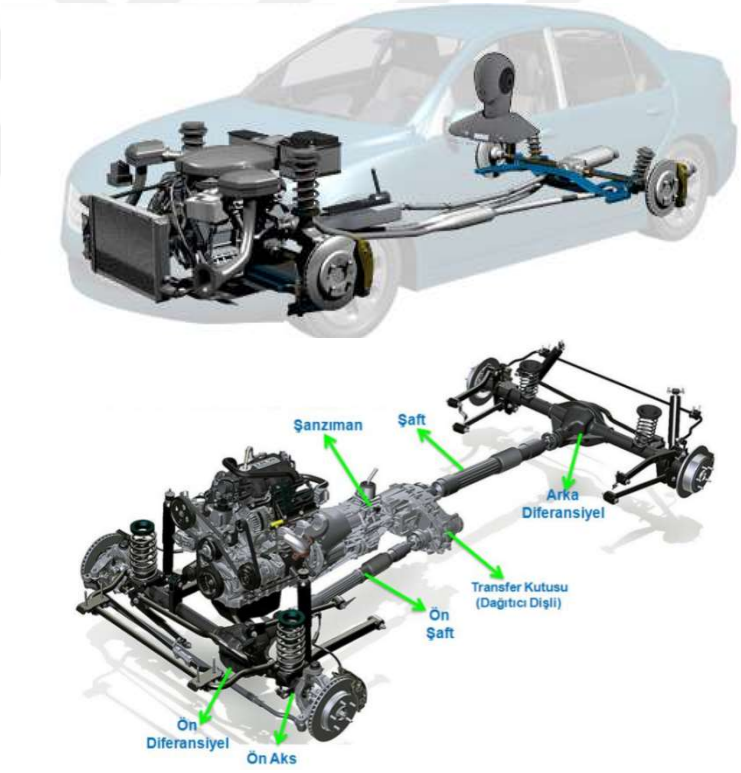
Şekil 4.19. H2 esnek rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi - Titanyum Nitrür……..……. 73
Şekil 4.20. H1 Esnek rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi - Nikel Kaplama……...…… 74
Şekil 4.21. H2 Esnek rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi - Nikel Kaplama……...…...…… 74
Şekil 4.22. H1 esnek rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi - Çinko-Fosfat……..……...…… 75
Şekil 4.23. H2 esnek rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi - Çinko-Fosfat……...……...……...…… 75
Şekil 4.24. H1 esnek Rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi – Nitrürleme……...……...…… 76
Şekil 4.25. H1 esnek Rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi – Nitrürleme……...……...…… 76
Şekil 4.26. TiN kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 20k sonrası kaplama görünümü……...……...…… 78
Şekil 4.27. Ni kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 20k sonrası kaplama görünümü
Çinko Fosfat kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 20k sonrası kaplama görünümü……...……...…… 78
Şekil 4.28. Nitrür kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 20k sonrası kaplama görünümü……...……...…… 78
Şekil 4.29. TiN kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 50k sonrası kaplama görünümü……...……...…… 79
Şekil 4.30. TiN kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 50k sonrası kaplama görünümü……..…….. 79
Şekil 4.31. Ni kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 50k sonrası kaplama görünümü……..…….. 80
Şekil 4.32. Çinko Fosfat kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 50k sonrası kaplama görünümü……..…….. 80
Şekil 4.33. Nitrür kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 50k sonrası kaplama görünümü……..…….. 80
Şekil 4.34. TiN kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 100k sonrası kaplama görünümü……..…….. 81
Şekil 4.35. Ni kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 100k sonrası kaplama görünümü……..…….. 81
Şekil 4.36. Çinko-Fosfat kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 100k sonrası kaplama görünümü……...……..…… 82
Şekil 4.37. Nitrür kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 100k sonrası kaplama görünümü……....……..…… 82
Şekil 4.38. H1 histerisiz değişimi – Genel……..……..…… 84
Şekil 4.39. H2 histerisiz değişimi – Genel……..……..…… 85
Şekil 4.40. H1 esnek rondelâ yükseklik değişimi…… 86
Şekil 4.41. H2 esnek rondelâ yükseklik değişimi…… 87
Şekil 4.42. H1 esnek rondelâ Yer Değiştirme-Yük grafiği……..…… 87
Şekil 4.43. H2 esnek rondelâ Yer Değiştirme-Yük grafiği……..…… 88

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 3.1.	Esnek rondelâ formülasyon kısaltma tanımlamaları…..……..	26
Çizelge 3.2.	Kaplama parametreleri……..……	38
Çizelge 3.3.	H1 histerisizi hesaplama tablosu.……...……..	55
Çizelge 4.1.	Debriyaj diski - esnek rondelâ - metal rondelâ eşleştirme tablosu……..……..…	62
Çizelge 4.2.	Kaplama özelliğine göre alıştırma öncesi H1 ve H2 histerisiz değerleri……...……..…	63

1. GİRİŞ

Son yıllarda müşterilerin artan konfor ve kalite beklenti taleplerinden dolayı, otomotiv sektörü kullanıcılara sunduğu konfor ve yakıt ekonomisi konularında rekabete girmeye başlamıştır. Araç üreticileri pazardaki payını arttırabilmek için daha yüksek müşteri ihtiyaçlarını karşılamaya odaklanmıştır. Sektör, bu konularda sürekli iyileştirme yöntemini izleyerek büyük araştırma ve geliştirme yatırımları yapmaktadır. Benzer çalışmaların kendi tedarikçileri tarafından da yapılması beklenmektedir. Her ne kadar motor ve buna bağlı ürün teknolojisi değişmeye başlamış olsa da uzun yıllar birçok üretici tarafından üretilecek olan hibrit araçlar ve elektrikli araçlarda da muhakkak titreşim sönümleme sistemi olacaktır. Araçtan güç aktarım organları ile gelen titreşimi sönümlemenin mevcuttaki en iyi yolu da debriyaj diski yani damperdir.



Şekil 1.1. Güç aktarım sistemi (Otomobil Teknolojisi, n.d.)

Şekil 1.1'de güç aktarma sisteminin gelen yapısı gösterilmiştir. Güç aktarma sisteminde kullanılan debriyajın motor ve dişli kutusu arasında bağlantı sağlayarak küçük kuvvetler ile büyük atalet kuvvetlerine izin veren önemli bir yapı olduğundan bahsedilmiştir.

Debriyaj sistemi, motor ile vites kutusu arasındaki tork iletimini keserek vites değiştirmeyi sağlayan güç aktarma organıdır. (Otomobil Teknolojisi, n.d.)

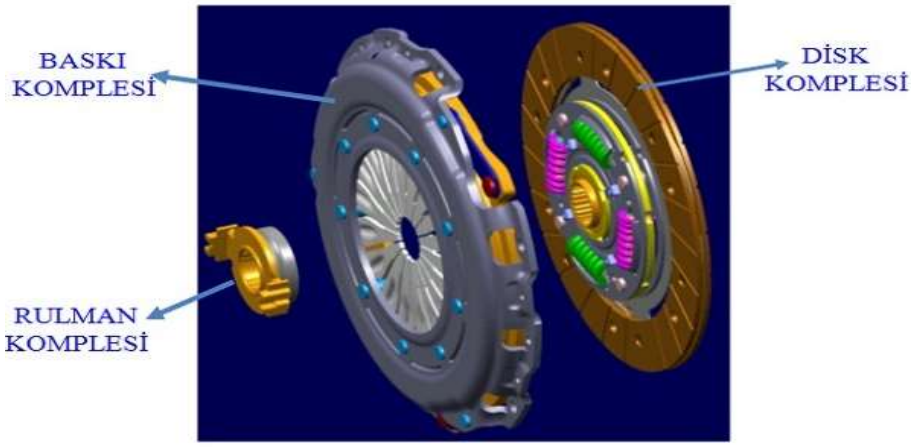
Güç aktarma sisteminin en uygun şekilde tasarlanması, araç sürüş konforunun artması ve araç mekaniğinin uzun ömürlü olması için gereklidir. Güç aktarma sisteminin tork iletim kontrolü debriyaj ile yapılır. Bu kontrol iki sürtünme yüzeyinin (baskı plakası ile balata) birbirine teması ile gerçekleşir. Debriyaj motordan aldığı torku iletmenin yanında, kalkış ve vites geçişi esnasında sürüş konforu da sağlar. Bu görevini, motordan gelen gürültü ve titreşimi debriyaj disk komplesi sayesinde sönümleyerek yapar.

Sürtünme işlemi, sürtünme katsayısı yüksek malzemelerden yapılmış balataların vites kutusu giriş mili üzerinde eksenel hareket edebilen bir rulman aracılığı ile baskı plakasının diyafram yayları aracılığı ile itilerek bu diskin baskı plakası ve volan arasında sıkıştırılmasıyla gerçekleşir. Bu yüzden yapının diğer adı kavrama olarak geçmektedir. Motorda üretilen tork, sürtünme ile debriyajdan diğer güç aktarma sistem elemanlarına geçerek aracın hareketi sağlar.



Şekil 1.2. Araç motoru

Günümüz binek araçlarının birçoğu konvansiyonel debriyaj sistemleriyle donatılmıştır. Bu debriyaj sistemleri, Şekil 1.3'te de görülen ve piyasada balata olarak bilinen disk komplesi, baskı komplesi, rulman komplesi ve Şekil 1.2'de görülen volandan meydana gelmektedir.



Şekil 1.3. Debriyaj Kiti (Rulman komplesi + Baskı komplesi + Disk komplesi)

Şekil 1.4'te bu çalışma da kullanılacak olan debriyaj diskinin görseli görülmektedir. Debriyaj diski, volan ile debriyaj baskı komplesi arasında sürtünme ile tork iletimini sağlayan, baskı diyafram yaylarına gelen kuvvet ile tork iletimini keserek vites değiştirme işleminin yapılmasına imkân veren, yüksek dayanımlı bir yapıdır.



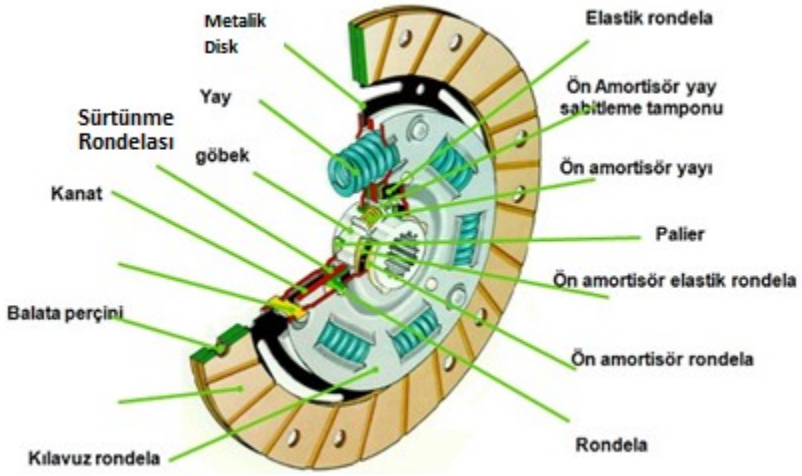
Şekil 1.4. NX tipi debriyaj diski (Anonim, 2014)

Disk Komplesinin fonksiyonel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kavrama pozisyonunda motor torkunun tamamını iletmek,
- Motor torkunu sönümleyerek iletmek,
- Motorun çalışması esnasında oluşturduğu titreşimleri filtrelemek,

Bu yapının tork iletimi sırasında motor titreşimlerini sönümlemesi beklenir. Bu nedenle disk komplesinde başta damper yayı olmak üzere değişik sönümleme elemanları mevcuttur. Sönümleme elemanları titreşimi sönümleyerek araç konforunu arttırmalarının yanında mekanik sistemlerin titreşim yorulması sebebiyle zarar görmelerini de engeller.

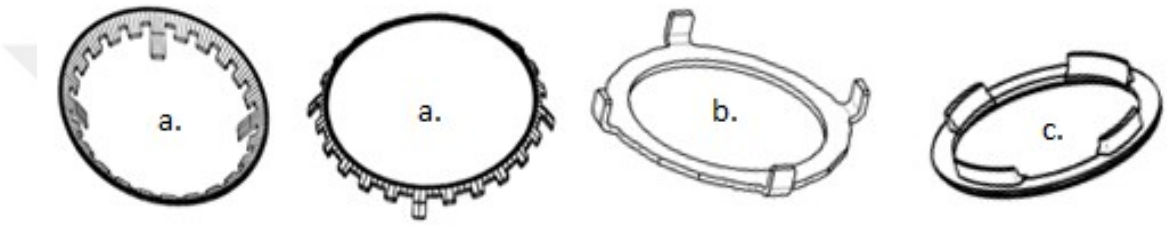
Motorun çalışması esnasında oluşturduğu titreşimleri filtrelemek işlevi disk komplesinin histerisiz özelliği ile yerine getirilir. Debriyaj diskinin açısal hareketi esnasında ulaştığı noktadan başlangıç noktasına dönerken oluşan sürtünme kaynaklı tork kayıplarına histerisiz denir. Histerisiz, krank milinden gelen dönme hareketinin dişli kutusu miline aktarılması esnasında iç komponentlerin birbiri ile etkileşimleri esnasında oluşur. Müşterilerle yapılan ortak çalışmalar, hesaplamalar ve araç testleri sonrasında histerisiz değerleri belirlenir. Belirlenen histerisiz değeri belli bir değer aralığında olmalıdır ki disk komplesi motordan gelen titreşimleri istenilen seviye de filtreleyerek dişli kutusuna aktarabilsin. Böylece istenilen seviye de araç konforu sağlanabilsin.



Şekil 1.5. Debriyaj disk komplesi bileşenleri

Disk komplesi temel olarak; Şekil 1.5'te görülen balatalar, metalik disk, göbek, kanat, sürtünme rondelası, elastik rondela, damper yay ve perçin elemanlarından oluşmaktadır.

Titreşim sönümleme performansı, histerisiz elemanlarının performansı ile belirlenmektedir. Histerisiz elemanları disk komplesi içerisindeki sürtünme karakteristiğini belirleyen ve seyir konforunu etkileyen bileşenler olup araç özelliğine göre değişkenlik göstermektedir. Benzinli ve dizel araçlarındaki motor yanma olayı ve ortaya çıkan titreşim değerleri farklı olduğu için kullanılan histerisiz elemanlarının özellikleri, adetleri ve disk komplesinin açısal hareketi esnasında devreye girme noktaları farklılık göstermektedir. Şekil 1.6'da verilen tırnaklı rondela, metal rondela ve plastik rondelası tipik histerisiz elemanlarına örnektir.



Şekil 1.6. a. Tırnaklı esnek rondela, b. Metal rondela, c. Plastik rondela

Fonksiyonel performansı garanti edilen debriyajın, çalışma ömrü boyunca histerisiz değerlerinin kabul edilebilir seviyede tutulabilmesi için belirli bir değer aralığında kalması gerekmektedir. Bu gerekliliği sağlamak için histerisiz elemanlarının zamana bağlı mekanik ve tribolojik özellik değişimlerinin minimum seviyede olması gerekmektedir.

Bu özellik değişimleri, disk komplelerini doğrulamak için yapılan hızlandırılmış standart testler ile değerlendirilmektedir. Debriyaj üreticileri uzun yıllar yapmış oldukları çalışmalar sonrasında, fonksiyonel özellik değişimlerini analiz edebilmek için tekrarladıkları testlerde ürünün tasarlandığı ve seri üretime girmiş olduğu zamandan farklı sonuçların ortaya çıktığını tespit etmişlerdir. Bir dönem istenilen sonucu veren ve tutarlı seyreden ürünün farklı bir dönemde farklı ve tutarsız sonuçlar gösterdiği tespit edilmiştir. Doğal olmayan bu durum, zamanla tasarımda değişiklik talepleri, zaman ve işgücü kaybına neden olmaktadır.

Histerisiz değişkenliğinin sebebinin bulunması için yapılan malzeme incelemeleri, ölçülen geometrik özellikler, parça ve ürün bazlı fonksiyonlar, temel olarak şu değişkenlerin sorunun önemli bir kısmını oluşturduğunu göstermiştir:

- Esnek rondelâ yükünün zamana bağlı olarak kabul edilebilir seviyeden daha fazla düşmesi,
- Metalik sürtünme rondelâları ve plastik sürtünme rondelâlarının sürtünme özelliklerinin bozulması,

Esnek rondelâların yük düşüm miktarı azalımı, metalik ve plastik rondelâların sürtünme özellikleri ve mekanik dayanım süreleri arttırılarak histerisiz değişiminin minimize edilmesi hedeflenmektedir. Daha istikrarlı bir yapı elde edilebilmesi için analiz metotlarının araştırılması ve çalışma sonuçlarının ortaya konması öngörülmüştür.

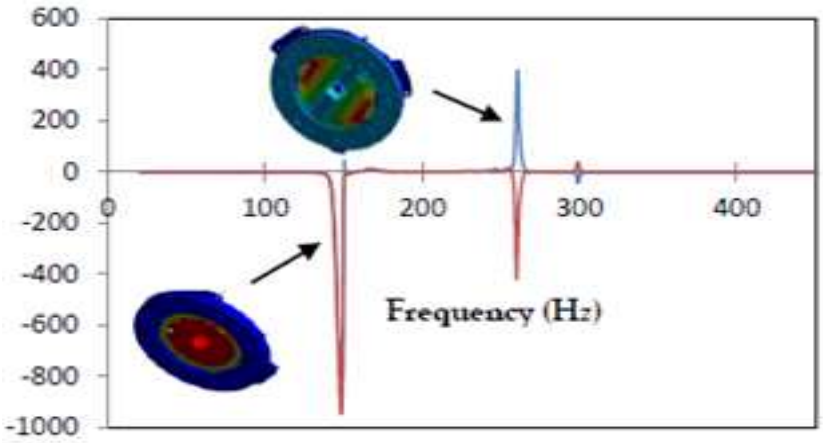
Bu yüksek lisans tez çalışmasında, güç aktarım sisteminin önemli bir parçası olan debriyajın titreşimi sönümleme performansı konusunda üstlendiği görev, titreşim sönümleme performansını iyileştirilmesi ile debriyaj diskinin histerisiz değişiminin sönümleme performansına olan etkisi incelenmiştir. Farklı metotlar ile histerisiz değişimine etkileri ve matematiksel model oluşturularak ilk yapılan modele göre değişim ve korelasyon hesaplamalarıyla sonuçlar karşılaştırılacaktır. Histerisize etki eden parametre ve değişkenlerin çeşitlilik göstermesine rağmen bu çalışmada en fazla değişkenliğe neden olan bileşenler üzerinde çalışma yapılacaktır. Böylece, bu değişkenlerin etki oranları ve çözüm yolları hakkında sonuca ulaşılabilir. Bu çalışma sonrasında diğer parametreler üzerinde de detaylı çalışma yapılıp süreç iyileştirilebilir. Araştırmada, sadece histerisiz değişimine en çok etki eden, esnek rondelânın yük değişimi ve farklı özellikteki kaplamalı metal rondelâların histerisiz değişimindeki davranışları gözlemlenecektir. Çalışma sonucunda elde edilecek veriler, daha detaylı analiz, ürün geliştirme süreçleri ve NVH testleri için hazırlanan özel test parçalarının daha kısa sürede hazırlanması için referans olarak kullanılabilir. Bu anlamda birçok çalışmada kaynak amaçlı kullanılabilir bir doküman olacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Motor titreşimlerini sönümleme üzerine yapılan çalışmalarda görülen ortak nokta bileşenlerdeki rijitlik değerlerinin belli kısıtlar içinde düşürülmesi, atalet momentlerinin arttırılması ve histerisiz değerlerinin belli değerler arasında tutulmasıdır. Histerisiz değerinin belli değerler aralığında tutulması için debriyaj diskinin iç bileşenlerinde tasarım değişiklikleri yapılması ve/veya değişkenliklerinin minimum seviyede olması gerekmektedir. Aynı zamanda frekans konfor aralığının artması titreşim sönümlemeleri ile birlikte kullanıcı tarafından hissedilen titreşimleri de azaltılabilir ve daha iyi bir konfor sağlanabilir.

2.1. Doğal Frekans ve Modal Analiz Üzerine Çalışmalar

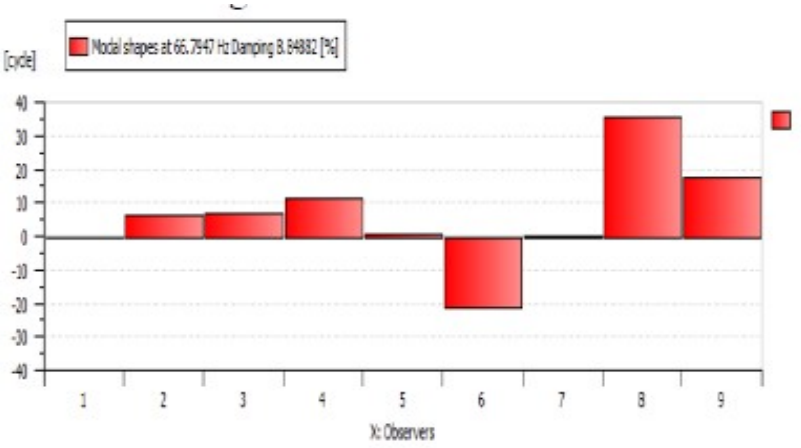
(Aktır ve ark., 2014), çalışmalarında motordan şanzıman giriş miline tork iletilmesini sağlarken aynı zamanda dönel ve eksenel titreşimlerin sönümlenmesi görevini yapan debriyajın çekiç vurma yöntemiyle modal analizini yapmışlardır. Manuel güç aktarma organının eksenel yöndeki dinamik davranışlarını araştırmışlardır. Debriyajın geometrik yüzeyi farklı olduğu için titreşim ve harmonik değerlerini test edebilmek için elektromekanik sallama testi ile bu süreci çözmüşlerdir. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere, bu çalışmanın sonucunda debriyajın rezonans frekanslarını bularak bunu testler ile doğrulamışlar ve bu hususa taşıt titreşimlerinde dikkat edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır.



Şekil 2.1. Debriyaj modal analizi (Aktır ve ark., 2014)

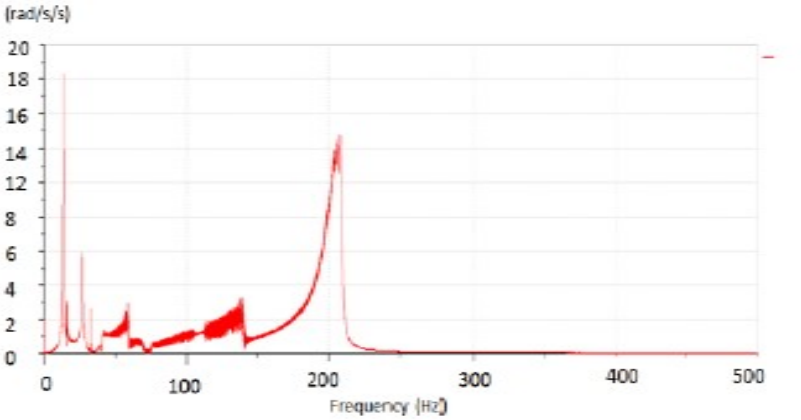
(Genc ve ark., 2018) yapmış oldukları çalışmada, araçtaki teknolojik gelişmeler ve artan müşteri beklentisi nedeni ile motordan gelen titreşim değerlerine göre damperin iyi bir şekilde optimize edilmesi gerektiğini, model analiz yönteminin de titreşimleri analiz etme ve belirlemedeki temel yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Model şekilleri, damper yayları ve diğer komponentler de değişiklikler yapılarak araştırılmış ve değişikliklerin titreşim sönümleme üzerine etkileri incelenmiştir.

(Genc ve ark., 2018), şekil 2.2'de de görüleceği üzere, debriyaj diskinde kullanılan her bir komponentin rezonans frekansını incelemiş ve hangi komponentlerde öncelikli olarak iyileştirme yapılması gerektiği belirlemiştir.



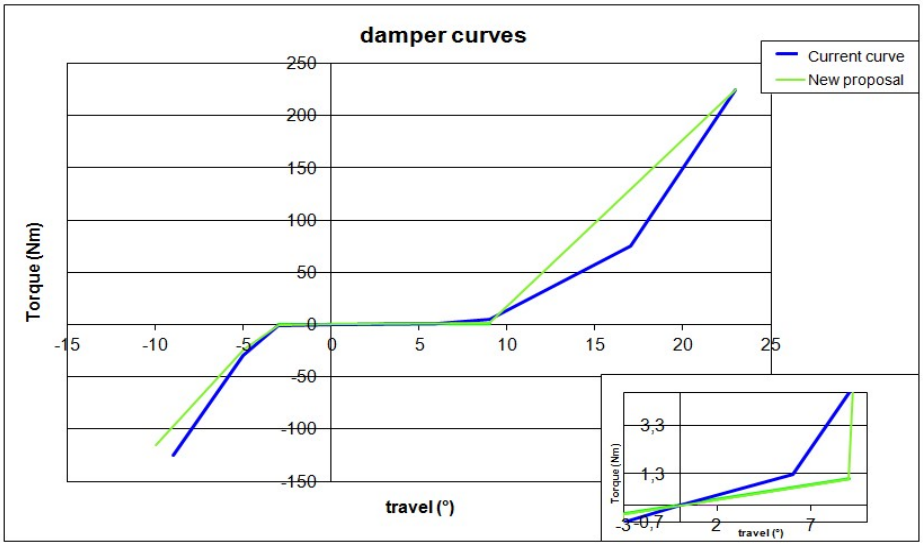
Şekil 2.2. LMS AMESim modal analizleri

(Genc ve ark., 2018), sistemdeki dinamik titreşimleri analiz edebilmek için zamana bağlı değişimleri titreşime bağlı değişimlere (Şekil 2.3) dönüştürülerek analiz etmiştir.



Şekil 2.3. Titreşim analizi için FFT (Fast Fourier Transformation) metodu (Genç ve ark., 2018)

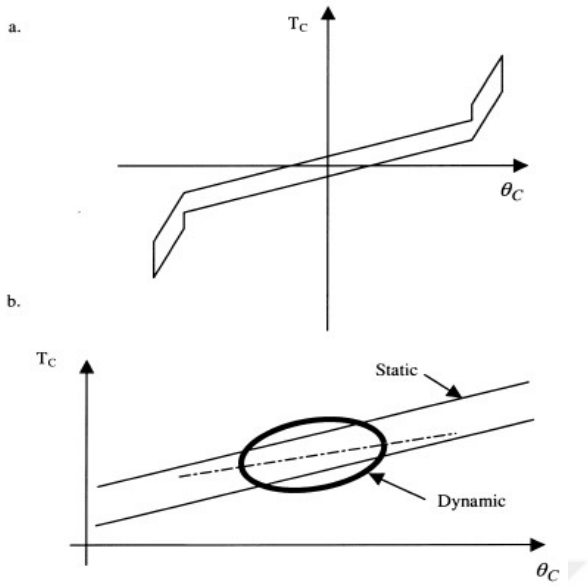
(Acar ve ark., 2014), titreşim sönümlemesi için 4 silindirli bir motora kıyasla daha etkili tasarım ve konfor gereksinimleri bulunan, yakıt tasarrufu daha yüksek olan 3 silindirli bir motorun konfor iyileştirme çalışmasını yapmıştır. Matlab programında frekans düzeyinde analiz yaparak debriyajın tasarımını iyileştirme önerilerini sunmuşlardır. Bu kapsamda yay, göbek ve kanat tasarımlarında değişiklikler yaparak Şekil 2.4'te yeşil renkli olarak görülen yeni titreşim sönümle eğrisini elde etmiş ve yeni tasarımın titreşim sönümleme performansı üzerine etkilerini incelemişlerdir.



Şekil 2.4. Değişiklik öncesi ve sonrası histerisiz değişimi karşılaştırma eğrisi (Acar ve ark., 2014)

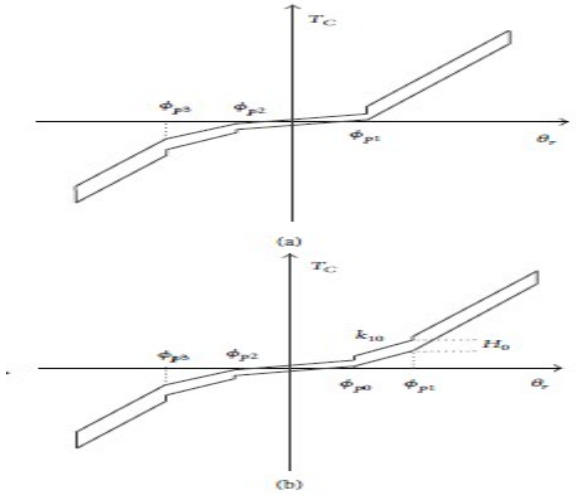
2.2. Debriyaj Sönümleme Sistemi Üzerine Çalışmalar

(Gaillard & Singh, 1999), torsiyonel dinamik karakteristiklerini lineer veya non-lineer olmak üzere 5 katı model parametresi ile tanımlamıştır. Şekil 2.5'te görülen non-lineer model, kuru sürtünme elemanları ve esnek yay sönümleme elemanlarından oluşmuştur. Genlik ve frekansa bağlı olarak dinamik katsayı ve enerji sönümleme spektralları incelenmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırma yapılmıştır.



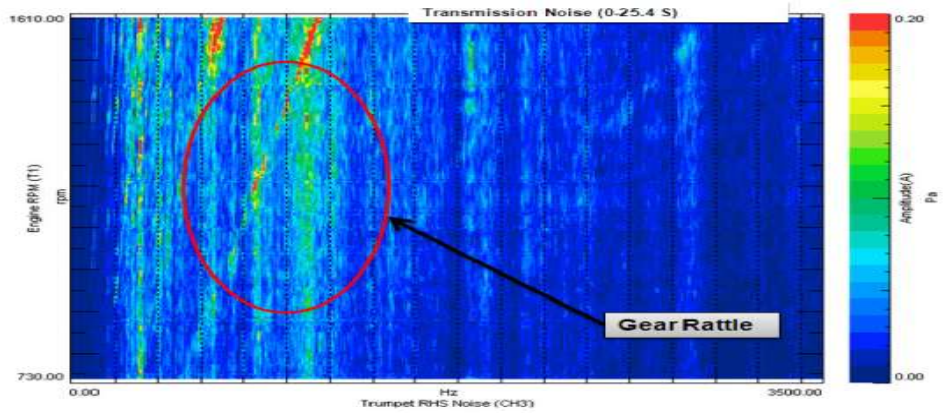
Şekil 2.5. a. Tipik debriyaj diski histerisiz karakteristiği, b. Açısal değişime göre dinamik tork değişimi (Gaillard & Singh, 1999)

(Wu & Wu, 2016), çalışmalarında, Şekil 2.6'da gösterilen 2 kademeli ve 3 kademeli yay rijitliğine sahip debriyaj disklerini kullanarak torsiyonel titreşimlerin analizini yapmışlardır. Debriyaj disk komplesi parametrelerini optimize ederek araç titreşimleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma ile debriyaj disk komplesi histerisiz parametrelerinin ve yay kademe sayısının düşüşünün, titreşimi sönümleme üzerinde belirgin etkileri olduğu ortaya konulmuştur.



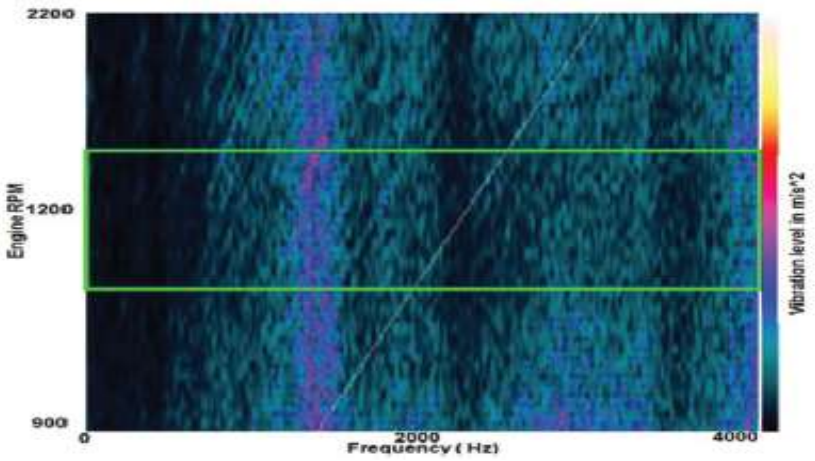
Şekil 2.6. a. 2 kademeli non-lineer histerisiz karakteristiği, b. 3 kademeli non-lineer histerisiz karakteristiği (Wu & Wu, 2016)

(Jadhav, 2014) çalışmasında, şanzıman dişlilerinin tasarımı ile debriyaj titreşim sönümleme faktörlerinin optimizasyon çalışmasını harmonik analize uygulayarak yapmıştır. Şekil 2.7'de görülen, dişli kutusu titreşimlerinin ve gürültülerinin meydana geldiği frekans aralıklarını yorumlamıştır.



Şekil 2.7. Dişli kutusu gürültü analizi (Jadhav, 2014)

(Prasad ve ark., 2013) çalışmalarında, bir yolcu otobüsünde şanzımandaki dişli tıkırtısına etki eden iç ve dış etkenleri belirleyip bunları elimine ederek dişli tıkırtısını azaltmakla alakalı çalışma yapmışlardır. Araç konforu ile alakalı temel parametrelerin motor parametreleri, sürüş modu ve debriyaj diski histerisiz parametreleri olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil 2.8'de, aracın 5.viteste ivmelenmesi esnasındaki dişli kutusu titreşimlerinin ölçümünü yapmışlardır.



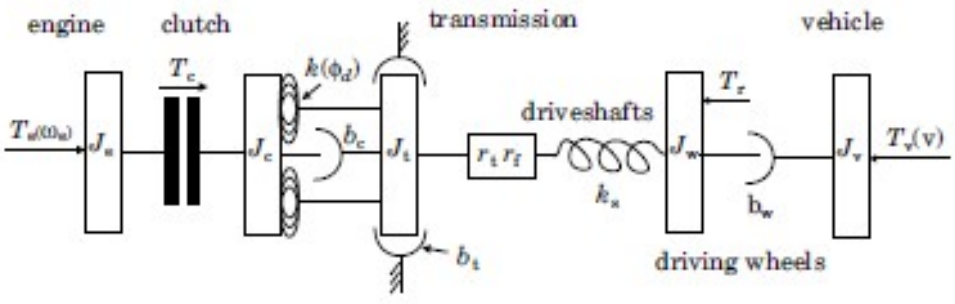
Şekil 2.8. 5.viteste ivmelenme esnasında maks histerisizli debriyaj diski ile yapılan testte renklendirilmiş dişli kutusundaki titreşim ölçümü (Prasad ve ark., 2013)

(Petri & Heidingsfeld, 1989) çalışmalarında, şanzıman doğal frekansı ve araç zorlama frekans aralıklarını incelemişlerdir. Güç aktarım sistemindeki kütle ve sönümleme elemanlarının araç konforuna olan etkilerini matematik model ile karşılaştırmıştır. Yaylı volanın sönümleme ve dönme devri konfor aralığındaki titreşim sönümleme iyileştirmelerinin özelliklerini yorumlamışlardır.

(Keeney & Shih, 1992) çalışmalarında, güç aktarım sistemindeki dönel titreşimlerin araçta meydana getirdiği gürültü etkisini azaltmak amacıyla harmonik incelemeler yapmıştır. Sönümleme elemanlarının değerlerini sınıflandırarak titreşim ve gürültü etkilerini yorumlamışlardır.

2.3. Matematiksel Model, Tasarım ve Sönümleme İlişkisi Üzerine Çalışmalar

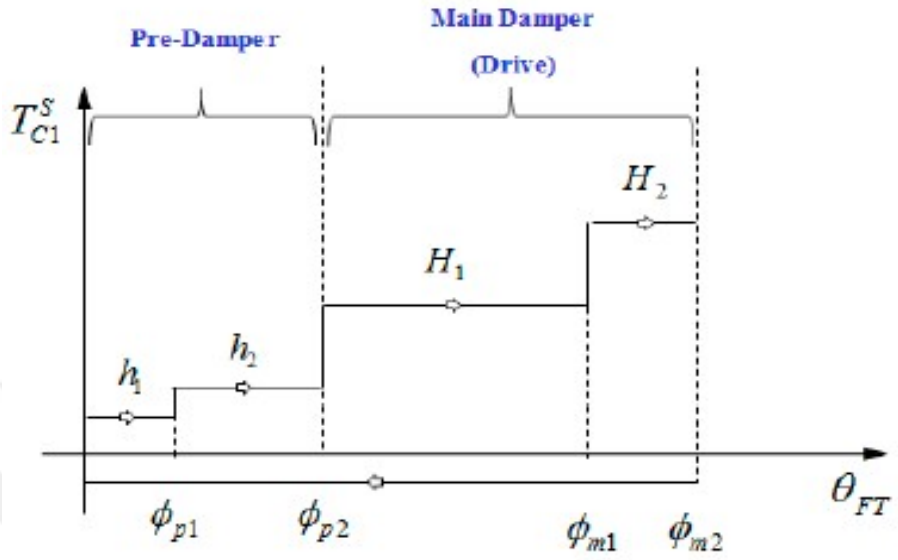
(Serrarens ve ark., 2004) çalışmalarında, debriyajın dinamik durumdaki davranışını Karnoop yaklaşımına göre modelleyerek gerçek çalışma durumunu simule etmeye çalışmışlardır. Oluşturulan model ile debriyajın, kavrama durumunu analiz ve simule etme, motorun çalışması ve sürüş moduna göre kavrama anını en iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Güç aktarım sisteminin modellemesini Şekil 2.9'daki gibi yapmışlardır.



Şekil 2.9. Güç aktarım sistem modeli (Serrarens ve ark., 2004)

(Duque & Augusto, 2012) yaptıkları çalışmada, statik ve dinamik histerisizleri MATLAB/Simulink'te matematiksel modellemesini oluşturularak gerçek araç verileri ile karşılaştırılmışlardır. Şekil 2.10'daki grafikte, tasarlanan debriyaj diskinde kullanılan

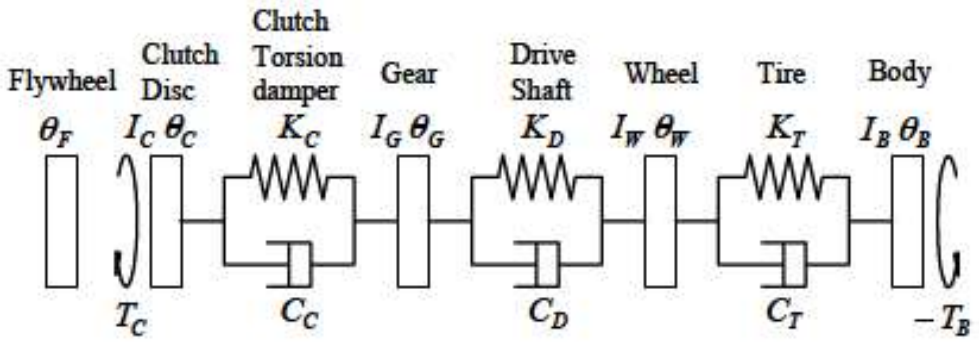
ön-amortisör ve ana amortisörlerin açısal değişime bağlı olarak tork değişimi ile ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Histerisize ile ilişkili tork değişimi (Ön-amortisör + Ana amortisör grubu) (Duque & Augusto, 2012)

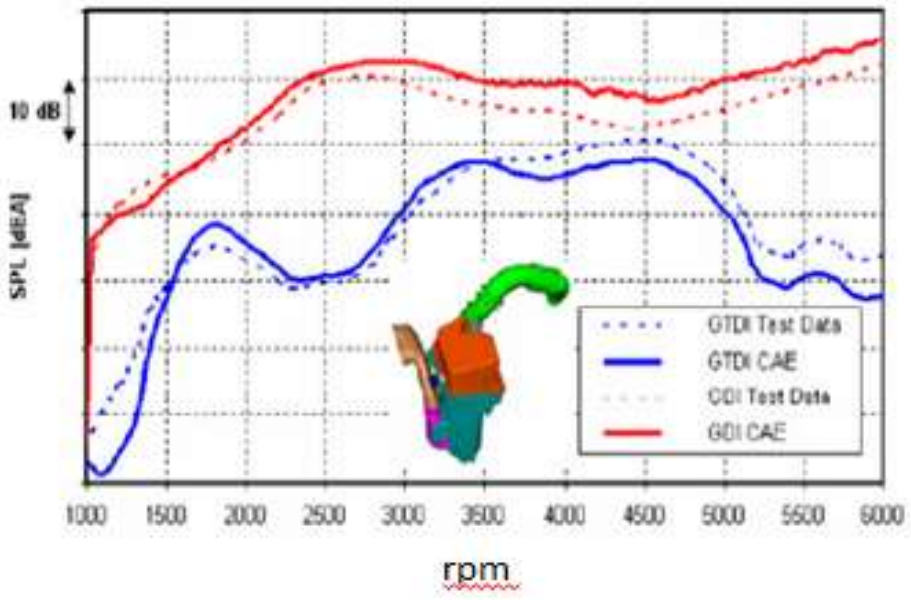
(Kato & Hibi, 2007) çalışmalarında, statik ve dinamik çalışma koşulları için matematiksel modeller oluşturulmuştur. Sürüş koşullarına bağlı olarak analizler yapılmıştır. Araç testleri ile elde edilen gerçek veriler dinamik matematiksel model verileri ile karşılaştırılmış ve oluşturulan modellerin uygunluğu görülmüştür.

(Kato & Hibi, 2007) araç kalkışı esnasında motor titreşimleri kaynaklı tork dalgalanmaları nedeni ile oluşan titreşim sönümlemesini debriyaj diski bileşenlerinin toleransları ve bileşenlerin birbirine göre izafi hareketlerini gözeterek incelemişlerdir. Bilgisayar ortamında, Şekil 2.11'deki araç sistem modeli temel alınarak yapılan matematiksel modelde motor çalışma parametre girdileri ile kavrama anı simule edilmiştir. Kato ve Hibi yapmış oldukları çalışmada, baskı plakasındaki atıklık, baskı yükü değişimi, debriyaj diski metalik diskinin sönümleme etkisi ve pedal yükü etkisi parametrelerini dikkate almışlardır.



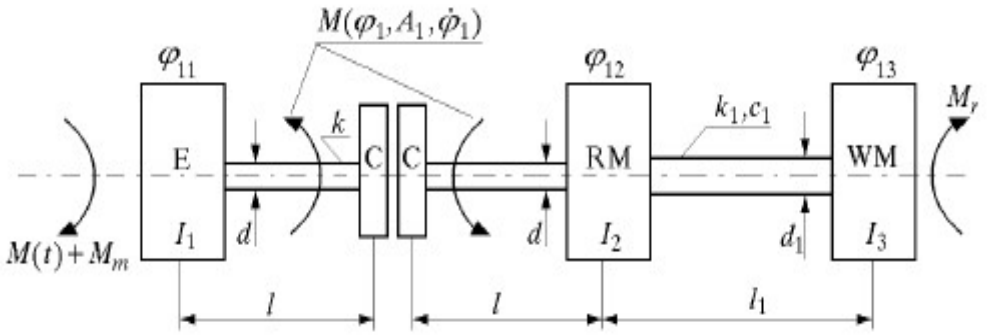
Şekil 2.11. Araç sürüş sistem modeli (Kato & Hibi, 2007)

(Abe & Felice, 2010) yaptıkları çalışmada, ilerleyen teknoloji ile birlikte kullanıcılarda artan konfor ve yakıt verimliliği gereksinimlerini incelemişlerdir. Araç konforunun arttırılmasında ihtiyaç duyulan titreşim ve gürültü optimizasyonunu, teorik ve araç test verilerini karşılaştırarak Şekil 2.12'deki gibi elde edilmiş eğrileri kullanarak yorumlamışlardır. Grafikteki kırmızı ve mavi çizgiler hesaplama sonrası devire bağlı olarak dBA gürültü değişimini göstermektedir. Kesikli çizgiler ise testler sonrası elde edilen gerçek araç verilerini göstermektedir.



Şekil 2.12. Taşıt gürültü optimizasyonu (Abe & Felice, 2010)

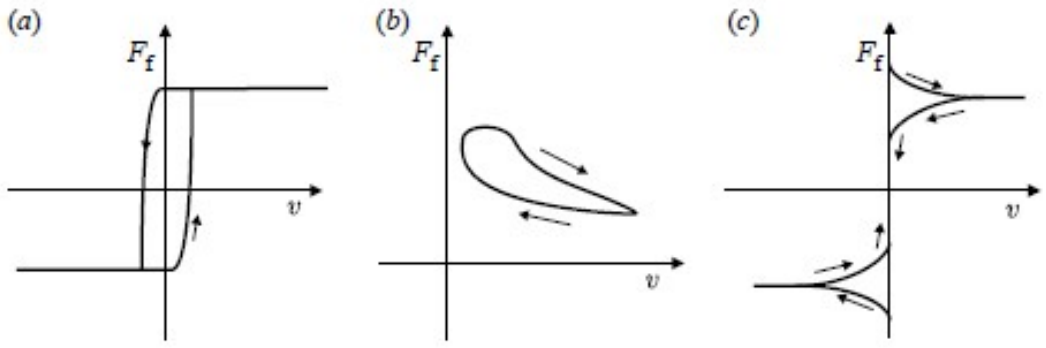
(Skup, 2004) çalışmasında, debriyajın ve güç aktarım sisteminin bileşen bazlı iletim fonksiyonlarını incelemiştir. Sönümleme elemanlarının etkilerini fonksiyonel ve grafiksel olarak yorumlamıştır. Güç aktarım sisteminin tasarımını Şekil 2.13'te görüldüğü gibi oluşturmuştur.



Şekil 2.13. Güç aktarım sistemi iletim fonksiyonları (Skup, 2004)

2.4. Debriyaj Disk Komplesinde Histerisiz ve Etkisinin incelenmesi

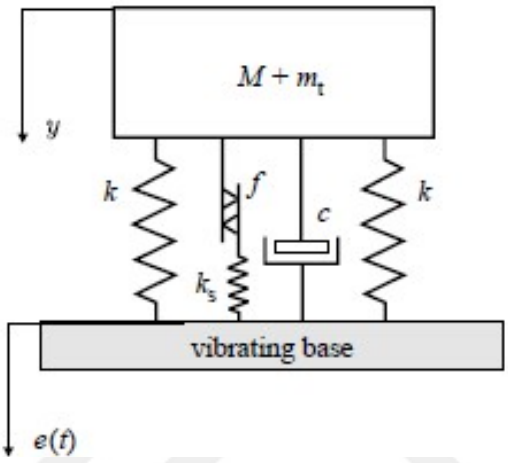
(Wojewoda ve ark., 2008), çalışmalarımda kuru yüzeylerde sürtünme kaynaklı histerisiz oluşumunu incelemişler ve matematiksel modellemesini oluşturmuşlardır.



Şekil 2.14. a. Kuru yüzeylerdeki sürtünme kaynaklı histerisiz eğrisi, b. Sürtünen hafıza ve c. Geri dönüşümsüz sürtünme karakteristikleri (Wojewoda ve ark., 2008)

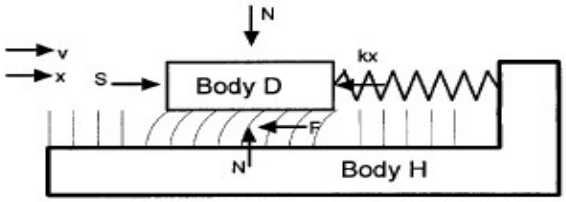
Debriyaj disklerinin sürtünme karakteristiği genel olarak Şekil 2.14.a. grafik yapısına uygun olarak oluşmaktadır. Debriyaj disk modellemelerinin tasarımı Şekil 2.14.a'daki

kurguya göre yapılmıştır. Şekil 2.14.b'de tanımlı olan sürtünen hafızalı histerisiz modeli tekrarlı olarak aynı karakteristik hareketi yapan non-lineer damper özelliklerini tanımlamaktadır. Şekil 2.14.c'deki geri dönüşümsüz histerisiz karakteristik yapısı debriyaj disklerinde kullanılmayan bir uygulamadır. Kuru yüzeylerdeki sürtünmeye ait sistem modellemesi ve matematiksel modelleme Şekil 2.15'teki gibi oluşturulmuştur. (Wojewoda ve ark., 2008) matematiksel modeli oluşturulan tasarımı simule etmiş ve deneysel veriler ile karşılaştırmalar yapmışlardır.

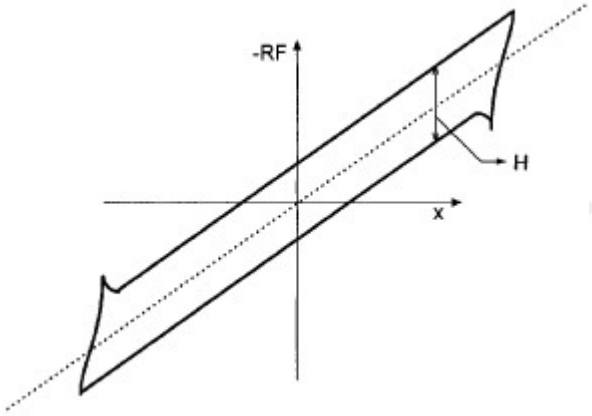


Şekil 2.15. Kuru yüzey sürtünmesini simule eden basitleştirilmiş model (Wojewoda ve ark., 2008)

(Szadkowski ve ark., 1995) çalışmalarında, Şekil 2.16'daki fiziksel modellemeyi histerisiz etkisinin frekanstan bağımsız olduğunu kabul ederek oluşturmuşlardır. Şekil 2.17'de debriyaj diskinin açısal hareketleri esnasındaki hız değişimlerine bağlı olarak oluşan enerji bazlı viskoz sönümlemelerin etkilerini tanımlanmışlardır. TORAN isimli simülasyon programı ile debriyaj diskinin algoritması oluşturulmuştur. Debriyaj torkunun histerisiz değerinden az olduğu ve sistemin kendini kilitleyerek görevini yerine getirmediği durumlar kayıt altına alınmıştır. Deneysel çalışmalar ile gerçek veriler karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.16. Kuru yüzeyli debriyaj diski fiziksel modeli (Szadkowski ve ark., 1995)



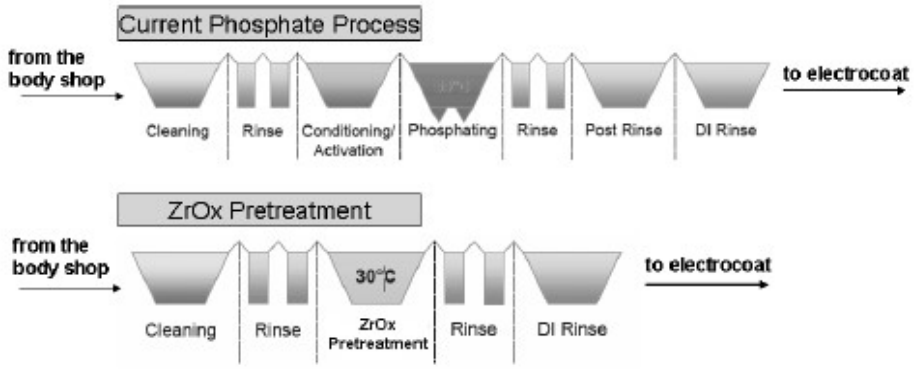
Şekil 2.17. Kuru yüzeyli debriyaj disk için statik histerisiz döngüsü (Szadkowski ve ark., 1995)

2.5. Metal Malzemelerde Kaplama Etkilerinin İncelenmesi

Bu kısımda bilgi verilmiş olan kaplama metotları debriyaj diskindeki histerisize etki eden en önemli bileşenlerden olan metal tırnaklı rondelaların kaplamalarında kullanılacak olan kaplama çeşitleri hakkındadır. Metal rondelâlarda farklı kaplamalar yapmamızın nedeni kaplama kaynaklı sürtünme katsayısının değişiminin histerisize etkisini analiz edebilmektir.

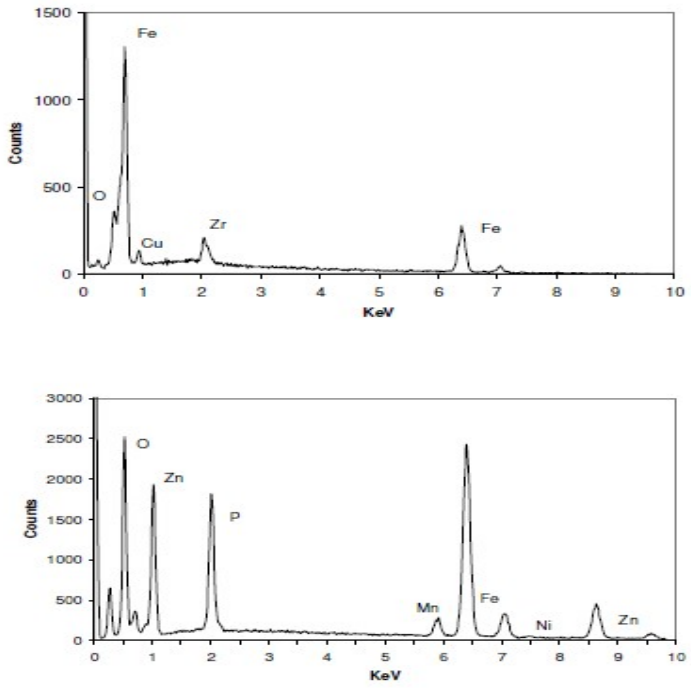
(Simko ve ark., 2009) yapmış oldukları çalışmada, çevresel etkiler nedeniyle regülâsyonların değişmesi kaynaklı kaplama metotlarında değişiklik yapılmasını ve çinko oksit temelli kaplama metotlarını incelemişlerdir. Çinko oksit kaplamasının çinko-fosfat kaplamaya göre 10 kat daha ince olduğu tespit edilmiştir. X-ray metodu ile kaplamanın karakteristik özellikleri incelenmiştir. Soğuk haddelenmiş çelik ve Al malzemelerde kaplamanın ince olmasına rağmen üniform dağıldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 2.18'de mevcuttaki fosfat kaplama prosesi ile çinko oksit ön işlem prosesleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.18. Önişlem proses akışlarının karşılaştırılması (Simko ve ark., 2009)

(Simko ve ark., 2009) çalışmalarında, metal sac malzemeler için çinko oksit kaplama metodu ile çinko-fosfat kaplama metotlarını karşılaştırmış ve çıkan sonuçları yorumlanmışlardır.



Şekil 2.19. EDS (X-Ray enerji dağıtım spektroskopy) Spektra analiz metodu ile çinko oksit (üstte) ve çinko-fosfat kaplama metotlarının karşılaştırılması (Simko ve ark., 2009)

(Nakayama ve ark., 2003) yaptıkları çalışmada, değişen regülâsyonlar nedeni ile çinko-fosfat kaplama prosesini değiştirerek ağır metallerin kullanım oranını %70 seviyelerinde azaltmışlardır. Böylece asitlere ve alkalilere karşı daha dirençli bir kaplama çalışması yapılmıştır. Korozyona karşı daha dirençli bir kaplama metodu oluşturulmuştur. Şekil 2.20'de mevcuttaki Çinko-Fosfat prosesine ve Şekil 2.21'de de yeni regülâsyonlara uygun ağır metal kullanımı azaltılmış süreci tanımlayan proses bilgilerini vermişlerdir.

STAGE	CHEMICALS	OPERATING CONDITIONS		
		System	Time (s)	Temp. (°C)
Degreasing	FC-E2001	Dip	120	40
Water rinsing	Tap water	Spray	30	RT
Surface conditioning	PL-ZTH	Dip	30	RT
Phosphating	ZP (PB-WL35)	Dip	90	35
Water rinsing	Tap water	Spray	30	RT
Water rinsing	Ion-exchanged water	Spray	30	RT
Dry off			120	100

Şekil 2.20. Çinko-Fosfat proses adımları (Nakayama ve ark., 2003)

STAGE	CHEMICALS	OPERATING CONDITIONS		
		System	Time (s)	Temp. (°C)
Degreasing	FC-E2001	Dip	120	40
Water rinsing	Tap water	Spray	30	RT
Conversion coating	NC (PALLUMINA)	Dip	90	45
Water rinsing	Tap water	Spray	30	RT
Water rinsing	Ion-exchanged water	Spray	30	RT
Dry off			120	100

Şekil 2.21. Yeni geliştirilen prosesin işlem adımları (Nakayama ve ark., 2003)

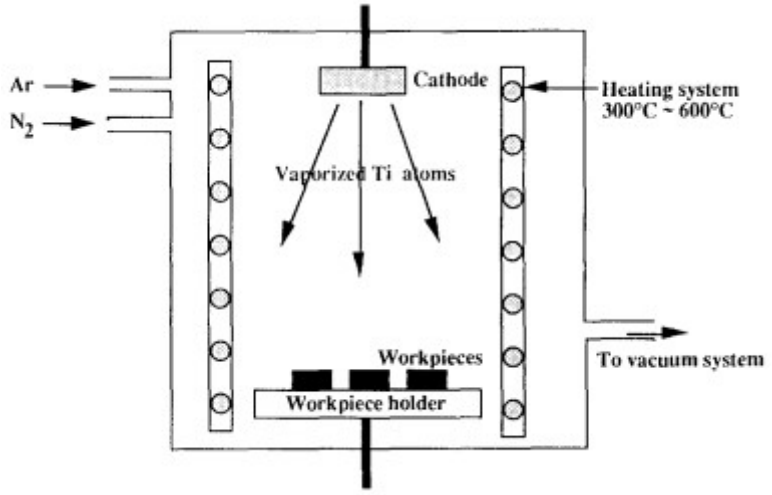
(Nakayama ve ark., 2003) yapılan korozyon testlerinin sonuçlarını karşılaştırdıklarında yeni proses metodunun daha iyi sonuçlar verdiğini, korozyona karşı dayanımının daha iyi olduğunu ve kaplamanın daha dirençli olduğu gözlemlenmişlerdir.

(Montgomery ve ark., 1956), sadece yüksek sıcaklığa karşı dirençli olmayıp aynı zamanda oksidasyona karşıda dirençli ve yalıtkan özellikli nikel kaplama ile alakalı bir patent başvurusu yapmıştır. Çalışmaları nikel kaplama metodu ile alakalı genel bilgileri,

nikel-magnezyum karışım oranı ve prosesin kaplama üzerindeki etkileri ile ilgili bilgiler içermektedir.

(Buhl ve Ark., 1981) çalışmalarında, Titanyum-Nitrid'in (TIN) kaplama özellikleri ve kullanım alanları ile genel bilgiler vermişlerdir. TIN kaplama genelde kalıp parçaları ve matkap uçlarında yüksek Vickers sertlik değerlerine sahip oldukları için tercih edilen, iyi ve uzun ömürlü bir kaplama ömrüne sahiptir. İyi bir yüzey kayganlığı, yüksek kimyasal stabilite ve aşınma direncine sahiptir. Altın rengi görünümünde olan bu kaplama metodu altın alaşımlı elementlerin yerine saat endüstrisinde tercih edilmektedir.

(Shanyong & Zhu, 1992) yapmış oldukların çalışmada, TIN kaplama metodunun kalıp parçalarında kullanımı, kaplamanın parça kalitesi ve parça üretim adetleri üzerine etkilerini ve farklı metotlar ile yapılan TIN kaplamanın etkilerini incelemiştir. Çalışmalarında, Şekil 2.22'de gösterimi yapılan püskürtme metodu ile TIN kaplama prosesini incelemişlerdir.



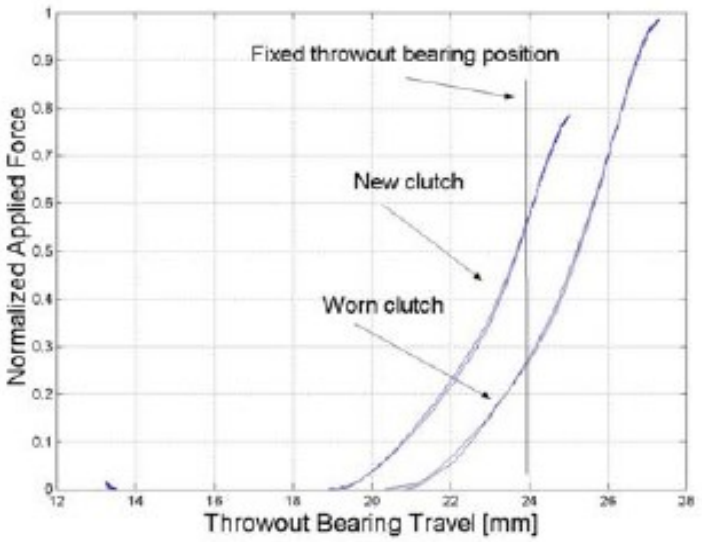
Şekil 2.22. Püskürtme yöntemi ile TIN kaplama proses metodu (Shanyong & Zhu, 1992)

2.6. Debriyaj Diyafram Yayı ve Tork İletme Kapasitesi Etkilerinin İncelenmesi

(Ercole ve ark., 2000) çalışmalarında, termal çalışma koşulları altında debriyaj diyafram yayında kavrama esnasında meydana gelen aşınmayı debriyajın tork iletimi ile olan etkisini farklı çalışma koşulları altında deneysel olarak araştırmışlardır. Tasarlanmış olarak test makinesinde vites değişim koşulları ve ilk çalıştırmadaki şartlar dikkate alınmış ve testleri sadece belli çalışma koşulları için yapmışlardır.

(Ercole ve ark., 2000) yapmış oldukları hızlandırılmış test parametreleri ile 50.000 Km'ye karşılık gelen aşınma seviyesini 5.000 km'lerde elde etmişlerdir. Bu bilgiler ile aşınmanın tork iletim kapasitesi ve debriyaj sıcaklığı etkileri incelenmiştir.

(Mattiazzo ve ark., 2002) yaptıkları çalışmada, diyafram yayının çalışma ömrü boyunca tork iletim kapasitesini incelemişlerdir. Debriyaj diskindeki aşınma değişimi önemsenmeden diyafram yayı karakteristiğinin değişimi deneysel olarak gözlemlenmiştir. Aynı zamanda diyafram yayındaki aşınmanın artmış olması durumu için sıcaklığın diyafram yayının hareket mesafesi üzerindeki değişim etkilerini incelemişlerdir. Şekil 2.23'te diyafram yayınının yeni ve aşınmış durumdaki rulman kursu uygulama kuvvetinin niteliksel değerini incelemişlerdir.



Şekil 2.23. Diyaframın yeni ve aşınmış durumdaki rulman kursu uygulanma kuvvetinin niteliksel değişimi (Mattiazzo ve ark., 2002)

3.MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde debriyaj histerisiz elemanlarının araç konforuna olan etkilerini incelemek amacı debriyaj disk modellenmiştir. Yay rijitliğinin titreşim sönümleme ve rezonans frekansına olan etkileri incelenmiştir. Histerisize etki eden parametreler belirlenmiştir. Kaplama yapılan metal rondelâların kaplama özelliklerinin ve esnek rondelâların yük değişimlerinin histerisize olan etkileri analiz edilmiştir.

3.1. Esnek Rondelâlar ve Özellikleri

Esnek rondelâlar diyafram yayı gibi yay özelliğine sahip ve açısal olarak form verilmesi ile belirli bir yay sabiti sonucu karşı kuvvet uygulayan yük elemanlarıdır. Seri ve paralel bağlantılı ya da şekilli kullanılan esnek rondelâlar vardır. Aynı doğrultuda esnek rondelâların üst üste istiflenmesi ve düşük yay sabiti ile daha yüksek bel verme sağlanabilir. Fakat debriyaj diskinde genel olarak üst üste değil de tekli fakat farklı kademelerde farklı yük seviyelerinde (paralel istifleme) esnek rondelâlar kullanılmaktadır. Paralel ve seri esnek rondelâ yük tanımlamaları kademeli esnek rondelâ kullanılan disk kompleleri ile alakalı temel bilgi verebilir.

n = # istiflenen esnek rondela adedi olarak kabul edilir ise;

Paralel istifleme (paralel sayısı n, seri 1 olmak üzere) - Bel verme 1 ad esnek rondelânın bel vermesi veya yükseklik değişimine eşit miktardadır. Yük n x 1 yaya eşittir. Örnek olarak, 4 adet esnek rondelâ üst üste istiflenir ise yay yükü bir yayın yükünün 4 katına eşittir.

Seri istifleme (paralel sayısı 1, seri n olmak üzere) - Yer değiştirme miktarı n x 1 yaya eşittir. Yük 1 tane esnek yay yüküne eşittir. Örnek olarak, 1 paralel ve 4 seri halde istiflenmesi halinde, aynı yük değeri fakat yer değiştirme 4 kat daha fazla olacaktır.

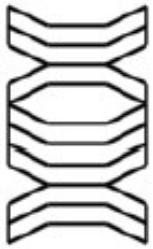
Paralel istiflemedeki histerisiz oluşumu sürtünmeden dolayı yük kaybı ile oluşmaktadır. Histerisiz kaybı debriyaj diski gibi sistemlerde titreşim enerjisini dağıtması ve motordan

gelen titreşimleri sönümlediği için avantaj olarak kullanılır. İdeal olarak, paralel sistemlerde 4 adet esnek rondelâdan fazlası kullanılmaz. Sürtünmeden kaynaklı yük kayıpları histerisiz metodu ile hesaplanır. Eğer yük kayıplarının telafi edilmesi ve sistemin doğru çalışması isteniyor ise emniyet faktör katsayısı arttırılır. Paralel sistemlerde sorun olan sürtünme kayıpları seri sistemler için ise bir sorun teşkil etmez.

Esnek rondelâların farklı kalınlık ve açılarla istenildiği gibi yük ve yer değiştirmeleri ayarlanabilir. Debriyaj diskinin limitli alanı ve yükseklik kısıtı nedeni ile istenilen yük değerlerinin ve özelliklerinin etkileri her zaman elde edilemeyebilir. Tasarımının dikkatli yapılması ve yük değerlerinin çok yüksek olmaması gerekir. Aksi halde, sistemde karşı kuvvet oluşturarak istenilen sonuçlara ulaşamamamıza neden olabilir.

Örnek hesaplama olarak, sürtünme ve ani yükseklik değişim etkileri önemsenmez ise, esnek rondelânın yük oranı tanımsal olarak tahmin edilebilir veya hesaplanabilir.

Şekil 3.1'deki gibi aşağıdan yukarıya doğru 2-3-1-2 şeklinde istiflenmiş bir esnek rondelâ yük grubunun yükünü hesaplamak istersek;



Şekil 3.1. Esnek rondelâ istifleme grubu

Toplam esnek rondelâ yay katsayısı;

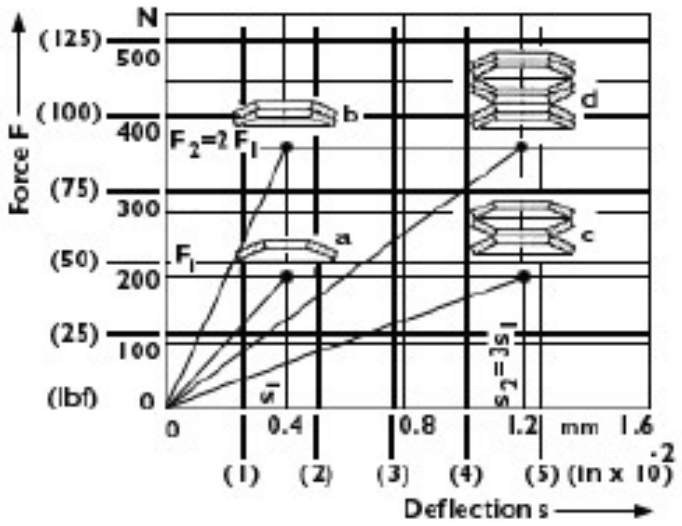
$$K = \frac{k}{\sum_{i=1}^{g} \frac{1}{n_i}} \quad \text{--> } \quad K = \frac{k}{\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+\frac{1}{1}+\frac{1}{2}} \quad \text{--> } \quad K = \frac{3}{7}k$$

n_i: Gruptaki esnek rondelâ sayısı

g = Grup sayısı

k = 1 Adet yayın, yay sabiti değeri

Sonuca bakıldığında bu yönteme göre sistemin yay yükü değeri 3k/7 değerine eşittir. Sistemde değişiklik yapılarak yay yükü değerinin değiştirilebilir olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu sayede istenilen sayıda varyasyon oluşturulabilir.

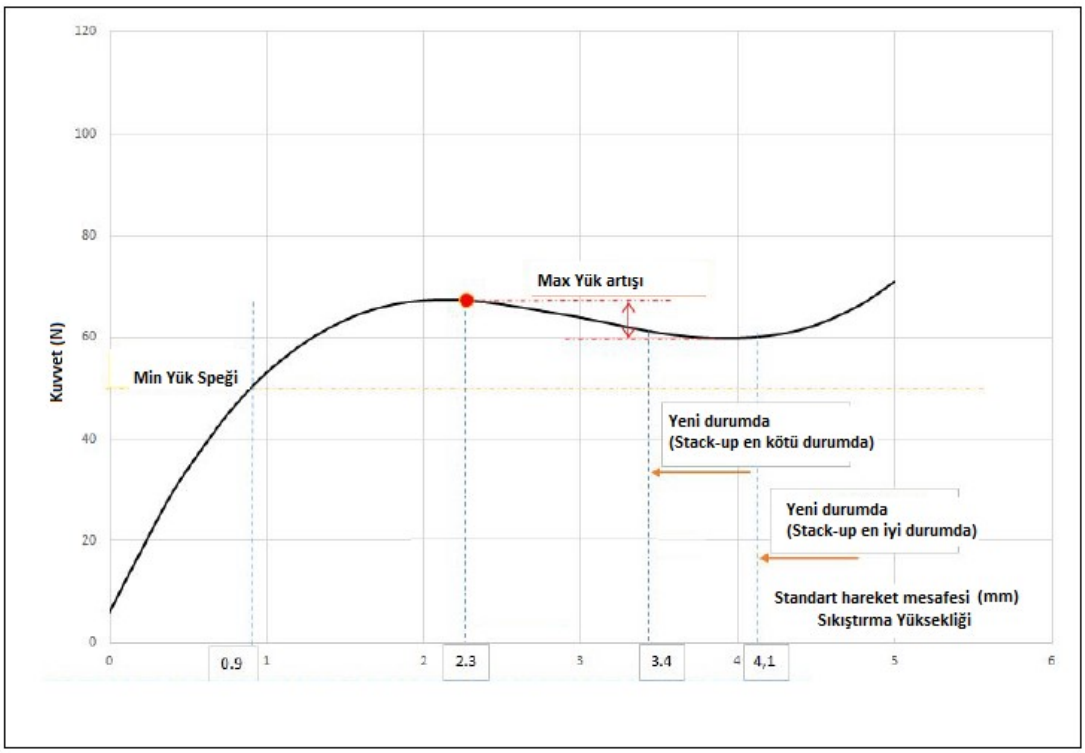


Şekil 3.2. Aynı boyutta farklı adette istiflenmiş esnek rondela karakteristikleri

Şekil 3.2'de 4 farklı istifleme modeline göre kuvvet-yer değiştirme grafiği tanımlanmıştır. Her bir istifleme durumu aşağıda tanımlanmıştır.

a. Tekil esnek rondela
b. Paralel olarak istiflenmiş 2 rondela (Aynı yer değiştirmede 2 katı kuvvet)
c. Seri olarak üst üste istiflenmiş 3 rondela (Yer değiştirme 3 katı)
d. Seri olarak çiftlerli istiflenmiş 3 grup rondela (Yer değiştirme 3 katı, kuvvet 2 katı) şeklindedir.

Debriyaj diskinde kullanılan esnek rondelalar, tırnaklı (Şekil 1.6) ve ondüla tipi esnek rondela olmak üzere iki tiptir. Kullanım yeri ve istenilen yük miktarına göre rondelâ seçimi yapılmak ile birlikte ağırlıklı olarak tırnaklı tip esnek rondelânın kullanımı daha yaygındır. Bunun sebebi Şekil 3.3'teki eğride görüldüğü üzere yük eğrisinin belli bir sıkıştırma anından itibaren değişiminin az olmasıdır. Sıkıştırma miktarı arttıkça veya azaldıkça uygulanan yük değeri değişimleri belli aralıkta olacağı için histerisize ve ürünün fonksiyonelliğine etkisi belli limitleri dâhilinde olacaktır. (Anonim, 2019)



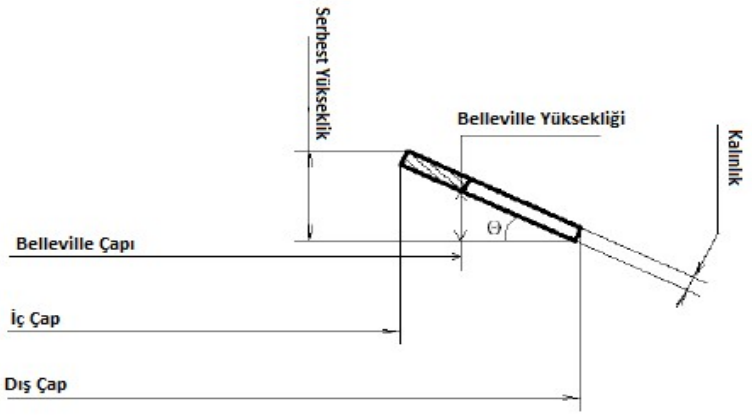
Şekil 3.3. Tırnaklı esnek rondela yük ölçüm eğrisi (Anonim, 2019)

Her halükarda, ürün tasarımı ve teknik özelliklerinin tanımlaması yapılırken minimum ve maksimum çalışma araklıları ve bu aralıklardaki yük değişimi ve histerisize etkileri hesaplanmaktadır. (Anonim, 2019)

Dikkate alınması gereken parametreler, minimum yük speği, maksimum yük artış miktarı (histerisiz değişiminin maksimum miktarı), esnek rondelânın hiç çalışmamış halindeki, yani yeni durumundaki en iyi ve en kötü durumlarının stack-up'ın (sandviç yapının) uyguladığı yük miktarıdır. (Anonim, 2019)

Eğer bu parametreler kontrol altında tutulabilir ise ürünün ömrü boyunca histerisiz değişimine etkisi minimize edilmiş olur.

3.1.1. Esnek Rondelâ Teorik Hesaplamaları



Şekil 3.4. Teorik hesap için gerekli bilgiler (ISO, 2017)

Esnek rondela yük hesaplamasını yapabilmek için Şekil 3.4'de tanımlı tüm verilerin bilinmesi gerekmektedir. Geometrik özelliklerinin yanında, Young modülü (E) ve Poisson oranını (v) tanımlayabilmek için malzeme özelliklerinin de bilinmesi gerekmektedir.

Çelik malzemeler için Young Modülü 206000 MPa ve Poisson oranı 0,3 tür. Formülasyon aşağıdaki tanımlamalara göre yapılmıştır

Çizelge 3.1: Esnek rondela formülasyon kısaltma tanımlamaları (ISO, 2017)

Dış Çap Ø	OD	Poisson Oranı	v
Belleville Ø	BD	OD / ID	δ
İç Çap Ø	ID	Hesaplama Oranı	C
Kalınlık	Th	Belleville Yüksekliği	BH
Serbest Yükseklik	FH	Gerçek Açı	Θ'
Teorik Açı	θ	Max Yükseklik	H_{max}
Young Modülü	E	Min Yükseklik	H_{min}
Yeni Dış Çap	OD_{new}	Yeni yükseklik	H_{new}
Yeni İç Çap	ID_{new}	Yeni yük	L_{new}

Yaklaşım olarak, yükün belleville bölgelerinden uygulandığı yani tırnaklardan bir yük uygulaması olmadığı öngörülerek hesaplama yapılmıştır.

Almen ve Laszlo'nun yapmış oldukları çalışmalardaki yaklaşımlara göre, eğer tırnaklar esnek rondelânın dışında ise yük (L) hesaplaması;

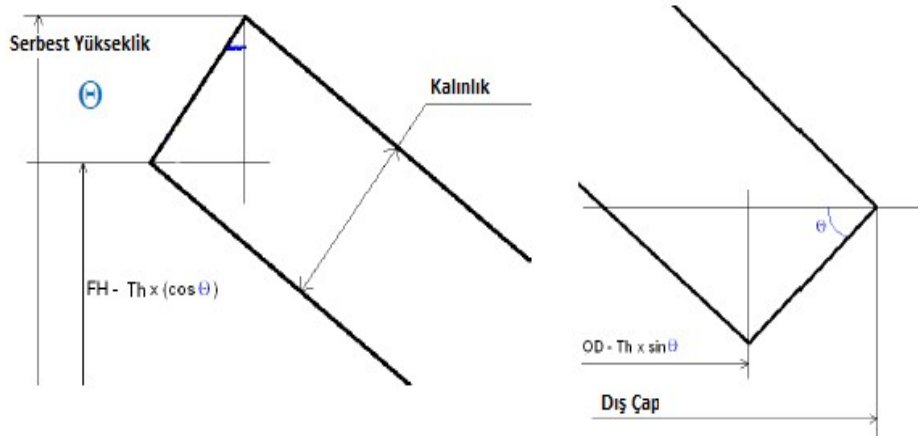
$$L = \frac{4\,E\,C}{1-\nu^2} \times \frac{Th\,f}{BH^2}\left[(ID-f)\left(ID-\frac{f}{2}\right) + Th^2\right] \quad [N] \tag{3.1}$$

Eğer tırnaklar esnek rondelânın içinde ise yük hesaplaması;

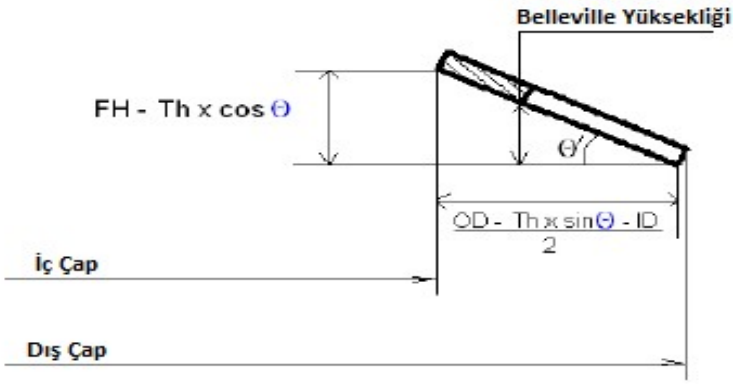
$$L = \frac{4\,E\,C}{1-\nu^2} \times \frac{Th\,f}{OD^2}\left[(BH-f)\left(BH-\frac{f}{2}\right) + Th^2\right] \quad [N] \tag{3.2}$$

$$C=\pi \times \left(\frac{\delta}{\delta-1}\right)^2 \times \left(\frac{\delta+1}{\delta-1} - \frac{2\delta}{ln\delta}\right) \tag{3.3}$$

$\delta = \frac{OD}{ID}$ ve f esnek rondelânın mm cinsinden yüksekliğe bağlı yer değiştirmesini ifade eder. Gerçek açı değeri hesaplaması (Θ') için gerekli olan bilgiler Şekil 3.5'te ve Şekil 3.6'daki çizimler üzerinde gösterilmiştir. Hesaplama yöntemi ise aşağıdaki formülasyonlara göre yapılmaktadır.



Şekil 3.5. Gerçek açının hesaplanması için gerekli bilgiler



Şekil 3.6. Θ' değerini hesaplama için gerekli bilgiler

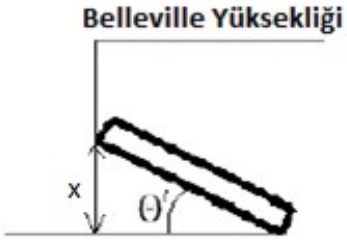
$$\Theta' = \frac{FH - Th\ x\ cos\Theta}{\frac{OD - Th\ x\ Sin\Theta -}{2}} \tag{3.4}$$

formülü ile hesaplanır. Esnek rondelânın gerçek açı değeri ise;

$$BH = \frac{OD - Th\ x\ Cos\theta - BD}{2\ x\ tan\Theta'} \tag{3.5}$$

formülü ile hesaplanır.

Yükseklik yer değiştirme ve yük hesaplaması esnek rondelânın tırnaksız olduğu ve yük uygulamasının belleville bölgesinden yapıldığı kabul edilerek hesaplanmaktadır.



Şekil 3.7. Belleville yüksekliği

Şekil 3.7 gösterimi yer değiştirme mesafesinin 0 ile BH arasında olduğunu gösterir. Max yük uygulandığında esnek rondelâ düz olur ve max yer değiştirme oluşur.

Aşağıdaki formül yer değiştirme yüksekliğinin hesaplamasını ifade eder. x değeri esnek rondelaya uygulanan yük değişimine göre değişiklik göstermektedir.

Yükseklik = $H_{max} - x$

Almen ve Lazslo'nun formülünü kullanarak, belleville yükünü, yükün gerçekten uygulandığı noktadan hesaplanması durumuna çevirebiliriz.

Dıştan tırnaklı esnek rondelâ için;

$$H_{New} = \frac{H\ x\ (OD_{New} - ID_{New})}{(BD - ID)} + Th; \quad (3.6)$$

$$L_{New} = \frac{L\ x\ (BD - ID)}{(OD_{New} - ID_{New})} \quad (3.7)$$

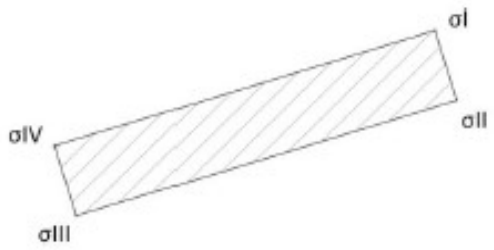
İçten tırnaklı esnek rondelâ için;

$$H_{New} = \frac{H\ x\ (OD_{New} - ID_{New})}{(OD - BD)} + Th; \quad (3.8)$$

$$L_{New} = \frac{L\ x\ (OD - B\ \ )}{(OD_{New} - ID_{New})} \quad (3.9)$$

Bu formülasyonlar ile esnek rondelânın yükünü ve yüksekliğini tüm durumlar için hesaplayabiliriz.

Esnek rondelâ stres hesabı ISO19690-1'e göre Şekil 3.8'deki tanımlı olan 4 farklı kritik durum için hesaplanmıştır.



Şekil 3.8. Esnek rondela stres hesabı bölgeleri

σ1 ve σ1V üst yüzeydeki, σ1I ve σ1II alt yüzeydeki stres noktalarını ifade eder. 4 katsayı ise aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$C_1 = \frac{1}{C} = \frac{1}{\pi} \text{ x } (\frac{\delta-1}{\delta})^2 / (\frac{\delta+1}{\delta-1} - \frac{2\delta}{ln\delta}); \quad (3.10)$$

$$C_2 = \frac{1}{\pi} \text{ x } \frac{6}{ln\delta} \text{ x } (\frac{\delta-1}{ln\delta} - 1)^2; \quad (3.11)$$

$$C_3 = \frac{3}{\pi} \text{ x } \frac{\delta-1}{ln\delta} \quad (3.12)$$

$$C_4 = 1 \quad (3.13)$$

Stres hesaplamaları ise aşağıdaki formüller ile hesaplanır. Pozitif değerler çeki, negatif değerler bası gerilmesini ifade eder.

$$\sigma I = \frac{4\,E}{1-v^2} \text{ x } \frac{Th\,f}{C_1 x\, OD^2} \text{ x } C_4 \text{ x } [-C_4 \text{ x } C_2 \text{ x } (\frac{FH}{Th} - \frac{f}{2Th}) - C_2] \quad (3.14)$$

$$\sigma II = \frac{4\,E}{1-v^2} \text{ x } \frac{Th\,f}{C_1 x\, OD^2} \text{ x } C_4 \text{ x } [-C_4 \text{ x } C_2 \text{ x } (\frac{FH}{Th} - \frac{f}{2Th}) + C_3] \quad (3.15)$$

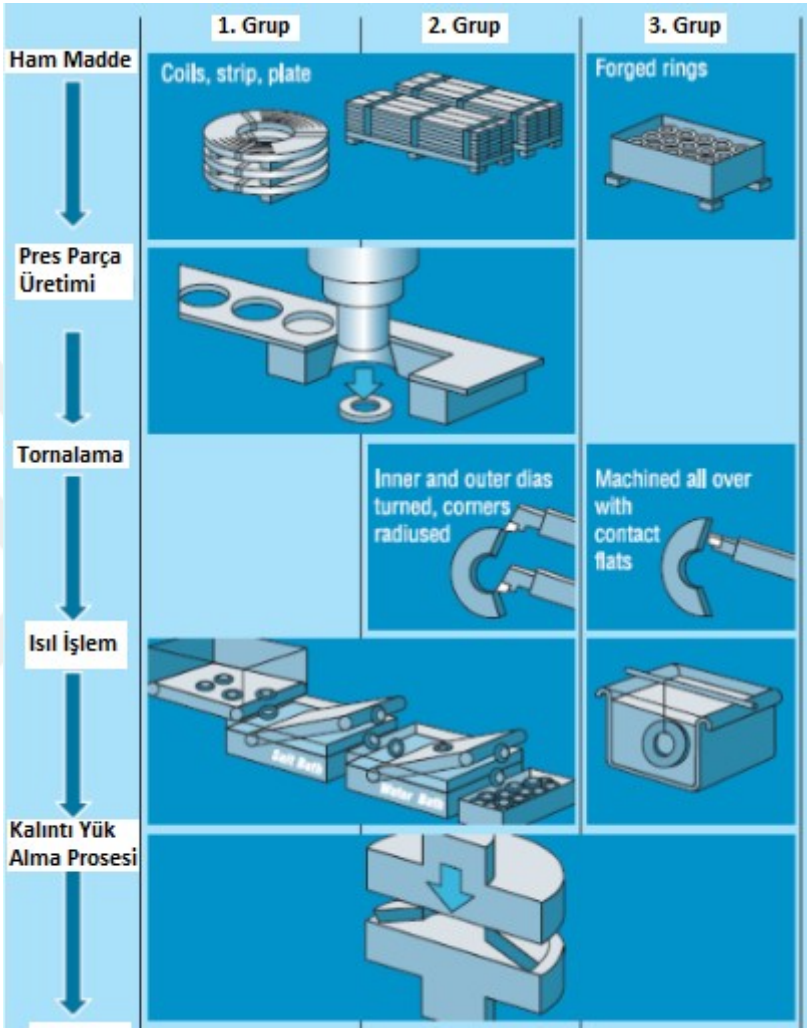
$$\sigma III = \frac{4\,E}{1-v^2} \text{ x } \frac{Th\,f}{\delta\, x\, C_1 x\, OD^2} \text{ x } C_4 \text{ x } [C_4 \text{ x } (2C_3 - C_2) \text{ x } (\frac{FH}{Th} - \frac{f}{2Th}) + C_3] \quad (3.16)$$

$$\sigma IV = \frac{4\,E}{1-v^2} \text{ x } \frac{Th\,f}{\delta\, x\, C_1 x\, OD^2} \text{ x } C_4 \text{ x } [C_4 \text{ x } (2C_3 - C_2) \text{ x } (\frac{FH}{Th} - \frac{f}{2Th}) - C_3] \quad (3.17)$$

3.1.2. Esnek Rondelâ Üretim Prosesleri ve Malzeme Bilgileri

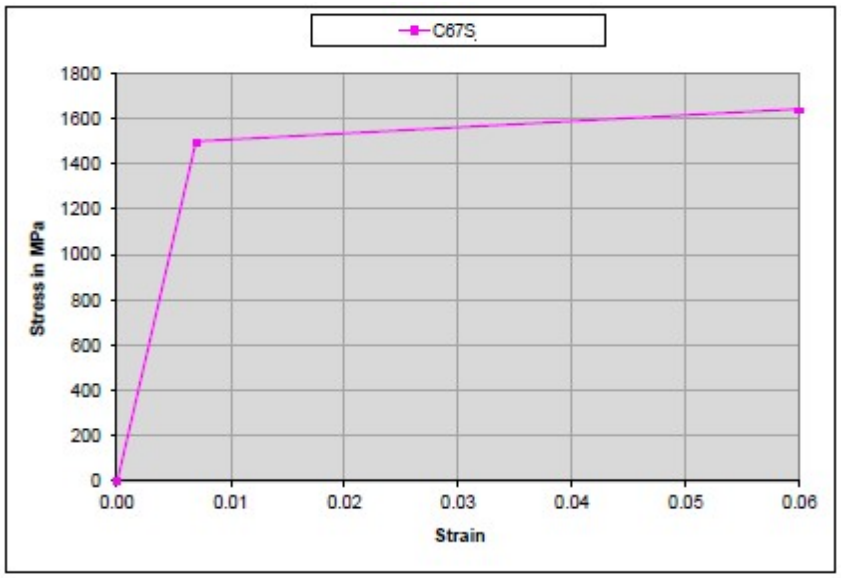
Debriyaj esnek rondelaları için genel olarak Şekil 3.9'da tanımlanan proses adımları uygulanır. Sadece, pres üretimi sonrasında kesme nedeni ile oluşabilecek keskin köşeleri yok eden (radius verme operasyonu) tornalama işlemi, kalıplarda keskin köşelere radius verme operasyonu ilavesi ile yapılabilir. Bu operasyonun yapılmasının nedeni parçanın çalışması esnasında stres kaynaklı kırılma risklerini minimize etmektir. (Engineering360, n.d.)

En önemli operasyon ise parça üretimi yapıldıktan sonra kalıntı yük alma (Scragging) işleminin uygulanmasıdır. Bu işlemin amacı, parçanın yük değişiminin üründeki çalışma ömrü boyunca minimize edilmesidir. (Engineering360, n.d.)



Şekil 3.9. Tırnaklı esnek rondela üretim prosesi (Engineering360, n.d.)

Debriyaj disklerinde kullanılan esnek rondelâlar maliyetleri, kullanım ömrü ve kolay tedarik edilebilme gibi özellikleri nedeni ile C67 gibi susuz yay çeliği malzemesi kullanılarak üretilir. Esnek rondelâlarda kullanılan C67 malzemesinin karakteristik gerilim-uzama eğrisi Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Esnek rondelâ kalınlıkları binek araçlarda kullanılan debriyaj diskleri için 0,4-0,8mm, ticari araçlar için 1,5mm'ye kadar değişebilir.



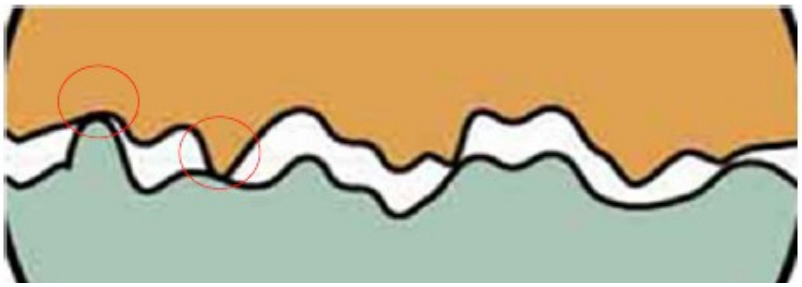
Şekil 3.10. C67S malzeme Gerilim - Uzama eğrisi grafiği (Anonim, 2019)

Farklı malzeme, karakteristik ve kriterler için gerekli olması halinde farklı malzeme seçenekleri de kullanılabilir.

3.2. Metal Rondelâlar, Kaplama Özellikleri ve Histerize Etkileri

Debriyaj diskinde kullanılan metal rondelâların kullanım amacı disk komplesinde kullanılan diğer bileşenler ile sürtünerek sistemin ihtiyaç duyduğu histerisiz değerini elde etmektir.

Genel anlamda elde edilmek istenilen histerisiz değerine bağlı olarak, plastik-metal veya metal-metal sürtünme rondelâları kullanılabilir. Düşük histerisiz değerleri elde edilmek isteniyorsa metal-plastik rondelâları kullanılmalıdır.



Şekil 3.11. Metal - Metal sürtünme yüzey animasyonu (Anonim, 2019)

Yüksek histerisiz elde edilmek istenildiğinde yapılması gereken metal-metal sürtünmesi yaratmaktır. Fakat metallerin yüzeyleri Şekil 3.11'deki görüldüğü gibi düzgün olmadığından histerisiz değerleri belli bir süre için kararsız olup istenilen seviyeden düşük (birbiri ile temas halindeki yüzey alan miktarının az olması nedeni ile) olabilmektedir. Kullanılan rondelâlar metal olduğu için sistemin kararlı hale gelmesi metal-plastik yüzey sürtünmesine göre daha uzun sürmektedir. Bu durum dezavantaj olmak ile birlikte metal-metal sürtünmesi kararlı hale geldikten sonra aşınma miktarlarının az olması nedeni ile daha uzun süre iyi bir kararlılık sağlar. Aynı durum ne yazık ki metal-plastik sürtünmeleri için uzun süreli çalışmalarda dezavantaj olarak ortaya çıkar. Bunun nedeni aşınmaların yüksek olması nedeni ile esnek rondelânın sisteme uyguladığı karşı kuvvetin azalması ve histerisiz değişiminin artmasıdır.

Sistemin oluşturduğu histerisiz değeri aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$H = 2 \times P \times \mu \times Rm \qquad (3.18)$$

H: Histerisiz (Nm)
2 --> Her iki yüzeyden sürtündüğü için
P: Esnek rondelânın uyguladığı yük kuvveti (N)
μ: Sürtünme katsayısı
Rm: Sürtünme alanı efektif yarıçapı (mm)

Sürtünme katsayısının tribolojik faktörlerden etkilendiğini kabul edersek, histerisize etki eden en önemli parametre ve değişkenlerden bir tanesi de μ sürtünme katsayısıdır. Eğer sürtünme katsayısını değiştirir veya değişimini sabit tutabilirsek istediğimiz sonuçları elde edebiliriz.

Sürtünme katsayısının değişimini minimize ederek sabit değişkenli histerisiz sağlamayı farklı kaplama metotları deneyerek test edebilir ve etkilerini inceleyebiliriz. Metal rondelâlarda kaplama yapmamızın sebebi, yüzeydeki mikro pürüzlülüklerin fazla olması ve sürtünme yüzey alanlarının aşınmalar (parçaların birbirine alışması) nedeni ile

sürekli değişkenlik gösterme davranışını incelemektir. Şekil 3.11'de görülen yüzeylerdeki pürüzlü yüzeyleri kaplama malzemeleri ile doldurmak ve ilk andan itibaren olabildiğince sabit bir histerisiz değeri elde etmektir.

Genel anlamda maliyetler nedeni ile fosfat bazlı kaplama metotları uygulanmaktadır. Çalışma için aşağıdaki belirtilen kaplama metotları ile üretilen parçalar kullanılacak olup histerisize etkileri incelenecektir.

- Alkali Çinko Fosfat
- Nikel Kaplama
- Titanyum Nitrür
- Nitrürleme (Nitrür Kaplama)

3.2.1. Alkali Çinko Fosfat Kaplama

Çinko fosfat kaplama (fosfatlama) işleminin genelde yapılmasının nedeni korozyon direncini arttırmaktır. Yapılan işlem fosfat asitli ve çinko iyonlu bir ortamda uygun sıcaklık ve sürelerde bekletilerek yüzeyinde karmaşık kristal tabakasının oluşturulması işlemidir. Debriyaj diski parçaları küçük parçalar olduğu için daldırma işlemi ile kaplama yapılmakta olup kaplama kalınlıkları 5µ ile 10µ aralığında değişmektedir. Fakat kristal yapısı nedeni ile uygulanan kaplama kalınlığı sağlıklı şekilde ölçülemez. Hesaplamalarda da kaplama kalınlığı dikkate alınmaz. (Anonim, 2016)

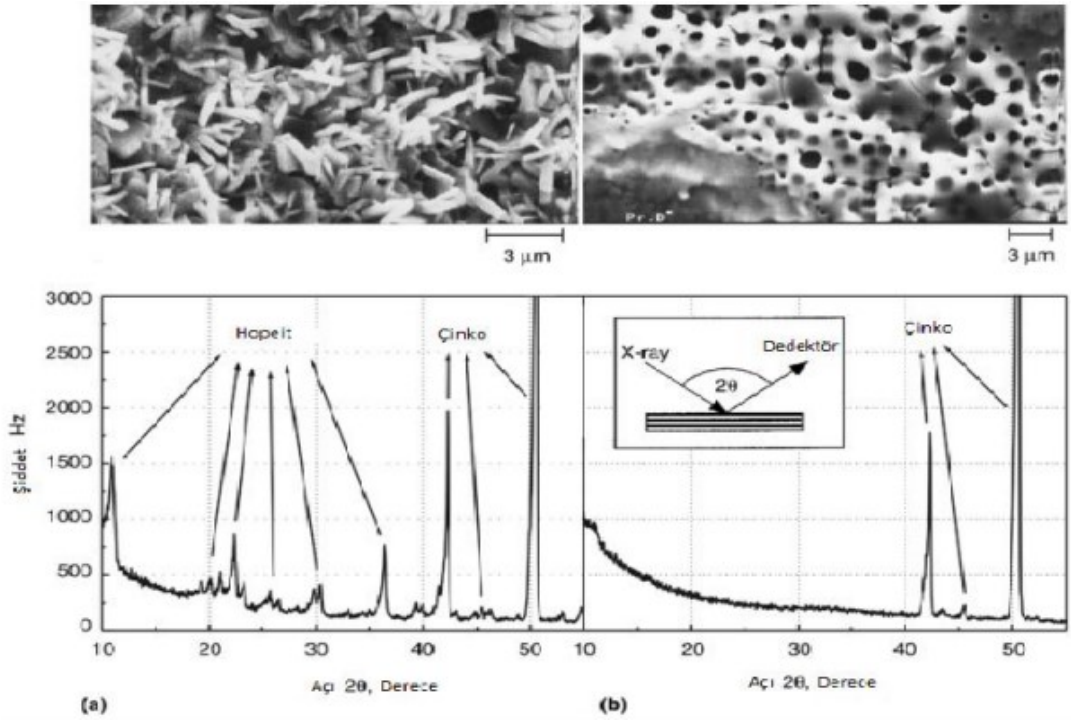
$$3Me(H_2PO_4)_2 + 2Fe \text{ ---------- } \underline{Me_3(PO_4)_2\,(k)} + 2Fe(H_2PO_4)2 + 2H_2 \qquad (3.19)$$

Me harfi demir, çinko veya mangan yerine geçebilir. Proseste, metal fosfat çökelirken demir fosfat asidi çözeltide kalır ve hidrojen gazı açığa çıkar. (Anonim, 2016)

$Fe^{+2} + PO_4^{-2} + NO_2^{-} + 2H^{+}$ --> $FePO_4 + 2H^{+} + NO + H_2O$ reaksiyonuyla çöken (FePO4) çamurunun temizlenmesi için banyo boşaltılır. (Anonim, 2016)

Toplam Reaksiyon: $Fe + 3Zn^{+2} + 2H_2PO_4^- + 2H^+ + 1/2O_2 + 4H_2O \rightarrow Zn_3(PO_4)_2.4H_2O + Fe^{+2} + 4H^+ + H_2O$ olarak gerçekleşir ve bu aşamadan sonra parçalar yıkanıp son aşamaya geçilir. (Anonim, 2016)

Son işlem 5 dk. süre ile 60±5°C sıcaklıktaki banyoda uygulanır. Banyonun pH'ı 3-5 olmalıdır. Bu aşamadan sonra parçalar 15-20 dk. gibi bekletilir ve süreç tamamlandığında fosfat kaplama yapılmış parçalar koyu gri rengini alır. (Anonim, 2016)



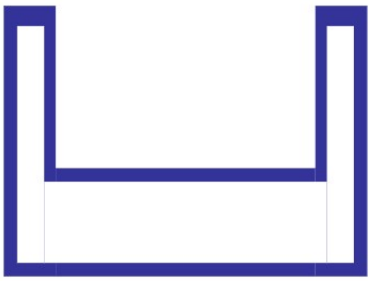
Şekil 3.12. Fosfat kaplamalarda görülen fosfat bileşimleri ve kristal yapı görünümü (Anonim, 2016)

3.2.2. Nikel Kaplama

Metal kompozanların kaplanmasında elektrolizsiz (akımsız) nikel kaplama yöntemi ile kaplama yapılan parçalar kullanılarak histerisiz değişimine etkisi incelenecektir.

Akımsız nikel kaplama metodunun kullanılmasının sebebi Şekil 3.13'de temsili olarak gösterilen çizimdeki gibi kaplama kalınlığının parçanın her yerinde istenilen seviyelerde

ve eşit miktarda dağılım sağlamış olmasıdır. Debriyaj diskinde kullanılan komponentlerde nikel kaplama kalınlıkları genel olarak 5-10 µm aralığında değişmektedir. (Anonim, 2016)



Şekil 3.13. Akımsız Nikel kaplama kalınlığı eşit dağılım gösterimi (Anonim, 2016)

Nikel kaplamanın kullanılmasındaki amaç, çok iyi korozyon direnci ve aşınmaya karşı yüksek seviyede dirençli olmasıdır. Aynı zamanda nikel özelliğinden dolayı malzeme yüzeyindeki sertlik değeri de bir miktar artış göstermektedir. Sertlik artışı metal rondelâların mekanik darbelere karşı dayanımını arttırmaktadır. Fakat kaplama kalınlığına dikkat edilmelidir. Eğer kaplama kalınlığı çok fazla olursa metal rondelânın yüzey sertliği gereğinden fazla artabilir ve bu durum ürün mekanik dayanımına negatif etki edebilir.

Nikel kaplamanın dezavantaj sayılacak bir özelliği de, yapılan kaplamanın özelliği nedeniyle sürtünme katsayısının düşük olması ve histerisiz değerlerinin istenilen limit değerlerin altında kalması riskini oluşturmasıdır.

Kaplamanın metal iyon redüklenmesi olayı;

M^{n+} ne ----------->M (redüksiyon metalin açığa çıkması (3.20)

bir başka iyonun oksitlenmesi

R^{2+}---------> $R^{(z+n)}$ + ne (oksidasyon) (3.21)

Şeklinde toplam reaksiyon;

$$M^{n+} + R^{z} \text{ ----------} > R^{(z+n)} + M \quad (3.22)$$

şeklinde ifade edilir.

(3.20) ve (3.21) kısmi, (3.22) toplam reaksiyonu basit bir şekilde ifade eder.

Kaplama olarak, en çok kullanılan redükleyici yöntem olan "**sodyum-hipofosfit**" yöntemi ile kaplama yapılacak olup kimyasal bileşimi $NaH_2PO_2.H_2O$ olarak ifade edilir. (Anonim, 2016)

3.2.3. Titanyum Nitrür Kaplama

Titanyum nitrür malzemelerin aşınma direncini arttırmak amaçlı kullanılan düşük aşınma ve sürtünme özelliğine sahip yüksek korozyon dirençli bir kaplamadır. Kaplama yapıldığı metalin tribolojik özellikleri geliştirmek amacı ile kullanılmaktadır. Çok büyük bir kullanım alanına sahiptir. Altın sarısı rengi nedeni ile dekoratif süs amaçlı eşyalarda da geniş bir kullanım alanı mevcuttur. Debriyaj diski metal rondelâlarında kullanılmasının amacı, aşınmaya karşı yüksek direnç özelliğinin histerisiz değişimi üzerindeki etkisini incelemektir.

Genel olarak, fiziksel buhar biriktirme (FBB), kimyasal buhar biriktirme (KBB), iyon aşılama, termo kimyasal nitrasyon ve reaktif termal sprey yöntemleri ile üretilmektedir. Termodinamik anlamda kararlı bir yapıya sahip olan Titanyum Nitrür oksijen ve hava ile temasa geçerek aşağıdaki şekilde oksitlenme reaksiyonunu oluşturur.

$$TiN + O_2 \text{ --> } TiO_2 + 1/\ 2N_2 \quad (3.23)$$

Titanyum nitrür kaplama, fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle katodik ark kullanılarak geliştirilmiştir. Kaplama öncesinde ultrasonik ve alkolle temizleme işlemlerinden sonra -1000V'da iyon bombardımanı uygulanmıştır. İyon bombardıman işlemi 5 dakikadan kısa bir sürede 10^{-5} Torr (mmHg) basınçta vakum ortamında gerçekleşmiştir. Kaplama kalınlığı 2-5µm aralığında yapılmaktadır. Kaplama parametreleri Çizelge 3.2'de

verilmiştir. Sürtünme katsayısı 0,6, yüzey pürüzlülüğü Ra 0,2µm seviyelerinde ölçülmektedir. (Anonim, 2016)

Çizelge 3.2. Kaplama parametreleri

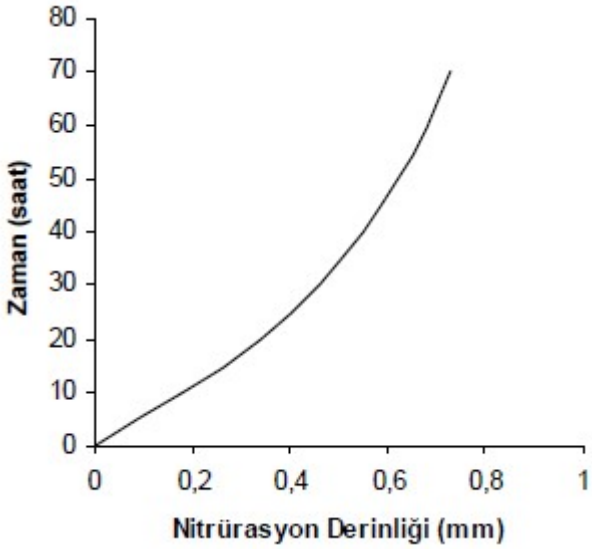
Yöntem	PDV Katodik Ark
Katot Sayısı	3 Ad Titanyum (99,6 Saf)
Bias	-200 V
Katot Akımı	55 A
Kaplama Sıcaklığı	450 - 500 °C
Azot Gazı Basıncı	$4x10^{-3}$ Torr (mmHg)
Kaplama Süresi	90 dk.

3.2.4. Nitrürleme (Nitrür Kaplama)

Malzemede istenilen derinliğe kadar sertlik sağlayan ve bunun yanında malzemenin esneklik özelliğini bozmayan kaplama yöntemlerinden bir tanesidir. Kaplama yapılan metal malzemeye kazandırdığı özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir. (Özdemir & Erten, 2003)

- Yüksek yüzey sertliği ve aşınma direnci,
- Temperlemeye karşı yüksek direnç ve yüksek sıcaklık sertliği,
- Paslanmaz olmayan çelikler için iyileşmiş korozyon direnci,
- Diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine göre yüksek boyutsal kararlılık,

Difüzyon yöntemi ile karbona göre atom yarıçapı daha düşük olan azot verilerek malzeme yapısına nüfuz ettirilmesidir. Yüksek alaşımlı çelikler hariç azot emdirmesi ferritik yapıda yapılır. Malzeme yapısı dikkate alınarak prosesin doğru belirlenmesi gerekir aksi halde işlem yapılan parçanın kırılganlığı artabilir. Şekil 3.14'te verilen grafiğe göre aynı sıcaklıklarda bekleme sürelerine göre nitrürleme derinliği artmaktadır. Fakat bekleme süresine bağlı olarak kırılganlık ve yüzey sertliğindeki değişim miktarlarına dikkat edilmelidir. (Özdemir & Erten, 2003)



Şekil 3.14. Zamana bağlı olarak nitrürasyon derinliği (Özdemir & Erten, 2003)

Gaz, banyo ve iyon olmak üzere farklı nitrürleme yöntemleri vardır. Kaplama yapılan parçanın kullanım yeri ve durumuna göre uygun yöntem seçimi yapılmalıdır.

Tez çalışmasında kullanılan metal rondelâlara, banyoya daldırma metodu ile kaplama yapılmıştır. Bu yöntemde 500^{o}C gibi düşük sıcaklıklarda daha yüksek sıcaklık ve düşük seviyedeki nüfuz derinliklerine daha kısa sürede ulaşabilmektedir. En büyük dezavantajı, çabuk ısınması nedeni ile işlem sırasında parçada deformasyon oluşturabilmesi ihtimalidir. Genelde nitrürleme 500-580^{o}C'de ve 2 saatlik proses süresi ile uygulanır. Yüksek seviyede gerilme olmasını engellemek için genelde 80^{o}C'deki banyolarda ani olarak soğutulur veya ortam sıcaklığında yavaş soğumaya terk edilir.

3.3. Histerisiz ve Etkilerinin İncelenmesi

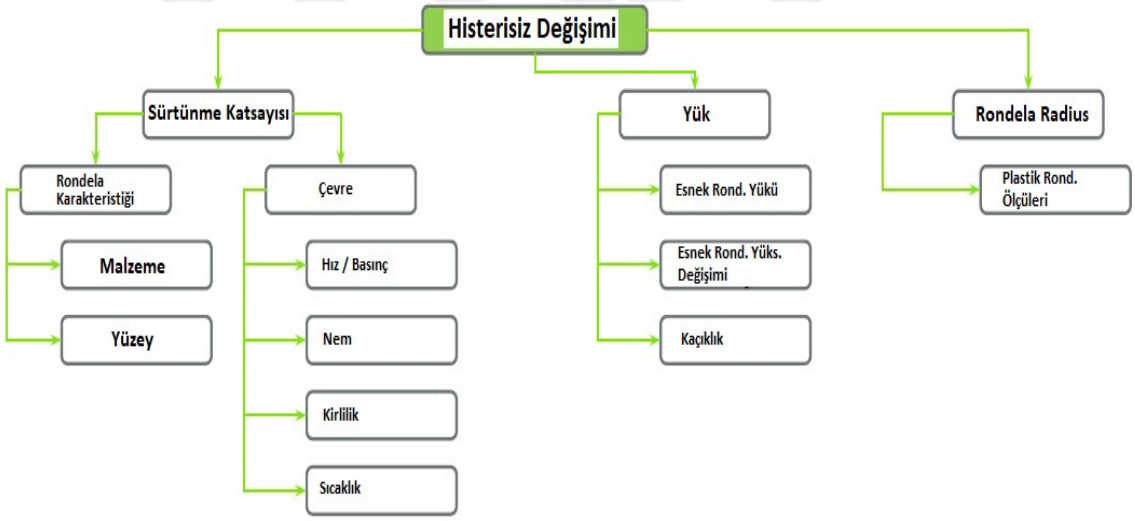
Histerisiz, debriyaj diskinin açısal hareketi esnasında ulaştığı noktadan başlangıç noktasına dönerken oluşan sürtünme kaynaklı tork kayıpları olarak tanımlanır. Nm/° birimi ile gösterilir.

Histerisize etki eden parametreler, malzeme, çalışma koşulları ve ortam koşullarına bağlı olarak değişir. Çok fazla etken olması nedeni ile bu etkenlerden sadece metal

malzemelerin kaplama kalınlığı (yüzey kalitesi ve sürtünme kaynaklı etkileri) ve esnek rondelâdaki yük kaybı parametreleri incelenecektir.

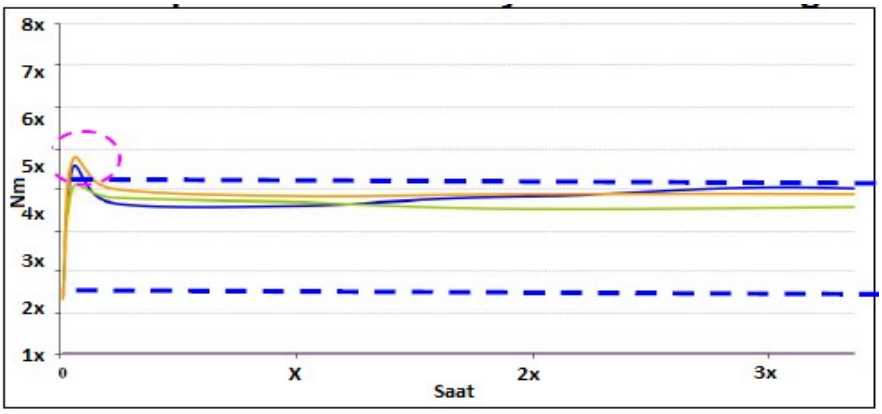
Histerisiz değerinin optimum seviyede olması, motordan gelen titreşimleri engelleyerek dişli kutusuna daha az titreşim aktarmayı ve ortaya çıkan gürültüyü azaltmayı garanti eder. Optimum değerin belirlenmesi, öncelikli olarak teorik hesaplama formülleri ve daha sonra araç üzerine prototip şartlarda üretilen minimum ve maksimum sınır şartlarında parçaların test (NVH) edilmesi ile belirlenir.

Elde edilmek istenilen histerisiz değerine göre yüzey sürtünmeleri metal-metal ve metal-plastik olabilir. Genel olarak, dizel yakıtlı araçlarda histerisiz seviyesi 3 veya 4, benzin yakıtlı araçlarda ise 0-1 veya 2 olabilir. Dizel yakıtlı araçlarda, daha fazla sönümleme ihtiyacı duyulmasının sebebi motordaki yanma olayı nedeni ile ortaya çıkan düzensiz titreşimlerin krank mili ile dişli kutusuna aktarılmasının istenmesidir.



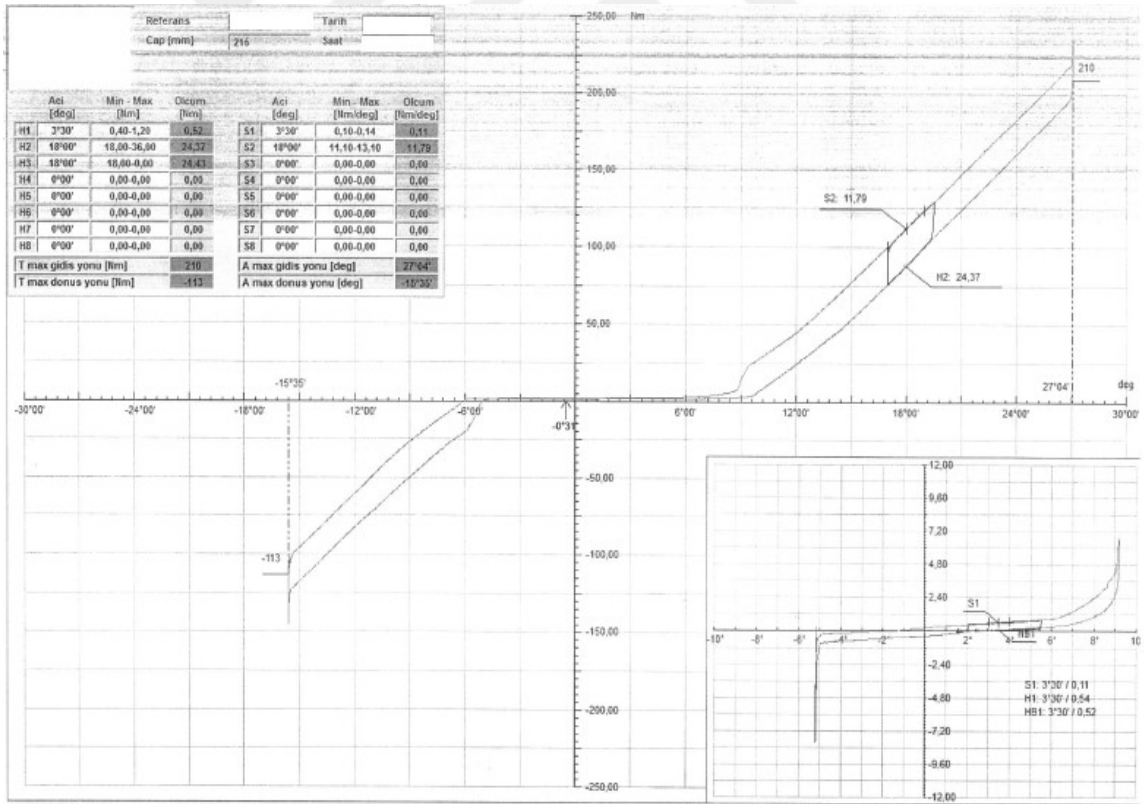
Şekil 3.15. Histerisiz değişimine etki eden parametreler (Anonim, 2018)

Şekil 3.15'teki etkilerden esnek rondelâ ile alakalı olan yük değişimi (yük, yükseklik değişimi) ve sürtünme katsayısına etki eden yüzey kalitesi özellikleri incelenecektir. Çevre ve plastik rondelâ etkileri ile alakalı bir çalışma yapılmayacak olup yapılan çalışmalar sonucunda sonuca etki eden değişiklikler olursa raporda belirtilecektir.



Şekil 3.16. Metal-metal sürtünmeli debriyaj diski teorik histerisiz değişimi grafiği (Anonim, 2018)

Şekil 3.16'daki başlangıç aşamasındaki histerisiz değerinin yüksek olmasının sebebi μ sürtünme katsayısının henüz stabil olmamış olması (Şekil 3.11) ve esnek rondelanın yük değişimlerinin durmamış olmasıdır.



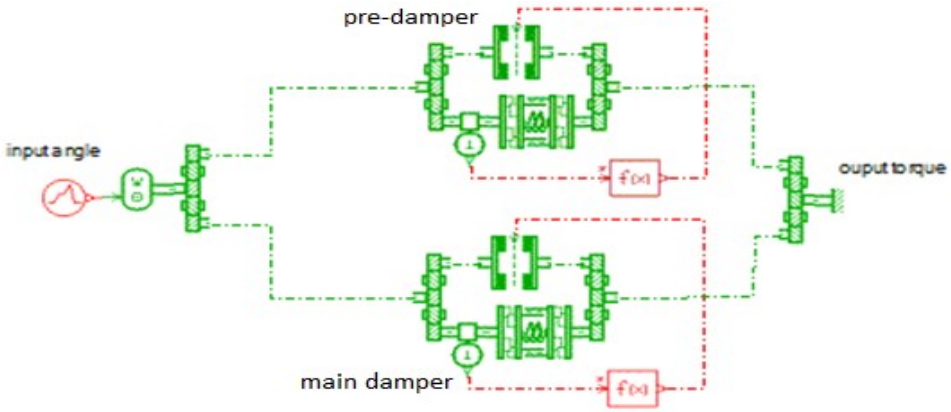
Şekil 3.17. Debriyaj diski histerisiz grafiği (Anonim, 2018)

Şekil 3.17'de çalışma yapılacak ürünün stabilizasyon işlemi sonrasına ait histerisiz eğrisi görülmektedir. X ekseni açısal hareketi (°), Y ekseni tork değerini (Nm) tanımlamakta kullanılır. Grafikte H_1,H_2,H_3 radyal hareket esnasındaki tork iletim kaybını (Nm) ifade eder. S_1, S_2, S_3 yay sabiti katsayısını ifade eder ve birimi Nm/°'dir.

Y ekseninin sağ tarafı, aracın sürüşü esnasındaki ivmelenme durumundaki açısal tork değeri ve histerisiz değişimini, sol tarafı frenleme esnasındaki açısal tork iletimi ve histerisiz değişimini ifade eder. Araç üreticilerine göre eğrinin sol ve sağ tarafındaki açısal hareket ve histerisiz değerleri aynı olabileceği gibi farklı da olabilir. Genel itibariyle, ivmelenme tarafındaki açısal hareket ve tork iletim kapasitesi ivmelenme nedeni ile frenleme tarafına eşit veya daha büyük olur. Şekil 3.17'de, grafikteki sağ alt köşedeki grafik aracın rölantili çalışma esnasındaki titreşimleri sönümlemesine ait histerisiz ve açısal tork değişimini göstermektedir.

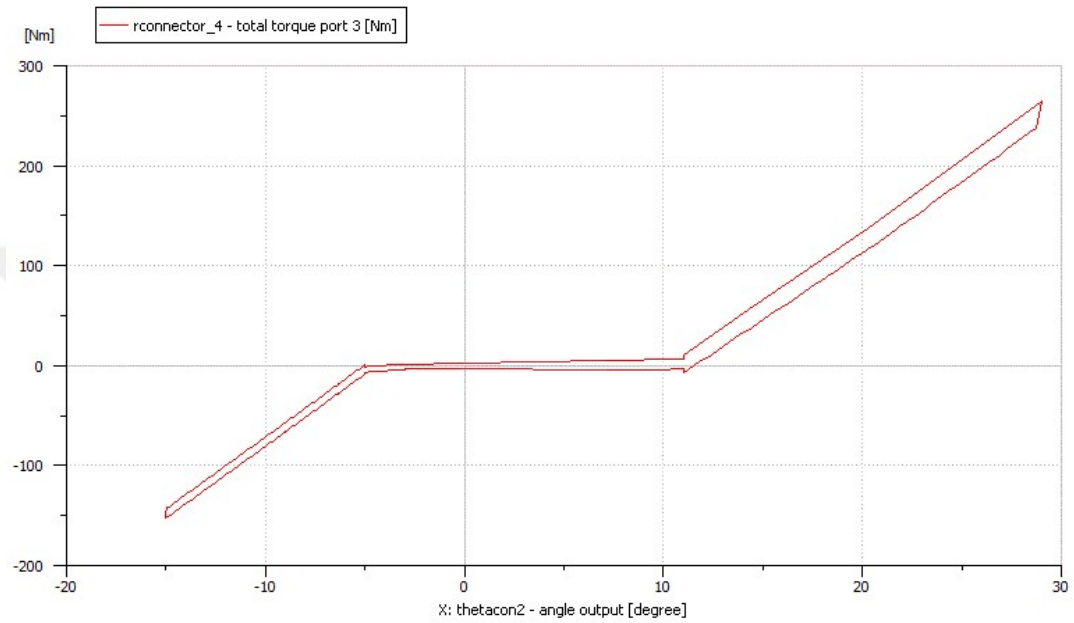
Grafikteki her bir kırılım yay sabitinin değiştiğini ve farklı bir titreşim sönümleme seviyesine geçtiğini gösterir. Çalışma yapılacak üründe 1 adet kırık vardır. Bunun anlamı 2 farklı yay sabiti (2 farklı tip yay kullanımı) demektir. Eğri analiz edildiğinde rölantide çalışma için birincil yay grubu ve aracın ivmelenme esnasındaki titreşimleri sönümlemek için ikincil bir yay grubu olduğunu anlaşılır. Eğrideki kırılma sayısının 1 olması aracın benzinli bir motor olduğunu ifade eder.

3.4. Debriyaj Diskinin Modellenmesi



Şekil 3.18. AMESim 1D damper modeli

Debriyajın matematiksel modeli, yay rijitliği ve hedeflenen histerisiz tolerans değerleri girilerek AMESim programında oluşturulmuştur. Sistem girdi verilerine göre Şekil 3.18'deki grafik çıktısı elde edilmiştir. Debriyaj diski, 1 adet ön-amortisör grubu ve 1 adet ana amortisör grubu olarak tanımlanmıştır. (Şekil 3.18)



Şekil 3.19. AMESim nominal histerisiz grafik eğrisi

Şekil 3.19'da AMESim programında matematiksel modellemesi yapılmış olan damperin nominal durumlardaki histerisiz eğrisi gözlemlenmektedir. Histerisiz değeri değiştiği takdirde gidiş-geliş eğrileri arasındaki fark azalır veya artar. Yapılan çalışmada yay rijitliği değeri sabit kabul edilip sadece histerisiz değerinin değişimi gözlemlenmiştir.

Debriyaj diskinin sürtünme ve kütle değerleri sisteme tanımlanıp dönen bir kütleyi temsil eden diğer parçadaki sürtünme değerleri ihmal edilmiştir. Sadece kütle değişkenlerinin sistemde neden olduğu değişiklikler dikkate alınmıştır. Aynı zamanda dönen kütlelerde atalet momentinin de incelenmesi gereklidir. Çünkü atalet momenti bir kütlenin ivmeye direnme eğilimini ifade eder. Yani duran veya hareket eden bir cismin durumunu korumaya karşı olan dirençtir. Atalet arttırılır ise sistemin rezonansı düşer ve dolayısı ile titreşim problemlerinde bu seçenekte değerlendirilebilir.

3.5. Debriyajda Tork İletimi

$$T = N * fs * F * Rm \quad (3.24)$$

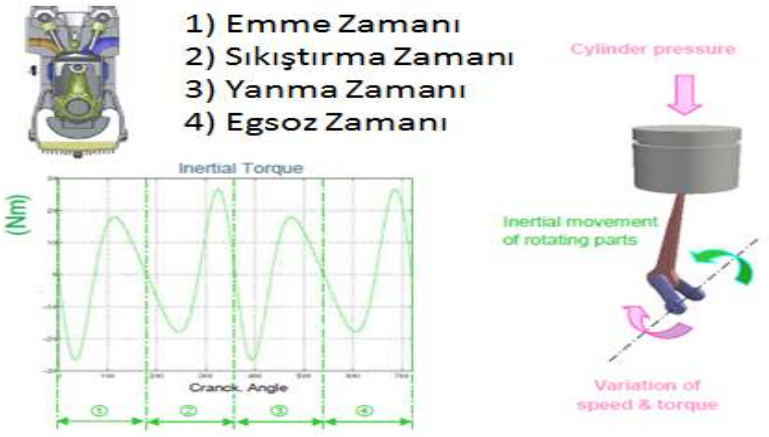
formülü ile tanımlanmıştır.

Denklemdeki terimlerin anlamları;
T = İletilen Tork Değeri (Nm)
fs = Sürtünme katsayısı
F = Tahrik kuvveti (N)
N = Sürtünme yüzey sayısı
Rm = İletim yapılan ortalama çap (mm)

Debriyaj diski, krank milinden gelen torku volan ve baskı plakası arasındaki sürtünme kuvveti ile iletir. Baskı plakasında bulunan diyafram yayına uygulanan kuvvet ile baskı plakasının eksenel hareket verilir ve bunun sonucunda vites değiştirme işlemi için motor ve güç aktarım sistemi birbirinden ayrılmış olur.

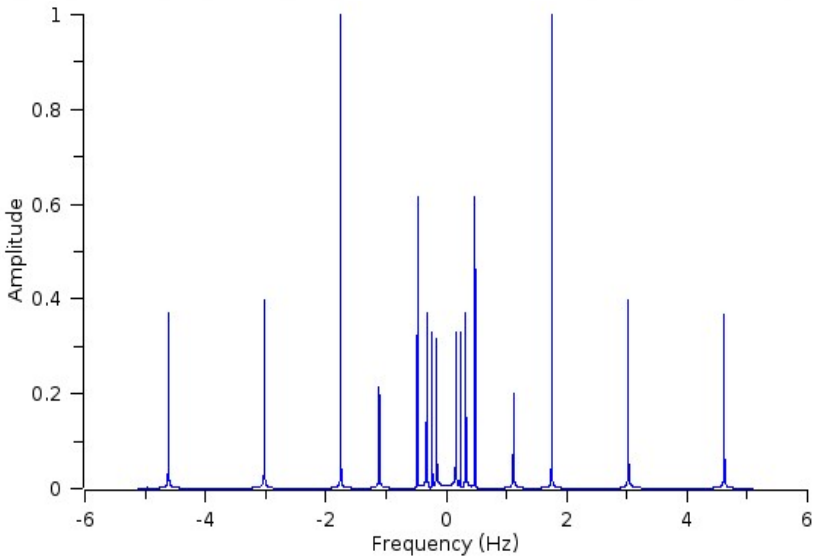
3.6.Titreşim

Titreşim, bir denge noktası etrafındaki mekanik salınım olarak tanımlanır. Araçta titreşimlerin yüksek olması halinde araç mekanik sisteminde deformasyon ve zararlara, kullanıcılar açısından da gürültü ve konforsuzluk olarak yansır. Motorda krankın döndürülmesi için silindirlerde belli bir sıra ile meydana gelen patlamalar araçta düzenli sinüzoidal titreşimler meydana getirir. Örnek olarak, Şekil 3.20'de dört zamanlı bir motorun genel çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Dört zamanlı motor çalışma prensibi (Anonim, 2013)

Sistem titreşimlerinin dinamik analizinin yapılması için zamana bağlı titreşimler frekans düzeyinde incelenir. Zamana bağlı titreşimler FFT yöntemi ile (Fast Foruier Transformation) zaman düzeyinden frekans düzeyine dönüştürülür. Şekil 3.21'de de görüleceği üzere, FFT yönteminde karışık sinyaller ayrıştırılarak, bu sinyaller içinde harmonik olanlar belirlenip harmonik bileşenlerine ayrılır.



Şekil 3.21. FFT yöntemi ile alınan titreşim sinyalleri (Anonim, 2014)

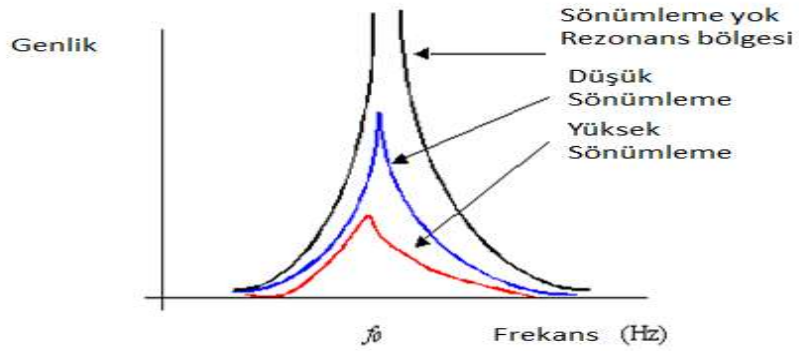
3.6.1. Doğal Frekans ve Rezonans

Bir sistemin serbest titreşim frekansına doğal frekans denir ve tamamen sistemin kendi parametreleri (esneklik ve kütlesi) ile belirlenir. Bir cisim veya sistemin doğal frekanslar ile çakışan frekanslarda uyarılması ile oluşan olaya da rezonans denmektedir. Rezonansa giren bir sistem aşırı bir şekilde titreşir.

Dinamik bir kuvvet etkisinde zorlanmış titreşimler yapan bir yapının doğal frekansı ile zorlamanın frekansının eşit olması durumunda ise yapının titreşim genliği artma eğilimine girer. Bu genlik artışı sistemin düzgün çalışmasını engellediği gibi, onun hasara uğramasına da neden olur. Bu nedenle rezonans bölgelerinde titreşimleri azaltmak amacıyla enerjiyi sönümleyen elemanlar bulunur.

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{3.25}$$

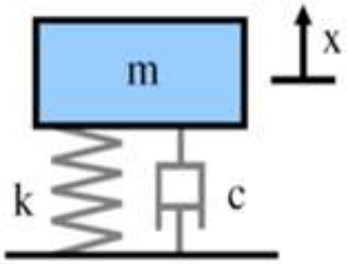
Denklemdeki terimlerin anlamları;
f = Frekans (Hz)
k = Rijitlik (N/mm)
m = kütle (kg)
Formülden anlaşılacağı gibi sistemin doğal frekansını değiştirmek istiyorsak ya sistemin sahip olduğu rijitlik (esneklik) değerini ya da kütlesini değiştirmemiz gerekir. Sistemin doğal frekansı ve zorlanma frekansı birbirine eşit olur ise titreşim genlikleri bu frekansta artacak ve rezonansın oluşmasına neden olacaktır. Sönümleme oranlarının karşılaştırmaları Şekil 3.22'de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Sönümleme oranı karşılaştırma grafiği

3.6.2. Sönümleme

Sönümleme, sistemin genliğini veya titreşimini azaltmak, sınırlamak veya sıfıra indirilmesi olayıdır. Sönümleme sayesinde mekanik titreşim genliğinde zamanla değişimler meydana gelir. Örnek olarak Şekil 3.23'de görülen kütle, yay ve sönüm elemanı modelini gösterebiliriz.



Şekil 3.23. Sönümlü titreşim

Kütle üzerindeki kuvvetler toplandığında denklem aşağıdaki gibidir.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \tag{3.26}$$

Sistemdeki sönümü tanımlamak için ''sönüm oranı'' denen bir oran kullanılır. Bu oran sistemdeki gerçek sönümün kritik sönüme oranıdır.

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \tag{3.27}$$

Denklemdeki terimlerin anlamları;

c = Sönümleme katsayısı (N * s / m)

k = Rijitlik katsayısı (N / mm)

m = Kütle (Kg)

Sistem sönüm oranına göre aşırı sönümlü, kritik sönümlü ve sönüm altında olarak üçe ayrılır.

1) Aşırı Sönümlü: ζ = % kritik sönüm oranı > 1

Bu durumda sistemde titreşim olmaz.

2) Kritik sönüm: ζ = % kritik sönüm oranı = 1

Bu durumda sistem genliğinde bir artış meydana gelmez.

3) Sönüm altında: 1 > ζ = % kritik sönüm oranı > 0

Bu durumda titreşim genlikleri zamanla azalan bir grafik gösterir.

Doğal frekans sönüme uğradıkça düşer. Kritik sönüm oranı ile sönümlü doğal frekans arasında aşağıdaki bağlantıyı kurabiliriz.

$$f_d = \sqrt{1 - \zeta^2} f_n \tag{3.28}$$

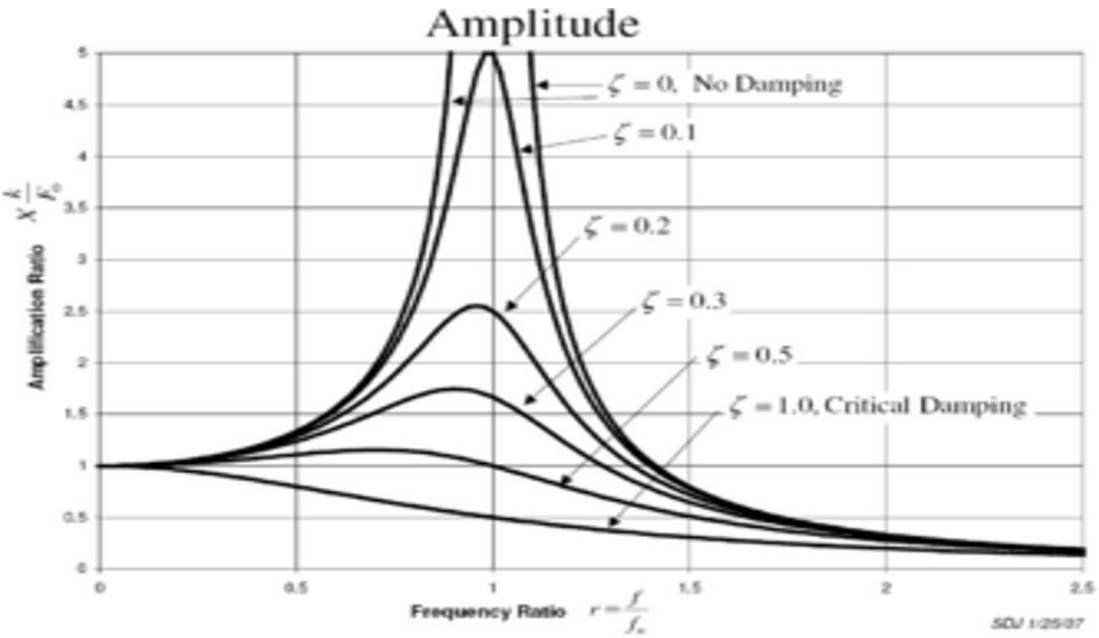
Denklemdeki terimlerin anlamları aşağıdaki gibidir.

f_d = Sönümlü doğal frekans

f_n = Sönümsüz doğal frekans

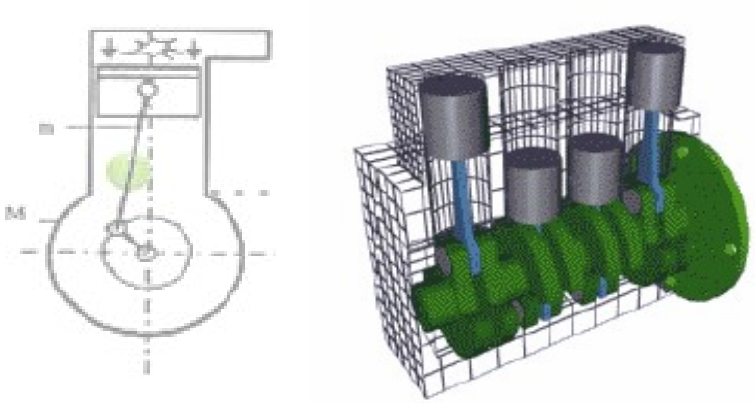
Sönümlü doğal frekansın dinamik sistemlerde kullanımı özellikle mekanik sistemlerin ömürlerini arttırmakta ve bununla bağlantılı olarak maliyetleri azaltmaktadır. Kullanılan ekipman ve/veya sistemlerde titreşim kaynaklı rahatsızlıklar minimize edilmekte veya büyük ölçüde sistemin çalışma frekansı dışındaki değerlere ötelemektedir. Böylece sistemin çalışması için daha güvenli bir bölge oluşturulmuş ve sistemin rezonans

frekansı düşürülmüş olur. Şekil 3.24'te sönümle oranları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Karşılaştırmalı sönümleme oranları

3.6.3. Motor Zorlama Frekansı



Şekil 3.25. Taşıt motoru

Krank milinin bir tam tur dönüşünde silindirlerde meydana gelen patlama sayısının frekans türünden ifadesidir. Şekil 3.25'te görülen 4 zamanlı bir motorda bir çevrim 4 aşamada tamamlanır. Bu aşamalar;

1) Emme Zamanı: Hava ve yakıtın silindirlerin içine emilmesi,
2) Sıkıştırma Zamanı: Yakıt ve havanın sıkıştırılarak tutuşma başlangıcı,.
3) Yanma Zamanı: Yanma olayı ve pistonun aşağı itilmesi,
4) Egzoz Zamanı: Yanmış gazların egzoz sistemi ile dışarı atılması

Benzinli ve dizel motorlarda fark olarak; Benzinli motorlarda sıkışmış karışım bir kıvılcım ile tutuşturulur. Dizel motorlarda ise yüksek basınç ve sıcaklık altında kendiliğinden tutuşur ve yanma gerçekleşir. Patlama sayısı motorun silindir sayısına bağlı olarak değişkenlik gösterir. 4 silindirli bir motorda bir turda 2 silindirde patlama olurken, 6 silindirli motorda bir turda 3 silindirde patlama olur.

Motorun zorlama frekansı formülü aşağıdaki gibidir.

$$F = rpm/60 \tag{3.29}$$

Denklemdeki terimlerin anlamları aşağıdadır.
F = Krankın saniyedeki dönüş miktarı (Hz)
rpm = Motorun 1 dakikadaki devri (Revolution per Minute). 60'a bölünmesinin sebebi motorun 1 saniyedeki devrini bulabilmektir.

Titreşim analizi yapabilmek için sistemde titreşimi oluşturan motor silindirleri içindeki patlama frekansının bulunması daha önemlidir.

$$Fz = F * Np \tag{3.30}$$

F = Krankın saniyedeki dönüş miktarı,
$Fz =$ Bir saniyede meydana gelen silindirlerdeki patlama sayısı,
Np = Bir turda meydana gelen patlama sayısı

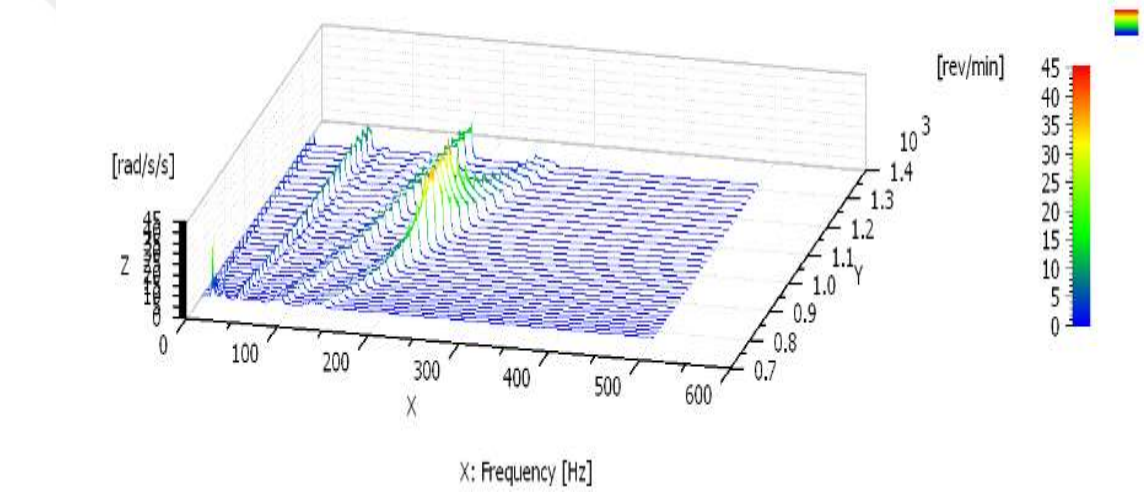
Örnek; 4 zamanlı ve 4 silindirli bir motorun zorlama frekansı;

Motor Hızı = 1200 rpm

F = 1200 / 60 = 20 Hz (Krankın saniyedeki dönüş sayısı)

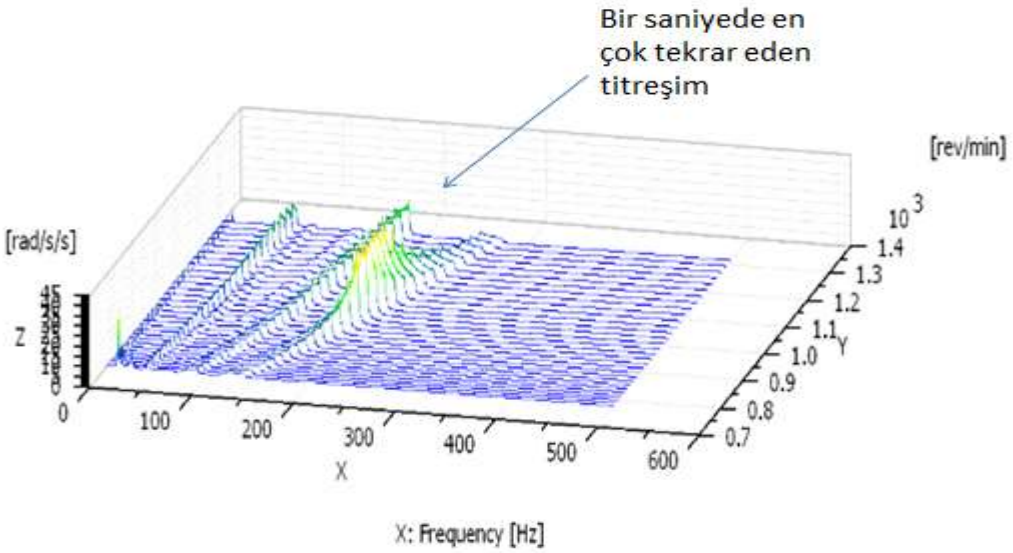
Fz = 20 * 2 = 40 Hz (Bir saniyede motorda gerçekleşen patlama sayısı)

Bu yöntem ile sistemi zorlayan titreşimin frekansı bulunmuş oldu. FFT yöntemi kullanarak motor kaynaklı olan ve olmayan titreşimler ayırt edilebilir. Şekil 3.26'da görülen spektrum haritası motor hızı, frekans ve titreşimin sinyal noktalarını FFT yöntemi ile bulan bu haritada "Order Track" ismi verilen, bir saniyede tekrar eden titreşim sayılarını veren bir seçenek vardır ve sistem titreşim ve gürültü analizlerinde kullanılır.



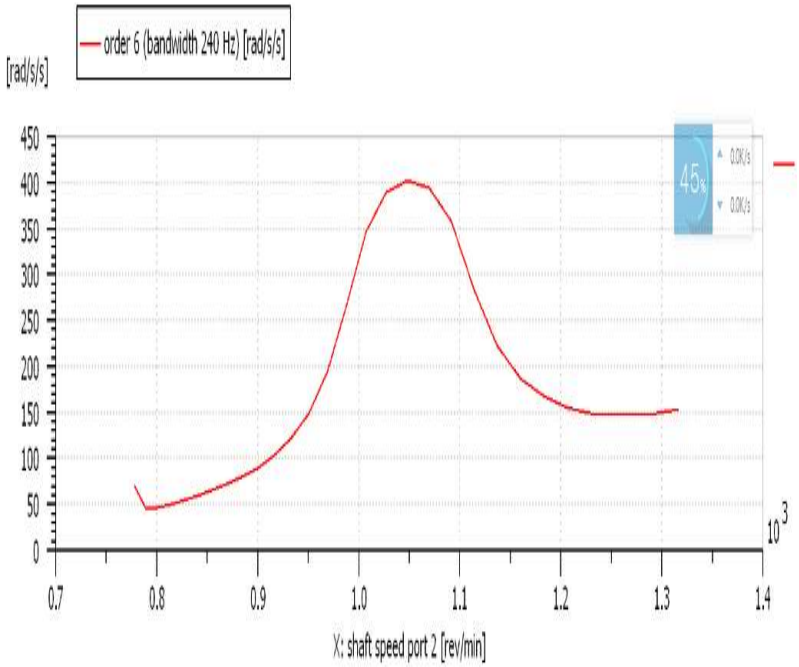
Şekil 3.26. AMESim frekans haritası

Frekans haritasında aracın hızı ile titreşimlerin genliği hakkında fikir sahibi olunur. Şekil 3.27'deki grafikte bir turda tekrar eden titreşim sayıları bulunabilir. Bu sayede sistem parçalarının dinamik davranışları yorumlanabilir.



Şekil 3.27. Harmonik seçimi

Bu yöntemi kullanarak sistemde oluşan arızalar ve gürültüler hakkında çözüm fikirleri oluşturulabilir. Örneğin frekans haritasında olması gerekenden büyük bir titreşim ile karşılaşılırsa, o parçaya direk müdahale ederek istenen titreşim seviyesinde olması sağlanabilir.



Şekil 3.28. Titreşim – RPM grafiği

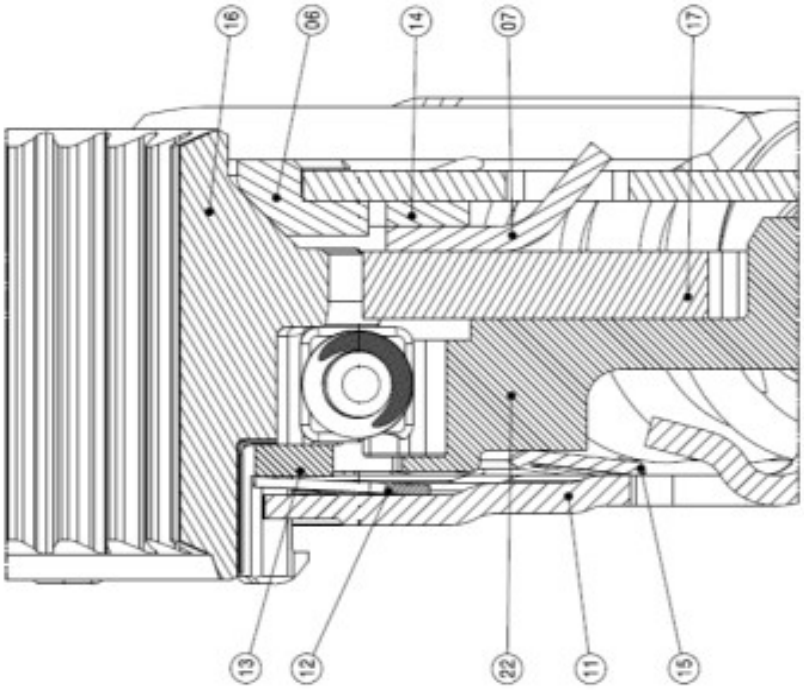
Harmonik analiz ile bulduğumuz değerleri Şekil 3.28'deki gibi program zaman tabanından frekans tabanına çevirerek araç içinde hissedilen değerleri elde ederiz. Bu değerleri program RMS hesabını kullanarak vermektedir. RMS (Root Mean Square) değeri değişen miktarların büyüklüğünün ölçümünde kullanılan istatistik bir ölçüttür. Değişimin artı ve eksi yönde olduğu sinyallerin hesaplanmasında kolaylık sağlamaktadır.

3.7. Histerisiz ve Hesaplanması

Histerisiz, ön-amortisör (damper) histerisizi ve ana amortisör (damper) histerisizi olarak ikiye ayrılır;

* Ön-amortisör (damper) histerisizi: Motorun rölanti durumundaki titreşimlerini sönümlemek ve dişli kutusunda bu frekanslarda oluşabilecek sesleri önlemek amacı ile kullanılır. Motordan gelen titreşimler fazla ise ve/veya daha hassas sönümleme isteniyor ise 2 kademeli ön-amortisörlü histerisiz sistemi kullanılır.
* Ana-amortisör (damper) histerisizi: Değişken motor devirleri ve değişken tork değerlerinde meydana gelen titreşimleri sönümleme amacı ile kullanılan sistemdir.

Proje çalışmaları aşamasında, belirlenen spek aralığı histerisiz değerlerinin doğruluğu özel olarak üretilen prototip parçalarının araç testleri yapılması ile teyit edilir. Eğer araç testleri esnasında herhangi bir titreşim yaşanırsa histerisiz değerleri optimize edilir ve buna göre ürün için yeni spek değerleri tanımlanır. Aynı şekilde ürün seri üretime girdikten sonrada üretilen ürünlerde histerisiz değerinin istenilen spekler aralığında olup olmadığı sürekli kontrol edilir. Her üretim için üretim başlangıcında yapılan kontroller ile garanti altına alınır. Histerisiz değerinin ölçümü için özel üretilmiş ölçüm makineleri vardır ve kontroller bu makineler ile yapılır. Bazı özel durumlar için, müşteriler tedarik ettikleri debriyaj disklerinde histerisiz değerlerinin kararlı olmasını ister ve bunun için her bir parça için özel alıştırma yapılıp üretilen parçalar müşteriye bu şekilde gönderilir. Bu alıştırma işlemi ürün tipine bağlı olarak birkaç dakika ile 1 saat arasında ilave bir stabilizasyon işlemi gerektirebilir.



Şekil 3.29. Debriyaj disk komponent kesiti (Anonim, 2014)

Şekil 3.29'da numaralandırılması yapılmış komponentlerin tanımlamaları aşağıdaki gibidir.

6 Numara --> Konik Palier

7 Numara --> Açılı Tırnaklı Metal Rondelâ

10 Numara --> Dişli tarafı klavuz

11 Numara --> Volan tarafı klavuz

12 Numara --> H1 Esnek Rondelâ

13 Numara --> H1 Plastik Rondelâ

14 Numara --> Tırnaklı Metal Rondelâ

15 Numara --> H2 Esnek Rondelâ

16 Numara --> Göbek

17 Numara --> Kanat

22 Numara --> Plastik Rondelâ

Her bir histerisiz değeri hesabi için histerisize etki eden tüm komponentlerin kalınlıkları ve tolerans değerleri dikkate alınarak esnek rondelâya etki eden yük hesabı yapılır ve buna göre histerisiz değeri hesaplanmış olur. 12 nolu parça H1 histerisizine etki eden

esnek rondelâdır ve hesaplama yaparken bu değere etki eden tüm ölçülerin değerleri tolerans değerleri de dikkate alınarak hesaplanır. H1 Değeri için örnek hesaplama yapılması gerekir ise;

Çizelge 3.3. H1 histerisizi hesaplama tablosu (Anonim, 2014)

Tanım	Nom	Tolerans		+ / -	Aritmetik			İstatistiksel				
		Min	Max		Min	Nom	Max	Ort	±	±nσ	σ^2	%
Volan tarafı klavuzu	8,5	0,1	-0,1	+	8,4	8,5	8,6	8,5	0,1	3	0,001	17
Perçin yüks.	7,9	0,1	-0,07	+	7,83	7,9	8	7,915	0,085	3	8E-04	12
Dişli tarafı klavuzu	1,1	0,1	-0,1	+	1	1,1	1,2	1,1	0,1	3	0,001	17
Plastik rond. kalınlığı	0,45	0,05	-0,05	-	-0,5	-0,45	-0,4	-0,45	0,05	3	3E-04	4
H1 plastik rond-palier arasındaki göbek yüksekliği	14,05	0,1	-0,15	-	-14,2	-14,05	-13,9	-14	0,125	3	0,002	26
H1 plastik rond. kalınlığı	1,9	0,05	-0,05	-	-1,95	-1,9	-1,85	-1,9	0,05	3	3E-04	4
Dişli tarafı klavuz kaçıklığı	0	0,05	-0,05	-	-0,05	0	0,05	0	0,05	3	3E-04	4
Volan tarafı klavuz atıklığı	0	0,1	-0,1	-	-0,1	0	0,1	0	0,1	3	0,001	1,5
Perçin ezme boy kaybı	0,12	0	0	-	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	0	3	0	1,56
Klavuzların açılması	0,25	0	0	+	0,25	0,25	0,25	0,25	0	3	0	0
TOPLAM					0,61	1,23	1,93	1,27	0,66	8	0,007	389

Çizelge 3.3'te kullanılan değerlerin hesaplanması aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

İstatistiksel ortalama = (Aritmetik Min + Aritmetik Max)/2

İstatistiksel ± = (Min Tolerans + Max Tolerans)/2

σ^2 = (İstatistiksel ± / ±nσ)^2

İstatistiksel % = σ^2 / TOPLAM Ort.

Komponentlere ait nominal, minimum/maksimum değerleri tasarımdan gelen komponent teknik resimlerinde tanımlı olan değerlerdir. Benzer çalışma tüm histerisiz değerleri için yapılıp her bir histerisizin teorik değeri bulunur. Metal sürtünme

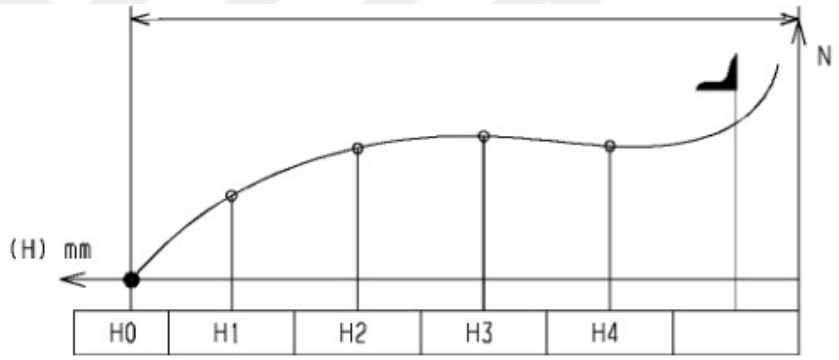
rondelâlarında kullanılacak kaplama çeşitleri farklı olduğu için teorik sürtünme katsayısına bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilebilir. Bu sayede yapılan hesaplama ile gerçek değerlerin tutarlılığı, kaplamanın ve esnek rondelâ yük kaybının histerisiz üzerindeki etkisi net şekilde incelenmiş olacaktır.

4. BULGULAR

Bu bölümde debriyaj diski modellemesi yapılmış, prototip üretimi yapılmış, histerisize etki eden esnek rondelâların test öncesi ve test sonrası yük değişimleri ve metal kaplamalı parçaların histerisiz üzerindeki etkileri incelenmiştir.

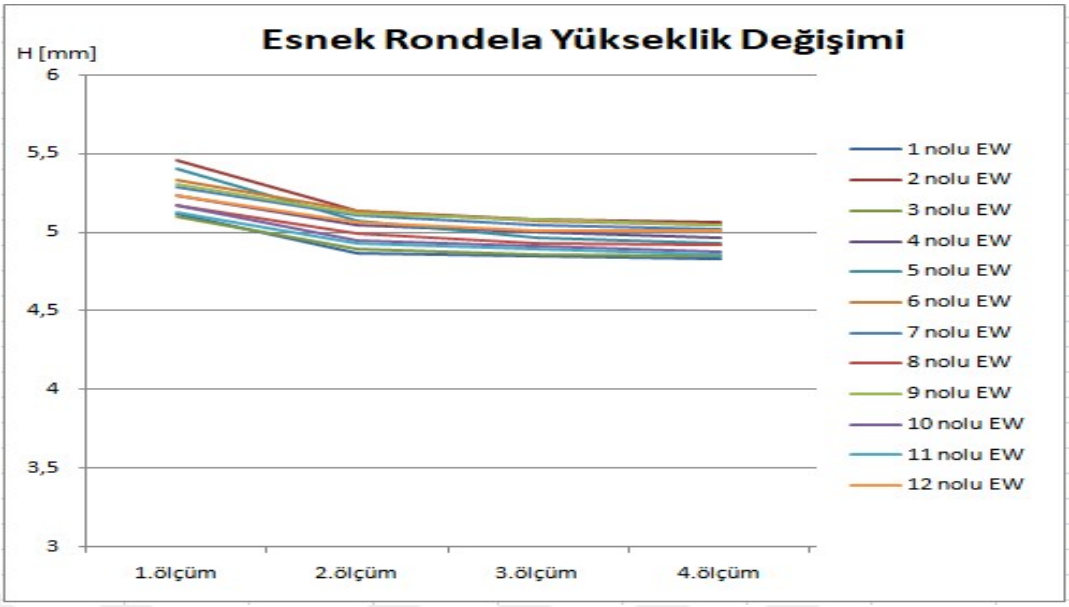
4.1. Test Öncesi Esnek Rondelâ Analizi

Çalışma da kullanılacak H1 ve H2 esnek rondelaları kullanılmadan önce Şekil 4.1'deki eğri modeline göre ölçümleri tanımlı olan yükseklik ve kuvvet uygulama değerlerine sahip olup olmadığı kontrol edilmiştir. Bu ölçümler yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta ölçümlerin tekrarlanarak yük kayıpları olup olmadığı ve var ise yük kayıp değerleri %10'un altına düşene kadar ölçümlere devam edilmesi gerekliliğidir.



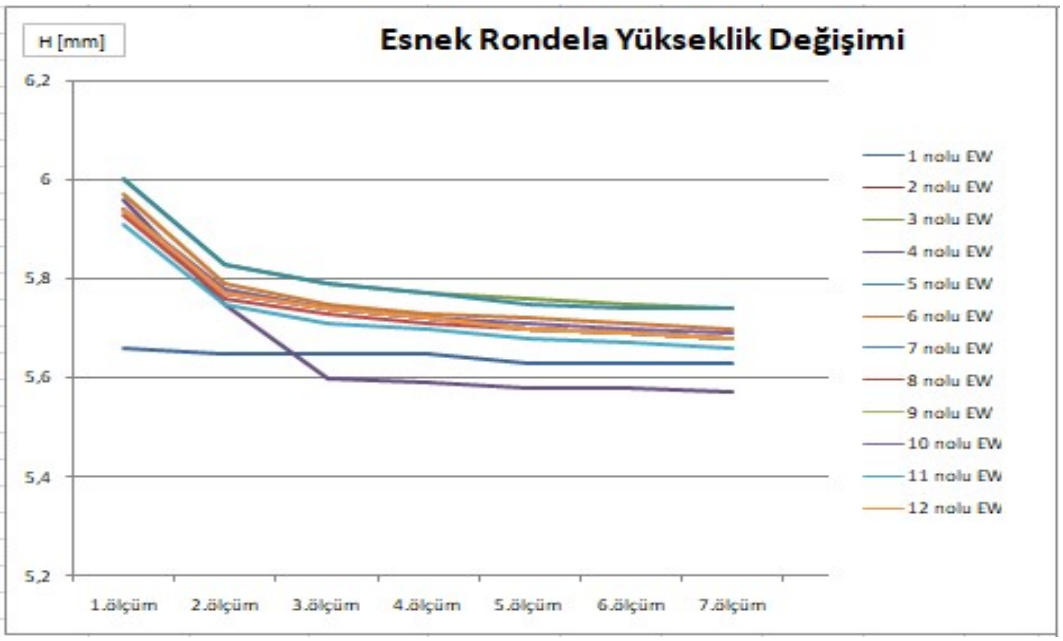
Şekil 4.1. Esnek rondela yük ölçüm eğri modeli (Anonim, 2013)

Şekil 4.2'de testlerde kullanılan 12 adet H1 esnek rondelasının kalınlık değişimi görülmektedir. Grafikten, test öncesi yük ölçümü yapılan parçalarda yaklaşık 0,5 mm'lik bir boy kaybı olduğu ve bu kaybın yaklaşık %10 seviyelerinde olduğu gözlemlenmektedir. En fazla yük düşümü 1. ve 2. ölçümler anında olmuş, 3. ve 4. ölçümler arasında yükseklik değişiminin ciddi seviyede azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2. Test öncesi H1 esnek rondela yükseklik ölçüm değişimi

Şekil 4.3'te H2 esnek rondelasına ait yükseklik değişim grafikleri görülmektedir. H2 esnek rondelâsında 7 defa ölçüm yapılmış ve yükseklik değişimi takip edilmiştir. En fazla yük kaybı H1 esnek rondelâsında olduğu gibi 1. ve 2. ölçümler anında olmuş ve 2. ölçüm sonrasında yükseklik değişimi yatay kalmayıp azalımı 0,1 mm kadar daha olmuştur. 1 ve 4 nolu esnek rondelâlar diğerlerinden farklı davranış sergilemiştir.



Şekil 4.3. Test öncesi H2 esnek rondela yükseklik ölçüm değişimi

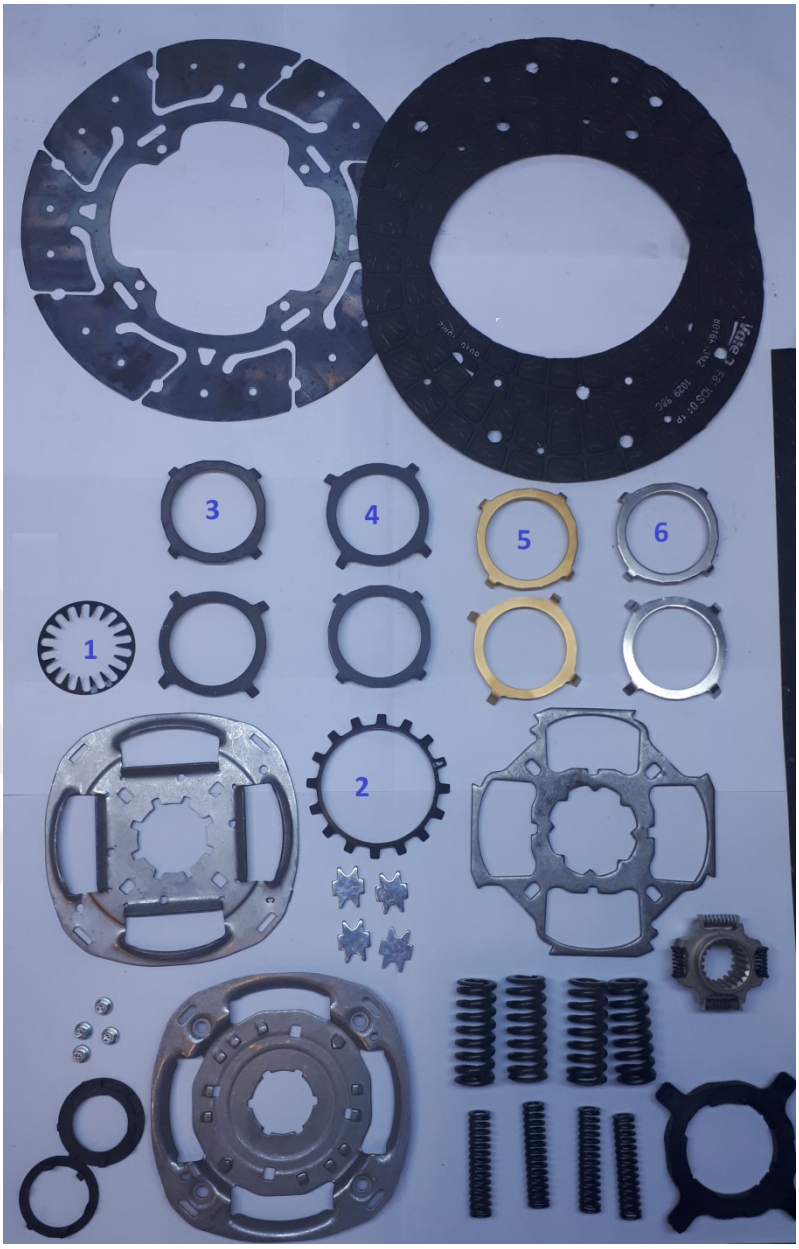
4.2. Prototip Üretimi ve Proses Parametreleri

Bu bölümde, AMESim'de genel modellemesi yapılan debriyaj disk komplesi üretimine ait bilgiler ve çalışmalar değerlendirilmiştir. Esnek rondelâların yük ölçümleri ve prototip üretimine ait proses bilgileri değerlendirilecektir.



Şekil 4.4. 100 Ton H tipi hidrolik prototip debriyaj diski üretim presi

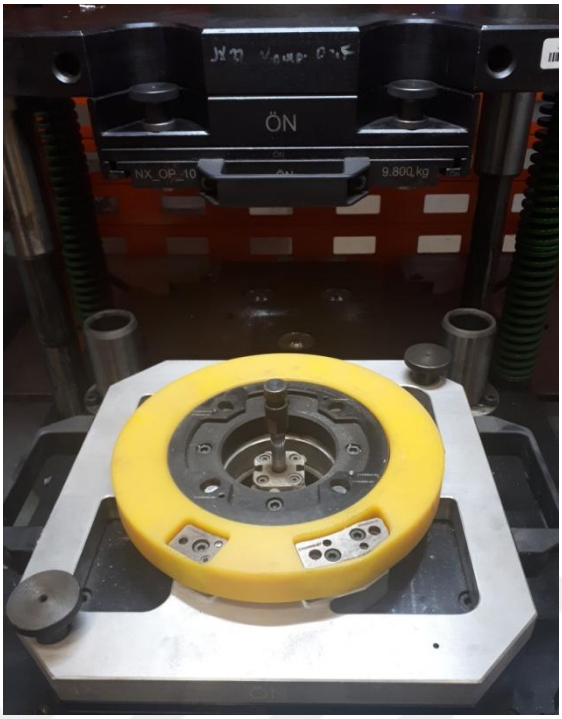
Çalışmada kullanılacak olan tüm debriyaj disk kompleleri Şekil 4.4.'te görseli bulunan 100 Tonluk H tipi hidrolik preste üretilmiştir. Üretim kaynaklı oluşabilecek değişkenlikleri minimize edebilmek amacı ile üretim için aynı pres, aynı proses parametrelerinde kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Debriyaj disk komplesi alt bileşenleri

Üretimi yapılan debriyaj diskine ait tüm alt bileşenler Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Histerisiz çalışmasında, özellikle 1 ve 2 nolu esnek rondelalar ve 3,4,5,6 numaralı farklı kaplama özelliklerine sahip tırnaklı metal rondelaların etkileri incelenecektir.

3 nolu metal tırnaklı rondelâ çifti çinko-fosfat, 4 nolu metal tırnaklı rondelâ çifti nitrürleme, 5 nolu metal tırnaklı rondelâ çifti titanyum nitrür, 6 nolu metal tırnaklı rondelâ çifti nikel kaplama özelliklerine sahiptir.



Şekil 4.6. NX tipi prototip debriyaj diski montaj kalıbı

Tüm debriyaj disk kompleleri gruplandırılarak Şekil 4.6'da görülen montaj kalıbında üretilmiştir. Parçaların üretimine ait proses bilgileri aşağıdaki gibidir ve disklerin her defasında, üretim esnasında aşağıda belirtilen parametreler kullanılarak üretilmiştir.

Çalışma Basıncı 125 bar = 10 Ton kuvvet (Pres katalog değerleri -Şekil 4.7)
Basınç altında ezme süresi = 3s'dir.
Perçin ezme işlemi 100 Ton preste otomatik modda yapılmıştır.



4-20 ton kademesinde çalışma değerleri	
tonaj	basınç (bar)
5 ton	62,5 bar
6 ton	75,0 bar
8 ton	100,0 bar
10 ton	125,0 bar
12 ton	150,0 bar
14 ton	125,0 bar
16 ton	200,0 bar
18 ton	225,0 bar
20 ton	250,0 bar

Basınç değeri bar cinsindendir.

Şekil 4.7. Pres tonaj-basınç eşlemle değer tablosu

Her bir çalışma grubu için 3'er adet ve toplamda 12 adet disk komplesi kullanılmıştır. Toplanan ürünlere ait bilgi Çizelge 4.1'deki tanımlanmıştır.

Çizelge 4.1. Debriyaj diski - esnek rondela - metal rondela eşleştirme tablosu

Disk Numarası	H1 Esnek Rondelâ No	H2 Esnek Rondelâ No	Metal Rondelâ Kaplama Tipi
1	1	1	Titanyum Nitrür
2	2	2	
3	3	3	
4	4	4	Nikel
5	5	5	
6	6	6	
7	7	7	Çinko Fosfat
8	8	8	
9	9	9	
10	10	10	Nitrürleme
11	11	11	
12	12	12	

Çalışma yapılan komponentler dışındaki diğer komponentlerin değişkenliğini ve etkisini minimize edebilmek için kullanılan komponentler değiştirilmemiş ve tüm çalışma boyunca aynı komponentler kullanılmıştır. Bu sayede ürünün çalışma ömrü boyunca oluşacak etkileri gerçek durumdaki gibi simule edilebilmiştir.

4.3. Test Öncesi Histerisiz Eğrisi Analizleri

Prototip şartlarında üretilen 4 farklı kaplama grubuna ait 12 Ad disk komplesi için testlere başlamadan önce H1 ve H2 histerisiz değerleri ölçülmüştür.

Çizelge 4.2'deki parça numaralandırması Çizelge 4.1'de yapılmış olan numaralandırma sıralamasına göre verilmiştir. Test öncesinde değerler incelendiğinde H1 histerisiz

değeri için sadece 8 nolu debriyaj diskinin histerisiz değerinin tolerans dışı olduğu, H2 histerisiz değeri için ise tüm ürünlerde histerisiz değerlerinin limit dışı kaldığı görülmektedir. Kaplama özelliğine göre histerisiz değerinin limitlere olan uzaklık / yakınlık mesafesi değişmektedir. En az fark Titanyum Nitrür kaplama, en fazla fark Nikel kaplamalı metal rondelâların kullanıldığı ürünlerde gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.2. Kaplama özelliğine göre alıştırma öncesi H1 ve H2 histerisiz değerleri

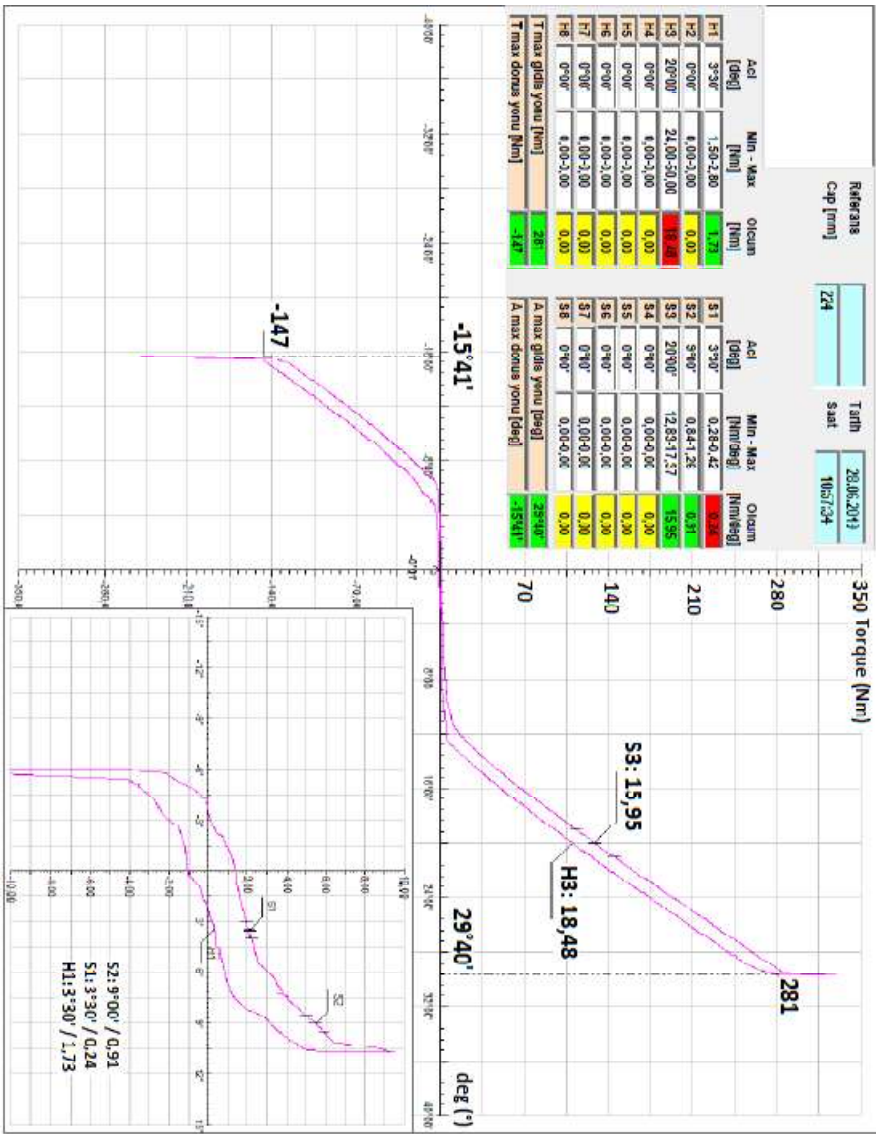
Disk Numarası	H1 Değeri [Nm/°]	H2 Değeri [Nm/°]	İstenen Çalışma Aralık Değerleri [Nm/°]	Metal Rondelâ Kaplama Tipi
1	1,50	21,45	H1 -> 1,5 -3,0 H2 -> 24 - 50	Titanyum Nitrür
2	1,73	18,48		
3	1,50	18,37		
4	1,58	13,40		Nikel
5	1,52	12,25		
6	1,64	11,27		
7	1,54	12,97		Çinko Fosfat
8	1,48	16,40		
9	1,65	14,70		
10	1,60	18,36		Nitrürleme
11	1,64	20,06		
12	1,55	16,15		

$T = N * fs * F * Rm$ formülüne göre değerlendirme yapılırsa en önemli değişkenlerin Rm sürtünme alanı efektif yarıçapı ve fs sürtünme katsayısı olduğu ve histerisiz değişime önemli etkisi olduğu kabul edilebilir. Yapılan çalışma ile histerisiz değişiminin nasıl olduğu ve etki eden en önemli parametrelerin analizi yapılmış olacaktır.

4.4. Test Şartlarının Oluşturulması

Üretimi yapılan debriyaj disk komplelerinin teste başlamadan önce H1 ve H2 histerisiz ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.8'de teste başlamadan ölçümü yapılmış debriyaj diskinin grafiği örnek olarak verilmiştir.

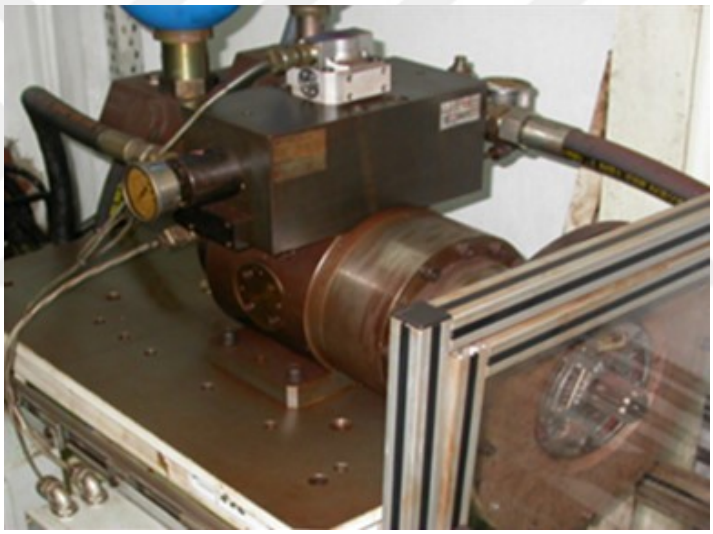
Grafikte H1,H2 histerisiz değerleri, S1,S2 yay rijitlik değerleri, debriyaj diskinin ivmelenme (grafiğin sağ tarafı) ve frenleme (grafiğin sol tarafı) anlarındaki ulaşabileceği tork değerleri görülmektedir.



Şekil 4.8. Test öncesi histerisiz ölçüm grafiği

Tüm ürünlerde hızlandırılmış testler, açısal yorma (bedding) makinesinin tahrik mili ile tork verilerek yapılmaktadır. Bu işlemin amacı, araçta belli çalışma süreleri sonrasında ortaya çıkabilecek histerisiz değişimini ve bu değişimin etkilerini analiz edebilmek ve hangi seviyeden sonra histerisiz değişiminin azaldığını ya da minimize olduğunu gözlemleyebilmektir. Alt bileşen ürünlerinin yüzey düzlemselliği, kaplamanın etkisi ve alt bileşenlerin birbiri ile yüzeysel temaslarının az olabilmesi nedeni ile başlangıçtaki ölçümler daha sık alınmıştır.

Tüm debriyaj disklerinde; test öncesi, 100, 200, 500, 1k, 2k, 5k, 10k, 20k, 30k, 40k, 50k, 60k, 80k, 100k çevrim açısal yorma testleri sonrasında ölçümler tekrar edilmiş ve değerler grafiklere aktarılarak değişimin gözlemlenmesi hedeflenmiştir.



Şekil 4.9. Açısal yorma test makinesi

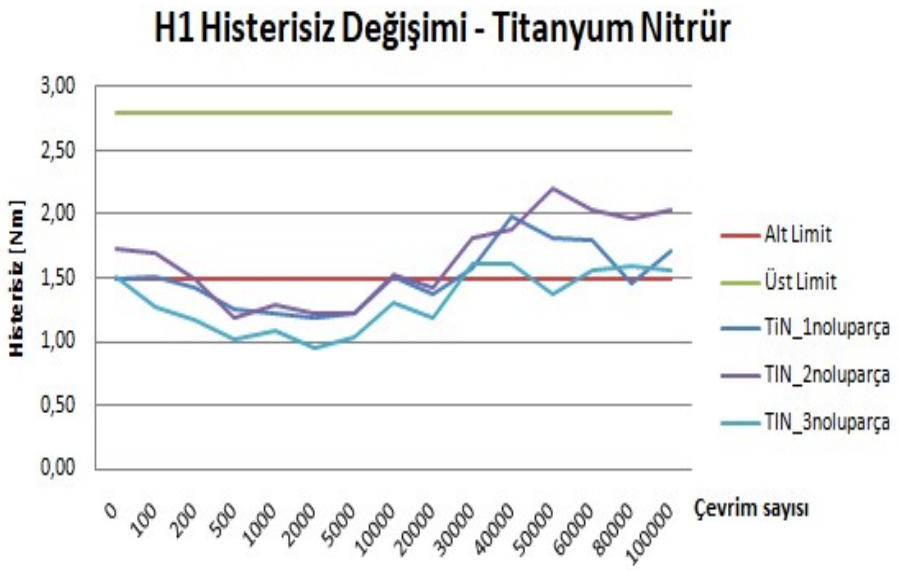
Açısal yorma (bedding) testleri Şekil 4.9'da görülen açısal yorma test düzeneğinde yapılmıştır. Araç motoru dişli milini simule edecek şekilde tasarlanan mil test düzeneğine bağlanmış ve daha sonrasında debriyaj diski göbek bölgesindeki dişliden mile geçirilmiştir. Bu aşamadan sonra metal flanş dış çap bölgesinden civatalar ile sıkılarak açısal tork sebebi ile debriyaj balatalarının kaçırma yapmasını engellemiştir. Makine kontrol panelinde derece cinsinden açısal hareket miktarı, Hz cinsinden tekrar frekansı ve kaç defa hareketi tekrarlayacağı bilgileri girilerek sisteme başlatılmıştır. Bu

işlem hedeflenen çevrim sayısına ulaşana kadar tüm debriyaj diskleri için tekrarlanır ve her tekrar sonrasında histerisiz ölçümleri yapılır.

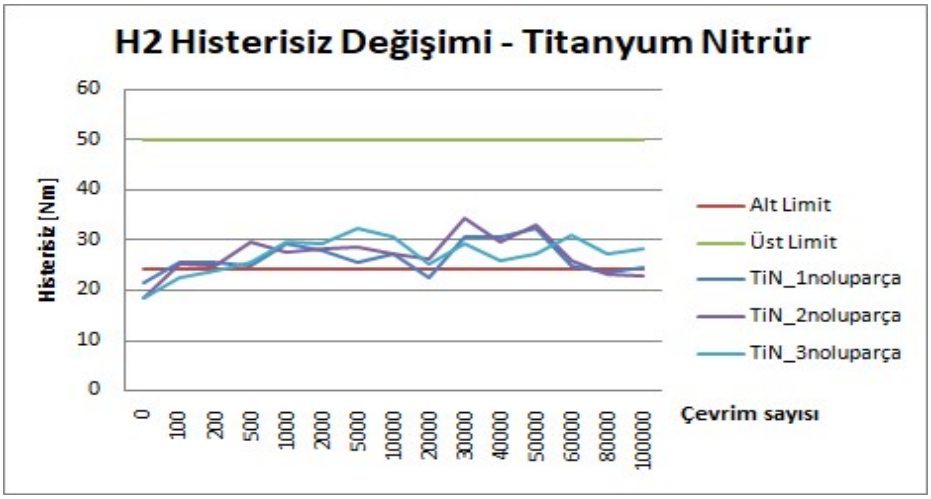
Ürünün rijitliğini ve parametre değişkenliğini engellemek için disk komplesi her açısal yorma işlemi sonrasında sökülmemiştir. Eğer sökülmüş olsa idi klavuz, m.disk gibi bazı önemli bileşenler kullanılamayacak seviyede deforme olacak ve yeni bileşenlerin kullanılması gerekli olacaktı. Bu durum, farklı parametre girdilerine ve hatalı analiz yapmamıza sebep olabilirdi. Buna istinaden, debriyaj disklerinin sökülmesi, esnek rondelâ yük analizi metal rondelâların temas yüzeylerinin tespiti ve kaplamanın durumu ve etkisi gibi değişkenler göz önünde alınarak 20k, 50k ve 100k çevrim açısal yorma sonrasında yapılacak ve raporlanacaktır.

4.5. Test Sonrası Histerisiz Analizleri

Tüm debriyaj disklerinde yapılan tanımlamaya göre histerisiz ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümlerin analizleri öncelikli olarak, kendi içlerinde daha sonra tüm grafikler karşılaştırılarak hangi ürünün seviyesinin iyi olduğu analiz edilecektir.



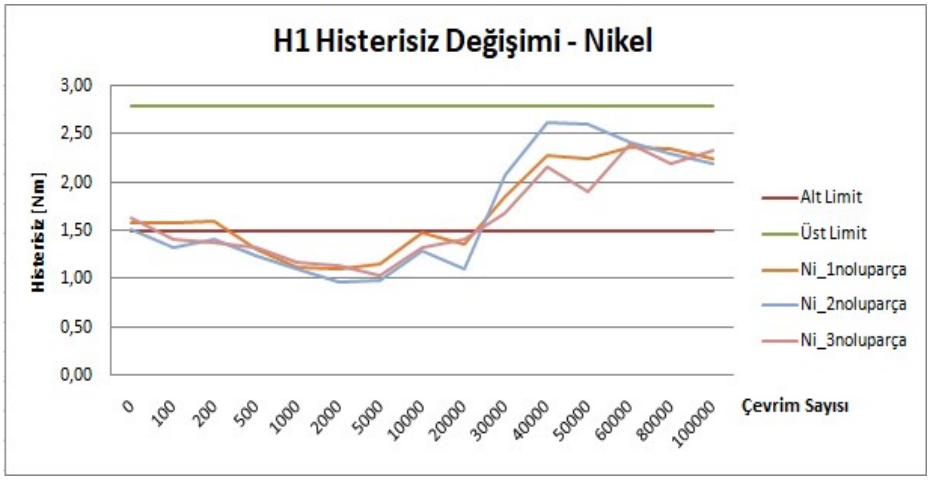
Şekil 4.10: H1 histerisiz değişimi - Titanyum Nitrür kaplama



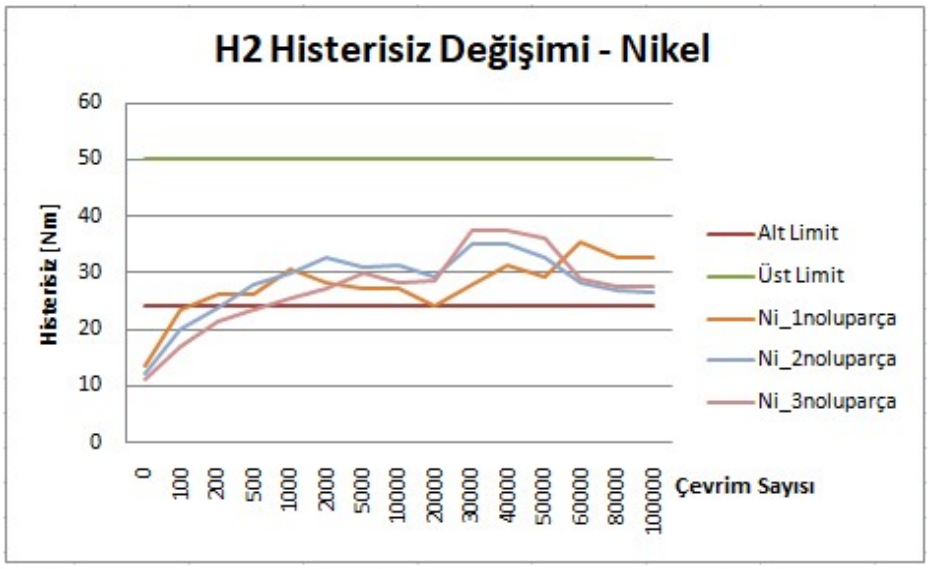
Şekil 4.11: H2 histerisiz değişimi - Titanyum Nitrür kaplama

Şekil 4.10'da histerisiz değişimleri görülen ve Titanyum Nitrür kaplamalı metal rondelâ ile toplanan debriyaj disklerinin H1 histerisiz değişimleri incelendiğinde, yaklaşık 30k çevrim sonrasında limit değerler içine girdiği fakat tekrardan kararlılığı bozularak limitler dışına çıktığı gözlemlenmiştir. H1 histerisiz değişimi çok istikrarlı bir yapı çizmemiştir.

Şekil 4.11'de histerisiz değişimleri görülen, H2 değerleri incelendiğinde, 200 çevrim sonrasında istenilen limit değerlerine ulaştığı fakat 20k çevrim seviyelerinde alt limitlere yaklaştığı ve 80k çevrim sonrasında limit dışına çıktığı ve istenilen değerlere sağlıklı şekilde ulaşamadığı gözlemlenmiştir.



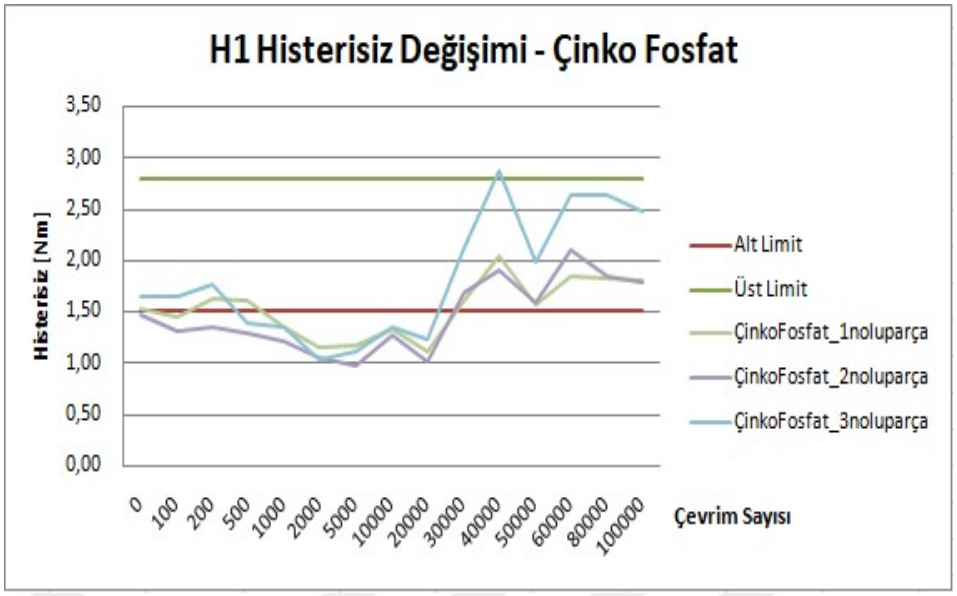
Şekil 4.12: H1 histerisiz değişimi - Nikel kaplama



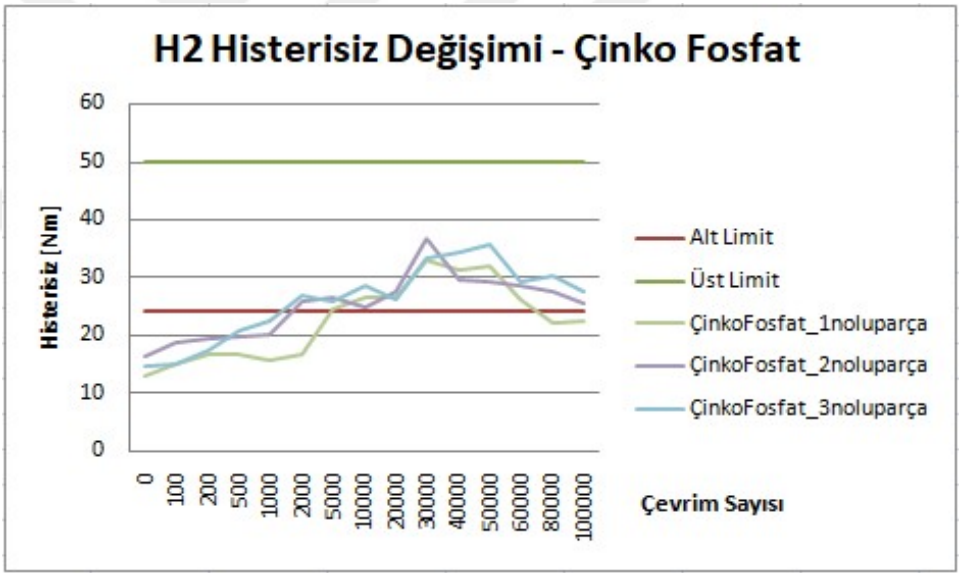
Şekil 4.13: H2 histerisiz değişimi - Nikel kaplama

Şekil 4.12'de histerisiz değişimleri gösterilen, nikel kaplamalı metal rondelâ ile üretilen debriyaj disklerinin H1 histerisiz değişimleri incelendiğinde, ilk 200 çevrimde limit değerler içinde olduğu fakat 30k çevrime kadar tanımlanan limit değerlerinin oldukça altında kaldığı, daha sonra ani şekilde hızlı bir artış gösterip 2-2,5 Nm değeri aralığında sabitlendiği gözlemlenmiştir.

Şekil 4.13'te histerisiz değişimleri gösterilen, H2 histerisiz değişimleri incelendiğinde, 500 çevrim sonrasında 3 adet ürününde histerisiz değerlerinin istenilen limit değerlerine ulaştığı fakat 20k çevrimde 1 nolu parçanın limit dışına çıktığı ve sonrasında tekrar limit değerlerinin içine girdiği gözlemlenmiştir. Test sonuçları incelendiğinde histerisiz değerlerinin alt limit değerlerine yakın olduğu fakat çok fazla değişkenlik göstermediği gözlemlenmiştir.



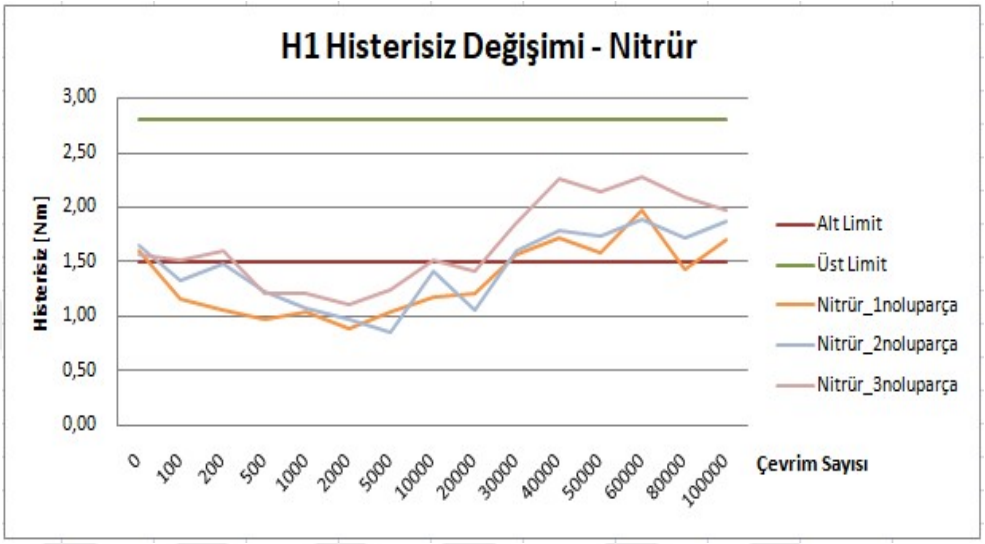
Şekil 4.14: H1 histerisiz değişimi - Çinko Fosfat



Şekil 4.15: H2 histerisiz değişimi - Çinko Fosfat

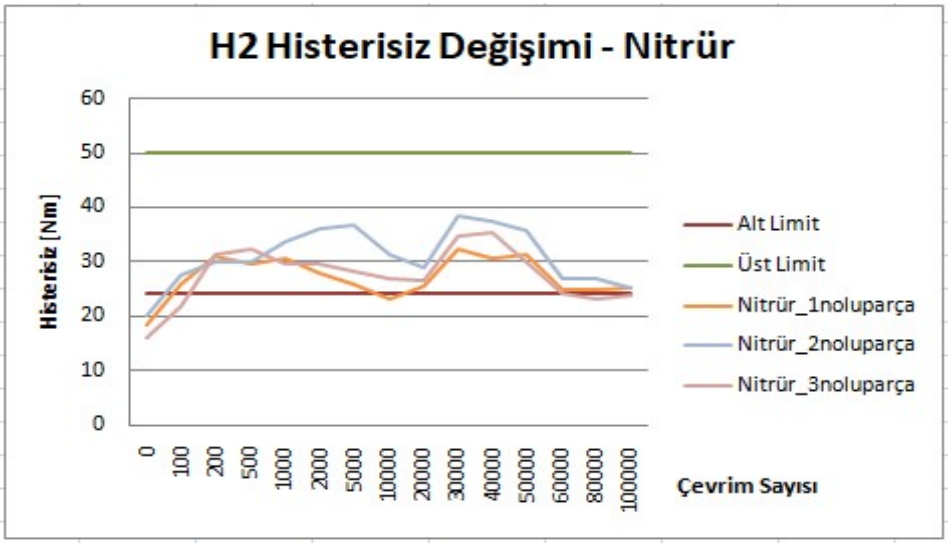
Çinko Fosfat kaplamalı metal rondela ile toplanan ve Şekil 4.14'de görülen disk komplelerinin H1 histerisiz değişimleri incelendiğinde, açısal yorma testleri öncesinde limit değerlerinin üzerinde fakat 500-1.000 çevrim sonrasında limit değerlerinin altına düştüğü ve 30k çevrim sonrasında artarak limit değerlerinin içerisine girdiği ve hatta 3 nolu parçanın üst limit değerini aşıp tekrardan limit değeri içine girdiği gözlenmiştir. Test boyunca H1 histerisiz değişiminin kararsızlığının yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.15'te görülen H2 histerisiz değeri değişimi incelendiğinde, 5k çevrim seviyelerinde limit değerler içerisine girdiği, 30k - 50k çevrim sonrasında pik yaptığı ve daha sonra düşüşe geçtiği, 1 nolu parçanın değerinin limit dışına çıktığı gözlemlenmiştir. Büyük ihtimal ile ilerleyen kilometrelerde histerisiz değeri ya daha da düşecek ya da kararsız bir yapıda devam edecektir.



Şekil 4.16: H1 histerisiz değişimi – Nitrürleme

Nitrür kaplamalı metal rondelâ ile toplanan debriyaj disklerinin H1 histerisiz değişimleri (Şekil 4.16) incelendiğinde, açısal yorma testleri öncesinde limit değerlerinin üzerinde olduğu fakat 100 çevrim sonrasında limit değerlerinin altına düşmeye başladığı ve bu durumun 30k çevrime kadar devam ettiği, sonrasında ise 1 numaralı parça da dalgalanma olduğu fakat genel anlamda değerlerin limit değerler içinde kalmış olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.17: H2 histerisiz değişimi – Nitrürleme

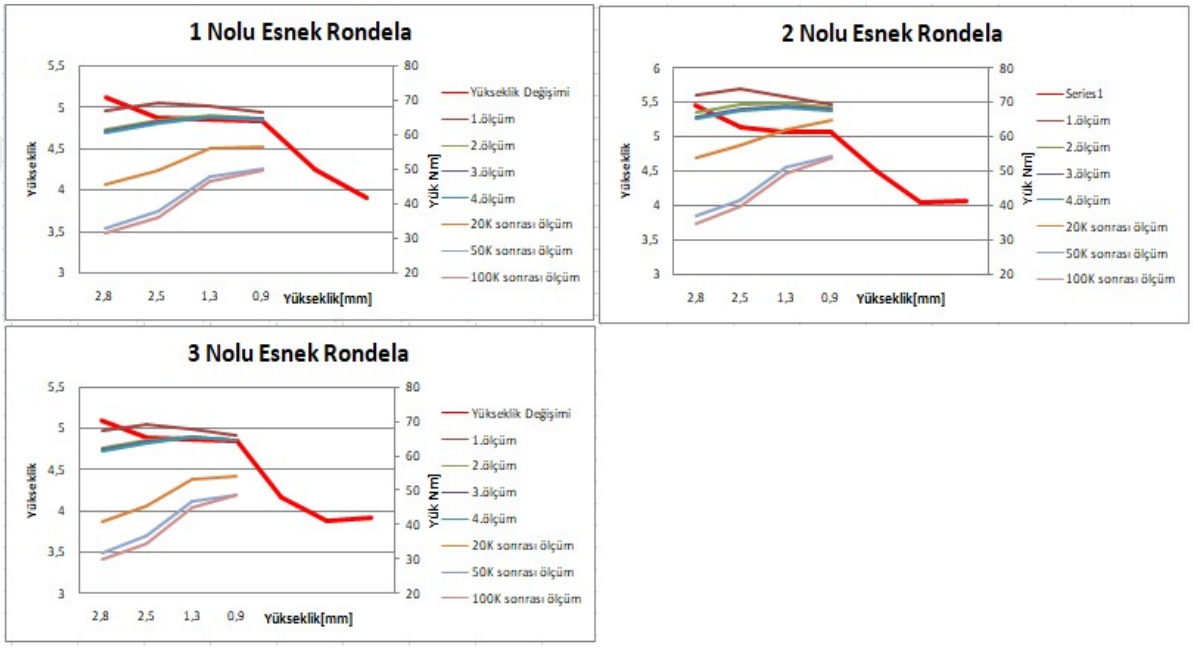
H2 histerisiz değeri değişimi (Şekil 4.17) incelendiğinde, 200 çevrim sonrasında değerlerin limitler içerisine girdiği, 10k çevrim seviyelerinde alt limit değerine yaklaştığı ve 60k çevrim sonrasında da alt limit bölgelerinde kararlı seyrettiği gözlemlenmiştir.

Histerisiz testlerinin yapılması ve değerlendirilmesi sonrasında aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Açısal yorma testleri yapılmayan ürünlerde genel olarak H1 histerisiz değeri alt limitlerde fakat limit değerlerin içinde, H2 histerisiz değerinin limit dışında olduğu gözlemlenmiştir.
- 20k - 30k çevrim aralığında hem H1 hem de H2 histerisiz değerleri minimum seviyelerine inmiş olup daha sonrasında genel olarak artış eğilimi göstermektedir.
- H1 histerisiz değişimine metal rondelâ kaplamasının etkisinin olduğu fakat bu etkinin H2 histerisiz değişiminde net olarak gözlemlenemediği görülmüştür.
- H2 histerisiz değerinin genel olarak 80k çevrim sonrasında alt limitler değerlere doğru hareket ettiği gözlemlenmiştir.

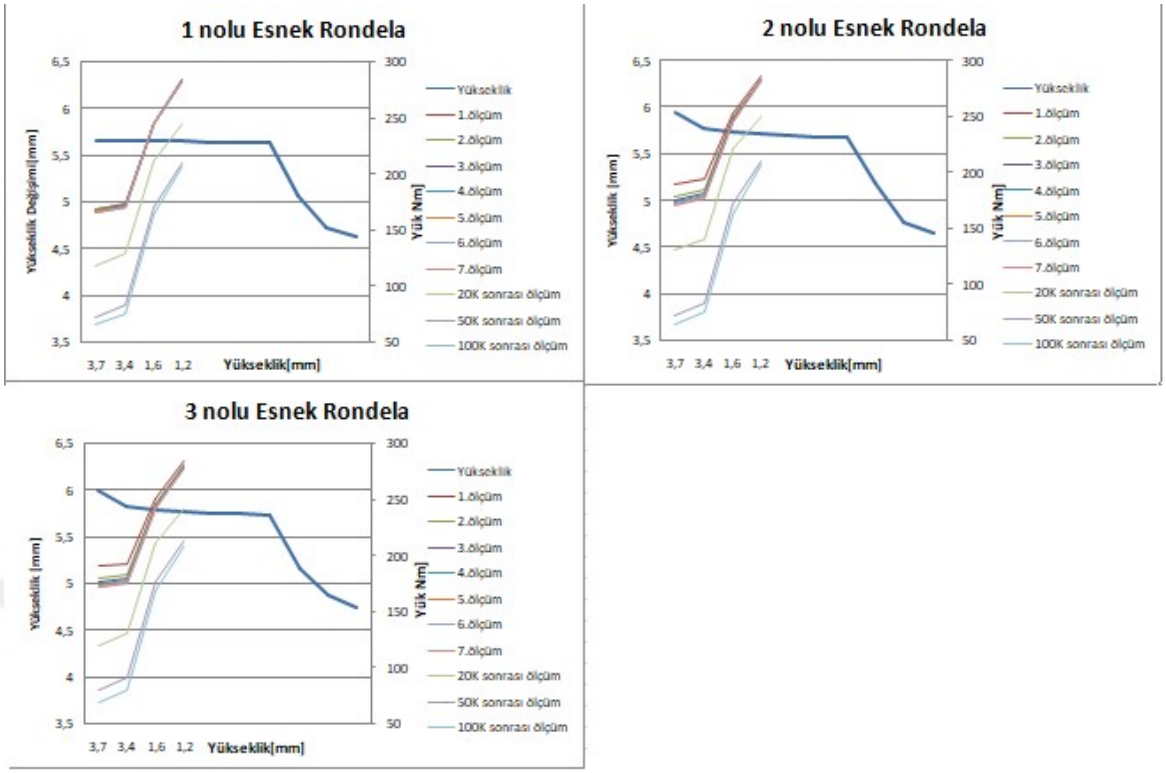
4.6. Test Sonrası Esnek Rondelâ Analizi

Açısal yorma testleri tamamlanan debriyaj disklerinin ürün montajı öncesi, 20k, 50k ve 100k çevrim sonrasındaki ölçümleri yapılmıştır. Tüm ürünlerde yük değişimleri ve çalışma yüksekliği kayıp değişimi görülmektedir. Teste başlamadan önce H1 esnek rondelâları yük kayıpların az olması nedeni ile 4 kez, H2 esnek rondelâları da 7 defa ölçülmüş ve bundan sonra test edilecek ürünlerde kullanılmıştır.



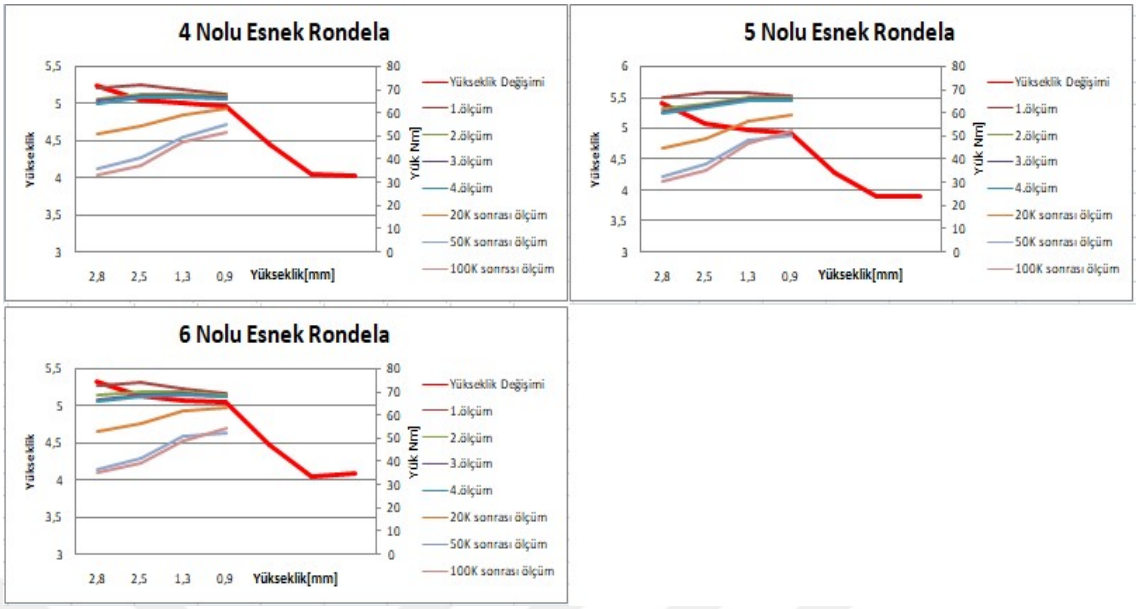
Şekil 4.18: H1 esnek rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi - Titanyum Nitrür

Titanyum nitrür kaplamalı metal rondelâlar ile toplanan debriyaj disklerinin H1 esnek rondelâlarının yük değişimleri (Şekil 4.18) incelendiğinde genel olarak aynı eğilimi gösterdiği ve yük kayıplarının birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Yükseklik değişimi 5,5 mm'lerden 4 mm seviyelerine inmiş ve 50k ile100k çevrim arasında genel olarak değişimin ciddi seviyede azaldığı gözlemlenmiştir. H2 esnek rondelâsında da H1 esnek rondelâsında olduğu gibi yük kaybı ve yükseklik değişimleri (Şekil 4.19) aynı değişimi ve değerleri göstermiştir.



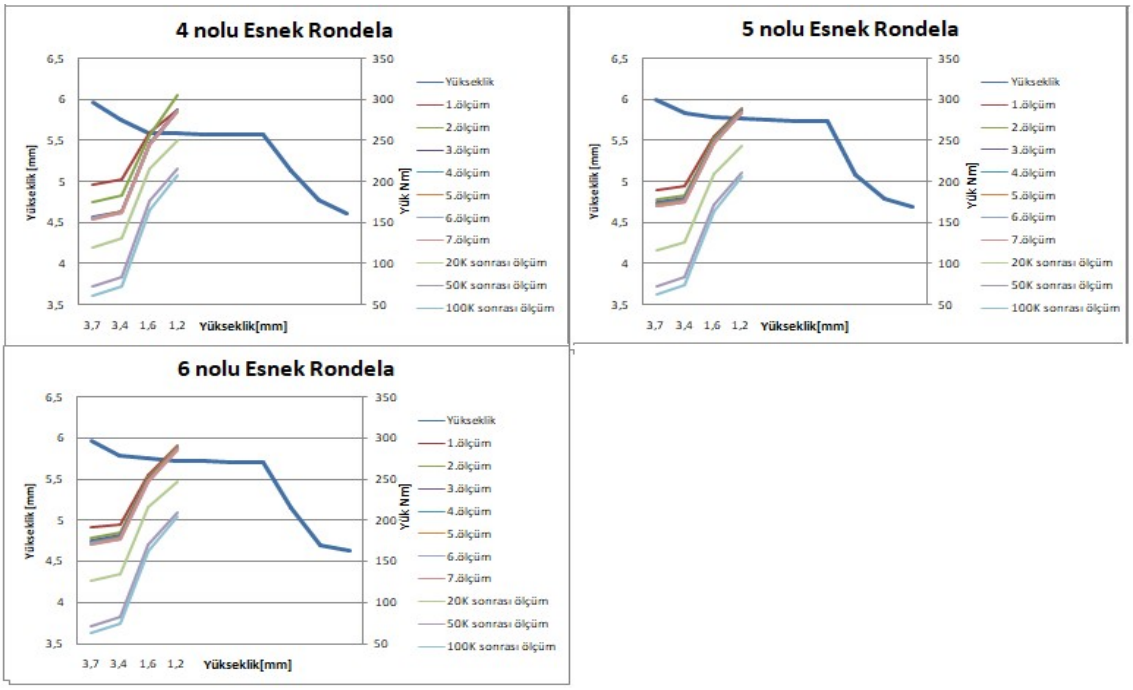
Şekil 4.19: H2 esnek rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi - Titanyum Nitrür

H2 esnek rondelâsında da H1 esnek rondelâsında olduğu gibi yük kaybı ve yükseklik değişimleri aynı değişimi ve değerleri göstermiştir. Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'deki ölçüm grafikleri Nikel kaplamalı metal tırnaklı rondelâ ile toplanan disk komplelerine aittir. Şekil 4.20'deki grafik için, H1 esnek rondelâsı yükseklik değeri Titanyum Nitrür kaplamalı metal sürtünme rondelâlı parçalarda olduğu gibi 5,5 mm seviyelerinden 4 mm seviyelerine düşmüş ve 50k çevrim ile 100k çevrim arasında nerede ise hiç değişim göstermemiştir. Aynı durum yük değişimi içinde geçerlidir.



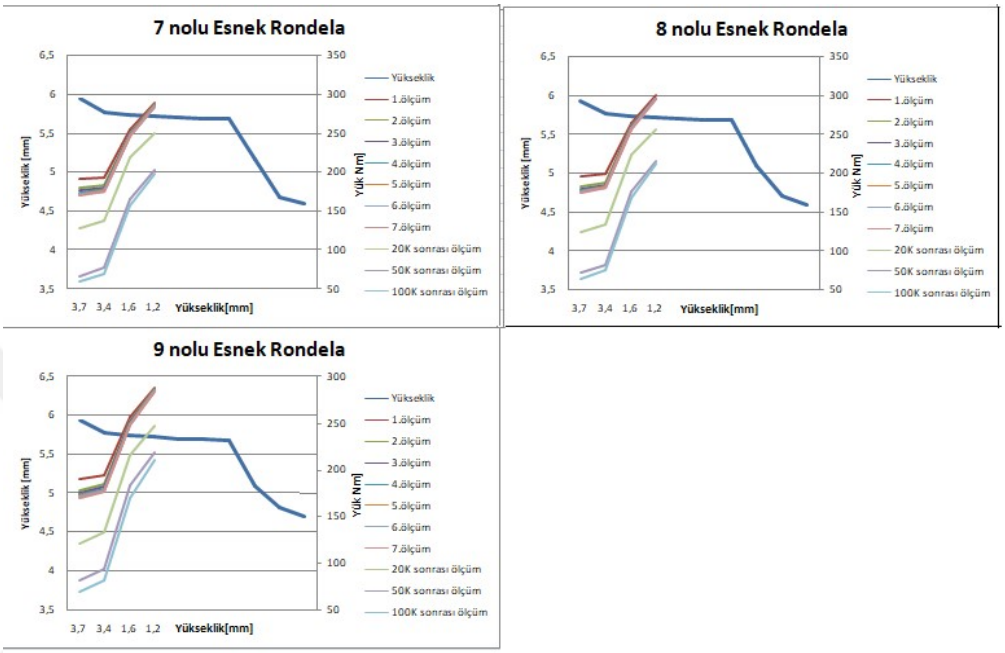
Şekil 4.20: H1 Esnek rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi - Nikel Kaplama

H2 esnek rondelâ grubu incelendiğinde (Şekil 4.21) esnek rondelâ yükseklik kaybının 6 mm seviyelerinden 4,5 mm seviyelerine gittiği fakat H1 esnek rondelâsındaki gibi yükseklik kaybının sabitlenmediği görülmektedir. Buna rağmen, 50k ve 100k değerlerinde yük değişimlerinin çok az olduğu görülmektedir.

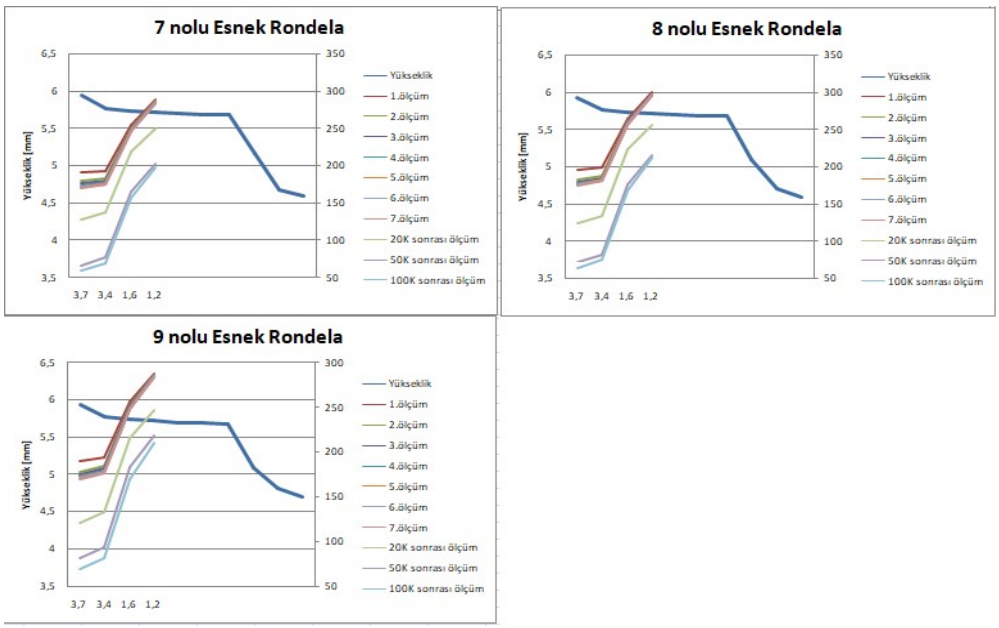


Şekil 4.21: H2 esnek rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi - Nikel Kaplama

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'teki ölçüm grafikleri Çinko-Fosfat kaplamalı metal tırnaklı rondelâ ile toplanan disk komplelerine aittir. Şekil 4.22'deki grafik için, H1 esnek rondelâ yükseklik ve yük değişimleri Titanyum Nitrür ve Nikel kaplamalı metal tırnaklı rondelâ kullanılan parçalarda olduğu gibi benzer özellik göstermiştir.

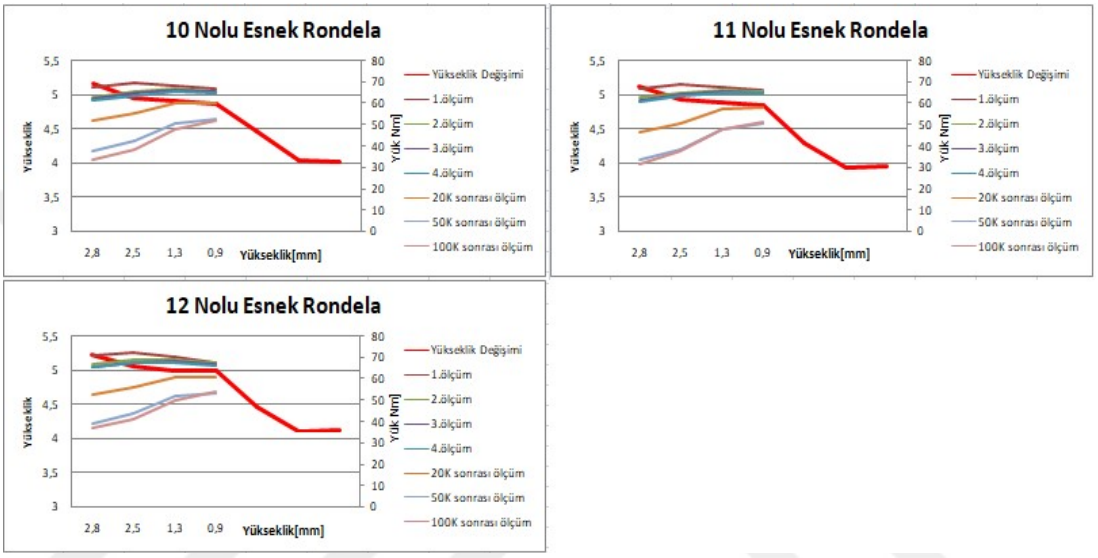


Şekil 4.22: H1 esnek rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi - Çinko-Fosfat

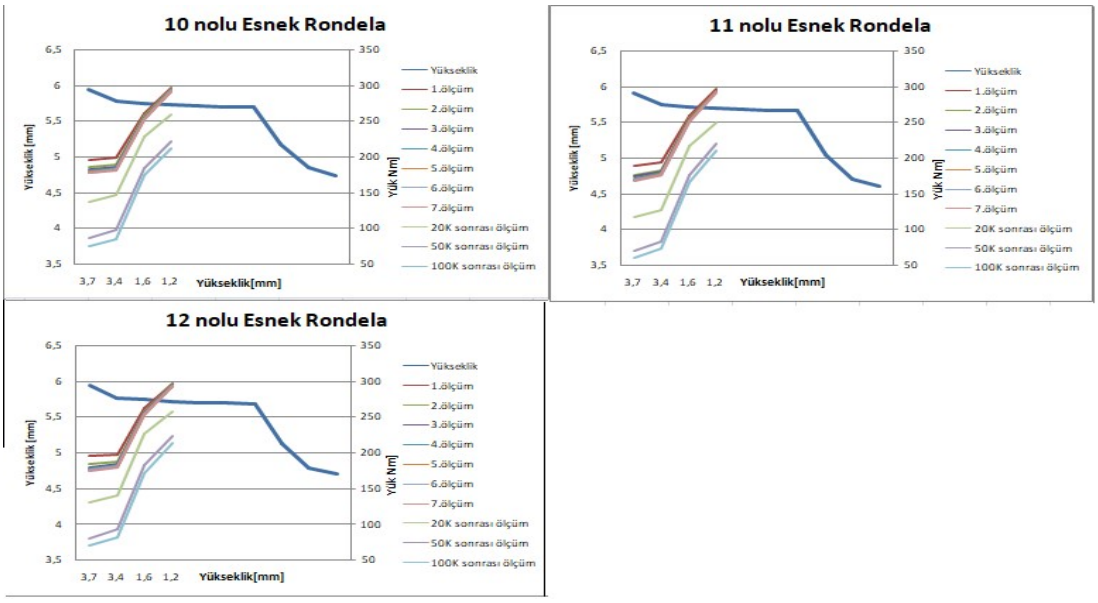


Şekil 4.23: H2 esnek rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi - Çinko-Fosfat

H2 esnek rondelâ yükseklik ve yük değişimleri (Şekil 4.23) Titanyum Nitrür kaplamalı metal tırnaklı rondelâ kullanılan parçalarda olduğu gibi benzer özellik göstermiştir. Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'teki ölçüm grafikleri Nitrür kaplı metal tırnaklı rondelâ ile toplanan disk komplelerine aittir. H1 esnek rondelâ yükseklik ve yük değişimleri (Şekil 4.24) diğer 3 farklı kaplamalı metal tırnaklı rondelâ kullanılan parçalardaki benzer özellik göstermiştir.



Şekil 4.24: H1 esnek Rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi – Nitrürleme



Şekil 4.25: H2 esnek rondelâ yük ve yükseklik kayıp değişimi – Nitrürleme

H2 esnek rondelâsının (Şekil 4.25) yük ve boy kaybı diğer esnek rondelâlar ile aynı özellikleri göstermiştir. Bu analizler sonrasında tüm esnek rondelâların yükseklik ve yük kayıp grafikleri üst üste konularak değişimleri incelenmiştir.

Esnek rondelâ yük ölçümlerinin yapılması ve değerlendirilmesi sonrasında aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

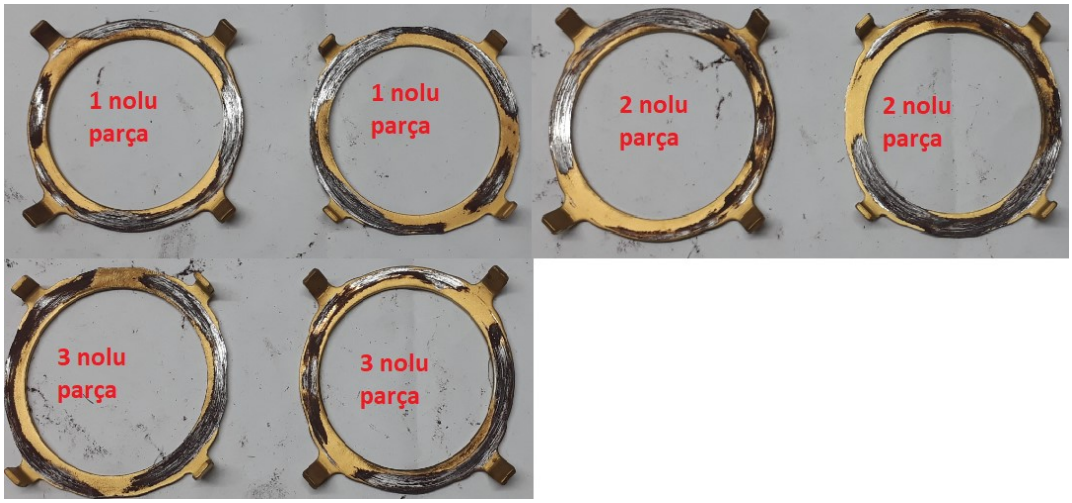
- H1 ve H2 esnek rondelâları için tüm parçalarda çalışma yüksekliği kaybı %20 ve üzerindedir.
- Tüm esnek rondelâlar, istisnai durumları dikkate almaz isek aynı karakteristik davranışı sergilemiş ve aynı seviyede yük ya da çalışma yüksekliği kaybı oluşmuştur.
- Histerisiz etkisi incelenirken, yükseklik ve yük kayıpları paralel seyrettiği için farklılık yaratan etkinin kaplama olabileceği bulgusu elde edilmiştir.
- Esnek rondelânın çalışma yükseklik kaybının ve yük kaybının yüksek olması, debriyaj diskinde histerisiz değişiminin azalmasına etki edebileceği fakat tek etken parametre olmadığı bulgusu elde edilmiştir.
- Çalışma ile gerçek veriler elde edilmiş olup teorik veriler ile karşılaştırılabilir ve korelâsyon sağlanabilir.

4.7. Test Sonrası Metal Kaplamalı Rondelâ Analizi

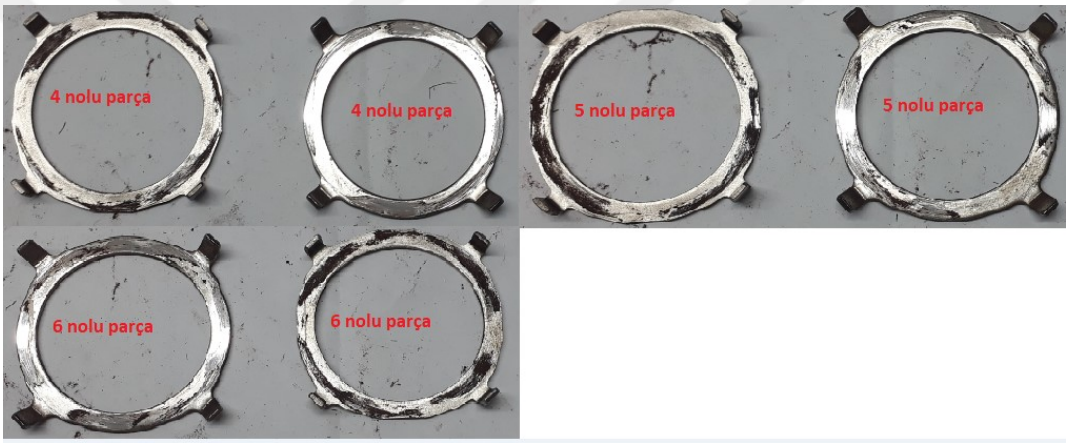
Test öncesi ve sonrası histerisiz grafik analizleri ve esnek rondelâ yük analizleri değerlendirildiğinde metal rondelâ kaplamasının önemli olduğu ve histerisiz değişimine etki eden en önemli parametrelerden birisi haline geldiğini göstermektedir.

20k, 50k ve 100k sonrası ölçümleri yapılırken sökülen debriyaj diskinin metal rondelâlarındaki durum fotoğraflanıp histerisize etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

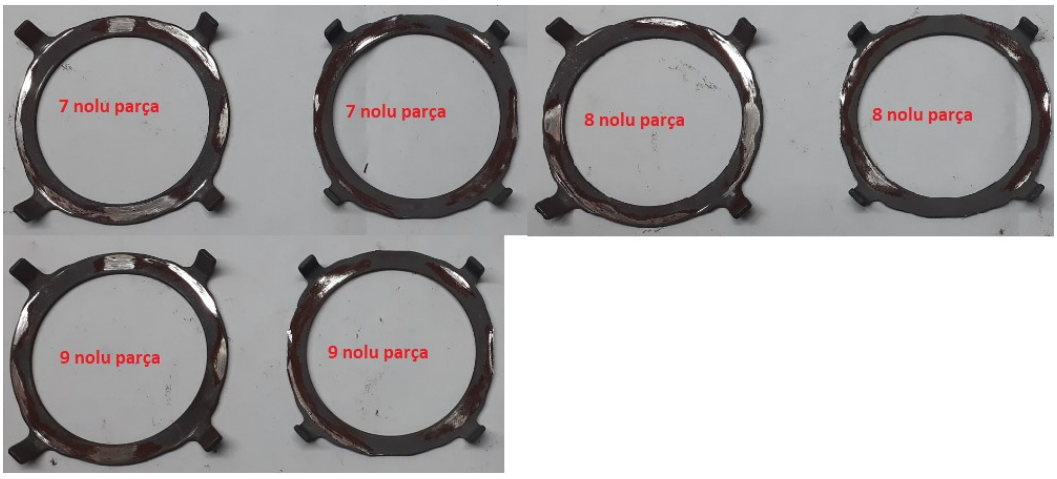
Öncelikli olarak tüm tırnaklı rondelâların 20k sonrası görselleri Şekil 4.26, Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da eklenmiş olup yüzeylerindeki kaplamaların sürtünme nedeni ile oluşan etkileri gözlemlenmiştir.



Şekil 4.26: TiN kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 20k sonrası kaplama görünümü



Şekil 4.27: Ni kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 20k sonrası kaplama görünümü



Şekil 4.28: Çinko Fosfat kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 20k sonrası kaplama görünümü



Şekil 4.29: Nitrür kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 20k sonrası kaplama görünümü

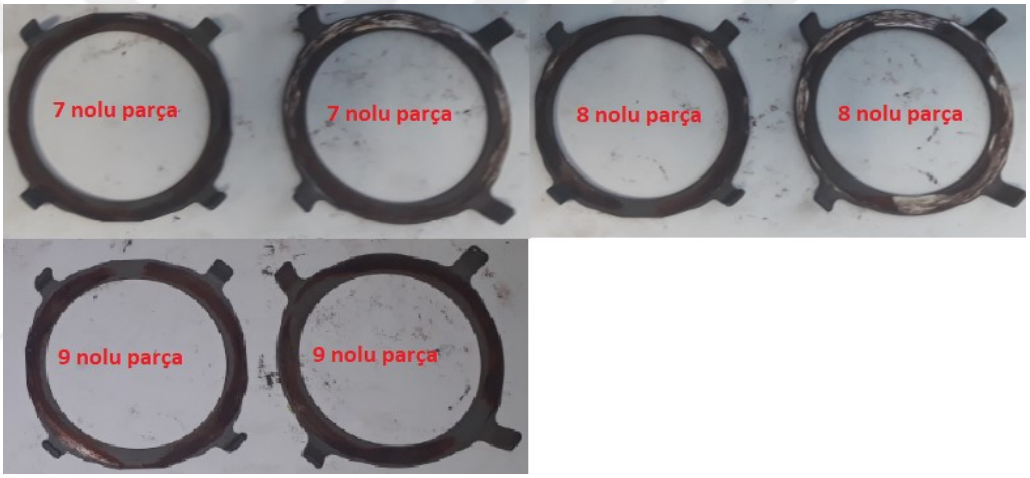
20k sonrası metal tırnaklı rondelâların yüzeyleri incelendiğinde kaplamalardaki aşınmaların homojen olmadığı ve bölgesel olduğu gözlemlenmiştir. Kaplamanın en fazla aşındığı parçaların TiN kaplı metal rondelalar olduğu, en az aşındığı parçaların ise Ni kaplı metal rondelâlar olduğu gözlemlenmiştir. Genel anlamıyla, tüm kaplamalı parçalarda kaplamaların metal-metal sürtünmesi nedeni ile yüzeyden uzaklaşmaya başladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.30: TiN kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 50k sonrası kaplama görünümü



Şekil 4.31: Ni kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 50k sonrası kaplama görünümü

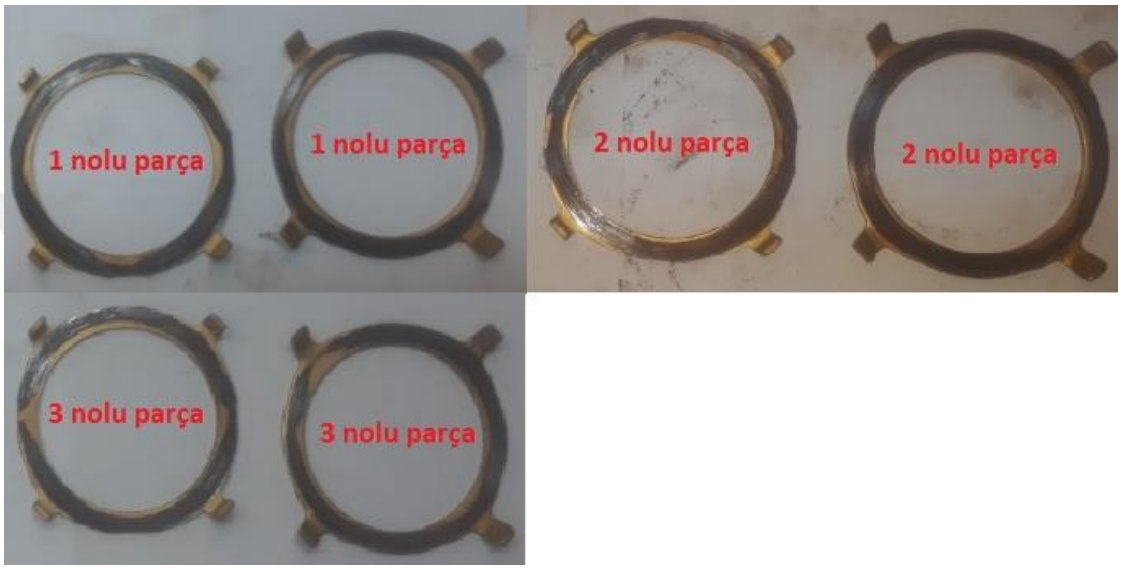


Şekil 4.32: Çinko-Fosfat kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 50k sonrası kaplama



Şekil 4.33: Nitrür kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 50k sonrası kaplama

50k sonrasında özellikle sürtünen yüzeylerde TiN kaplamalı metal tırnaklı rondelâlarda (Şekil 4.30) kaplama yüzeyden gitmiştir. Diğer parçalarda (Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33) ise hala yüzey temasları TiN kaplamalı parçaların seviyesine ulaşamamıştır. Bu durumun histerisize etkisi "**4.5. Test Sonrası Histerisiz Analizleri**" bölümündeki histerisiz değişimleri ile ilişkilendirilebilir ve esnek rondela yük düşümü ile arasında korelasyon kurulabilir.



Şekil 4.34: TiN kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 100k sonrası kaplama görünümü



Şekil 4.35: Ni kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 100k sonrası kaplama görünümü



Şekil 4.36: Çinko-Fosfat kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 100k sonrası kaplama görünümü



Şekil 4.37: Nitrür kaplamalı metal tırnaklı rondelâ 100k sonrası kaplama görünümü

Tüm metal tırnaklı rondelâlar Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'deki fotoğraflardan incelendiğinde en fazla temas yüzeyine ilk olarak TiN kaplamalı metal tırnaklı rondelâların (Şekil 4.34) kullanıldığı debriyaj disklerinde ulaşılmıştır.

.

Histerisiz değerinin öncelikli olarak düşük ve daha sonra yükselen bir trend sergilemesinin nedeni metal-metal parçalar arasından sürtünme yüzeylerinin başlangıç aşamasında az olması ve daha sonra metal yüzeylerinin birbiri ile uyum sağlaması nedeniyledir. Metal parçalar birbiri ile sürtünürken yüzeylerindeki pürüzlü yüzeyleri ve doğal olarak kaplamaları da kaldırarak uyum sağlamaktadır.

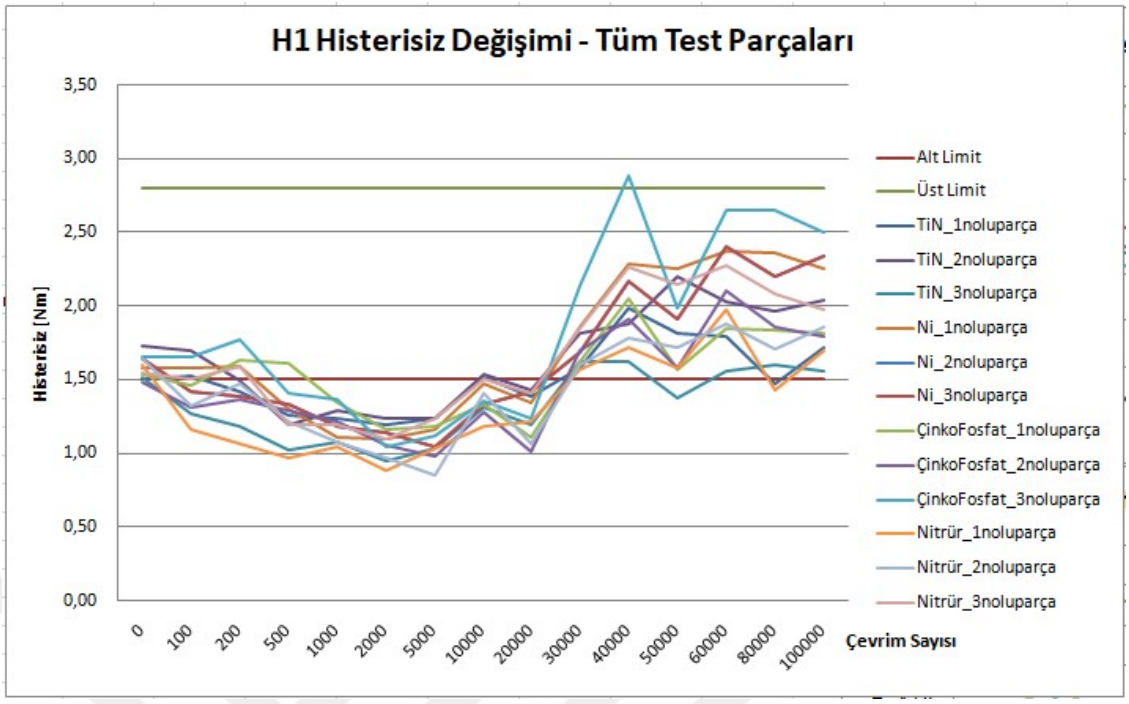
Histerisiz formülü dikkate alınır ise, sürtünme yüzey alanının düşük olması düşük histerisiz, yüksek olması yüksek histerisiz oluşmasına neden olmaktadır. Fakat histerisiz değişimini minimum seviyede tutmak istiyor isek etkenlerin sadece sürtünme katsayısı ve sürtünme alanı efektif yarıçapı olmadığı fakat önemli bir etken parametreler olduğu söylenebilir.

Metal tırnaklı rondelâlara kaplama yapılmasının değerlendirilmesi sonrasında aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Kaplamanın özelliği teste ilk başlanan aşamalarda önemli olduğu fakat belli bir süre sonra önemli olmadığı,
- Metal-metal parçalar arasındaki yüzey temasının üniform olmadığı ve parçaların birbiri ile çalıştığı her an sürekli değişiklik gösterdiği,
- Yüzey sürtünme alanının sabit bir değer olmayıp sürekli olarak değiştiği ve bu değişikliğe esnek rondelâ yükünün de etki ettiği,
- Tırnaklı rondelâ üretimi yapılırken yüzeyindeki düzlemselliğin üniform sürtünme elde edilebilmesi için önemli olduğu,
- Histerisiz değişimini limitler içinde tutabilmek istiyorsak tasarım değişikliğine ihtiyacımız olduğu belirlenmiştir.

4.8. Histerisize Etki Eden Faktörlerin Analiz ve İncelemesi

Bu bölümde yapılan testler sonucunda elde edilen histerisiz değişim grafikleri ve esnek rondelâların yük değişim grafikleri incelenip analiz edilmiştir. Yapılan çalışmaya ait özet bilgiler, ürünün histerisiz değişkenliğinin iyileştirilmesi ve çalışma yapılarak üründe geliştirilmesi gereken noktalar daha net tespit edilmiştir.

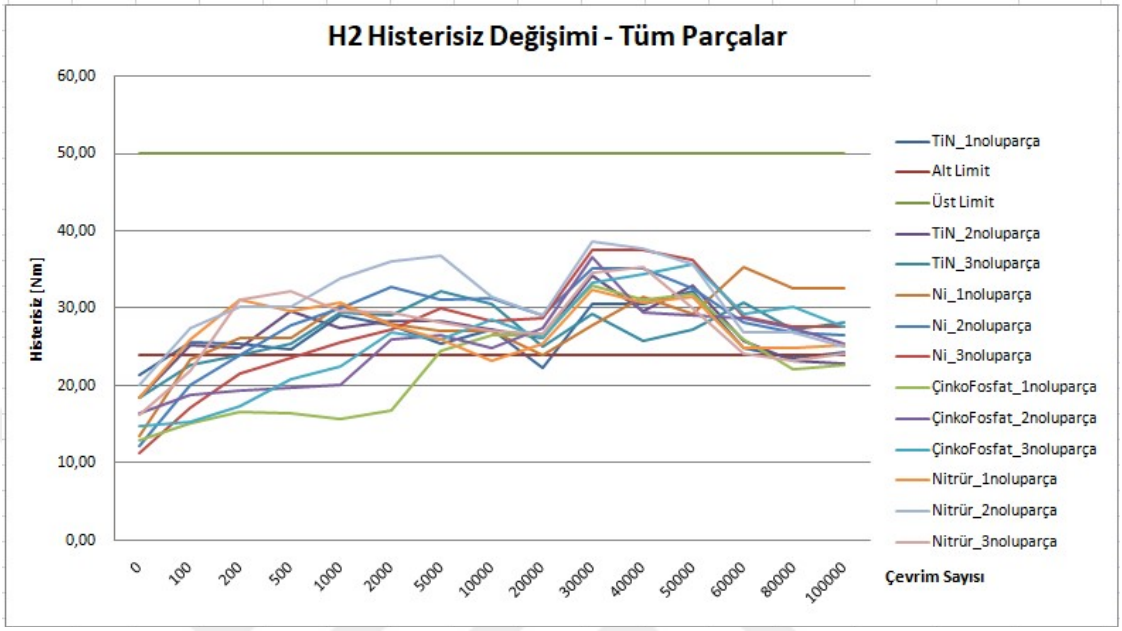


Şekil 4.38: H1 histerisiz değişimi – Genel (Avcı & Karamangil, 2021)

Şekil 4.38'de çalışmada kullanılan tüm debriyaj disklerinin H1 histerisiz değişimleri incelendiğinde genel olarak başlangıç seviyesinde istenilen limit değerler içerisinde veya çok az farkla limitin altında, 200 - 30k çevrim aralıklarında alt limitin altında olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle 1k - 5k çevrim aralığında histerisiz değeri en alt limitlerdedir. Genel olarak, 30k çevrim sonrasında limitlerin içinde seyreden H1 değerleri ürüne göre çok fazla değişkenlik ve değişim göstermektedir.

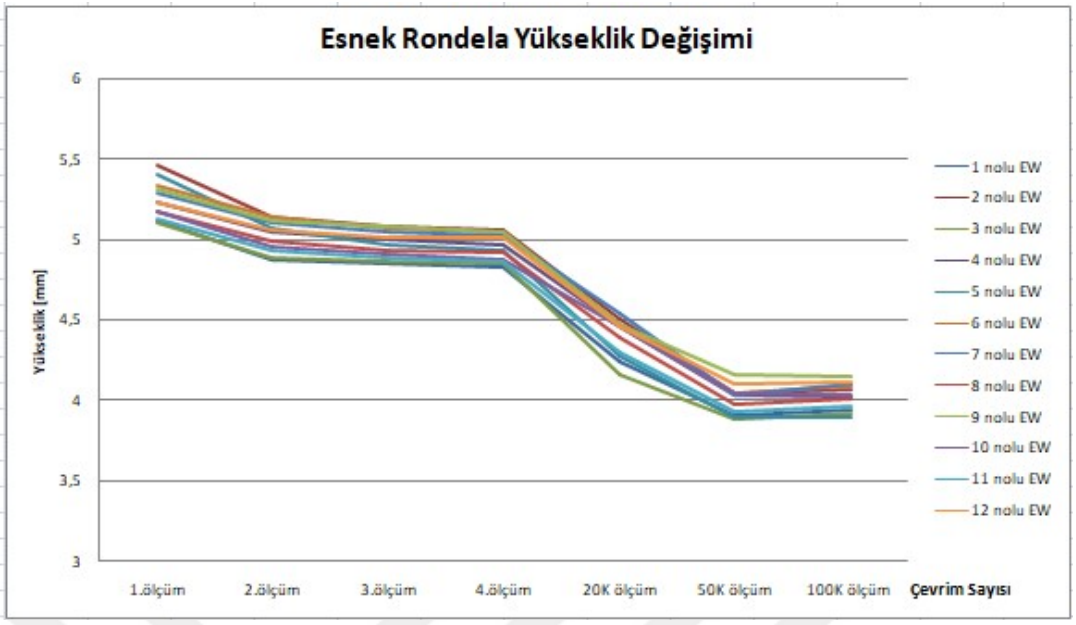
Şekil 4.39'da çalışmada kullanılan tüm debriyaj disklerinin H2 histerisiz değişimleri incelendiğinde hepsinin test öncesinde limit değerlerinin dışında ve alt limitin altında olduğu, 100 ile 2.000 çevrim aralıklarında limit değerlerin içine girmeye başladığı ve 20k - 30k çevrim aralığında alt limite yaklaştığı ve bazı ürünlerde limit dışına çıktığı, 80k çevrimden sonra titanyum nitrür ve çinko fosfat kaplamalı metal rondelâlar ile toplanan parçaların limit dışında kaldığı diğer debriyaj disklerindeki histerisiz değerlerinin alt limitlere yaklaştığı yorumlanabilir. Özellikle 5k çevrime kadar ki durumlarda 200 çevrim sonrasında histerisiz değerlerinin metal rondelâ kaplama tipine göre değişkenlik gösterdiği fakat 30k ve sonrasında genel itibari ile benzer seyir izlediği

gözlemlenmiştir. Bunun nedeni kaplamaların sürtünme nedeni ile ortadan kalkması ve sürtünme temas yüzeylerinin benzer seviyelerde olması olarak değerlendirilebilir.



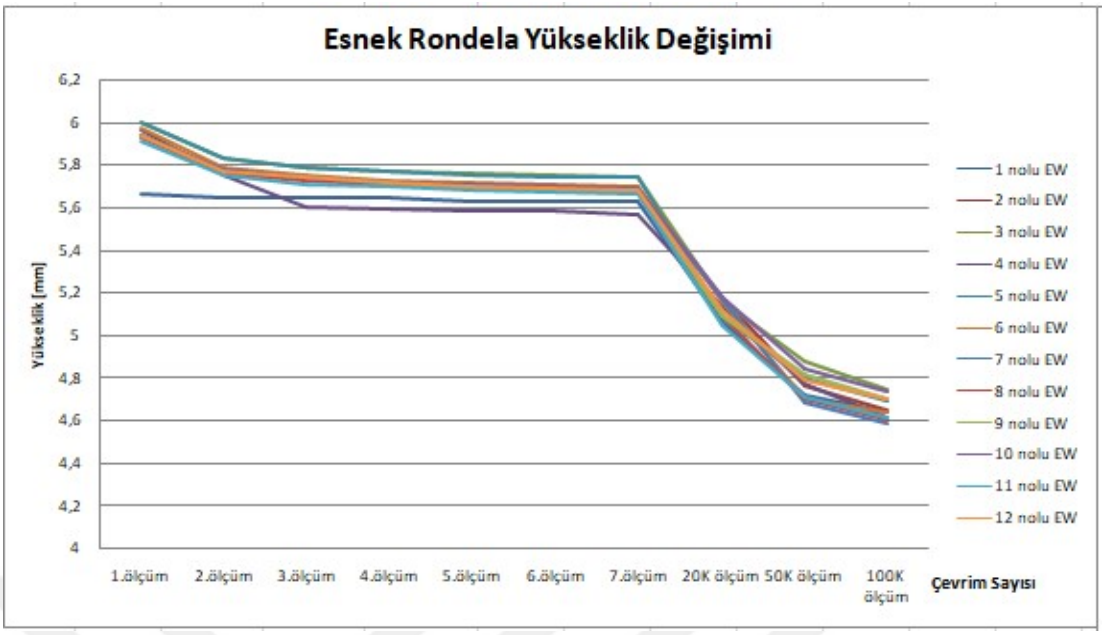
Şekil 4.39: H2 histerisiz değişimi – Genel

Şekil 4.40'ta testler de kullanılan tüm H1 esnek rondelâların test boyunca yükseklik değişimleri aynı grafikte toplanmış ve açısal yorulmaya bağlı olarak tepkileri incelenmiştir. Sonuçlara göre 100k açısal yorma işlemi sonrasında 5,25 mm ortalama yükseklik değeri 4 mm ortalama yükseklik değerine düşmüş ve değişim 50k açısal yorma sonrasında sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Toplam yükseklik kaybının %24 seviyelerinde olduğu gözlemlenmiştir. Grafik incelendiğinde yük değişiminin tüm esnek rondelâlarda aynı karakteristikte olduğu ve histerisiz değişimine yaklaşık olarak benzer tepkileri vereceği yorumu görülmüştür. Bu durumda histerisiz farklı kaplamalara sahip parçalardaki farklı histerisiz değerlerinin birincil sebebi esnek rondelâ yük düşümü olamaz.



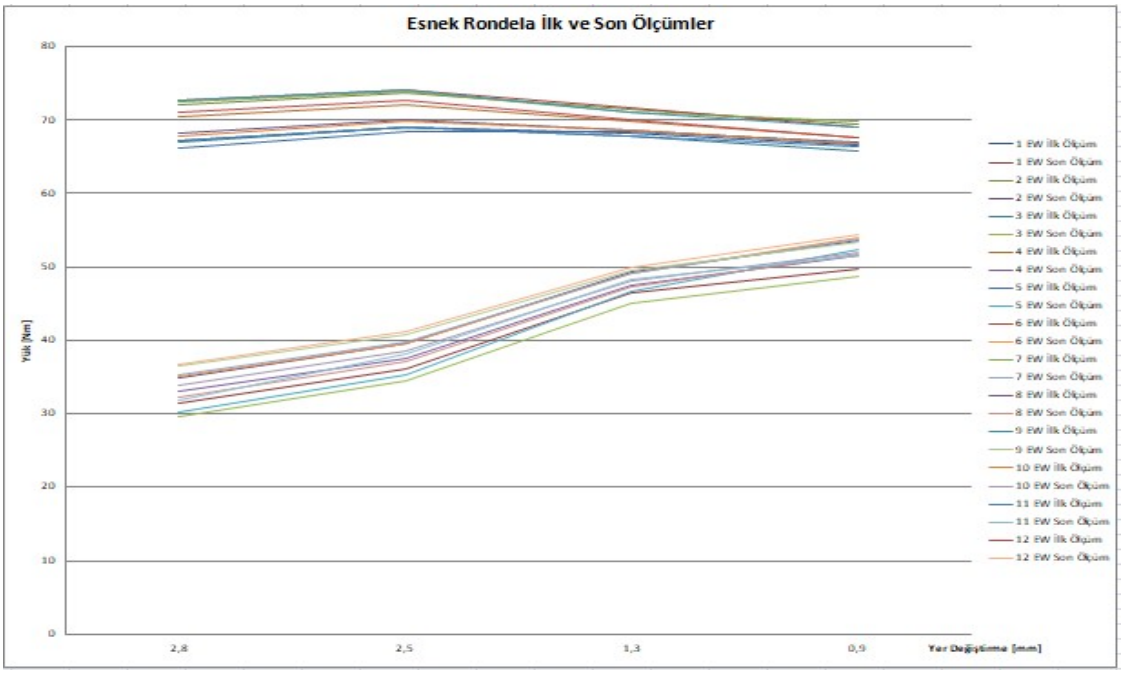
Şekil 4.40: H1 esnek rondelâ yükseklik değişimi (Avcı & Karamangil, 2021)

Şekil 4.41'de testlerde kullanılan tüm H2 esnek rondelâlar genel anlamda benzer karakteristik sergilemiş olup tek fark 1 ve 3 nolu esnek rondelâlarda test öncesi ölçümlerde görülmüştür. Test sonrası yapılan tüm ölçümlerde herhangi bir farklı karakteristik veya davranış gözlemlenmemiştir. Esnek rondelâ yüksekliği 6 mm ortalama değerden 4,7 mm ortalama değerine düşmüştür. Ortalama çalışma yüksekliği kaybı %21 seviyelerindedir. H1 esnek rondelâsında olduğu gibi 50k sonrasında yükseklik kaybı sabitlenmemiş olup, yükseklik kaybı devam etmektedir. Her iki esnek rondelânın da en fazla yükseklik kaybının test öncesi ile 20k çevrim aralığında olduğu ve buna bağlı olarak değişimin fazla olduğu görülmüştür.



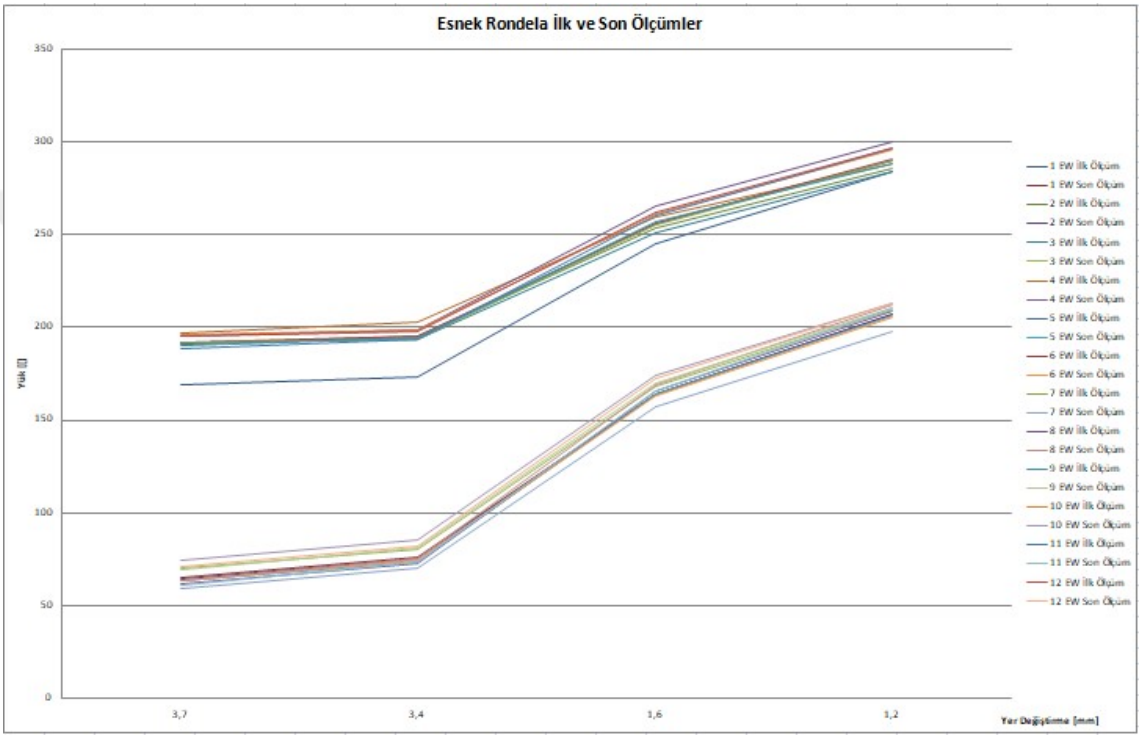
Şekil 4.41: H2 esnek rondelâ yükseklik değişimi (Avcı & Karamangil, 2021)

Şekil 4.42'de H1 esnek rondelâsı için test öncesindeki ilk ölçüm ile 100k açısal yorma işlemi sonrasındaki yer değiştirme miktarına bağlı olarak yük değişim grafiği görülmektedir. Grafik incelendiğinde yük miktarlarında ciddi seviyede düşüş olduğu görülmüştür. Tüm H1 esnek rondelâlar benzer yük değişim karakteristiğini göstermiştir.



Şekil 4.42: H1 esnek rondelâ Yer Değiştirme-Yük grafiği

Şekil 4.43'te H2 esnek rondelâsı için test öncesindeki ilk ölçüm ile 100k açısal yorma işlemi sonrasındaki yer değiştirme miktarına bağlı olarak yük değişim grafiği görülmektedir. Sadece 1 numaralı esnek rondelâ test öncesi diğerlerinden farklı bir davranış sergilemiş olup 100k test sonrasında davranışı normale dönmüştür. Grafik incelendiğinde yük miktarlarında ciddi seviyede düşüş olduğu fakat tüm H2 esnek rondelâların aynı yük değişim karakteristiğini sergilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.43: H2 esnek rondelâ Yer Değiştirme-Yük grafiği

Tüm histerisiz değişimi ve esnek rondelâ yük değişimi grafikleri incelendiğinde esnek rondelâ yükseklik kaybı ve yük değişiminin histerisizi azaltıcı etkisi olmasına rağmen sürtünme yüzeyleri arasında artış etkisinin daha fazla ve etkili olduğu görülmüştür.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Tez çalışmasında esnek rondelânın yükseklik değişimi ve farklı kaplama özelliklerine sahip metal rondelâların histerisiz değişimine olan etkileri incelenmiştir. Farklı kaplama özelliklerine sahip metal rondelâların etkileri ve davranışı analiz edilip raporlanmış ve yorumlanmıştır. Buna paralel olarak, histerisiz değişiminde en büyük ikincil etkiye sahip olan esnek rondelâların davranışları takip edilip analiz edilmiştir. Esnek rondelâ ve metal kaplamalı rondelâ haricindeki diğer bileşenlerin etkileri çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. Çalışmada değişken sayısını sabit tutabilmek için tüm veri toplamaları aynı debriyaj disklerinde zarar vermeden sökülerek ve sonrasında tekrar aynı proses parametreleri ile üretildikten sonra alınmıştır.

Araştırma sonunda, esnek rondelâ davranışlarının metal parçalardaki kaplamadan bağımsız olarak aynı davranışı sergilediği ve metal parçalardaki kaplamanın özellikle araçların ilk kilometrelerdeki konfor çıktı parametresine etki edebileceği fakat belli bir sürüş mesafesi sonrasında etkisinin azalarak yok olacağı ve kaplamanın etkisinin olmayacağı sonucuna varılmıştır. Esnek rondelânın histerisiz üzerindeki etkisi başlangıç anından başlayarak belli bir seviyeye kadar ön planda ve baskın parametre, fakat belli bir seviyeden sonra metal rondelâlardaki zamana bağlı olarak parçaların birbiri ile uyumunun ve buna bağlı olarak sürtünme yüzeyinin artması nedeni ile efektif yarıçapın ve kaplamalı yüzeylerin değişkenlik göstermesinden (artmasından) dolayı çekinik kaldığı ve sürtünme özelliklerinin histerisizi belirlemede ön plana çıktığı gözlemlenmiştir. Özellikle 50k açısal yorma işleminden sonra esnek rondelâdaki yükseklik ve yük değişiminin histerisiz değişimine etkisinin önemsenmeyecek seviyelere düştüğü gözlemlenmiştir. Bu aşamadan sonra, metal rondelâlardaki tüm kaplamalar yok oluncaya kadar belirleyici temel parametrelerin yüzeydeki kaplama alanlarının değişmesi kaynaklı sürtünme katsayısı değişimi ve efektif sürtünme yarıçapı değişimi olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum değerlendirilerek, açısal yorma sayısına bağlı olarak esnek rondelâ yük düşümü, sürtünme katsayısı değişimi ve efektif sürtünme yarıçapı değişim parametreleri dikkate alınarak nümerik bir çalışma yapılabilir.

Esnek rondela için mevcut proses ile üretimde yük ve boy kaybının hedef değerlerin çok üzerinde olduğu ve bunu limit değerlere çekebilmek için proses çalışmasının yapılması ve fonksiyonelliğinin iyileştirilmesi gerektiği ortaya konmuştur. Proses iyileştirilmesinin sağlanması neticesinde esnek rondelânın değişkenlik etkisinin azalacağı kabul edilebilir.

Titanyum Nitrür ve Nikel kaplama maliyetleri yüksek olduğu için otomotiv sektöründe kullanımları kısıtlı olabilir. NVH araç testleri gibi özel hazırlanması gereken test ürünlerinde ve uzun çalışma süreleri gerektiren prototip çalışmalarında kullanılabilir. Bu metodoloji önemli bir zaman avantajı sağlayabilir. Ayrıca, bu tez çalışmasının çıktıları ürün tasarımında girdi olarak kullanılabilir.

Metal rondelâlardaki kaplamanın, özellikle ürünün kullanılmaya başladığı ilk kilometrelerde histerisize etkisinin çok daha fazla olduğunu ve konforu etkileyebilecek seviyede önem arz ettiği gözlemlenmiştir. Fakat seri üretim şartları ve maliyet konuları dikkate alındığında kullanılabilirlikleri yüksek maliyetli olan kaplama çeşitleri için uygun değildir. Debriyaj sistemlerini ele alırsak, sadece özel çalışmalarda ve/veya Ar-Ge çalışmalarında kullanılabilir.

Yapılan çalışma ile esnek rondelâ yük ve boy kaybı, sürtünme yüzey değişimi ve metal rondelâlardaki kaplama etkisini içerecek matematiksel modelleme çalışması ve sistem geliştirmesi yapılabilir.

KAYNAKLAR

Abe, T. & Felice, M. J. (2010). Driving the next generation of powertrain NVH refinement through virtual design. *ISMA International Conference on Noise and Vibration Engineering,* 4275-4279.

Acar, H., Gul, C., Avcı, M., (2014). Clutch disc torsionel characteristics optimization to reduce idle and gear rattle on passenger car. *25th JUMV International Automotive Conference, 22-28.*

Aktir, Y., Brunel, J., Dufrenoy, P., Mahe, H. (2014). Modal analysis of automotive clutch using finite element method. *ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, *2.* https://doi.org/10.1115/ESDA2014-20166

Anonim, (2013). *Technical documentation of Valeo A.Ş.*

Anonim, (2014). *Technical documentation of Valeo A.Ş.*

Anonim, (2016). Kaplama teknolojileri ders notları. *Sakarya Üniversitesi*

Anonim, (2018). Metal rondelâ ve kaplama özellikleri. *Technical documentation of Valeo A.Ş.*

Anonim, (2019). Esnek rondelâ ve özellikleri. *Technical documentation of Valeo A.Ş.*

Buhl, R., Pulker, H. K., Moll, E., (1981). TiN coating on steel, *3rd International Conference on Ion and Plasma Assisted Techniques, 80*, 1–3, 265-270. https://doi.org/10.1016/0040-6090(81)90233-9

Avcı, M., Karamangil, M. İ., (2021). Improvement of Vibration Damping Performance for Automobile Clutches. *10th International Automotive Technologies Congress, 1.* 717-724.

ISO (2017, Mar 20) *Disc springs - Part 1: Calculation: ISO 19690-1*

Duque, E. & Augusto, R. (2012). Mathematical formulation of dynamic automotive clutch damper. *SAE Technical Papers*. https://doi.org/10.4271/2012-36-0454

Ercole, G., Mattiazzo, G., Mauro, S., Velardocchia, M., Amisano, F., Serra, G., (2000). Experimental methodologies to determine diaphragm spring clutch characteristics. *SAE Technical Papers.* https://doi.org/10.4271/2000-01-1151

Gaillard, C. L. & Singh, R. (1999). Dynamic analysis of automotive clutch dampers. *Elsevier, 60,* 4, 399-424. https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00005-0

Genc, M. O., Budak, B., Kaya, N. (2018). Modelling and vibration analysis of powertrain system. *International Journal of Automotive Science And Technology, 2,* 17-25. https://doi.org/10.30939/ijastech..345094

Otomobil Teknolojisi (n.d.). *Araç Çekiş Sistemleri-Aktarma Organları ve Tork Aktarımı*. Retrieved Jan 12, 2022 from https://otomobilteknoloji.blogspot.com/2017/06/arac-cekis-sistemleri-aktarma-organlari-tork-aktarimi.html

Engineering360 (n.d.). *Spring washers information.* Globalspec. Retrieved Feb 14, 2022 from https://www.globalspec.com/learnmore/mechanical_components/springs/washer_springs

Jadhav, S. M. (2014). Powertrain NVH analysis including clutch and gear dynamics. *SAE Technical Paper, 1.* https://doi.org/10.4271/2014-01-1680

Kato, H. & Hibi, K. (2007). A prediction method of vehicle vibration caused by the drive torque fluctuation at takeoff. *SAE Technical Paper, 1.* https://doi.org/10.4271/2007-01-3499

Keeney, C. S. & Shih, S. (1992). Prediction and control of heavy duty powertrain torsional vibration. *SAE Transactions*, *101*, 805–814. http://www.jstor.org/stable/44719853

Mattiazzo, G., Mauro, S. Velardocchia, M., Amisano, F., Serra, G., Ercole, G. (2002). Measurement of torque transmissibility in diaphragm spring clutch. *SAE Technical Paper ,1*. https://doi.org/10.4271/2002-01-0934

Montgomery, E. T., Welch, A. P., Joseph, L. (1956). Method of coating a metal surface. *United Stated Patent Office*

Nakayama, T., Satoh, H., Okada, E. (2003). Development of new conversion coating system. *SAE Technical Paper, 1*. https://doi.org/10.4271/2003-01-1243

Özdemir, U. & Erten, M. (2003). Plazma (iyon) nitrürleme yöntemi ve malzeme özellikleri üzerindeki ektisi. *Journal of Aeronautics and Space Technologies, 1(2).* 41–48. https://jast.hho.msu.edu.tr/index.php/JAST/article/view/80

Petri, H. & Heidingsfeld, D. (1989). The hydraulic torsion damper—A new concept for vibration damping in powertrains. *SAE Transactions*, *98*, 526–535. http://www.jstor.org/stable/44468793

Prasad, J., Damodar, N., Naidu, T. (2013). Clutch hysteresis maximization for elimination of gear rattle in a passenger bus. *SAE Technical Papers, 5*. https://doi.org/10.4271/2013-26-0100

Serrarens, A., Dassen, M., Steinbuch, M. (2004). Simulation and control of an automotive dry clutch. *Proceedings of the American Control Conference, 5*. 4078 - 4083. https://doi.org/10.23919/ACC.2004.1383947

Shanyong, Z. & Zhu, W. (1992) TiN coating of tool steels: a review. *Elsevier Journal of Materials Processing Technology, 39,* 165-177. https://doi.org/10.1016/0924-0136(93)90016-Y

Simko, S., Schneider, B., Tardiff, J., Jagner, M., Drews, A. (2009). Characterization of zirconium oxide-based pretreatment coatings part 1 - variability in coating deposition on different metal substrates. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2.* 416-424. https://doi.org/10.4271/2009-01-0890

Skup, Z. (2004). Vibration damping in a power transmission system containing a friction clutch. *Pamm, 4.* 111-112. https://doi.org/10.1002/pamm.200410037

Szadkowski, A., Prange, E., Naganathan, N. (1995) Hysteresis effects on driveline torsional vibrations. *SAE Technical Paper.* https://doi.org/10.4271/951293

Wojewoda, J., Stefanski, A., Wiercigroch, M., Kapitaniak, T., Ski, A. (2008). Hysteretic effects of dry friction: modelling and experimental studies. *Philosophical Transactions of The Royal Society A, 366.* 747-765. https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2125

Wu, H. & Wu, G. (2016). Driveline torsional analysis and clutch damper optimization for reducing gear rattle. *Shock and Vibration, Article ID 8434625.* https://doi.org/10.1155/2016/8434625