

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİŞLİ SİSTEMLERİNDE ÇELİK MALZEMELERİN EŞLENİK ÇALIŞMA
PERFORMANSININ ARTIRILMASINA YÖNELİK KAPLAMA
YÖNTEMLERİNİN BELİRLENMESİ VE PERFORMANS ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Feyza Hilal SAĞLAM

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

TEMMUZ 2025

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DIŞLI SİSTEMLERİNDE ÇELİK MALZEMELERİN EŞLENİK ÇALIŞMA
PERFORMANSININ ARTIRILMASINA YÖNELİK KAPLAMA
YÖNTEMLERİNİN BELİRLENMESİ VE PERFORMANS ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Feyza Hilal SAĞLAM

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet FIRAT

TEMMUZ 2025

Feyza Hilal SAĞLAM tarafından hazırlanan “Dişli Sistemlerinde Çelik Malzemelerin Eşlenik Çalışma Performansının Artırılmasına Yönelik Kaplama Yöntemlerinin Belirlenmesi ve Performans Analizi” adlı tez çalışması 11.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Mehmet FIRAT (Danışman)**

Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. A. Çağatay ÇİLİNGİR**

Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Emre ESENER**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “DİŞLİ SİSTEMLERİNDE ÇELİK MALZEMELERİN EŞLENİK ÇALIŞMA PERFORMANSININ ARTIRILMASINA YÖNELİK KAPLAMA YÖNTEMLERİNİN BELİRLENMESİ VE PERFORMANS ANALİZİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(11/07/2025)

Feyza Hilal SAĞLAM





Her zaman beni destekleyen güzel aileme ve arkadaşlarıma..



TEŞEKKÜR

Süreç boyunca akademik bilgi ve deneyimiyle tez çalışmama değerli katkılar sunan, yapıcı desteğiyle ilerlememe olanak sağlayan Prof. Dr. Mehmet Fırat'a; yol gösterici yaklaşımıyla bana rehberlik eden Doç. Dr. Osman Hamdi Mete'ye; deney süreçlerindeki büyük emekleri için Arş. Gör. Erhan Duru'ya; her zaman desteklerini hissettiren, üzerimde çok büyük emeği olan kıymetli aileme ve çok sevgili arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Feyza Hilal SAğLAM



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Kapsamı	1
1.2. Tezin Amacı	1
1.3. Tezin İkincil Amacı	2
1.4. Literatür Araştırması	2
1.5. Hipotez	6
2. DIŞLI SİSTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI	7
2.1. Paralel Eksenli Dişliler	7
2.1.1. Düz dişliler	8
2.1.2. Helisel dişliler	8
2.1.3. Çavuş dişliler	9
2.1.4. Bitişik çavuş dişliler	9
2.2. Çakışık Eksenli Dişliler	10
2.2.1. Düz konik dişliler	11
2.2.2. Spiral konik dişliler	11
2.3. Dikey Eksenli Dişliler	12
2.3.1. Hipoid dişli	13
2.3.2. Planet dişli	13
2.3.3. Sonsuz vida-dişli	14
3. SONSUZ VİDA-DIŞLI SİSTEMLERİNDE MALZEME SEÇİMİ	17
3.1. Sonsuz Dişlilerde Bronz Malzeme Kullanımı	17
3.2. Çelik Malzeme İle Bronz Malzeme Özelliklerinin Karşılaştırılması	18
4. MALZEMELERİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ VE TEST YÖNTEMLERİ	23
4.1. Yüzey Kaplama	23
4.1.1. Katı film kaplama	29
4.1.2. DLC kaplama	30
4.1.3. Sert krom kaplama	31
4.1.4. Ni-W kaplama	32
4.2. Belirlenen Kaplamaların Sertlik Değerleri	32
4.3. Kaplamanın Yapılmasında Kullanılan Cihazlar	33
4.3.1. Ultrasonik çözücü	34

4.3.2. Elektromanyetik karıştırıcı	34
4.4. Test Yöntemleri ve Kullanılan Cihazlar	35
4.4.1. Taramalı elektron mikroskobu	36
4.4.2. Tribometre	36
4.4.3. Bakalite alma cihazı	37
4.4.4. Zımparalama ve parlatma cihazı	37
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	39
5.1. Yüzey SEM Analizleri	43
5.2. Kesit SEM Analizleri	44
5.3. Aşınma Testi	44
5.4. Aşınma Sonrası SEM Analizi	46
6. SONUÇ VE TARTIŞMALAR	49
7. ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	65



KISALTMALAR

AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu)
cm	: Santimetre
CVD	: Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
DLC	: Diamond Like Carbon (Elmas Benzeri Karbon)
GPa	: Gigapascal
HV	: Vickers
m	: Metre
mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
PTFE	: Politetrafloroetilen
PVD	: Physical Vapour Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
SDS	: Sodyum Dodesil Sülfat
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)



SİMGELER

°C	: Santigrad Derece
Al	: Alüminyum
Br	: Brom
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
H	: Hidrojen
L	: Kayma mesafesi [m]
m	: metre [m]
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
N	: Kuvvet birimi – Newton [$\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$]
Na	: Sodyum
Ni	: Nikel
$t_{\text{on-toff}}$: Akım darbe süreleri [ms]
W	: Tungsten veya volfram
μ	: Sürtünme katsayısı



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Çelik ve bronz malzemelerin mekanik özellikleri.	19
Tablo 4.1. Kaplama yöntemleri ve kullanım alanları.	24
Tablo 4.2. Kaplama seçiminde dikkat edilecek kriterler.	26
Tablo 4.3. Belirlenen kaplama türleri ve özellikleri.	29
Tablo 4.4. Katı film kaplama.	30
Tablo 4.5. DLC kaplama.	31
Tablo 4.6. Sert krom kaplama.	32
Tablo 4.7. Ni-W kaplama.	32
Tablo 5.1. Ni-W kaplama reçetesi.	40
Tablo 5.2. Ball-on-flat testi koşulları.	45
Tablo 6.1. Kaplama türlerine göre aşınma testi sonrası hasar çeşitleri ve yorumları.	56
Tablo 6.2. Bronz ve DLC kaplamalı çelik dişliye ait maliyet kıyaslaması.	58
Tablo 6.3. Bronz dişli ve DLC kaplamalı çelik dişliye ait kıyaslama kriterleri.	58



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Düz dişli.....	8
Şekil 2.2. Helisel dişli.....	9
Şekil 2.3. Çavuş dişli.....	9
Şekil 2.4. Bitişik çavuş dişli.....	10
Şekil 2.5. Düz konik dişli.....	11
Şekil 2.6. Spiral konik dişli.....	12
Şekil 2.7. Dikey eksenli dişli çeşitleri.....	13
Şekil 2.8. Hipoid dişli.....	13
Şekil 2.9. Planet dişli.....	14
Şekil 2.10. Sonsuz vida-dişli.....	15
Şekil 2.11. Glooid vida-dişli.....	15
Şekil 3.1. Glooid dişli-vida.....	18
Şekil 4.1. Katı film kaplama yapılan çeşitli parçalar.....	30
Şekil 4.2. DLC kaplama yapılan parçalar.....	31
Şekil 4.3. Ultrasonik çözücü.....	34
Şekil 4.4. Elektromanyetik karıştırıcı.....	35
Şekil 4.5. Ball-on flat testi.....	36
Şekil 4.6. Taramalı elektron mikroskobu.....	36
Şekil 4.7. Tribometre.....	37
Şekil 4.8. Bakalite alma cihazı.....	37
Şekil 4.9. Zımparalama ve parlatma cihazı.....	38
Şekil 5.1. Numune ölçüleri.....	39
Şekil 5.2. Firmalarda kaplatılmış numune örnekleri a)Sert krom kaplama b) Katı film kaplama c) DLC kaplama.....	39
Şekil 5.3. Elektromanyetik karıştırıcı ile karıştırılan çözelti.....	41
Şekil 5.4. Zımpara çalışmaları.....	41
Şekil 5.5. Nitrik asit ve saf su karışımı.....	42
Şekil 5.6. Nitrik asit karışımına bandırılan numune ve elektrotlar.....	42
Şekil 5.7. Laboratuvar ortamında kaplanmış olan Ni-W kaplama numunesi.....	43
Şekil 5.8. Numunelerin bakalit üzerindeki görüntüleri.....	44
Şekil 5.9. Anton Paar CSM Tribometer.....	45
Şekil 5.10. Katı film kaplamalı numunenin test sonrası görüntüsü.....	45
Şekil 5.11. Aşınma sonrası numune görüntüleri a) Katı film kaplama b) DLC kaplama c) Sert krom kaplama d) Ni-W kaplama.....	46
Şekil 6.1. Yüzey SEM görüntüleri a) DLC b) Katı film kaplama c) Ni-W kaplama d) Sert krom kaplama.....	49
Şekil 6.2. Kesit SEM görüntüleri a) DLC b) Katı film kaplama c) Ni-W kaplama d) Sert krom kaplama.....	51
Şekil 6.3. Numune-Sertlik(HV) grafiği.....	52
Şekil 6.4. Kayma mesafesi – sürtünme katsayısı grafiği.....	53
Şekil 6.5. Numune-Aşınma hızı grafiği.....	54

Şekil 6.6. Aşınma sonrası DLC kaplama SEM görüntüsü.....	54
Şekil 6.7. Aşınma Sonrası katı film kaplama SEM görüntüsü.....	55
Şekil 6.8. Aşınma sonrası sert krom kaplama SEM görüntüsü.....	55
Şekil 6.9. Aşınma sonrası Ni-W kaplama SEM görüntüsü.....	55



DIŐLİ SİSTEMLERİNDE ÇELİK MALZEMELERİN EŞLENİK ÇALIŞMA PERFORMANSININ ARTIRILMASINA YÖNELİK KAPLAMA SEÇİMİ VE PERFORMANS ANALİZİ

ÖZET

Günümüzde mekanik sistemlerde verimlilik, dayanıklılık ve maliyet dengesini sağlamak, mühendislik uygulamaları açısından kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda, güç aktarım sistemlerinde kullanılan dişli mekanizmalarının malzeme seçimi ve mekanik özellikleri, sistemin performansı üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır.

Sonsuz vida-dişli mekanizmaları, yüksek iletim oranı sağlayabilmeleri ve kompakt yapıları sayesinde özellikle güç aktarım sistemlerinde yaygın olarak tercih edilen dişli türlerinden biridir. Bu sistemlerde, genel uygulama pratiğinde, sonsuz vida çelikten, karşılık gelen dişli ise bronz alaşımlardan üretilmektedir. Bu malzeme seçimi, temel olarak bronzun çeliğe karşı düşük sürtünme katsayısına ve iyi bir aşınma davranışına sahip olmasıyla ilişkilidir. Ancak günümüzde artan hammadde maliyetleri, sürdürülebilirlik kaygıları ve tedarik problemleri, bu geleneksel yaklaşımın yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle alüminyum bronz malzemenin birim maliyetinin çeliğe göre yaklaşık 20 kat daha yüksek olması, büyük ölçekli üretimlerde toplam maliyeti ciddi biçimde etkilemekte ve sistemin ekonomik verimliliğini düşürmektedir. Buna ek olarak, bronzun mekanik dayanımının çeliğe kıyasla sınırlı olması da yüksek yük altında çalışan sistemlerde işlevsel bir kısıt ortaya çıkarmaktadır.

Bu bağlamda, çalışmanın temel motivasyonu; çelik-çelik eşlenik dişli sistemlerinin yüzey kaplama teknolojileri ile desteklenerek hem aşınma performansının artırılması hem de ekonomik sürdürülebilirliğin sağlanmasıdır. Bu amaçla DLC, sert krom, nikel-tungsten (Ni-W) ve katı film gibi farklı yüzey kaplamaları çelik numuneler üzerine uygulanmış, bu kaplamaların tribolojik performansları sistematik bir şekilde analiz edilmiştir. Deneysel aşamada Vickers mikrosertlik ölçümleri, yüzey ve kesit SEM incelemeleri, kuru ortamda aşınma testleri ve sürtünme katsayısı (COF) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aşınma sonrası yüzey morfolojileri detaylı olarak değerlendirilerek, her bir kaplamanın çelik yüzeyler üzerindeki koruyucu etkisi ve yapısal bütünlüğü ortaya konmuştur.

Elde edilen veriler, bazı kaplama türlerinin çelik-çelik temas durumunda aşınma direncini ciddi oranda artırdığını ve sürtünme katsayısını düşürdüğünü göstermektedir. Bu bulgular, bronz yerine çelik kullanımının uygun kaplama teknolojileriyle desteklenmesi halinde mümkün olabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma sonsuz dişli malzemesi olarak bronz kullanıldığı durumda sistemde ortaya çıkan dezavantajları ortadan kaldırmak için ekonomik bir alternatif sunmakta hem de literatürde sınırlı olarak ele alınmış çelik-çelik eşlenik sonsuz vida-dişli sistemlerine dair özgün ve uygulanabilir teknik veriler kazandırmaktadır.



PERFORMANCE ANALYSIS OF VARIOUS COATING METHODS TO ENHANCE THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF STEEL MATERIALS IN GEAR SYSTEMS

SUMMARY

In today's engineering practices, efficiency, durability, and cost-effectiveness are core concerns in the design and operation of mechanical transmission systems. Among various gear mechanisms, worm gear systems are widely employed due to their ability to provide high reduction ratios within compact geometries. Traditionally, the worm is manufactured from steel, while the mating worm wheel is typically produced from bronze alloys. This conventional material pairing has long been favored owing to bronze's advantageous tribological properties, particularly its low coefficient of friction (COF) and satisfactory wear resistance when operating against steel.

However, rising raw material costs, global supply chain disruptions, and growing sustainability concerns have prompted a critical reassessment of material selection in such systems. In particular, bronze's significantly higher cost—up to 20 times more expensive per unit than steel—introduces major economic burdens in large-scale production, thereby reducing the overall efficiency and feasibility of these systems. Moreover, bronze's limited mechanical strength compared to steel restricts its applicability in high-load applications, thus creating functional limitations. These factors underline the necessity of exploring alternative solutions that maintain or enhance performance while improving economic and structural efficiency.

This study is motivated by the need to develop a technically and economically viable solution that replaces bronze with steel in conjugate gear applications, particularly in worm gear mechanisms. The primary research hypothesis is that the wear and friction limitations associated with steel-on-steel contact can be significantly mitigated through the use of advanced surface coating technologies. By applying protective coatings to steel components, it may be possible to enhance tribological performance, improve wear resistance, and reduce friction to levels comparable with or superior to traditional bronze-steel pairings.

The main objective of this thesis is to investigate the tribological behavior of coated steel surfaces in a steel-steel conjugate configuration and to determine the effectiveness of various surface coatings in enhancing mechanical performance. The study specifically evaluates the suitability of DLC (Diamond-Like Carbon), hard chrome, Ni-W (nickel-tungsten alloy), and solid film coatings in terms of their protective properties, structural integrity, and overall contribution to system efficiency.

To assess the performance of the selected coatings, a comprehensive experimental program was designed and executed. Steel specimens were coated with four different commercially and industrially viable coatings: DLC, hard chrome, Ni-W alloy, and solid film. The coated samples underwent a series of standardized tests aimed at

evaluating their hardness, wear resistance, surface morphology, and frictional behavior.

First, surface and cross-sectional analyses were performed using Scanning Electron Microscopy (SEM) to observe coating uniformity, thickness distribution, and any potential defects. Vickers microhardness testing was conducted to measure the hardness improvements introduced by the coatings. Subsequently, tribological behavior was examined through dry sliding wear tests based on the pin-on-disc method. These tests aimed to determine both the volume loss due to wear and the coefficient of friction throughout the sliding process. Post-wear surface morphology was again analyzed using SEM to investigate wear mechanisms and surface damage characteristics.

The experimental findings revealed that each coating exhibited unique tribological characteristics, but all showed improvements over uncoated steel in terms of wear resistance and COF reduction. DLC, in particular, demonstrated superior performance by offering both low friction values and high wear resistance, attributable to its high hardness and self-lubricating nature. The Ni-W alloy coating also presented promising results due to its dense microstructure and high surface hardness. Hard chrome, while providing moderate frictional performance, showed excellent wear resistance under specific conditions. The solid film coating was effective in reducing COF but was found to be less durable under prolonged loading conditions.

Overall, the coatings significantly mitigated the limitations of steel-on-steel contact, validating the hypothesis that surface treatments can effectively transform conventional steel components into high-performance alternatives to bronze-based systems. The improvements in surface hardness and the ability of the coatings to resist material transfer and adhesive wear played a central role in the performance enhancements observed.

In addition to the technical performance, the economic and environmental implications of transitioning from bronze to coated steel components must be considered. The drastic cost difference between steel and bronze makes the former a more attractive choice, especially when enhanced with high-performance coatings. Moreover, reducing the dependency on non-ferrous metals like bronze, which require energy-intensive extraction and processing methods, contributes to the overall sustainability of manufacturing operations. Coated steel alternatives offer a pathway to more eco-friendly production systems, minimizing resource depletion while maintaining high functionality. Such transitions are particularly vital in the current era where environmental compliance and carbon footprint reduction are becoming industry-wide priorities.

This study provides valuable experimental evidence to support the application of surface coatings in gear mechanisms involving steel-on-steel contact. The results indicate that a properly selected coating not only enhances mechanical properties such as wear resistance and friction control but also allows for significant cost savings by enabling the replacement of bronze with steel. From an industrial perspective, the ability to switch to steel components without compromising system performance offers considerable advantages in terms of both sustainability and operational efficiency.

Furthermore, this research contributes to the existing body of knowledge by focusing on an area that remains underrepresented in the literature: conjugate steel gear systems in worm gear applications. The comparative analysis of four different coatings,

supported by detailed experimental data, serves as a practical guide for engineers and researchers involved in material selection and surface engineering.

The outcomes of this study are directly applicable to a wide range of mechanical systems that rely on gear-based motion transmission. Industries such as automotive, aerospace, robotics, heavy machinery, and defense can benefit from these findings by integrating coated steel solutions into their gear assemblies. For instance, in automotive powertrains and steering systems where worm gears are prevalent, enhanced wear resistance can extend the service life and reduce maintenance costs. Similarly, in defense applications where reliability under extreme load conditions is crucial, the use of coated steel provides both robustness and efficiency. The selection criteria and empirical data presented in this thesis can thus serve as a practical reference for engineers and decision-makers in industrial settings.

While this study has demonstrated promising results, several avenues remain open for further research. Future studies could explore the long-term durability of coatings under cyclic loading and varying temperature conditions to simulate real-world operational environments. Additionally, the combination of multiple coatings (hybrid or multilayer systems) could be investigated to achieve synergistic performance improvements. It would also be beneficial to develop predictive wear models using computational simulations supported by the empirical data gathered in this research. Such models would allow for more accurate service life estimations and material optimization in early design stages. Further collaboration with industry partners could also accelerate the implementation of these findings into commercial products.

In conclusion, the findings of this thesis highlight the potential of surface coating technologies to extend the functional capabilities of steel gear components in demanding applications. By successfully addressing both tribological performance and economic feasibility, this study lays the groundwork for broader adoption of coated steel materials in gear transmission systems, particularly in scenarios where bronze usage is no longer sustainable. The results offer both academic insights and real-world applicability, positioning this research as a valuable contribution to modern mechanical design practices.



1. GİRİŞ

Dişli mekanizmaları, hareket ve güç iletiminde yüksek verimlilik, kompaktlık ve dayanıklılık sunmaları nedeniyle makine mühendisliğinin temel yapı taşları arasında yer almaktadır. Bu sistemler arasında sonsuz vida-redüktör mekanizmaları, yüksek dişli oranları sağlamaları ve sessiz çalışmaları nedeniyle özellikle tercih edilmektedir. Bu tür sistemlerde geleneksel yaklaşım, sürtünme ve aşınma dengesini sağlamak amacıyla bir elemanın çelikten, diğersinin ise bronz alaşımından imal edilmesidir. Bronzun çeliğe karşı daha düşük sürtünme katsayısına sahip olması, bu seçimde belirleyici rol oynamaktadır. Ancak bronzun yüksek maliyeti ve sınırlı mekanik dayanımı, bu yaklaşımın uzun vadeli sürdürülebilirliğini tartışmalı hale getirmiştir.

1.1. Tezin Kapsamı

Bu tez çalışması, çelik-çelik eşlenik sistemlerin yüzey kaplama teknolojileri ile optimize edilmesi üzerine odaklanmaktadır. Çalışma kapsamında dört farklı yüzey kaplaması olan DLC, sert krom, Ni-W ve katı film kaplamalar çelik numuneler üzerine uygulanmış ve bu kaplamaların tribolojik performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Deneysel süreç; yüzey ve kesit SEM görüntüleri, Vickers sertlik değerlerinin karşılaştırılması, kuru ortamda aşınma testleri, sürtünme katsayısı (COF) değişimi ve aşınma sonrası yüzey incelemeleri gibi kapsamlı karakterizasyonları içermektedir.

1.2. Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı, çelik dişli sistemlerinde kaplama teknolojilerinin uygulanabilirliğini araştırmak bronzla kıyasla daha üstün mekanik performans sunacak bir çözüm ortaya koymaktır. Çelik-çelik eşlenik yapının yüzey kaplama ile desteklenmesiyle, aşınma direncinin artırılması ve sürtünmenin kontrol altına alınması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, her kaplamanın yapısal bütünlüğü, aşınma davranışı ve yüzey morfolojisi deneysel verilerle değerlendirilmiştir.

1.3. Tezin İkincil Amacı

Tezin ikincil amacı, literatürde sınırlı sayıda incelenmiş olan çelik-çelik eşlenik sonsuz vida sistemleri üzerine yeni ve karşılaştırmalı veriler sunarak, mühendislik uygulamalarına doğrudan katkı sağlamaktır. Ayrıca, bronz yerine çelik malzeme kullanımının tercih edilmesiyle hem maliyet açısından avantaj sağlanması, hem de performans değerlendirmeleri doğrultusunda endüstride kaplama seçimine yönelik somut teknik verilerin sunulması amaçlanmıştır. Böylece yalnızca akademik değil, pratik uygulamalar için de yönlendirici sonuçlar elde edilmiştir.

1.4. Literatür Araştırması

Sonsuz vida-dişli sistemleri, yüksek indirgeme oranları sağlayabilen, sessiz çalışan ve kompakt yapıları sayesinde birçok endüstriyel uygulamada tercih edilen özel dişli mekanizmalarıdır. Bu sistemlerin temel özelliği, kaymalı temasın baskın olduğu bir çalışma şekline sahip olmalarıdır. Bu kaymalı hareket, özellikle temas halindeki yüzeylerde aşınmaya neden olabilecek yüksek sürtünme gerilmeleri oluşturur. Bu nedenle, sonsuz dişli sistemlerinde kullanılan malzeme kombinasyonları, tribolojik performans açısından son derece kritik öneme sahiptir.

Geleneksel tasarım yaklaşımında, sonsuz vida genellikle çelik (örneğin 42CrMo4) gibi yüksek mukavemetli malzemelerden imal edilirken, sonsuz dişli çarkı çoğunlukla bronz alaşımlardan üretilmektedir. Bronzun burada tercih edilme sebebi, çelikle eşlenik çalıştığında düşük sürtünme katsayısı göstermesi, yüzeyde oluşabilecek yapışma ve aşınma risklerini minimize etmesi ve yağlayıcı tutma kapasitesinin yüksek olmasıdır. Özellikle kalay bronzları (CuSn10, CuSn12) ve alüminyum bronzlar (CuAl10Ni5Fe4) sonsuz dişlilerde sıkça tercih edilen alaşımlardır.

Bronz, mikroyapısal olarak yumuşak bir malzeme olduğu için çelik vidaya göre daha fazla deformasyona uğrar, bu sayede yük altında kendini kısmen şekillendirerek temas yüzeyinin genişlemesini sağlar. Bu durum, yüzeydeki temas basıncını azaltır ve yüzeylerin mikro ölçekte uyumlanmasına katkı sunar. Ayrıca bronzun yağ filmi tutabilme özelliği sayesinde, kaymalı temas yüzeyleri arasındaki sınır yağlama koşullarında dahi koruyucu bir film tabakası oluşur ve bu da sistemin aşınma direncini artırır.

Tüm bu avantajlarına rağmen, bronz malzemelerin kullanımının bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Öncelikle, bronzun birim maliyeti çeliğe kıyasla oldukça yüksektir. Ayrıca bronz, mekanik olarak çeliğe göre daha düşük mukavemet ve sertlik değerlerine sahiptir; bu da yüksek yük altında deformasyon riskini artırır. Bu tür dezavantajlar, özellikle ağır hizmet uygulamalarında bronzun ömrünü kısıtlayabilir. Buna ek olarak, bronz üretimi ve işlenmesi sırasında oluşan çevresel etkiler de sürdürülebilirlik açısından yeniden değerlendirme gerektirmektedir. Bronz malzeme, çelikle eşlenik çalıştığında sunduğu tribolojik avantajlar sayesinde sonsuz dişli sistemlerinde tarihsel olarak yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Ancak, artan maliyet ve performans beklentileri doğrultusunda bronzun yerini alabilecek alternatif çözümler araştırılmaktadır.

Gelişen teknolojiyle birlikte yüzey özelliklerini değiştirme ve iyileştirmeye yönelik uygulamalar, çok çeşitli teknikler ve malzemeler aracılığıyla gerçekleştirilmekte; bunlar genel olarak kaplama, yüzey alaşımlama, yüzey sertleştirme ve ince film teknolojileri olarak sınıflandırılmaktadır. Özellikle ince film kaplama yöntemleri, mikro ölçekte yüzeye kontrollü yapılar kazandırarak tribolojik performans üzerinde belirgin iyileşmeler sağlamaktadır. Bu tür kaplamalar; difüzyon, fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve elektrodepozisyon gibi farklı tekniklerle uygulanabilmekte, uygulama yöntemi kaplamanın morfolojisini, kalınlığını ve işlevini doğrudan etkilemektedir.

Özellikle yüksek temas basınçlarına ve kaymalı harekete maruz kalan sistemlerde, kaplama türünün seçimi kadar, bu kaplamaların yapısal özellikleri, ortam koşullarına duyarlılıkları ve alt tabaka ile uyumları da belirleyici parametreler olarak vurgulanmaktadır. Birçok çalışma, belirli kaplamaların sadece belirli uygulama koşullarında yüksek performans gösterdiğini, ancak tüm sistemler için tek başına yeterli olmadığını ortaya koymuştur. Bu nedenle kaplama seçimi yapılırken yalnızca laboratuvar test sonuçları değil, aynı zamanda sistemin çalışma karakteristiği, ekonomik sürdürülebilirlik ve üretim kabiliyetleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu çalışmada ele alınan kaplama yöntemlerinin seçimi, öncelikle yukarıda özetlenen literatür eğilimleri ve uygulama örnekleri temel alınarak gerçekleştirilmiştir. İncelenen kaynaklarda tribolojik anlamda en fazla öne çıkan, farklı mekanizmalarla çalışan ve çelik yüzeylerde başarılı sonuçlar verdiği raporlanan kaplama türleri dikkate alınmıştır. Seçim yapılırken, endüstriyel uygulanabilirlik, çevresel etki, kaplama

kalınlığı kontrolü ve yüzeyle olan bağ dayanımı gibi teknik kriterler de değerlendirilmiştir.

Bu doğrultuda, çalışmada dört farklı yüzey kaplama yöntemi üzerinde durulmuştur: elmas benzeri karbon (DLC) kaplama, sert krom kaplama, katı film kaplama (örneğin MoS₂ bazlı) ve nikel-tungsten (Ni-W) alaşım kaplama. Her biri farklı bir kaplama teknolojisini ve mekanizmasını temsil eden bu yöntemler, çelik malzemenin yüzey özelliklerini iyileştirme yönünde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Dişli sistemlerinin tribolojik davranışlarını inceleyen çalışmalar, uzun yıllardır mekanik tasarım ve malzeme mühendisliği literatüründe önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle sonsuz vida mekanizmalarında dişli elemanlarının malzeme seçimi, sistemin verimliliğini, ömrünü ve bakım gereksinimlerini doğrudan etkileyen temel bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel yaklaşımlarda, farklı sertlik seviyelerine sahip malzemeler eşleştirilerek sürtünme ve aşınma dengesi sağlanmaya çalışılmıştır. Örneğin sonsuz vida malzemesi olarak çelik kullanılırken eşlenik olarak çalıştığı sonsuz dişli malzemesi için bronz kullanılmaktadır.

Ancak artan üretim maliyetleri, çevresel etkenler ve daha uzun ömürlü sistemlere duyulan ihtiyaç, bu alanda yeni çözümlerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu doğrultuda, yüzey kaplama teknolojilerinin kullanımı, son yıllarda literatürde giderek daha fazla yer bulmaktadır.

Çelik-çelik eşlenik sistemlerde tribolojik performansın artırılması, malzeme mühendisliği açısından oldukça zorlu bir optimizasyon sürecini gerektirmektedir. Aynı sertlik düzeyine sahip iki metal yüzeyin doğrudan teması, genellikle yüksek sürtünme katsayısı, yapışma aşınması ve termal gerilmelerin artması gibi olumsuz etkilerle sonuçlanmaktadır. Bu durum, özellikle kaymalı hareketin hâkim olduğu sonsuz vida sistemlerinde yüzeyde erken bozulmalara ve sistem ömrünün kısalmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, benzer sertliğe sahip malzemelerin eşlenik çalışmasını mümkün kılmak için, bu yüzeylerin tribolojik olarak kararlı hale getirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, kaplama teknolojilerinin çelik-çelik sistemlerdeki bu temel zafiyeti ortadan kaldırmak amacıyla kullanılması hedeflenmiştir. Seçilecek kaplamaların belirlenmesinde öncelikle tribolojik dayanımın sağlanması, düşük sürtünme ile çalışmaya imkân tanınması gibi teknik kriterler dikkate alınmıştır. Ayrıca, uygulama

sürecinin endüstriyel ölçekte gerçekleştirilebilir olması, çevresel etkiler açısından sürdürülebilirlik taşıması ve kaplamanın termal/kimyasal kararlılığı gibi mühendislik gereksinimleri de değerlendirme sürecine dahil edilmiştir.

Kaplama türlerinin seçiminde bir diğer önemli husus, her bir kaplamanın farklı mekanizmalarla tribolojik iyileştirme sağlamasıdır. Örneğin DLC kaplama, yüksek sertlik ve sürtünmeyi doğrudan azaltma potansiyeline sahipken; sert krom kaplama, mikro sertlik ve yüzey koruma sağlamakta; Ni-W alaşımı mikro yapı kararlılığı ile dikkat çekmekte; katı film kaplamalar kendinden yağlayıcı özelliği sayesinde düşük sürtünme katsayısına sahip olmasıyla ideal çözümler sunmaktadır. Bu çeşitlilik sayesinde, hem karşılaştırmalı analiz yapma hem de farklı koşullar altında optimum çözüm arayışı mümkün kılınmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalarda, çeşitli kaplamaların sürtünme katsayısı, sertlik ve aşınma performansları sayısal olarak değerlendirilmiştir. Örneğin DLC (elmas benzeri karbon) kaplamaların 1800–4500 HV aralığında sertlik sunduğu ve kuru ortamda sürtünme katsayısını 0,07 – 0,15 e kadar düşürdüğü bildirilmiştir. Bu özelliği sayesinde, yüksek kayma yükleri altında çalışan sistemlerde aşınmayı önemli ölçüde azaltarak ömrü artırmaktadır. Sert krom kaplamalar, 800–1100 HV sertlik sunmakta olup yağlı koşullarda 0,12 gibi düşük sürtünme katsayısı gösterebilmesine rağmen, kuru koşullarda bu değer 0,6–0,8 seviyelerine çıkabilmektedir. Ni-W kaplamalar ise 500–900 HV arası sertlik değeri ve yağlı koşullarda 0,15–0,25 arasında sürtünme katsayısı ile dikkat çekmekte olup, elektrodepozisyon yöntemiyle yüzeye uygulanabilmektedir. Katı film kaplamalar (örneğin MoS₂ bazlı sistemler), 100–300 HV arası sertlik ve 0,05–0,15 arası sürtünme katsayısıyla, özellikle kuru ortamda çalışması gereken sistemler için uygun alternatifler sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışmada seçilen kaplamalar, çelik-çelik eşlenik sistemlerin tribolojik olarak sürdürülebilir hale getirilmesi yönünde literatürden elde edilen teknik bulgular, deneysel uygulanabilirlik ve sektörel gereklilikler dikkate alınarak belirlenmiştir.

Yapılan literatür taramalarında, söz konusu kaplamaların farklı alanlardaki performansları detaylı şekilde incelenmiş olmakla birlikte, sonsuz vida-dişli mekanizmalarına özgü çelik-çelik temaslı sistemler üzerine oluşturulan çalışmaların sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, bu tez çalışması, literatürdeki boşluğa

doğrudan katkı sağlayacak şekilde, farklı kaplamaların çelik malzeme üzerindeki tribolojik davranışlarını deneysel olarak karşılaştırmalı biçimde analiz etmeyi hedeflemektedir.

1.5. Hipotez

Çelik-çelik eşlenik sonsuz dişli sistemlerinde, yüzey kaplamalarının uygulanması yoluyla geleneksel çelik-bronz eşleşmesine alternatif oluşturulabileceği yönündedir. Yüzey kaplama teknolojileri ile desteklenen çelik malzemelerin, sürtünme ve aşınma davranışı açısından yeterli performans göstererek hem mekanik dayanım hem de ekonomik açıdan avantaj sağlayacağı öngörülmektedir.

Bu bağlamda, farklı özelliklere sahip DLC, sert krom, Ni-W ve katı film kaplamaların çelik yüzeyler üzerindeki tribolojik performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Uygun kaplama yöntemi ile çelik yüzeyin aşınmaya karşı korunabileceği, sürtünmenin düşürülebileceği ve sistemin hizmet ömrünün artırılabilceği değerlendirilmektedir. Aynı zamanda, bronz kullanımı yerine çelik kullanımına geçilmesi ile malzeme maliyetlerinde ciddi bir azalma sağlanabileceği varsayılmaktadır. Artan mekanik dayanım sayesinde, daha kompakt boyutlarda tasarlanan sistemlerle istenen çıkış torkunun sağlanması da mümkün olabilecektir.

Bu hipotez doğrultusunda yürütülen deneysel çalışmalarda, her bir kaplamanın yüzey morfolojisi, sertlik değerleri, sürtünme katsayısı değişimi ve aşınma sonrası yapısal bütünlüğü değerlendirilerek, çelik-çelik sistemlerin kaplama destekli uygulanabilirliği test edilmiştir.

2. DIŐLİ SİSTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Tahrik teknolojilerinin temel bileşenlerinden olan, hareket veya güç iletimini sağlamakta olan dişliler, diş profilleri ve pozisyonlarına göre farklı hız ve tork iletimini mümkün hale getirmektedir.

Mekanik güç aktarımında oldukça kritik bir görev üstlenen ve kullanım alanına göre çok çeşitli tasarımlarda türlere sahip olan dişli sistemleri; eşlenik çalışan dişlilerin eksenlerinin birbirine olan konumlarına göre sınıflandırılabilir.

Birinden diğerine kuvvet ve hareket ileten millerin eksenleri birbirine paralel, dikey ya da çakışık olabilir. Bu makine elemanları birçok alanda kullanılmaktadır. Güç ve devir aktarımına ihtiyaç duyan makinelerin tamamında dişli kullanılmaktadır. [1]

2.1. Paralel Eksenli Dişliler

Paralel eksenli dişli sistemleri, güç ve hareket iletiminin birbirine paralel konumlanmış iki mil arasında gerçekleştirildiği mekanik yapılarıdır. Bu tür sistemlerde tahrik ve tahrip edilen dişli millerinin eksenleri aynı düzlem üzerinde yer almakta olup, dişliler arasındaki temas çizgisel düzlemde meydana gelir. Moment aktarımı, dönme yönü değiştirilmeden, yüksek verimle ve sabit eksen mesafesiyle sağlanır.

Paralel eksenli dişli mekanizmalarının tasarımında, mil konumları arasındaki rijitlik, dişli çarklar arasındaki eksenel hizalama ve yük dağılımı kritik parametrelerdir. Bu sistemlerde kullanılan dişliler, genellikle silindirik yapıda olup, dönel hareketin sorunsuz şekilde iletilmesi amacıyla hassas yüzey işleme ve doğru montaj gerektirir. Ayrıca, yüksek çevrim oranlarına ve büyük yük taşıma kapasitelerine ulaşmak için çok kademeli çözümler sıklıkla tercih edilmektedir.

Çalışma koşullarına bağlı olarak; dişli geometrisinin yanı sıra, malzeme özellikleri, yüzey pürüzlülüğü, ısıl işlem uygulamaları ve yağlama tipi de sistem performansını doğrudan etkileyen unsurlar arasında yer alır. Paralel eksenli yapılar, düşük kayma oranları ve dengeli yük iletimi sayesinde hem yüksek verimli hem de uzun ömürlü güç aktarım elemanları olarak değerlendirilir.

2.1.1. Düz dişliler

Dişliler arasında en sık rastlanan dişli tipidir. Paralel millere ve düz dişlere sahiptir. Dişlinin merkez eksenini, dişli üzerinde bulunan dişlere paraleldir. Dişlerin eşlenik çalışma esnasında birbirini üzerine geçme şekli sebebi ile çalışma gürültü seviyesi yüksektir. Bu sebeple, yaygın olarak düşük hıza sahip uygulamalarda tercih edilmektedir. [3]

Genellikle kullanıldıkları alanda torku artırmak ya da azaltmak için kullanılmaktadır. [2]

Üretimleri basittir. Bu dişlilerin tasarımı da kolaydır.



Şekil 2.1. Düz dişli.

2.1.2. Helisel dişliler

Helis dişlileri düz dişlilerden ayıran yönleri tasarımlarındaki bazı detaylardan dolayı ortaya çıkmaktadır. Helisel dişlilerde, helis şeklinde eğilimli olarak yer alan dişler mevcuttur. Dişlerin geometrisinden kaynaklanan bu farklılıklar, dişlerin çalışma performansında da değişiklikler oluşturmaktadır. Helisel dişliler, düz dişlilere kıyasla daha sessiz çalışırlar. Daha büyük yük ve daha yüksek hız kriterlerine sahip çalışma koşullarında, düz dişlilere kıyasla helisel dişliler öne çıkmaktadır. [3]



Şekil 2.2. Helisel dişli.

2.1.3. Çavuş dişliler

Helisel diş profiline sahip iki dişlinin sırt sırta getirilmesi ile oluşan dişli mekanizmasıdır. Dişler üzerine gelen aksenal yüklerin birbirini karşılıklı olarak dengeliyor olmasından kaynaklı, mil üzerinde aksenal yük ortaya çıkmaz. Helis dişler, büyük radyal yük taşıma kapasitesine sahiptir. Bu sebeple çavuş dişliler de bu özellikten faydalanarak büyük yük taşıma ve dayanım talep edilen çalışma koşullarında kullanılmaktadır. [4]



Şekil 2.3. Çavuş dişli.

2.1.4. Bitişik çavuş dişliler

Bitişik çavuş dişliler, her iki yönde helisel diş açısına sahip diş profillerinin tek bir dişli gövdesi üzerinde simetrik olarak yerleştirilmesiyle oluşturulan, gelişmiş bir helisel dişli türüdür. Diş profilleri karşıt açılarda yer aldığından, aksenal kuvvetler

birbirini dengeleyerek sistemin yataklama yükünü azaltır ve daha sessiz, titreşimsiz bir çalışma karakteristiği sağlar. Bu özellikleri sayesinde bitişik çavuş dişliler, yüksek tork iletimi gereken, aynı zamanda dengeli ve sürekli yük aktarımının kritik olduğu ağır hizmet uygulamalarında tercih edilmektedir. Düzgün yük dağılımı ve yüksek yüzey temas oranı, bu dişli türünün hem verimini hem de aşınma ömrünü artırmaktadır. Üretimi klasik helisel dişlilere kıyasla daha karmaşık ve hassas tolerans gerektirir; bu nedenle ileri imalat teknolojileri ve yüksek hassasiyetli takım tezgâhları gerektirebilir. Bitişik çavuş dişliler, özellikle ağır sanayi redüktörlerinde, denizcilik transmisyonlarında ve türbin tahrik sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. [1]



Şekil 2.4. Bitişik çavuş dişli.

2.2. Çakışık Eksenli Dişliler

Çakışık eksenli dişliler, tahrik eden ve edilen millerin eksenlerinin belirli bir noktada kesiştiği mekanik sistemleri ifade eder. Bu tür dişli düzeneklerinde, dönme hareketi iki mil arasında sabit bir açı altında, eksenel kesişim noktası üzerinden iletilir. Eksenlerin genellikle 90° açıyla kesiştiği bu yapılar, yön değişiminin gerekli olduğu uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir.

Bu eksenel yapı sayesinde, sistemler kompakt bir şekilde yerleştirilebilirken aynı zamanda yüksek moment aktarımı da sağlanabilir. Dişliler, konik bir yüzey üzerine işlenen profiller yardımıyla güç iletimini gerçekleştirir. Eksenel kesişme geometrisi, dişli temas koşullarını doğrudan etkileyerek hem verim hem de çalışma karakteristiklerini belirler.

Çakışık eksenli sistemlerin tasarımında, eksen açısı, dişli hizalaması, yataklama düzeni ve montaj toleransları dikkatle değerlendirilmelidir. Ayrıca bu tür dişli

çiftlerinde oluşan temas tipi, kayma ve yuvarlanma bileşenlerinin birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Bu durum, yağlama koşullarının ve yüzey kalitesinin sistem performansı üzerindeki etkisini artırmaktadır.

Çakışık eksenli dişliler; otomotiv, havacılık, ağır makine ve enerji aktarım sistemleri gibi alanlarda, eksenel yön değişiminin gerektiği durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.2.1. Düz konik dişliler

Koni şeklinde olan konik dişliler arasında, düz dişli profiline sahip olan dişlilerdir. Bu dişli türleri, kesişen miller arasındaki moment ve güç aktarımı yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Aralarındaki açı genelde 90 derece olsa bile farklı açılarda da çalışabilmektedir. Dişliler birbirine aniden temas ettiğinden dolayı şok yüke maruz kalmaktadır.



Şekil 2.5. Düz konik dişli.

2.2.2. Spiral konik dişliler

Spiral konik dişliler, eksenleri belirli bir açıda kesişen miller arasında güç ve hareket iletimi sağlamak amacıyla kullanılan, konik yüzey üzerine helisel diş açısı ile işlenmiş dişlilerdir. Diş profillerinin eğrisel bir hatta yerleştirilmiş olması, temas yüzeyinin artmasını sağlar ve bu sayede yük aktarımı daha dengeli, sessiz ve titreşimsiz bir şekilde gerçekleşir. Bu dişlilerde, birden fazla dişin aynı anda temas etmesi hem temas oranını artırır hem de darbe yüklerini azaltır. Spiral konik dişliler, özellikle yüksek hız ve yüksek moment gerektiren uygulamalarda düz konik dişlilere göre üstün performans gösterir. Ancak bu avantajlarının yanında, üretim süreçleri daha karmaşık olup hassas diş işleme, uygun takım geometrisi ve dikkatli montaj gerektirir. Montaj sırasında hassas hizalama yapılmadığı takdirde gürültü, aşınma ve verim kaybı oluşabilir. Bu dişliler otomotiv diferansiyelleri, havacılık tahrik sistemleri ve yüksek devirli makine transmisyonlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.6. Spiral konik dişli.

2.3. Dikey Eksenli Dişliler

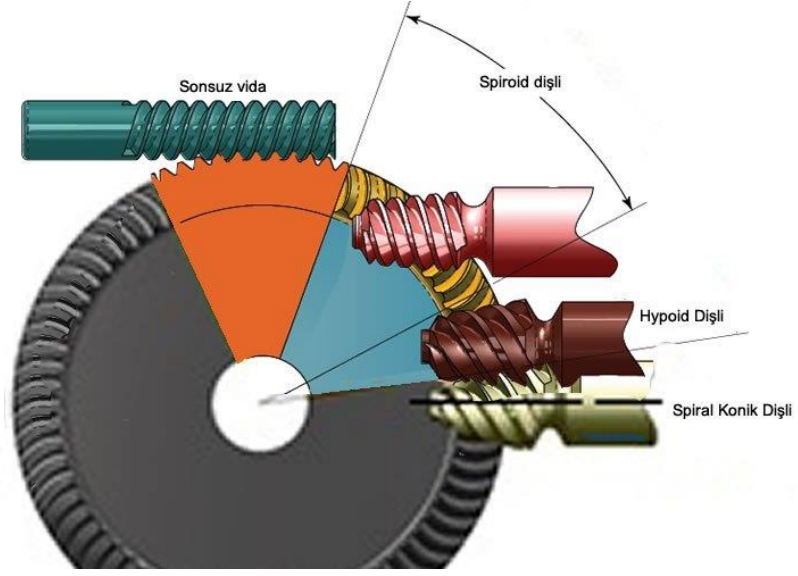
Dikey eksenli dişliler, tahrik eden ve edilen millerin eksenlerinin birbirine dik olarak konumlandığı, yani eksenler arasında genellikle 90° 'lik bir açı bulunan dişli sistemlerini tanımlar. Bu yapı sayesinde dönme hareketi bir eksenenden diğerine yön değiştirilerek aktarılır. Bu tür dişli konfigürasyonları, sınırlı alanlarda yön değişimi gereken uygulamalarda önemli bir avantaj sağlar.

Dişli çiftleri arasındaki temas, hem kayma hem de yuvarlanma bileşenlerini içerdiği için, sistemin verimi doğrudan diş geometrisi, hizalama doğruluğu, yüzey kalitesi ve yağlama koşulları gibi faktörlere bağlıdır. Dikey eksenli yapılar genellikle özel geometrilere sahip dişli türleri ile gerçekleştirilir ve bu sayede hem tork aktarımı sağlanır hem de aksenal yön değişimi elde edilir.

Bu sistemlerin tasarımında eksen açıklığı, dişli merkezlerinin hassas konumlandırılması, yataklama yapısı ve montaj toleransları dikkatle değerlendirilmelidir. Ayrıca dikey eksen konfigürasyonlarında, dişliler arasında yüksek kayma oranı oluşabileceği için aşınma davranışı da önemli bir tasarım kriteri haline gelir. Bu nedenle yüzey sertliği, kaplama özellikleri ve uygun yağlama sistemi seçimi, çalışma ömrünü belirleyen kritik parametrelerdendir.

Dikey eksenli dişli sistemleri; sonsuz vida mekanizmaları, globoid yapılar ve bazı özel redüktör tasarımlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu sistemler, ters tahriki sınırlama kabiliyeti, kompakt yerleşim avantajı ve yüksek çevrim oranları ile öne çıkar.

Dikey eksenli dişlilerin çeşitli türleri bulunmaktadır. [5]



Şekil 2.7. Dikey eksenli dişli çeşitleri.

2.3.1. Hipoid dişli

Gleason şirketi bünyesinde otomobillerin arka akslarının tahrik edilmesi amacıyla geliştirilmiş olan bir dişli türüdür. Spiral konik dişlilere benzerlikleri yüksektir. Farklı olarak, kesişmeyen miller arasında hareket iletimi sağlamaktadır.

Daha fazla yüzey teması sağlamaktadırlar. Konik dişliler ile kıyaslandığında, benzer boyutlarda olan konik dişlilere göre daha yüksek çıkış torkuna sahiptirler. Dişler arasındaki temas yüzeyleri çok daha iyi seviyede olduğundan dolayı daha sessiz çalışmaktadırlar. İmalat ve tasarımda ortaya çıkan zorluktan dolayı yüksek teknoloji sınıfına giren dişliler arasında yer almaktadır. [6]



Şekil 2.8. Hipoid dişli.

2.3.2. Planet dişli

Merkezde bulunan dişli güneş dişli olarak adlandırılırken, etrafında dönen dişliler ise gezegenlere benzetilmiştir. Bu sebeple planet ismi verilmiştir. Bu sistemlerde, planet dişliler kol ya da taşıyıcı aracılığıyla bir mile bağlı iken, güneş dişli başka bir mile

bağlıdır. İstenilen bir milden tahrik başlatılabilir. Genel olarak, merkez güneş dişli etrafında üç adet planet dişli kullanılacak şekilde tasarlanır. Planet dişlilerin temasta olduğu dış güneş dişli ise dış güneş dişli olarak adlandırılmaktadır.

Kullanılacak olan sistemdeki hareket tercihinine yönelik olarak; dış güneş dişli, iç güneş dişli veya planet dişliler sabit duruma getirilebilir. Bu sayede farklı tork ve hız iletimleri sağlanmış olur. Normal dişli sistemlerine kıyasla verimleri daha yüksektir. Titreşimi azdır. Tasarımı karmaşık olduğundan dolayı maliyeti de bununla orantılı olarak fazladır. Klasik dişli sistemleri ile kıyaslandığında hesaplamaları daha zor ve karmaşıktır. [7] [8]

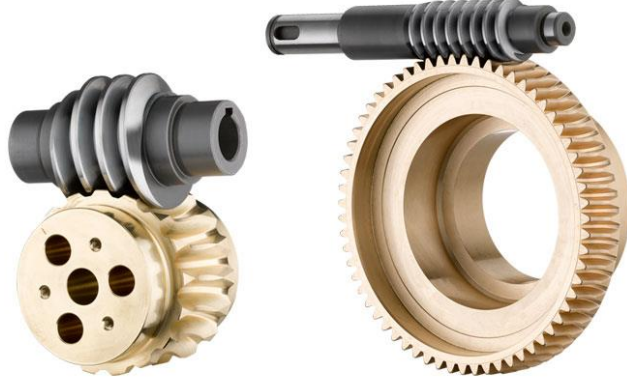


Şekil 2.9. Planet dişli.

2.3.3. Sonsuz vida-dişli

Dişliler sınıflandırıldığında, eksenleri çakışmayan dişliler kategorisinde en sık kullanılan dişliler, sonsuz vida-dişlilerdir. Bu dişli sistemindeki en büyük avantaj, adım açısının 5 dereceden düşük olduğu durumlarda, kendinden kilitlemeli olarak çalışabiliyor olmalarıdır. Bu sayede; dönme hareketi sonsuz vida üzerinden değil de sonsuz dişli üzerinden aktarılmaya çalışıldığında başarısız olunur ve sonsuz vida hareket etmez.

Fren kullanımını ihtiyaç duyulmaması istenen sistemlerde sonsuz vida-dişli çözümünden faydalanılabilmektedir. [1] [9]



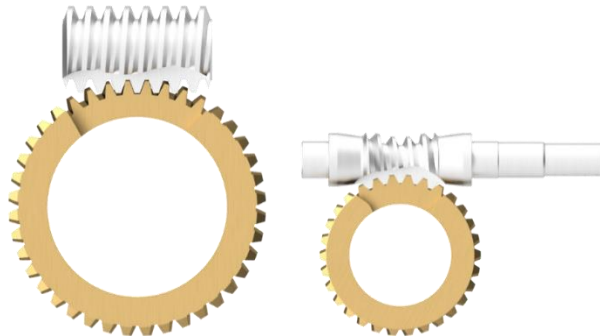
Şekil 2.10. Sonsuz vida-dişli.

Globoid vida-dişli, sonsuz vida- dişli sınıfına ait bir çeşit dişli sistemleridir. Çift sarmal dişli teknolojisini olarak da tanımlanabilen globoid dişli teknolojisini; sonsuz vida-dişli sisteminden farklı olarak, vidanın diş profili eşlenik dişlisinin profiline sarmal şekilde oturmaktadır. Sonsuz vida-dişli sisteminde, temasta olan diş sayısı 1,75- 2 arasındadır.

Globoid dişli sisteminde ise temas eden diş sayısı 3 dişten 11 diş kadar çıkmaktadır. Az sayıda dişlinin noktasal temas etmesi prensibi ile çalışan sonsuz vida-dişli sistemlerinde, bu temas prensibi dolayısıyla bronzun aşınması sorunu ortaya çıkmaktadır.

Globoid dişli sistemlerinde 3-11 dişin yüzeysel temas etmesi sayesinde şok yüklere dayanımları da yüksek olmaktadır. Çok küçük hacimlerde çok yüksek torklara ihtiyaç duyulan sistemlerde globoid dişli sistemi özellikle tercih edilmektedir.

Globoid dişliler, gerçek sıfır boşluk sunabilmektedir. Bu özelliğini sayesinde, yüksek pozisyonlama hassasiyetinin olduğu sistemlerde rahatlıkla kullanılabilir. [10]



Şekil 2.11. Glooid vida-dişli.



3. SONSUZ VIDA-DİŞLİ SİSTEMLERİNDE MALZEME SEÇİMİ

Sonsuz vida-dişli sistemlerinde malzeme seçimi, sistemin tribolojik performansını, çalışma ömrünü ve verimliliğini doğrudan etkileyen en kritik parametrelerden biridir. Özellikle çelik-çelik eşlenik sistemlerde görülen yüksek sürtünme kuvvetleri, bu bölgede aşırı yüzey aşınmasına, kısa servis ömrüne ve artan çalışma gürültüsüne yol açmaktadır. Bu nedenle geleneksel uygulamalarda, vida malzemesi olarak sertliği ve mukavemeti yüksek olan çelik tercih edilirken, dişli (tekerlek) malzemesi olarak genellikle iyi kayma özelliklerine sahip ve daha düşük sertlikteki bronz alaşımlar kullanılmaktadır. Bronz, çelikle eşlendiğinde yüzeyler arasındaki sürtünmeyi azaltarak aşınmayı sınırlamakta, aynı zamanda kendinden yağlayıcı özelliği sayesinde kuru veya sınır yağlama koşullarında da çalışmaya olanak tanımaktadır. Vida üzerindeki kayma oranı yüksek olduğundan, bu bileşenin daha sert bir malzeme ile üretilmesi sistemin güvenilirliğini artırmakta ve uzun süreli çalışma koşullarına uyum sağlamaktadır. Bu şekilde oluşturulan çelik-bronz eşlenik yapı, hem tribolojik uyumluluk açısından avantaj sunmakta hem de sistemin çalışma koşullarını optimize ederek verimlilik ve dayanıklılığı artırmaktadır.

3.1. Sonsuz Dişlilerde Bronz Malzeme Kullanımı

Bronz malzeme, yüksek aşınma direncine sahiptir ve sürtünme esnasında yüksek yağlayıcılık gösterir. Sonsuz vida-dişli sistemlerinde kayma hareketi olduğundan dolayı, eşlenik çalışan parçaların malzemeleri arasındaki sürtünme katsayısının düşük olması istenir. Bu sayede daha az aşınacağından, kullanım ömrü daha uzun olmaktadır.

Çalışma koşulları da göz önüne alındığında, bronz malzeme korozyona karşı daha dirençli olduğundan dolayı daha yüksek çalışma performansı sağlar. Çelik-bronz eşlenik çalışma sisteminde sürtünme katsayısı oldukça düşük olacağından, elde edilecek verim de yüksek olacaktır.

Sonsuz dişli malzemesinin bronz olarak seçilmesi, bronz malzemenin çelikle iyi kayma özelliğine sahip olması ve bu sayede sürtünme kat sayısının çok düşük olması avantajını beraberinde getirmektedir.

Bronz malzeme yağlayıcı madde olmadan da çalışabilir. Bu sebeple sistemdeki yağlama aralıkları çok daha uzun, bakım gereksinimi çok daha az olmaktadır. [11]

Bronz malzeme kullanmanın sağladığı tüm faydaların yanında, çelik malzemelere kıyasla mekanik özellikler bakımından daha kısıtlı olduğundan dolayı getirdiği dezavantajlar da vardır. Bronzun sağladığı avantajları farklı yöntemler ile sisteme yeniden kazandırma şansı olduğu düşünüldüğünde, bronz yerine alternatif olabilecek malzeme arayışına girilmesi doğru bir adım olacaktır.

Bu konuda bronz yerine çelik malzeme kullanımı ile ilgili yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir. Aşınma, yağlayıcılık, korozyon direnci gibi faydalar; farklı yöntemlerle kazandırılabilirse, sonsuz dişli sistemleri için büyük bir adım atılmış olacaktır.



Şekil 3.1. Glooid dişli-vida.

3.2. Çelik Malzeme İle Bronz Malzeme Özelliklerinin Karşılaştırılması

Çelik malzeme, bronz alaşımlara kıyasla sertlik, dayanım ve mukavemet açısından belirgin üstünlükler sunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde çelik, yüksek yük altında çalışan mekanik sistemlerde uzun ömür ve yapısal kararlılık sağlamaktadır. Öte yandan, bronz alaşımlar nispeten daha yumuşak yapıları ve düşük mekanik dayanımları nedeniyle özellikle düşük ile orta seviyeli yük koşullarında tercih edilmektedir. Ancak bronz malzemelerin de kullanım alanına bağlı olarak geliştirilen

çok sayıda alaşım türü mevcuttur. Bu nedenle, uygulama koşullarına uygun bronz türünün doğru seçilmesi, sistemin performansı açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bu bağlamda, özellikle havacılık ve savunma sanayii gibi yüksek mukavemet ve korozyon direncinin birlikte arandığı alanlarda, alüminyum bronzlar ön plana çıkmaktadır. Mekanik dayanım ve çevresel etkilere karşı direnç açısından üstün performans sergilemektedir. Alüminyum bronzların yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma direnci ve iyi oksidasyon kararlılığı sayesinde, agresif çevre koşullarında dahi güvenilir bir çözüm sundukları literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır. Bu özellikler, söz konusu alaşımların savunma ve havacılık sanayisinde yaygın olarak tercih edilmesine olanak tanımaktadır. Her ne kadar bazı özel bronz alaşımları geliştirilmiş olsa da, bu malzemeler genel olarak çelik kadar yüksek mekanik dayanım sunmamaktadır.

Çelik malzemeler ile bronz malzemelerin mekanik özellikleri aşağıda yer alan tablo ile incelenmiştir.

Tabloda yer alan bilgiler, AISI 4140 (42CrMo4) çelik ve CuAl10Ni5Fe4 alüminyum bronz aittir.

Tablo 3.1. Çelik ve bronz malzemelerin mekanik özellikleri.

Malzeme	Brinell Sertliği	Çekme Dayanımı: Akma (MPa)	Kesme Modülü (GPa)	Poisson Oranı
Çelik	300	660	73	0,29
Bronz	200-210	320-470	44	0,34

Tabloda sunulan veriler, çelik ve bronz malzemeler arasında önemli mekanik farklılıklar olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Öncelikle, Brinell sertliği açısından değerlendirildiğinde çeliğin değeri ($HB \approx 300$), bronz göre belirgin biçimde yüksektir ($HB \approx 200-210$). Bu fark, çeliğin yüzeydeki plastik deformasyona karşı daha dirençli olduğunu göstermekte ve dişli temas yüzeylerinde mikroyapısal bozulmaların önlenmesine katkı sunmaktadır. Sertlik değerinin yüksek olması, aynı zamanda aşınma direncinin de daha yüksek olması anlamına gelmektedir. Bu durum, çelik malzemenin daha zorlu hizmet koşullarında tercih edilmesinin başlıca nedenlerinden biridir.

Akma dayanımı bakımından da benzer bir tablo söz konusudur. Çeliğin akma dayanımı 660 MPa mertebesindeyken, bronzda bu değer 320–470 MPa aralığında değişmektedir. Bu fark, çeliğin hem statik hem de dinamik yükler altında daha fazla gerilime dayanabileceği anlamına gelmektedir. Yani aynı boyutlardaki dişli elemanları kullanıldığında, çelik daha yüksek torqları taşıyabilmekte ve tasarımın kompaktlaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Bu özellik, özellikle sınırlı hacimlerde çalışan sonsuz vida sistemleri için büyük avantaj sunmaktadır.

Kesme modülü karşılaştırıldığında çeliğin değeri (73 GPa), bronzunkine (44 GPa) göre oldukça yüksektir. Kesme modülü, malzemenin şekil değiştirmeye karşı koyma kapasitesini belirler. Dolayısıyla, çelik malzeme altında çalışacak bir dişli sistemde elastik deformasyon miktarı daha az olacak; bu da dişliler arasındaki temas doğruluğunu koruyarak iletim verimliliğini artıracaktır.

Poisson oranı bakımından ise bronzun (0,34) çeliğe (0,29) kıyasla daha yüksek bir değere sahip olması, yük altında daha fazla enine genişleme eğiliminde olduğunu gösterir. Bu durum, yüksek temas basınçlarında bronzun şekil değiştirerek yüzey uyumunu artırmasına katkı sağlarken, aynı zamanda şekil bozulması ve geometri kaybı riskini de beraberinde getirir.

Sonuç olarak, çelik; sertlik, dayanım ve elastik rijitlik bakımından bronzla kıyasla üstün mekanik özellikler sergilemektedir. Bu avantajlar, daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip, kompakt ve uzun ömürlü sonsuz dişli sistemlerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, çelik-çelik temasının doğal tribolojik zayıflıkları, bu üstünlüğü sınırlayan temel faktörlerden biridir. Bu nedenle yüzey kaplama uygulamaları ile çeliğin tribolojik performansının iyileştirilmesi, yalnızca malzeme düzeyinde değil, sistem düzeyinde de önemli kazanımlar sunmaktadır.

Çelik ve bronz malzemeler arasındaki temel farklılıklar incelendiğinde, bronzun mekanik özellikler bakımından çeliğe kıyasla daha sınırlı bir performans sunduğu açıkça görülmektedir.

Bu bağlamda, sonsuz dişli sistemlerinde çark malzemesi olarak bronz yerine çelik kullanılması, sistemin taşıma kapasitesini artırmak açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak çeliğin tribolojik açıdan doğrudan eşlenik kullanımı, yüzeyde aşınma, yapışma ve mikroskobik hasar oluşumu gibi riskleri beraberinde getirmektedir. Özellikle çelik-çelik teması, yüksek sürtünme katsayısı nedeniyle

sistemde enerji kayıplarına, yüzey ısınmasına ve işletme ömrünün azalmasına neden olabilir. Bu nedenle çelik malzemelerin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi, sistem performansını artırmak için kaçınılmaz bir mühendislik gereksinimi hâline gelmiştir. Bu noktada yüzey kaplamaları, çeliğin mekanik gücünü koruyarak, yüzeyde tribolojik uyumluluk sağlama işlevi görmektedir.

Yüzey kaplamalarının uygulanması, yalnızca aşınma direncini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda sürtünme kuvvetlerini azaltarak enerji verimliliğini artırmakta ve yağlama gereksinimlerini minimize etmektedir. Özellikle kompakt ve yüksek torklu sonsuz dişli sistemlerde bu iyileştirme; ısıl dengenin korunması, yüzey hasarının önlenmesi, gürültü düzeylerinin azaltılması ve bakım aralıklarının uzatılması gibi çok yönlü faydalar sunmaktadır. Bu yönüyle yüzey kaplama uygulamaları, yalnızca malzeme iyileştirme stratejisi değil, aynı zamanda sistem mühendisliği açısından performans artırıcı bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Bronz malzeme çelik malzemeye göre çok daha yumuşak bir malzeme olduğundan dolayı diş profili açmak çok daha kolaydır. Fakat uygun kesme yöntemleri ve kesici uçlar seçildiğinde sonsuz vida-dişli sistemleri için çelik malzemeden dişli üretimi konusunda herhangi bir sorun gözlemlenmeyecektir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde çelik malzemeden üretilen sonsuz dişlinin uygun kesme yöntemleri ile işlendiğinde rahatlıkla üretilebildiği ve bir sıkıntı yaşanmadığı görülmüştür.[9]



4. MALZEMELERİN TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ VE TEST YÖNTEMLERİ

Mekanik sistemlerde karşılaşılan temel problemlerden biri olan yüzey kaynaklı aşınma ve sürtünme, sistemin genel verimliliğini, enerji tüketimini ve bileşen ömrünü doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, tribolojik performansın iyileştirilmesi modern mühendislik uygulamalarında büyük önem taşımaktadır. Malzemelerin tribolojik özelliklerini iyileştirme teknikleri, triboloji disiplini altında değerlendirildiğinde; yüzeyler arası sürtünme, aşınma ve yağlama süreçlerini optimize etmeyi amaçlayan çeşitli yöntemleri kapsamaktadır. Bu yöntemler arasında yağlayıcı kullanımı, yüzey modifikasyonları ve özellikle yüzey kaplama teknolojileri yaygın ve etkili çözümler olarak öne çıkmaktadır. Kaplama işlemleri, malzemenin kütsel özelliklerini değiştirmeksizin yüzey sertliği, aşınma direnci ve kimyasal dayanım gibi parametreleri artırarak tribolojik açıdan daha dayanıklı yüzeyler elde edilmesini sağlar.

Bu çalışma kapsamında, özellikle geleneksel sistemlerde yaygın olarak kullanılan bronz-çelik eşlenik yapının yerine çelik-çelik kombinasyonunun kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu geçişin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için, çelik malzemenin bronzun sağladığı düşük sürtünme katsayısı ve yüksek yüzey uyumu gibi avantajları karşılayabilecek düzeye getirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, yüzey kaplamaları çeliğe bu özellikleri kazandırmak amacıyla stratejik bir çözüm sunmaktadır. Özellikle sonsuz vida-dişli sistemlerinde hem yüzey hasarlarının önlenmesi hem de sistemin daha kompakt hale getirilmesi hedeflenmektedir. Bu amaç doğrultusunda, uygun kaplama yöntemlerinin seçilebilmesi için sistem isterlerinin doğru şekilde tanımlanması ve kaplama teknolojilerinin yüzey performansına etkilerinin titizlikle analiz edilmesi büyük önem arz etmektedir.

4.1. Yüzey Kaplama

Yüzey kaplama teknolojileri, mühendislik uygulamalarında malzeme yüzeylerinin mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklerini geliştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Tribolojik davranışın kritik rol oynadığı sistemlerde, yüzey kaplama; aşınma direnci, sürtünme katsayısı, korozyon dayanımı, sıcaklık toleransı ve yüzey

sertliği gibi parametrelerde önemli iyileşmeler sağlar. Bu sayede makine parçalarının ömrü uzatılırken bakım aralıkları genişletilir ve sistem verimliliği artırılır.

Yüzey kaplamalar, özellikle dişli sistemleri, yataklar, kesici takımlar, pistonlar, kalıplar ve tıbbi implantlar gibi sürtünmenin yoğun olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Son yıllarda gelişen kaplama teknolojileri sayesinde sadece koruyucu değil, aynı zamanda işlevsel ve özelleştirilmiş yüzeyler elde etmek mümkün hâle gelmiştir. Bu gelişmelerle birlikte, kaplama kalınlığı, yüzeye tutunma dayanımı, mikroyapısal bütünlük ve kaplama/malzeme uyumu gibi kriterler, kaplama teknolojisinin seçiminde belirleyici faktörler hâline gelmiştir.

Yüzey kaplama yöntemleri genellikle uygulama ilkesine göre fiziksel, kimyasal ve elektrokimyasal yöntemler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Uygulama koşullarına, kaplanacak malzemenin özelliklerine ve istenen yüzey davranışına göre uygun yöntemin seçilmesi, kaplamanın fonksiyonel başarısını doğrudan etkiler. [12]

Kaplama yöntemleri, süreçlerin detaylarına göre birçok farklı alt kategoriye ayrılabilir. Genel anlamda kaplama türleri ve yaygın kullanım alanları aşağıdaki gibi gruplandırılabilir:

Tablo 4.1. Kaplama yöntemleri ve kullanım alanları.

Kaplama Yöntemi	Temel Prensipte	Kullanım Alanı
Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)	Katı hedefin buharlaştırılması ve yüzeye kondensasyonu	Kesici takımlar, kalıplar, mikroelektronik
Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)	Kimyasal reaksiyonlarla buhar fazından yüzey oluşumu	Yüksek sıcaklık parçaları, uzay-havacılık
Elektrokaplama	Elektrik akımıyla metal iyonlarının çöktürülmesi	Takılar, otomotiv parçaları, borular
Anodizasyon	Alüminyum yüzeyin oksitlenmesiyle koruyucu tabaka oluşumu	Havacılık, otomotiv, dekoratif parçalar
Termal Sprey Kaplama	Yüksek sıcaklıkla ergitilmiş malzemenin yüzeye püskürtülmesi	Makine parçaları, dişliler, biyomedikal ekipmanlar
Organik Kaplamalar	Reçine, boya gibi organik maddelerin yüzeye uygulanması	Mobilya, beyaz eşya, otomotiv iç yüzeyleri
Seramik Kaplamalar	İnorganik bileşiklerin sinterleme veya püskürtme ile yüzeye uygulanması	Kesici takımlar, türbin bıçakları, motor parçaları

Bu başlıkların her biri, yöntemlerin temel prensipleri, avantajları, dezavantajları ve uygulama alanları gibi detaylarla ayrı ayrı incelenebilir. [13]

Kaplamanın tribolojik performansını etkileyen maddeler aşağıdaki gibidir;

- Kaplama-Malzeme Uyumunun Önemi

Kaplama ile alt tabaka arasındaki mekanik ve kimyasal uyum, kaplamanın uzun ömürlü olmasını ve işlevini sürdürbilmesini doğrudan etkiler. Örneğin, termal genişleme katsayılarındaki büyük farklılıklar, ısıl çevrimler sırasında kaplamada çatlama veya soyulmalara neden olabilir. Bu nedenle seçilen kaplamanın çelik gibi yüksek mukavemetli bir alt tabakayla uyumlu olması gerekir.

- Kaplama Kalınlığı ve Mikrosertlik Etkileri

Kaplamanın kalınlığı, aşınma direnci ve yüzey pürüzlülüğü gibi tribolojik performans üzerinde doğrudan etkilidir. Çok ince kaplamalar hızla aşınabilirken, çok kalın kaplamalar ise çatlama riski taşıyabilir. Mikrosertlik ölçümleri, özellikle temas yüzeyinde deformasyon direnci hakkında fikir verir ve tribolojik performansın bir göstergesidir.

- Yapışma Dayanımı

Kaplamanın alt tabakaya ne kadar iyi tutunduğu, aşınma ve çalışma ömrü açısından önemlidir. Yapışma kuvveti yetersiz olan bir kaplama çalışma esnasında ayrılabilir ve sistem performansını ciddi şekilde olumsuz etkileyebilir. Bu bağlamda Scratch Test gibi yöntemlerle yapışma özellikleri değerlendirilir.

- Kaplamaların Tribolojik Mekanizmaları

Farklı yüzey kaplama yöntemleri, tribolojik performansı artırmak adına yüzeyde çeşitli fiziksel ve kimyasal mekanizmalarla etki gösterir. Örneğin bazı kaplamalar düşük sürtünme katsayısı sağlayarak temas yüzeyindeki kayma direncini azaltırken, bazıları aşırı sertlikleri sayesinde aşındırıcı etkilere karşı direnç gösterir. Yüzeyde oluşan mikroyapı, kristal yapı düzeni, boşluk oranı ve kaplama alt-taban etkileşimi gibi faktörler, bu mekanizmaların etkinliğini belirler.

Bazı kaplamalar, yüzeyde sürekli bir kaygan tabaka oluşturarak kuru temas koşullarında sürtünmeyi azaltırken; bazıları sert partiküller veya metalik fazların dağılımı yoluyla yüzeyin mikroaşınmalara karşı daha dirençli hâle gelmesini sağlar. Dolayısıyla, seçilecek kaplama yöntemi sadece tribolojik gerekliliklere değil, aynı

zamanda çalışma koşullarına (kuru/yağlı ortam, sıcaklık, yükleme tipi) göre de optimize edilmelidir.

Kaplama seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken kriterler tabloda verilmiştir;

Tablo 4.2. Kaplama seçiminde dikkat edilecek kriterler.

Kriter	Önemi
Sertlik	Aşınma direncini doğrudan etkiler
Yapışma dayanımı	Kaplamanın çalışma süresince yüzeyde kalmasını sağlar
Kalınlık	Yeterli koruma sağlamalı, ama soyulmaya neden olmamalı
Termal genişleme uyumu	Kaplama ve alt tabaka arasındaki uyum
Sürtünme katsayısı	Isınma ve enerji kayıplarını azaltır
Korozyon direnci	Dış ortam koşullarında uzun ömür sağlar

Kaplama yöntemleri tercih edilirken dikkate alınması gereken bu parametreler doğrudan etkili olmakla birlikte, ilgili malzeme çiftlerinin çalışma koşullarına göre değişkenlik gösterdiği bilinmektedir. Bu bağlamda, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan çelik malzemeler, yüksek mekanik dayanımları ve işlenebilirlikleri sayesinde tercih edilmekle birlikte; çelik-çelik eşlenik sistemler, yüzey temasında oluşan sürtünme kuvvetleri, aşınma eğilimleri ve sıcaklık artışları nedeniyle ciddi tribolojik zorluklar barındırmaktadır. Özellikle yağlama yetersizliği veya kuru temas koşullarında bu sorunlar daha belirgin hale gelmekte ve sistemin performansını olumsuz yönde etkilemektedir.

Sonsuz vida-dişli sistemleri gibi yüksek kayma oranına sahip ve sürekli temas altında çalışan sistemlerde, bu tür yüzey problemlerinin etkisi daha da kritik hale gelmektedir. Geleneksel sistemlerde bu nedenle çelik-sert bronz gibi farklı malzeme çiftleri tercih edilerek tribolojik denge sağlanmaya çalışılmıştır. Ancak ekonomik faktörler, sürdürülebilirlik gereklilikleri ve kompakt sistemlerde daha yüksek yük taşıma kapasitesine ulaşma hedefleri doğrultusunda, her iki elemanın da çelikten üretildiği sistem konfigürasyonları araştırma odağı haline gelmiştir. Bu tür sistemlerde ortaya çıkabilecek dezavantajların ortadan kaldırılması ise yalnızca malzeme seçimiyle değil, yüzey mühendisliği teknikleriyle mümkündür.

Çelik malzemeler, yüksek mekanik dayanım, sertlik, işlenebilirlik ve ekonomik erişilebilirlik gibi özellikleri nedeniyle güç iletim sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak çelikten imal edilmiş iki elemanın doğrudan temas halinde

çalıştığı sistemlerde, tribolojik açıdan çeşitli zorluklar ortaya çıkmaktadır. Özellikle sürtünme kaynaklı ısınma, adezif aşınma, mikroyapısal bozulmalar ve yüzey deformasyonları gibi sorunlar, sistemin performansını düşürmekte; enerji kayıplarını, bakım ihtiyacını ve arıza riskini artırmaktadır. Geleneksel sistemlerde bu durum, çelik karşısında bronz gibi daha düşük sertliğe sahip ancak iyi yağlama karakteristiği gösteren malzemeler kullanılarak dengelenmeye çalışılmıştır. Ancak bronz malzemenin yüksek maliyeti, sınırlı mukavemeti ve sürdürülebilirlik kaygıları, bu çözümü uzun vadede yetersiz kılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, sonsuz vida-dişli sistemlerinde çelik malzemenin yalnızca vida değil, aynı zamanda eşlenik dişli elemanı olarak da kullanılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda, çelik-çelik eşlenik yüzeylerin tribolojik performansını artırmak amacıyla uygun yüzey kaplama yöntemlerinden yararlanılmıştır. Kaplama işlemiyle çeliğe kazandırılmak istenen başlıca özellikler şunlardır:

- Aşınma Direncinin Artırılması:

Çelik-çelik temaslarında en yaygın görülen problem, yüzeylerin sürekli temas halinde olması nedeniyle oluşan abrasiv ve adezif aşınmadır. Bu durum, yüzey geometrisinin bozulmasına, boşlukların artmasına ve sistemin mekanik doğruluğunun kaybına neden olur. Uygulanan kaplama sayesinde yüzey sertliği artırılarak mikroaşınmaların önüne geçilmesi ve elemanların ömrünün uzatılması amaçlanmaktadır.

- Sürtünme Katsayısının Düşürülmesi:

Yüksek sürtünme katsayısı, hem enerji kaybına neden olur hem de sürtünme nedeniyle ısınmayı artırarak termal bozulmalara yol açar. Seçilen bazı kaplama türleri (örneğin DLC veya katı film kaplamalar), yüzeyin kaydırıcılığını artırarak sürtünme kuvvetlerini minimize eder ve sistemin verimliliğini yükseltir.

- Kuru Çalışmaya Uygunluk Sağlanması:

Yüzey kaplamaları, çoğu zaman yağlama yetersizliğinde veya yağsız ortamlarda da performans gösterecek şekilde tasarlanır. Özellikle kuru film kaplamalar, yüzeyde adeta bir katı yağlayıcı işlevi görerek kuru koşullarda da düşük sürtünme ve aşınma sağlar.

- Korozyon Direncinin Artırılması:

Bazı kaplama yöntemleri, çevresel etkilere karşı dirençli bir bariyer oluşturarak korozyon riskini minimize eder. Bu, özellikle dış ortamda çalışan dişli sistemleri için hayati önem taşır.

Yukarıda ifade edilen tribolojik gereksinimler doğrultusunda, yüzey kaplamalarının sağlayabileceği performans katkısı, ancak doğru kaplama malzemesinin ve yöntemin seçilmesiyle mümkün hale gelmektedir. Bu bağlamda, çelik-çelik eşlenik sistemlerde ortaya çıkan yüksek aşınma eğilimi, artan sürtünme kuvvetleri ve yağlama eksikliğinden kaynaklı termal stres gibi problemlere doğrudan yanıt verebilecek yüzey kaplama çözümlerinin literatür desteğiyle değerlendirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Yapılan araştırmalar, düşük sürtünme katsayısı, yüksek sertlik, termal ve kimyasal stabilite gibi parametreleri sağlayan kaplama türlerinin, çelik esaslı tribolojik sistemlerde başarıyla uygulandığını göstermektedir.

Özellikle kuru veya yarı kuru çalışma koşullarında, yüzeyde kaydırıcılığı artıracak katı yağlayıcı etkisi olan kaplamalar; ayrıca yük taşıma kapasitesini artıracak sert yüzey filmleri, çelik-çelik eşlenik sistemlerde öne çıkan gereksinimlerin başında yer almaktadır. Bunun yanında, kaplamanın yüzeye iyi tutunması, yapısal süreklilik sağlaması ve işlem parametrelerine uyum gösterebilmesi de seçim sürecinde dikkate alınan önemli teknik kriterler arasındadır. Bu değerlendirmeler sonucunda, çelik yüzeyler üzerinde gerçekleştirilmesi planlanan kaplama türlerinin, yalnızca teorik avantajlar değil; aynı zamanda uygulama kolaylığı, endüstriyel uygunluk ve çevresel sürdürülebilirlik gibi yönleriyle de rasyonel temellere dayanması sağlanmıştır.

Bu kapsamlı değerlendirmeler ve literatürdeki güncel bulgular ışığında, çelik-çelik eşlenik sistemlerde karşılaşılan tribolojik zorluklara etkin çözümler sunabilecek yüzey kaplama türleri belirlenmiştir. Seçilen kaplama yöntemlerinin her biri, literatürde gerek aşınma direnci, gerekse sürtünme azaltıcı etkileriyle öne çıkan uygulamalar olup, aynı zamanda endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği kanıtlanmış tekniklerdir. Yapılan analizlerde; yüzey sertliğini artırarak mikroaşınmayı azaltan, kaydırıcılığı yükseltmek enerji kaybını minimize eden ve kuru koşullarda dahi etkili performans sergileyebilen kaplama türleri önceliklendirilmiştir. Bu doğrultuda çalışmada, belirlenen teknik ve işlevsel kriterleri karşılayan Ni-W alaşımlı kaplama, katı film kaplama, sert krom kaplama ve DLC kaplama tercih edilmiştir.

Birbirinden farklı mekanizmalarla çalışan bu kaplamalar, çeliğin yüzey özelliklerini optimize ederek çelik-çelik eşlenik sistemlerin tribolojik performansını iyileştirmeyi hedeflemektedir. Aşağıdaki alt başlıklarda, söz konusu kaplama türlerinin teknik yapısı, uygulama prensipleri ve literatürde raporlanan performans sonuçları detaylı olarak sunulacaktır.

Tablo 4.3. Belirlenen kaplama türleri ve özellikleri.

Kaplama Türü	Uygulama Prensibi	Öne Çıkan Özellikler	Kullanım Alanları
Ni-W	Elektrodepozisyon (elektrokimyasal yöntem)	Yüksek sertlik, iyi aşınma ve korozyon direnci	Makine parçaları, kalıplar, tribolojik uygulamalar
Katı Film	Katı yağlayıcıların yüzeye uygulanması (fiziksel/kimyasal)	Kuru çalışmaya uygunluk, düşük sürtünme katsayısı	Ağır yükte çalışan kuru sistemler, uzay-havacılık
Sert Krom	Elektro-kaplama (galvanik yöntem)	Yüksek aşınma direnci, iyi yüzey sertliği	Silindirler, pistonlar, dişliler
DLC	Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) / Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)	Çok düşük sürtünme katsayısı, yüksek yüzey sertliği	Otomotiv, medikal, kesici takımlar

4.1.1. Katı film kaplama

Kuru ve katı film yağlayıcı kaplamalar, sürtünen yüzeylerde sürekli yağlama ve kayganlık sağlayarak ana metalin zarar görmesini engeller ve korozyona karşı uzun süreli koruma sunar. Bu kaplamalar, tüm metal yüzeylere uygulanabilir ve farklı metal gruplarının bir arada bulunduğu montaj sistemlerinde aynı tip kaplamayla bütünsellik avantajı sağlar.

Birbiri ile eşlenik çalışan elemanlar arasında sürtünmeyi azaltmak için yüzeyler arasına bir akışkan göndererek yağlama yapılmakta ya da buna alternatif olarak MoS₂, PTFE ve grafit ile yağlayıcılık sağlanmaktadır.

Uygulama yöntemleri arasında daldırma, püskürtme ve dip-spinning yer alır.

500 saati aşan korozyon dayanımı ile uzun süreli koruma sağlar.

-200°C ile +430°C arasındaki sıcaklıklarda etkili performans gösterir.

Sürekli yağlama sağlayarak sürtünmeyi ve aşınmayı azaltır.

Kaplamanın kuru olması, kontaminasyon riskini ortadan kaldırır ve uygulandığı yüzeyde kalıcılık sağlar.

10-20µm kalınlıklarında hassas toleranslı parçalara uygulanabilir.

Uzun süreli ve kalıcı yağlama gereken uygulamalarda idealdir.

Bu avantajlar sayesinde, kuru ve katı film yağlayıcı kaplamalar, otomotiv, havacılık, medikal ve enerji gibi çeşitli endüstrilerde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. [14]

Tablo 4.4. Katı film kaplama.

Özellik	Katı Film Kaplama
Sürtünme Katsayısı (μ)	0,05–0,15
Uygulama Alanları	Havacılık, otomotiv, savunma sanayi
Öne Çıkan Özelliği	Kendinden yağlayıcı, kuru ortamda çalışma



Şekil 4.1. Katı film kaplama yapılan çeşitli parçalar.

4.1.2. DLC kaplama

Düşük sürtünme katsayısı ve üstün kayma özellikleri sayesinde, bu kaplamalar düşük yağlamalı ve hatta kuru çalışma koşullarında bile idealdir.

Elmas benzeri karbon yapısına sahip, ince film teknolojisi ile üretilmiş bir yüzey kaplama türüdür. Bu kaplama, hem çok düşük sürtünme katsayısına sahip olması hem de yüksek sertliği sayesinde aşınma ve yüzey yorgunluğu gibi problemlere karşı etkili bir çözümdür. Genellikle tribolojik olarak zorlayıcı koşullarda çalışan parçalar için tercih edilir.

DLC kaplama, son derece sert olması, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek hızlarda kullanım gerektiren uygulamalarda tercih edilebilecek bir kaplama türüdür. Ayrıca estetik olarak koyu renkli ve parlak bir görünüm sunduğundan, bazı ürünlerde görsel

avantaj da sağlar. Otomotiv, tıbbi cihazlar ve hassas mekanik parçalar gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. [15]

Tablo 4.5. DLC kaplama.

Özellik	DLC Kaplama
Sürtünme Katsayısı (μ)	0,07–0,15
Uygulama Alanları	Otomotiv, takım tezgahları, mikro mekanik sistemler
Öne Çıkan Özelliği	Çok düşük sürtünme, yüksek sertlik



Şekil 4.2. DLC kaplama yapılan parçalar.

4.1.3. Sert krom kaplama

Sert krom kaplama, genellikle aşınma, korozyon ve yüzey pürüzlülüğünü azaltma gibi amaçlarla metal yüzeylere uygulanan bir yüzey işlemidir. Bu işlemde, elektroliz yöntemiyle metal yüzeye saf krom (Cr) tabakası kaplanır. Kaplanan krom, yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısı gibi özellikleri sayesinde mekanik sistemlerin ömrünü uzatır ve performansını artırır.

Bu kaplama özellikle ağır yüklere maruz kalan makine parçalarında, piston millerinde, kalıplarda ve döner parçalarda tercih edilir. Sert krom kaplama genellikle 5 ila 500 mikron arasında bir kalınlıkta uygulanabilir. Ayrıca, parlak bir görünüm ve yüksek yüzey kalitesi sağlar.

Uygulama sırasında, baz metal genellikle çelik, paslanmaz çelik veya dökme demirdir. Kaplama işlemi sırasında dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri, yüzeyin uygun şekilde hazırlanması ve krom tabakasının homojen dağılmasıdır. [16]

Tablo 4.6. Sert krom kaplama.

Özellik	Sert Krom Kaplama
Sürtünme Katsayısı (μ)	0,12–0,3 (yağlı koşul)
Uygulama Alanları	Kalıpcılık, hidrolik silindirler, pistonlar
Öne Çıkan Özelliği	Yüksek sertlik, korozyon direnci

4.1.4. Ni-W kaplama

Ni-W kaplama, nikel ve tungsten elementlerinin birlikte kullanıldığı, yüzeye uygulanan sert ve dayanıklı bir kaplama türüdür. Bu kaplama özellikle aşınma ve korozyon direnci gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Tungstenin yüksek sertliği ile nikelin kimyasal dayanımı bir araya gelerek, yüzeyde uzun ömürlü ve dayanıklı bir tabaka oluşturur.

Geleneksel sert krom kaplamalara alternatif olarak geliştirilmiş olan Ni-W kaplama, çevreye zarar veren altı değerlikli krom içermez ve bu yönüyle daha çevreci bir seçenektir. Elektrolitik veya kimyasal yöntemlerle uygulanabilir ve kaplama kalınlığı ile sertlik gibi özellikler işlem parametrelerine bağlı olarak ayarlanabilir.

Ni-W kaplama, takım tezgahı parçaları, kalıplar, makine elemanları ve yüksek sıcaklıkta çalışan yüzeylerde kullanılmaktadır.

Tablo 4.7. Ni-W kaplama.

Özellik	Ni-W Kaplama
Sürtünme Katsayısı (μ)	0,15–0,25 (yağlı koşul)
Uygulama Alanları	Aşınmaya dayanıklı parçalar, endüstriyel dişliler
Öne Çıkan Özelliği	Yüksek sertlik, iyi aşınma direnci

4.2. Belirlenen Kaplamaların Sertlik Değerleri

Kaplama türlerinin tribolojik performansları kadar, mikrosertlik özellikleri de önemli bir değerlendirme kriteridir. Bu çalışmada kaplamalar için literatürde bildirilen Vickers sertlik değerleri dikkate alınarak karşılaştırmalı analiz yapılmıştır.

DLC kaplamalar, çok yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısı gibi özellikleriyle bilinen karbon bazlı sert filmlerdir. Literatürde DLC kaplamalar için bildirilen Vickers mikrosertlik değerleri oldukça geniş bir aralıkta yer almaktadır. Bu aralık, kaplamanın yapısal özelliklerine, kullanılan alt tabakaya ve kaplama parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Genellikle:

1800 – 4500 HV aralığı sıkça bildirilmektedir. Bazı kaynaklarda ise, özellikle hidrojen içermeyen amorf yapılı DLC kaplamalarda, daha yüksek değerlere de rastlanmakta olduğuna yer verilmiştir [17].

Katı film kaplamalar, genellikle molibden disülfür (MoS_2), grafit veya PTFE gibi katı yağlayıcı içeren kompozit yapılardır. Bu tür kaplamalar, düşük yük altında çalışmak üzere geliştirilmiş olup, sertlik değerleri metalik kaplamalara kıyasla düşüktür. Literatürde bildirilen Vickers sertlik değerleri genellikle 100 – 300 HV aralığındadır [18].

Bu nedenle bu kaplamalar, yüzey kayganlığı açısından avantajlı olsa da, yüksek yük taşıma kapasitesi açısından sınırlıdır.

Ni-W alaşım kaplamalar, özellikle mekanik dayanım ve aşınma direnci açısından tercih edilmektedir. Sertlik değerleri tungsten içeriği, çöktürme yöntemi ve ısıl işlem parametrelerine bağlı olarak değişebilmektedir. Literatürde bildirilen Vickers sertlik değerleri 500 – 900 HV aralığındadır.

Tungsten oranının artışı ile birlikte sertliğin daha üst seviyelere yaklaşabildiği gözlemlenmiştir [19,20].

Sert krom kaplamalar, sanayide yaygın olarak kullanılan klasik kaplama türlerinden biridir. Yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direnci sunan bu kaplamalar için literatürde genellikle 800 – 1100 HV aralığı yer almaktadır [21].

4.3. Kaplamanın Yapılmasında Kullanılan Cihazlar

Ni-W kaplama işlemi laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş olup, bu süreçte kullanılan cihazlar hem yüzey hazırlığı hem de kaplama çözeltisinin hazırlanması aşamalarında önemli rol oynamıştır. Kaplamanın istenen homojenlikte ve tutarlılıkta gerçekleşebilmesi için, ön işlem adımlarında ve kaplama süresince fiziksel ve kimyasal parametrelerin kontrolü sağlanmıştır. Bu kapsamda kullanılan cihazlar, çözeltideki iyonların dağılımını dengelemek, parçaların yüzeyini kaplama öncesinde etkin şekilde hazırlamak ve işlem süresince çözeltinin stabilitesini korumak gibi işlemlere sahiptir. Bu bölümde, uygulanan kaplama yönteminde aktif olarak kullanılan ultrasonik çözücü ve elektromanyetik karıştırıcı cihazları tanıtılmaktadır.

4.3.1. Ultrasonik çözücü

Ultrasonik çözücüler, toz-sıvı bulamaçlarının verimli bir şekilde dağıtılması ve homojenize edilmesi amacıyla çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan güçlü karıştırma ekipmanlarıdır. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak, bu çözücüler yüksek yoğunluklu ultrason dalgaları sayesinde sıvı içinde yoğun kavitasyon ve mikro türbülans oluşturarak etkili bir karışım sağlar. [22]



Şekil 4.3. Ultrasonik çözücü.

4.3.2. Elektromanyetik karıştırıcı

Sıvı karışımlarını homojenize etmek için manyetik alan kullanarak çalışan ve aynı zamanda sıvıyı ısıtabilen bir laboratuvar cihazıdır. Bu cihaz, manyetik bir çubuk yardımıyla sıvıyı döndürerek karıştırır ve istenilen sıcaklığa kadar ısıtabilir. Alüminyum alaşımlı ısıtma tablası, ısı dağılımını eşit şekilde sağlar. [23]



Şekil 4.4. Elektromanyetik karıştırıcı.

4.4. Test Yöntemleri ve Kullanılan Cihazlar

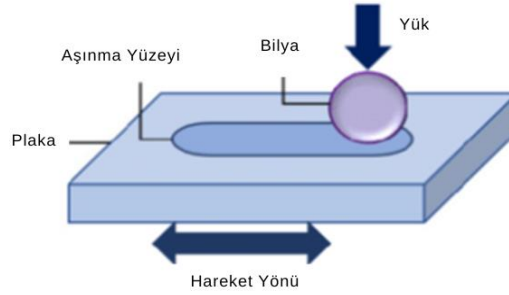
Kaplamaların uygulama sonrası performanslarının değerlendirilmesi için çeşitli yöntemler kullanılarak kaplamanın altlık olarak kullanılan malzemeye tutunma şekli, eşlenik olarak çalıştığı malzeme karşı ortaya çıkan sürtünme katsayısı, aşınma miktarı gibi çeşitli parametreler değerlendirilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında numuneler üzerine yapılan dört farklı kaplama aşağıdaki şekilde incelenecek ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılacaktır;

- 1- Yüzey SEM
- 2- Kesit SEM
- 3- Sertlik
- 4- Kuru Ortamda Aşınma
- 5- Aşınma Sonrası SEM

Malzemelerin tribolojik olarak incelenmesinde yaygın olarak kullanılan bir test yöntemidir. Bu testte bir bilya numunesinin dönen veya sabit halde bulunan bir plaka üzerinde, belirli bir yük altında sürekli olarak hareket etmesi sağlanır. Plaka karşıt malzeme olarak kullanılacak olan yüzeydir. Bilya üzerine belirli bir yük (N) uygulanmaktadır. Bilya belirli bir hızda plaka üzerinde lineer bir gidip gelme hareketi yapar ve hızı olarak kontrol edilir.

Sürtünme kuvveti sensörü kullanılarak pim ve disk arasındaki sürtünme kuvveti ölçülür ve sürtünme katsayısı hesaplanır.

Ağırlık kaybı, hacim kaybı veya profil taraması gibi teknikler kullanılarak numuneler üzerinde meydana gelen değişiklikler tespit edilir. Bu sayede aşınma da ölçülmüş olur. [24]



Şekil 4.5. Ball-on flat testi

4.4.1. Taramalı elektron mikroskobu

Numune atomları ile etkileşen elektronlar, numune yüzeyindeki kompozisyon hakkında bilgi vermektedir. Odaklanmış elektron demetinin, numune yüzeyini taraması ile görüntü elde edilmesini ve bu görüntünün bilgisayar ekranına aktarılmasını sağlamaktadır.



Şekil 4.6. Taramalı elektron mikroskobu.

4.4.2. Tribometre

Sürtünme, aşınma ve yağlama gibi malzemelerin tribolojik özelliklerinin ve farklı koşullar altında gösterdikleri davranışların incelenmesi için kullanılan bir test cihazıdır.

Sürtünme katsayısının belirlenmesi; aşınma miktarının ölçülmesi, aşınma hızının ölçülmesi, yağlayıcıların etkinliğinin test edilmesi ve eşlenik çalışacak malzeme çiftlerinin uygunluğunun değerlendirilmesi işlevlerini yerine getirmektedir.

Bu tez kapsamında ball-on-disk testinin yapılması için kullanılmıştır.



Şekil 4.7. Tribometre.

4.4.3. Bakalite alma cihazı

Kaplama işleminden sonra yapılan yüzey karakterizasyonlarında, özellikle SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizleri için numunelerin sabitlenmesi ve kesit görüntülerinin sağlıklı bir şekilde alınabilmesi adına numuneler bakalit içerisine gömülmüştür. Bu işlem için kullanılan bakalite alma cihazı, termo-reaktif reçinenin kontrollü sıcaklık ve basınç altında numune çevresine düzgün bir şekilde yayılmasını sağlamaktadır. Numunenin mekanik olarak desteklenmesini ve analiz öncesi taşınabilirliğini kolaylaştıran bu yöntem, aynı zamanda yüzey bozulmalarını da minimumda tutarak mikroskobik inceleme için uygun hazırlık ortamı sunar.

Cihazın otomatik sıcaklık ve zaman kontrolü sayesinde standartlara uygun örnekleme yapılması sağlanmaktadır.



Şekil 4.8. Bakalite alma cihazı.

4.4.4. Zımparalama ve parlatma cihazı

Numunelerin yüzey morfolojisinin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için kaplama sonrası yapılan hazırlık işlemleri büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda kullanılan zımparalama ve parlatma cihazı, kaplama yüzeyinin SEM analizine hazır

hale getirilmesi amacıyla uygulanmıştır. Farklı tane büyüklüğüne sahip zımpara kâğıtları ve elmas süspansiyonları ile yapılan bu işlem, yüzeydeki düzensizliklerin giderilmesini, çiziklerin minimize edilmesini ve düzgün bir analiz yüzeyi elde edilmesini sağlamıştır. Cihaz, numunelere kontrollü baskı ve dönme hareketi uygulayarak, her bir numune için tekrarlanabilir ve homojen yüzey kalitesi elde edilmesini mümkün kılmıştır. Bu sayede analizler sırasında ışığın veya elektronların yüzeye düzgün dağılması sağlanarak, görüntü kalitesi ve ölçüm doğruluğu artırılmıştır.

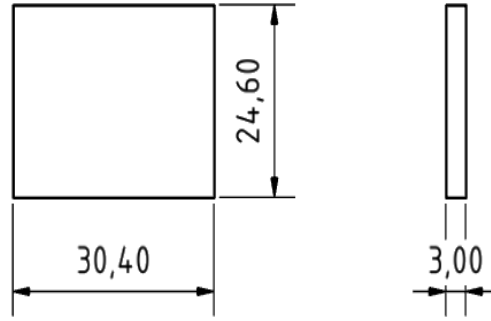


Şekil 4.9. Zımparalama ve parlatma cihazı.

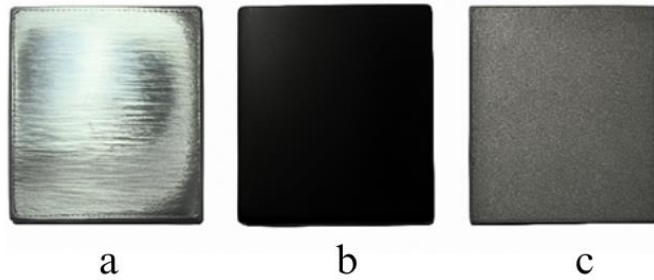
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Ball-on-flat testi ASTM G133 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Ball – on – flat testi kapsamında öncelikli olarak numuneler belirlenmiştir. Sonsuz dişlinin çelik malzemesi olarak çelik kullanılacağından dolayı flat malzemesi St-37 olarak belirlenmiştir. Flat üzerine, belirlenen kaplamalar yaptırılacaktır. Sonsuz vida malzemesi olarak mevcutta da çelik kullanıldığından dolayı bu malzeme üzerinde herhangi bir kaplama olmayacak, sabit tutulacaktır. Bu test kapsamında bilya, sonsuz vida için değerlendirilecektir. 100Cr6 malzemeden yapılmış 10 mm çapında tane bilya kullanılmıştır. Bu test kapsamında 4 adet bilya kullanılmıştır.

Belirlenen dört farklı kaplamanın test edilmesi için St-37 çelikten lazer kesim ile plakalar kestirilmiştir. Kaplamaların üçü farklı firmalarda yaptırılmış, Ni-W kaplama ise laboratuvar ortamında yapılmıştır. Numuneye ait ölçüler mm cinsinden olacak şekilde aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.1. Numune ölçüleri.



Şekil 5.2. Firmalarda kaplatılmış numune örnekleri a)Sert krom kaplama b) Katı film kaplama c) DLC kaplama.

Şekil 5.2.'de firmalarda yaptırılmış olan üç farklı yüzey kaplamasına sahip numuneler yer almaktadır.

DLC kaplamalı numune, karakteristik olarak gri tonda, homojen ve mat bir yüzey görünümüne sahiptir. Bu ton, DLC kaplamanın sp^2/sp^3 hibritleşme oranına, katman kalınlığına ve kaplamanın uygulama koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir. Yüzeyde gözle görülür bir dalgalanma ya da mikroyapısal bozukluk bulunmamakta, bu durum kaplamanın kontrollü ve homojen bir şekilde uygulandığını göstermektedir.

Katı film kaplamalı numune ise daha koyu ve siyaha yakın renkte olup, oldukça düzgün ve yansımatsız bir yüzey sunmaktadır. Görselde gözlemlenen bu homojen yapı, yüzey topografyasında önemli bir pürüzlülük oluşturmadığını göstermektedir.

Sert krom kaplamalı numune, yüksek yansıtıcılığa sahip tipik parlak metalik yüzeyiyle kolayca ayırt edilmektedir. Yüzeydeki bu parlak yapı, kaplamanın sürekliliği ve yoğunluğu açısından olumlu bir gösterge olarak değerlendirilebilir.

Numune üzerine Ni-W kaplama aşağıdaki şekilde uygulanmıştır;

Ni-W kaplama için belirlenmiş olan reçeteye göre karışım hazırlanmıştır.

Tablo 5.1. Ni-W kaplama reçetesi.

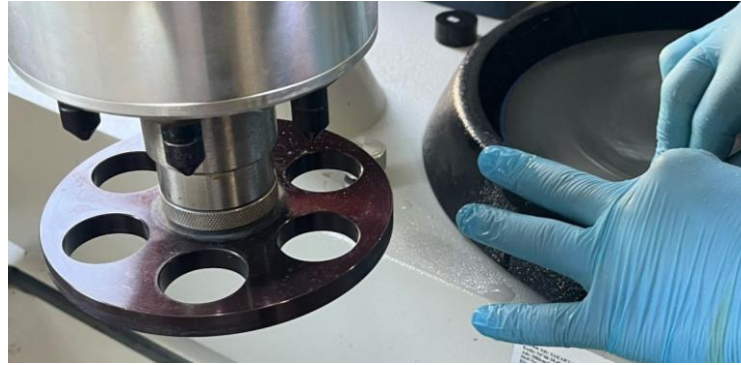
$NiSO_4 \cdot 7H_2O$ (gL^{-1})	16	pH	8,5
$Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ (gL^{-1})	46	Sıcaklık ($^{\circ}C$)	70
$Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$ (gL^{-1})	147	Zaman (dk)	45
		Akım	
NH_4Cl (gL^{-1})	25	Yoğunluğu (A/dm^2)	10
$NaBr$ (gL^{-1})	16	$t_{on} - t_{off}$ (ms)	50-50
SDS (gL^{-1})	0,1		

Belirlenen Ni-W kaplama reçetesi doğrultusunda hazırlanan çözelti, elektrolit içeriğinin homojen şekilde dağılması amacıyla elektromanyetik karıştırıcı kullanılarak karıştırılmıştır. Aynı zamanda, çözeltinin kaplama için uygun sıcaklık koşullarına ulaşabilmesi amacıyla sistem kademeli olarak $70^{\circ}C$ 'ye kadar ısıtılmıştır. Isıl stabilitenin korunması ve sürecin kontrol altında tutulması için sıcaklık, proses boyunca termometre yardımıyla düzenli olarak izlenmiştir.



Şekil 5.3. Elektromanyetik karıştırıcı ile karıştırılan çözelti.

Kaplama işlemine geçilmeden önce, altlık olarak kullanılan çelik numunelerin yüzeylerinin düzgünlüğü ve temizliği sağlanarak kaplamanın yapışma kalitesini artırmak amacıyla yüzey hazırlığı yapılmıştır. Bu kapsamda, numune yüzeyleri sırasıyla 240, 400, 800, 1200 ve 2500 grit zımpara kağıtları kullanılarak çok kademeli zımparalama işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 5.4. Zımpara çalışmaları.

Son aşamada, kaplama öncesi yüzeyin kimyasal olarak aktive edilmesini ve kaplamanın altlığa olan bağlayıcılığını artırmak amacıyla, nitrik asit ve saf sudan oluşan bir ön işlem çözeltisi hazırlanmıştır.



Şekil 5.5. Nitrik asit ve saf su karışımı.

Yüzey hazırlığı tamamlanan ve zımparalanarak düzgün hale getirilen numuneler, kaplama öncesi yüzeyin kimyasal olarak aktive edilmesi amacıyla hazırlanan nitrik asit–saf su karışımı içerisinde daldırılmış ve belirli bir süre bekletilmiştir.



Şekil 5.6. Nitrik asit karışımına bandırılan numune ve elektrotlar.

Dağlama işlemi sonucunda, yüzeydeki oksit tabakası ve kirleticiler uzaklaştırılarak kaplamanın altlıkla güçlü bir şekilde bağlanabilmesi için uygun yüzey koşulları elde edilmiştir. Bu işlemin ardından, numuneler sırasıyla alkollü su çözeltisi ve ardından saf su ile durularak kimyasal kalıntılardan arındırılmıştır. Kaplama işleminde kullanılacak elektrolit çözeltisi, daha önce hazırlanmış karışımların birbiri ile karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Yüzeyi hazırlanmış numuneler, kaplama banyosuna

daldırılmadan önce anot elektrotu ile birlikte deney düzeneğine sabitlenmiştir. Son olarak, numuneler elektrolit banyosuna daldırılmış, güç kaynağı devreye alınarak elektron akışı başlatılmıştır ve böylece Ni-W kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Her bir numune 45 dakika boyunca bekletilmiştir. Kaplanan numuneler önce alkollü su ile sonra saf su ile yıkanarak kurutma makinesi yardımıyla kurutulmuştur.



Şekil 5.7. Laboratuvar ortamında kaplanmış olan Ni-W kaplama numunesi.

Şekil 5.7.'de yer alan Ni-W kaplamalı numune, karakteristik olarak mat gri-kahverengi tonlara sahip, renk dalgalanması olan bir yüzey görünümü sergilemektedir. Elektrodepozisyon yöntemiyle uygulanan bu tür kaplamalarda, numunenin merkezinde gözlenen renk yoğunluğu farklılıkları ve kenarlara doğru artan koyuluk, kaplama sırasında oluşan akım yoğunluğu değişimlerine işaret edebilmektedir. Yüzeyde gözlemlenen yapışma sorunu, çatlak veya soyulma belirtisi bulunmaması ise kaplama ile alt tabaka arasındaki adezyonun yüksek olduğunu göstermektedir.

5.1. Yüzey SEM Analizleri

Kaplamaların yüzey morfolojilerini incelemek ve kaplama kalitesine ilişkin yapısal veriler elde etmek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak detaylı yüzey analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir kaplama örneğinden, kaplama işleminden sonra herhangi bir işleme tabi tutulmadan yüzey görüntüleri alınmıştır. SEM görüntüleri 500× ile 2000× büyütme aralığında elde edilmiş olup, bu sayede mikroyapıdaki yüzey kusurları, çatlaklar ve partikül yapıları yüksek çözünürlükle gözlemlenebilmiştir. Analiz kapsamında her bir kaplama türü için; yüzey pürüzlülüğü, kaplama homojenliği, mikroskobik çatlak oluşumu ve gözeneklilik durumu değerlendirilmiştir.

5.2. Kesit SEM Analizleri

Kaplama kalınlıkları ve içeriklerinin incelenmesi için numuneler üzerinden bakalit için uygun olacak ölçülerde parçalar kesildi ve numuneler bakalite yerleştirilmiştir. Bakalit üzerindeki numunelerde parlak bir yüzey elde edilebilmesi için elmas parçacıklı solüsyon kullanılarak yüzey zımparalandı. SEM cihazında kesit görüntüleri incelenmiştir.



Şekil 5.8. Numunelerin bakalit üzerindeki görüntüleri

Dört farklı kaplamaya ait numuneler, iki ayrı bakalit bloğu içerisinde kalıplanarak hazırlanmıştır. Sol tarafta yer alan bakalitte, Ni-W kaplamaya ait iki adet numune kesiti bulunmaktadır. Aynı bakalit içerisinde, kaplamalar arasında ayırt edilebilirliği sağlamak amacıyla sert krom kaplamaya ait numune, diğerlerinden daha kısa kesilmiştir. Sağ tarafta yer alan bakalitte ise, numunelerin tanımlanabilirliğini artırmak için bir referans teli kullanılmıştır. Bu blokta, telin yanında yer alan numune kesiti katı film kaplamaya; bitişiğinde yer alan kesit ise DLC kaplamaya aittir.

5.3. Aşınma Testi

Kaplamaların tribolojik performanslarını değerlendirmek amacıyla aşınma testleri, Anton Paar CSM Tribometer cihazı kullanılarak ball-on-flat test yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde sabit konumda bulunan çelik bilya, belirli bir yük altında doğrusal hareket yapan kaplanmış düz numune yüzeyiyle temas ettirilmiştir. Test, kuru ortam koşullarında yapılmış olup herhangi bir yağlayıcı madde kullanılmamıştır. Test koşulları Tablo 5.2’de paylaşılmıştır.

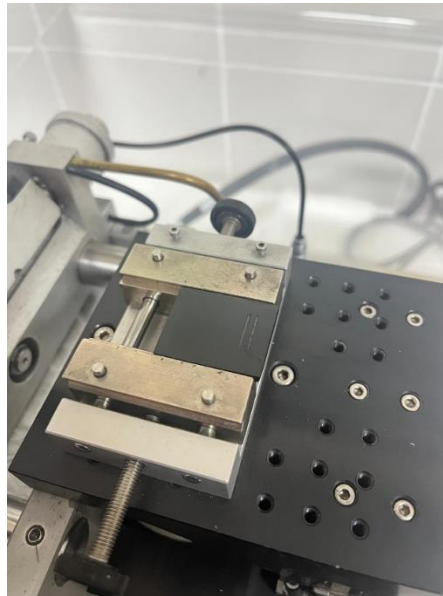
Tablo 5.2. Ball-on-flat testi koşulları.

Test Parametresi	Değer
Test Modu	Lineer
Yük	3 N
Kayma Mesafesi	500 m
Kayma Hızı	25 cm/s
Ortam	Kuru
Karşı Yüzey Malzemesi	DIN 1.3505 (100Cr6)
Numune Malzemesi	St-37

Deneyleerde kullanılan karşı yüzey malzemesi 100Cr6 çeliğinden imal edilmiş, 10 mm çapında sertleştirilmiş çelik bilya olup, kaplanmış numune yüzeyiyle sürekli kayma temasına girmiştir. Test parametreleri sabit tutulmuştur. Test sırasında oluşan sürtünme kuvveti ve katsayısı cihaz üzerindeki sensörler aracılığıyla gerçek zamanlı olarak ölçülmüş ve program üzerinden kaydedilmiştir. Her kaplama için iki ayrı test gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar .txt formatında kaydedilmiştir.

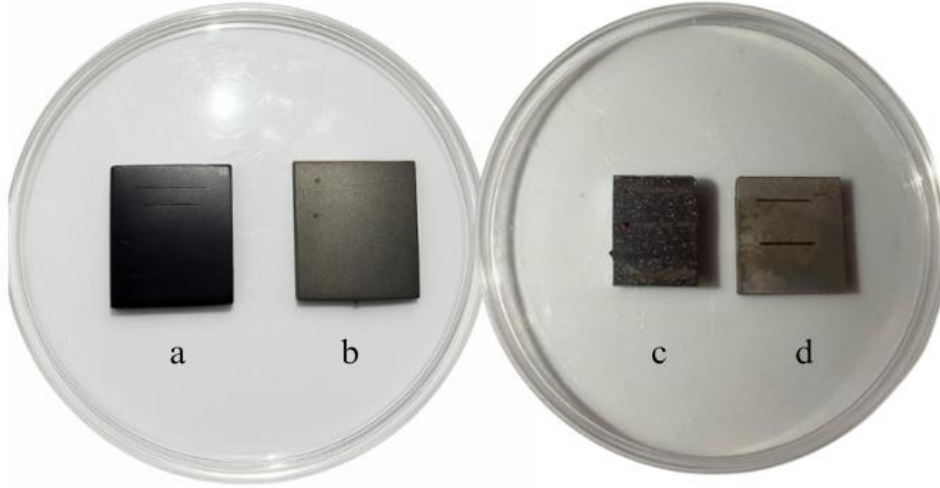


Şekil 5.9. Anton Paar CSM Tribometer.



Şekil 5.10. Katı film kaplamalı numunenin test sonrası görüntüsü.

Aşınma sonrası, kaplanmış olan numunenin üzerinde iki çizgi görülmektedir. Her bir numunede iki kere aşınma testi yapılmıştır. Üzerinde oluşmuş çizgiler referans alınarak SEM cihazında incelenecektir.



Şekil 5.11. Aşınma sonrası numune görüntüleri a) Katı film kaplama b) DLC kaplama c) Sert krom kaplama d) Ni-W kaplama.

Şekil 5.11. incelendiğinde, DLC kaplamalı numunede aşınmanın oldukça sınırlı olduğu, yüzeyde belirgin bir deformasyon veya çizgi oluşumunun gözlemlenmediği dikkat çekmektedir. Katı film kaplamalı numunede ise, yüzeyde doğrusal ve düzenli aşınma izleri hafif belirgin şekilde görülmekte olup, bu durum kaplamanın sınırlı kalınlıkta olması ve kısmi yüzey deformasyonlarına karşı daha duyarlı bir yapı sergilemesiyle ilişkilendirilebilir. Ni-W kaplamalı yüzeyde aşınma çizgileri oldukça net biçimde izlenebilmekte ve bu çizgilerin bulunduğu alanlarda yüzey parlaklığının artmış olması, kaplamanın lokal olarak düzleştiğini ve aşınma izlerinin ışığı daha yoğun yansıttığını göstermektedir. Sert krom kaplamalı yüzeyde ise, yüzeydeki çizgiler diğer numunelere göre daha az belirgin olsa da, bölgesel parlama ve yüzey yönlendirilmesi farklılıkları aşınmanın varlığına işaret etmektedir. Bu gözlemler, her bir kaplamanın tribolojik koşullar altındaki mekanik tepkisini makroskobik düzeyde karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır.

5.4. Aşınma Sonrası SEM Analizi

Aşınma testlerinin ardından, kaplama yüzeylerinde meydana gelen yapısal değişimleri değerlendirebilmek amacıyla numuneler yeniden Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Elde edilen görüntüler, her bir kaplamanın mekanik deformasyona karşı gösterdiği direnç açısından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Aşınma izlerinin şekli, boyutu, yüzeydeki yapısal bütünlük ve olası aşınma mekanizmaları kaplama performansını değerlendirmede temel ölçütler olarak ele alınmıştır.

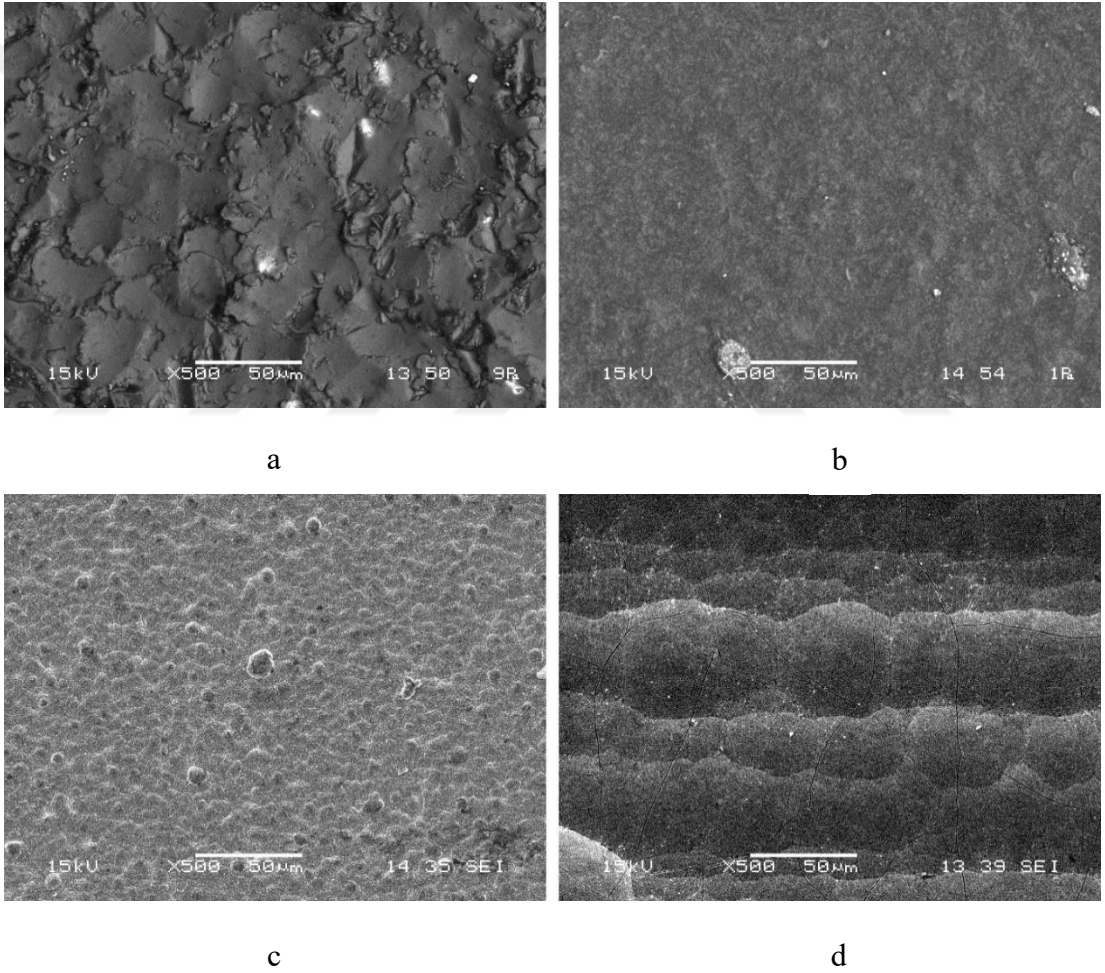




6. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

Her bir kaplama türü için yüzey ve kesit SEM görüntüleri, Vickers mikrosertlik değerleri grafikleri, kuru ortamda ball-on flat ile aşınma testleri, aşınma sonrası yüzey morfolojisi analizleri, sürtünme katsayısı- kayma mesafesi grafikleri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Kaplanmış numunelere ait yüzey SEM görüntüleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 6.1. Yüzey SEM görüntüleri a) DLC b) Katı film kaplama c) Ni-W kaplama d) Sert krom kaplama.

DLC kaplamaya ait SEM görüntüsünde yüzeyin oldukça kompakt bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Yüzey genel olarak amorf karakter göstermekte olup, belirgin bir tane yapısı bulunmamaktadır. Bu durum DLC (diamond-like carbon) kaplamaların tipik özelliklerinden biridir ve kaplamanın yüksek yoğunluklu, boşluksuz yapısını

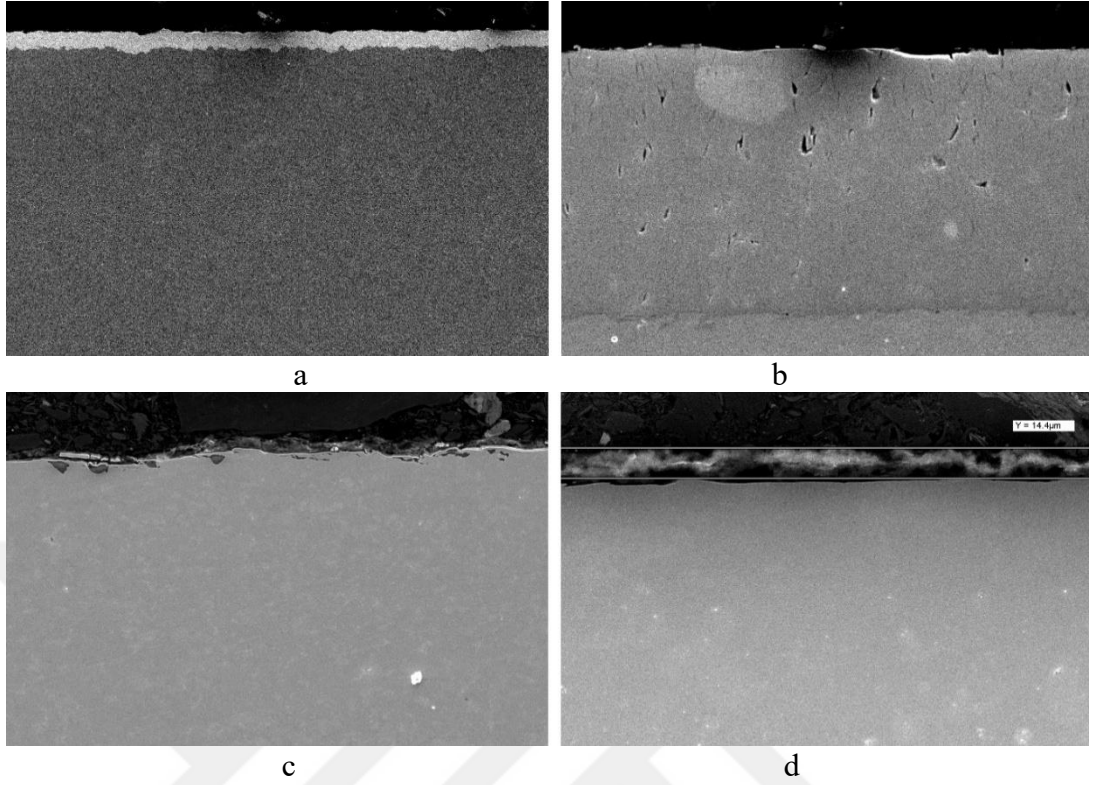
yansıtmaktadır [25]. Yüzeyde çatlak, gözenek veya delaminasyon gibi kusurlar tespit edilmemiştir. Bu da kaplamanın yüzeye başarılı bir şekilde uygulandığını ve yüksek yapışma kalitesine sahip olduğunu göstermektedir. [17]

Katı film kaplamaya ait SEM görüntüsünde yüzeyde yer yer pürüzlü bölgeler ve hafif heterojen dağılım gözlemlenmiştir. Bazı bölgelerde tane yapısı belirginleşmiş olup, yüzey boyunca dağınık halde mikrogözeneklere rastlanmıştır. Bu durum, kaplamanın uygulama yöntemine ve parametrelerine bağlı olarak oluşabilecek yüzey düzensizliklerini yansıtmaktadır. Katı film kaplamalar, tipik olarak kuru sürtünme koşulları altında çalışmak üzere tasarlanmış olup, belirli uygulamalarda yeterli performans sağlayabilir. Ancak yüzeyin homojenliğinin görece düşük olması, aşınma direnci açısından değerlendirme gerektirmektedir.

Ni-W kaplamaya ait SEM görüntüsünde, dendritik veya pulsu yapı formasyonu dikkat çekmektedir. Yüzey görüntüsü incelendiğinde kaplamanın homojen bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Gözenekli yapı ve tane sınırlarında oluşan farklılıklar, kaplamanın mekanik dayanımı ve aşınma direnci üzerinde etkili olabilir. Yine de, yüzey genel olarak kaplamanın başarılı şekilde uygulandığını göstermektedir.

Sert krom kaplamaya ait SEM görüntüsünde yüzey boyunca mikroskobik çatlakların varlığı tespit edilmiştir. Bu mikroçatlaklar, sert krom kaplamalarda sıkça rastlanan bir özellik olup, bir yandan yağ tutucu özellik sağlar, diğer yandan ise uzun süreli mekanik yükleme altında çatlak ilerlemesi riskini beraberinde getirir [20]. Sert krom kaplamalar yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direnci gibi avantajlar sağlamaktadır; ancak çevresel etkiler ve proses parametrelerine bağlı olarak yüzeyde çatlak oluşumu gözlemlenebilir [21].

Kesit SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir;



Şekil 6.2. Kesit SEM görüntüleri a) DLC b) Katı film kaplama c) Ni-W kaplama d) Sert krom kaplama.

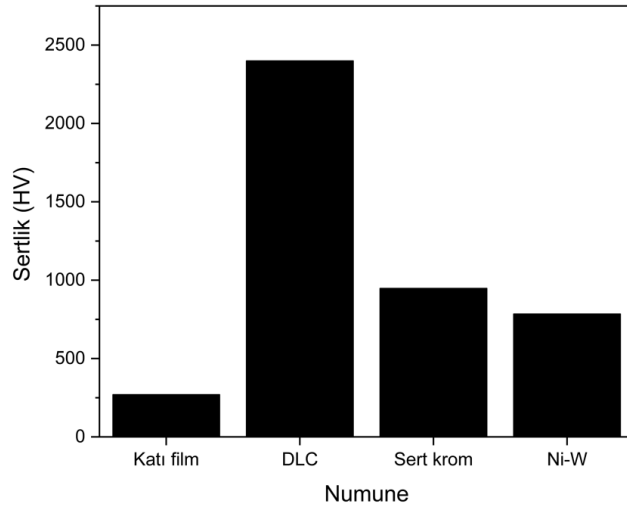
DLC kaplamaya ait kesit SEM görüntüsünde, kaplamanın altlık yüzeyine dalgalı biçimde tutunduğu gözlemlenmektedir. Herhangi bir çatlak, gözenek ya da delaminasyon izine rastlanmamıştır. DLC kaplamaların karakteristik yapısı olan yoğun, amorf morfoloji bu görüntüde de belirgindir. Bu durum, kaplamanın altlık yüzeye karşı yüksek adezyon dayanımı gösterdiğini ve yapısal bütünlük açısından sorunsuz uygulandığını göstermektedir.

Katı film kaplamaya ait kesit görüntüsünde kaplama kalınlığının diğerlerine kıyasla oldukça ince olduğu görülmektedir. Katman yapısında bazı bölgelerde düzensizlikler mevcuttur. Altlık ile kaplama arasındaki sınır belirgin olmakla birlikte, sınıra yakın bölgelerde ayrılma eğilimi gösteren yapılar dikkat çekmektedir. Bu durum, yüzey hazırlığı veya kaplama parametrelerine bağlı olarak gelişmiş olabilir.

Ni-W kaplamaya ait kesit görüntüsünde, kaplama kalınlığı belirgin şekilde ayırt edilebilmekte ve kaplama ile altlık arasında net bir geçiş yüzeyi görülmektedir. Arayüzde delaminasyon izine rastlanmamıştır. Kaplamanın bütünlüğü ve sürekliliği iyi düzeydedir.

Sert krom kaplamanın kesit SEM görüntüsünde, altlık üzerinde kalın ve sürekli bir kaplama tabakası olduğu izlenmiştir. Ara yüzeyde yapısal bütünlük korunmuş olup, kaplama boyunca süreklilik sağlanmıştır. Bununla birlikte, sert krom kaplamalara özgü mikroskobik çatlaklar bu örnekte de gözlemlenmiştir. Bu çatlaklar yağ tutma kapasitesini artırabilirken, zamanla ilerleme göstermesi durumunda kaplama performansını olumsuz etkileyebilir.

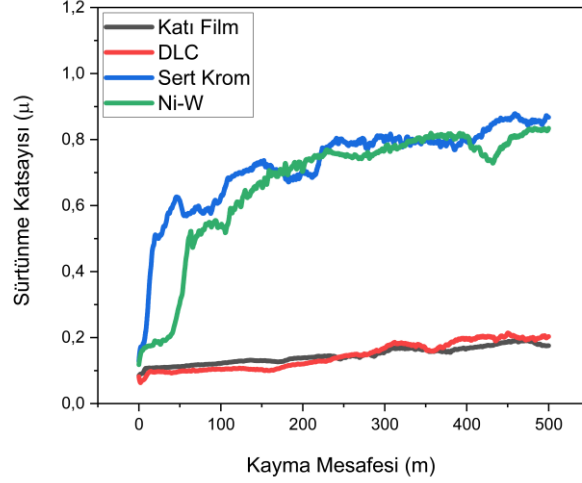
4.1.5. numaralı başlık altında literatür araştırmasında tespit edilmiş olan HV değerleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 6.3. Numune-Sertlik(HV) grafiği.

Mevcutta kullanılan alüminyum bronzlar düşünüldüğünde, bu bronzların ölçülmüş HV değeri yaklaşık olarak 210-220 HV arasındadır. Yapılan kaplamalar sonrası çelik malzemenin üretilen sonsuz dişlinin sertlik değerinin; mevcut dişliler ile kıyaslandığında 1,15-10 kat arasında artabileceği görülmektedir.

Ball-on-flat testi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı değerleri grafiğe aktarılmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.4. Kayma mesafesi – sürtünme katsayısı grafiği.

DLC kaplama için sürtünme katsayısı oldukça düşük seviyelerde seyretmiştir. Başlangıçta kısa süreli bir dalgalanma gözlenmiş olsa da, COF değeri genel olarak 0,05–0,18 aralığındır. Bu sonuç, DLC kaplamaların düşük sürtünme özelliği ve yüzey stabilitesi sayesinde yüksek tribolojik performans sergilediğini göstermektedir. Aşınma izlerinin SEM görüntülerinde de gözlemlendiği üzere, kaplamada belirgin deformasyon ya da ciddi bir yapışma etkisi gözlenmemiştir. Bu durum, DLC kaplamaların uzun süreli uygulamalarda yüzey bütünlüğünü koruyabileceğini desteklemektedir [17].

Katı film kaplamalı numunede sürtünme katsayısı düşüktür. Sürtünme katsayısı değerinin yaklaşık 0,08–0,17 seviyelerinde olduğu görülmüştür. İçeriğinde MoS₂ veya grafit gibi yağlayıcılar olduğundan dolayı bu kaplamanın sürtünme katsayısı oldukça düşüktür. Film yapısının zayıflaması ile birlikte yüzeydeki sürtünme artacaktır [18, 28].

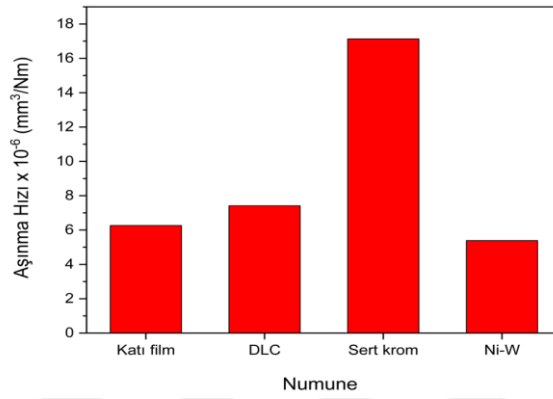
Ni-W kaplamada sürtünme katsayısı testlerin başında görece düşük başlamakta, ardından artış göstermektedir. Bu durum, Ni-W kaplamanın mikroyapısal özelliklerinden kaynaklanan, gözenekleşme mekanizmalarının etkili olduğunu göstermektedir. [19, 20].

Sert krom kaplamaya ait testte sürtünme katsayısı başlangıçta yüksek seviyelerde seyretmiş, kısa sürede 0,5 düzeylerine ulaşmış, sonrasında daha yavaş eğilimli bir artış göstermiştir. Bu durum, sert krom kaplamanın yüzeyde yüksek ilk sürtünmeye neden olmasına rağmen, aşınma ilerledikçe stabil bir temas yüzeyi oluşturduğunu ve

ardından tekrar yükseliş gösterdiğini göstermektedir. Yüzey SEM görüntülerinde gözlemlenen mikroçatlaklı yapı, bu davranışa katkı sağlayan bir faktör olabilir [21].

Sonuç olarak; başlangıçta DLC ve katı film kaplamalarda 0,1-0,2 arasında sürtünme katsayısı değerleri elde edilmişken sert krom ve Ni-W kaplamanın sürtünme katsayısının 0,6-0,9 arasında seyrettiği gözlemlenmiştir.

Ball-on-flat testi sonucunda elde edilen aşınma hızı değerleri aşağıdaki grafikte incelenmiştir;

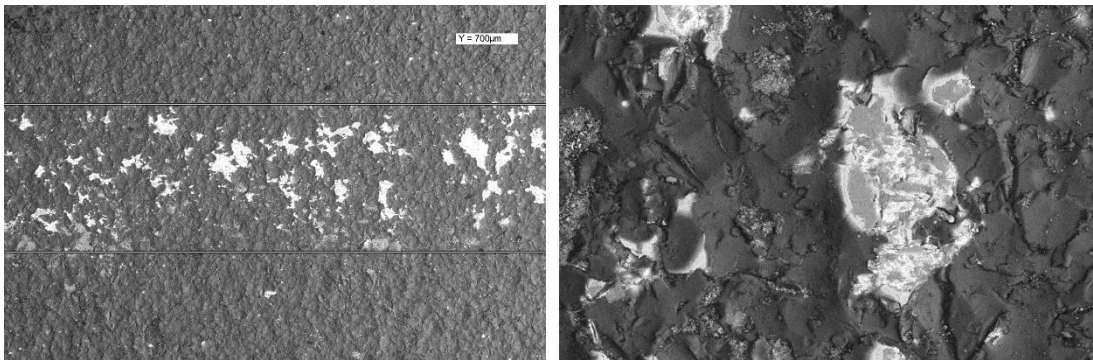


Şekil 6.5. Numune-Aşınma hızı grafiği.

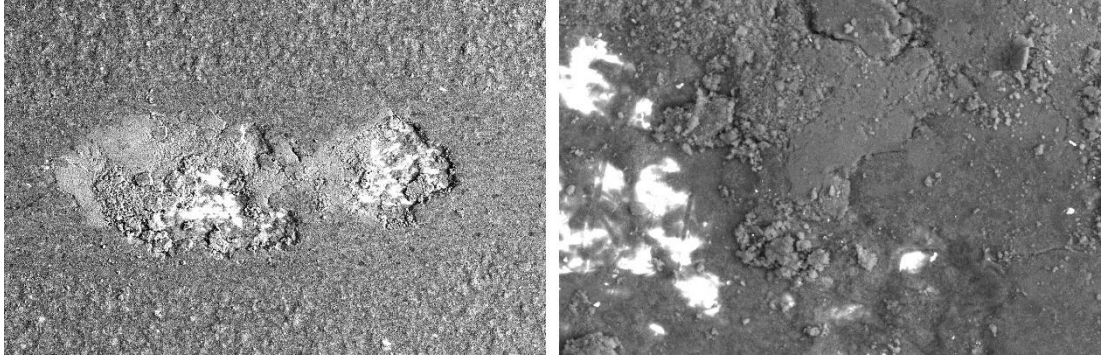
Bu veriler değerlendirildiğinde Ni-W kaplamanın en düşük aşınma hızına sahip olduğu görülmektedir. Aşınma hızının düşük olduğu numunelerde yüzeyin aşınma direnci yüksek olduğu için Ni-W kaplamanın yüzey aşınma direncinin en yüksek olduğu söylenebilir.

Elde edilen verilerin tamamının birlikte değerlendirilmesi, sağlıklı bir çıkarım yapılması açısından önemlidir. Sonuçlar bölümünde elde edilen veriler birlikte değerlendirilmiştir.

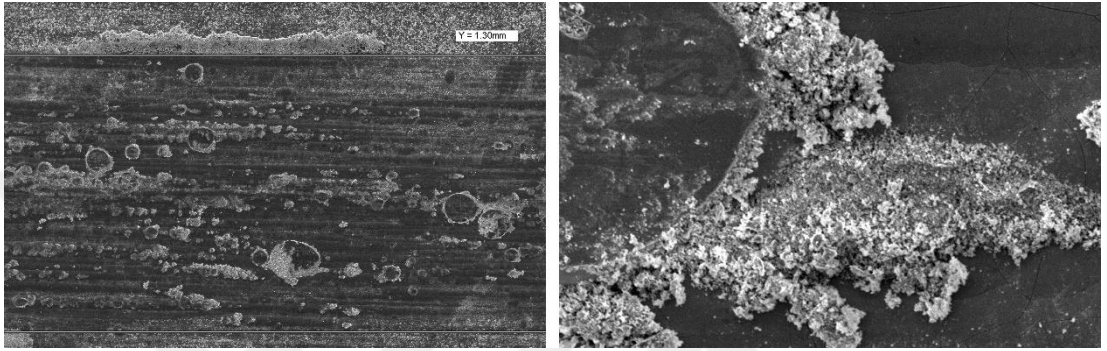
Aşınma sonrası SEM görüntüleri aşağıdaki gibidir;



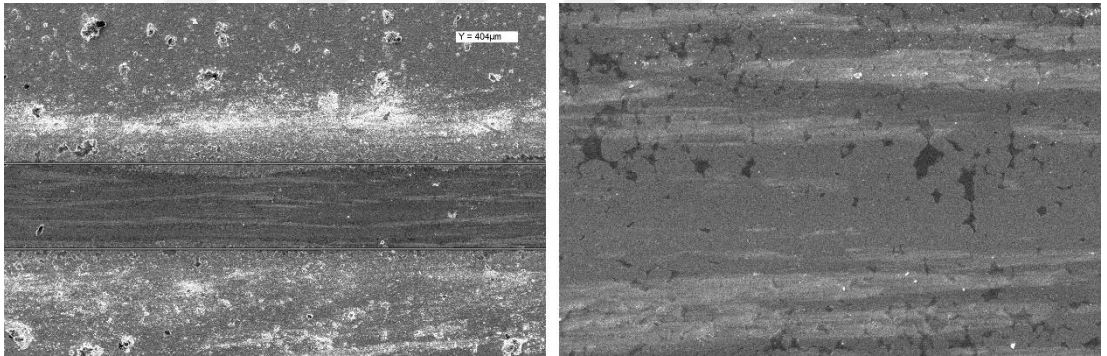
Şekil 6.6. Aşınma sonrası DLC kaplama SEM görüntüsü.



Şekil 6.7. Aşınma Sonrası katı film kaplama SEM görüntüsü.



Şekil 6.8. Aşınma sonrası sert krom kaplama SEM görüntüsü.



Şekil 6.9. Aşınma sonrası Ni-W kaplama SEM görüntüsü.

DLC numunesinde aşınma izleri oldukça düzenli ve çizgisel yapıdadır. Yüzeyde derin plastik deformasyon ya da kırılma izine rastlanmamıştır. Kaplama genel olarak bütünlüğünü korumuş, ciddi delaminasyon veya çatlak oluşmamıştır. Bu da DLC kaplamanın yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayısı sayesinde aşınmaya karşı oldukça dirençli olduğunu göstermektedir. Aşınma mekanizmasının hafif adezif aşınma şeklinde gerçekleştiği düşünülmektedir [17].

Katı film kaplamalı numunede, aşınma izlerinin belirgin ve zaman zaman kesintili olduğu görülmektedir. Aşınma alanlarında film tabakasının yer yer kalktığı ve bazı bölgelerde soyulma olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, kaplama kalınlığının düşük olması ve altlıkla zayıf bağlanması gibi nedenlerle açıklanabilir. Aşınma bölgelerinde

film kırılması ve yerel delaminasyon izlenmiştir. Aşınma mekanizması olarak mikro kırılma ve yapışmalı aşınma davranışı gözlemlenmiştir [18, 19].

Ni-W kaplamada aşınma izleri boyunca düzenli bölgeler dikkat çekmektedir. Aşınma sonrası yüzey SEM görüntüsünde, yüzey boyunca belirgin şekilde uzanan çizgisel izler gözlemlenmiştir. Aşınma tipi olarak abrazyon olduğu söylenebilir. Aşınma boyunca kararlı bir yapı sergilediği görülmektedir. [19, 20].

Sert krom kaplamada yüzeyde mikroskobik çizikler dışında derin aşınma gözlenmemiştir. Yüzeyde paralel doğrultuda uzanan çizgisel izler belirgin şekilde görülmektedir. Bu izler, temas sırasında meydana gelen kayma hareketinin yüzeyde oluşturduğu doğrusal aşınma izleri olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte, yüzeyin belirli bölgelerinde çizgisel yapıların çatallanarak ilerlediği ve daha karmaşık, ağaç benzeri morfolojiler oluşturduğu da gözlemlenmektedir. Bu yapı, yüzeydeki aşınma davranışının homojen olmadığını ve yer yer yönlendirilmiş mikro deformasyon izlerinin geliştiğini göstermektedir. Aşınma mekanizması muhtemelen hafif abrazyon ve yüzey yorgunluğu şeklinde gelişmiştir [21].

Tablo 6.1. Kaplama türlerine göre aşınma testi sonrası hasar çeşitleri ve yorumları.

Kaplama Türü	Gözlenen Yapı Özelliği	Aşınma Mekanizması	Yorum
DLC	Homojen ve yoğun yapı	Hafif adezyon	En iyi performans, çizik izleri minimum
Sert Krom	Mikro transfer parçacıkları	Mikroçatlakla başlayan abrazyon	Kırılgan yapı, yorulma aşınması
Katı Film	Katmanlı yapıda aşınma tabakası	Yayılmış yüzey yıpranması	Yağlayıcılık etkisi sınırlı kalmış
Ni-W	Düzenli ve kompakt yapı	Hafif abrazyon ve sürtünme	Dengeli aşınma davranışı göstermiş

Aşınma hızı grafiği, sürtünme katsayıları, SEM görüntüleri detaylı olarak incelendiğinde;

En iyi performans, yapısal bütünlük, yüksek sertlik ve çok düşük sürtünme katsayısına sahip olması nedeniyle DLC kaplama tarafından sağlanmıştır.

Sert krom kaplama, aşınma direncinin en yüksek olduğu performansı sergilemiş ve aşınma sonrası yüzey bütünlüğünü korumuştur fakat sürtünme katsayısı dikkate alındığında bronz yerine çelik kullanılan sistemlerde sert krom kaplama yapılması

yüzey arasında aynı ya da daha fazla sürtünme oluşturacağından dolayı iyi bir alternatif olmayacaktır.

Ni-W kaplamanın; sertlik ve aşınma hızı sonuçları incelendiğinde çelik dişli üzerine uygulandığında yüksek performans sergileyeceği görülmektedir. Fakat sürtünme katsayısı incelendiğinde, çelik-çelik sistemdeki kuru sürtünme katsayısından düşük olmadığı görülmektedir.

Katı film kaplamalar, aşınma sonrası dayanım açısından sınırlı olması ve kaplamada soyulmalar tespit edilmesi sebebiyle çalışma koşulları gözden geçirilerek bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

Bronz malzemenin çelik malzeme ile eşlenik olarak çalışırken 0,1–0,2 arası düşük bir sürtünme katsayısına sahip olduğu fakat yağlamanın gerekli olduğu; bronz malzemenin mekanik özellikler bakımından çelikten daha düşük performans sergilediği göz önüne alındığında; sonsuz dişli-vida sistemlerinde sonsuz dişlinin çelik malzemeden yapılması ve kullanım alanına göre yapılacak kaplamaya karar verilerek en yüksek verimin alınabileceği görülmektedir.

Sonsuz vida-dişli sistemlerinde yaygın olarak tercih edilen alüminyum bronzun birim maliyetinin, çeliğe göre yaklaşık 20 kat daha yüksek olduğu düşünüldüğünde büyük hacimli projelerde ortaya çıkan mali dezavantajın; çelik-çelik eşlenik çalışan sonsuz dişli-vida sisteminde dişli malzemesinin çelik olarak tercih edileceği ve uygun kaplamanın yapılacağı uygulamalarda ortadan kaldırılmış olacağı görülmüştür. Kaplama maliyeti uygulama türüne bağlı olmakla birlikte toplam sistem maliyeti hala bronzdan daha düşüktür.

Maliyet analizinin tam olarak görülebilmesi için bir dişli ölçüsü belirlenmiş, buna yönelik olarak bronz ve çelik malzemelerin kg fiyatları tedarikçilerden alınmıştır. Aynı dişli için kaplama firmasından DLC kaplama için fiyat alınmıştır. Kaplama için bir şarj bedeli belirtilmiş buna yönelik kaç adet ürünün aynı şarjda kaplanacağı belirtilmiştir. Ortaya çıkan maliyetler Tablo 6.2.'de belirtilmiştir.

Tablo 6.2. Bronz ve DLC kaplamalı çelik dişliye ait maliyet kıyaslaması.

Özellik	Bronz Parça	DLC Kaplamalı Çelik Parça
Ağırlık	1,532 kg	1,36 kg
Malzeme Birim Fiyatı	24 €/kg	1,23 €/kg
Malzeme Maliyeti	36,768 €	1,6728 €
Kaplama Maliyeti	—	20 €
Toplam Maliyet	36,768 €	21,6728 €

Tablodan da açıkça görüldüğü üzere, DLC kaplamalı çelik parça, toplam maliyet açısından bronz parçaya göre önemli bir avantaj sunmaktadır. Bronz malzemenin birim fiyatı yüksek olduğundan, yalnızca malzeme maliyeti 36,768 €'ye ulaşmaktadır. Buna karşılık, çelik malzeme daha düşük yoğunluk ve birim fiyata sahip olduğundan, kaplama maliyeti eklenmiş hâliyle bile toplam maliyeti yalnızca 21,6728 € olmaktadır. Bu da yaklaşık %41 daha düşük maliyet anlamına gelmektedir.

Bu durum, DLC kaplamalı çelik parçaların yalnızca tribolojik performans değil, ekonomik açıdan da tercih edilebilir olduğunu göstermektedir. Özellikle seri üretim senaryolarında, birim maliyette sağlanan bu fark, toplam üretim maliyetlerini ciddi ölçüde azaltma potansiyeli taşımaktadır. Ancak kaplama süresi, tedarik altyapısı ve kalite kontrol gereklilikleri gibi ek faktörlerin de değerlendirme sürecine dâhil edilmesi önerilir.

Tablo 6.3. Bronz dişli ve DLC kaplamalı çelik dişliye ait kıyaslama kriterleri.

Karşılaştırma Kriteri	Bronz Parça	DLC Kaplamalı Çelik Dişli
Yoğunluk (g/cm ³)	8,70	7,85
Yüzey Sertliği (HV)	210	2200
Sürtünme Katsayısı	0,16 (yağlı ortam)	0,15 (kuru ortam)

Yukarıdaki karşılaştırma dikkate alındığında, DLC kaplamalı çelik malzemenin sadece yüzey sertliği ve sürtünme performansı bakımından değil, genel mekanik özellikler açısından da bronz malzemeye kıyasla önemli avantajlar sunduğu görülmektedir.

Aynı yük taşıma kapasitesine sahip bir sistem, çelik ile üretildiğinde bronzla kıyasla daha küçük hacim ve daha düşük ağırlıkla tasarlanabilir. Bu durum, özellikle yer kısıtı olan uygulamalarda büyük avantaj oluşturur. Çelik, bronzla kıyasla daha yüksek özgül mukavemete sahiptir; bu da daha hafif ve kompakt tasarımlara olanak tanır.

Ayrıca DLC kaplamanın sağladığı düşük sürtünme katsayısı ve yüksek yüzey sertliği, çelik malzemenin tribolojik performansını artırarak, hem aşınmayı azaltmakta hem de

bakım sıklığını düşürmektedir. Bu yönüyle değerlendirildiğinde, DLC kaplamalı çelik malzeme, bronzla kıyasla daha uzun ömürlü, daha hafif ve daha yüksek yük kapasitesine sahip dişli kutularının tasarlanmasına olanak tanımaktadır.

Çelik-çelik eşlenik sistemlerde, sonsuz dişli malzemesi olarak çeliğin tercih edildiği uygulamalarda DLC kaplama, tribolojik performansı artırmak amacıyla uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Yüksek yüzey sertliği ve kuru çalışma koşullarında dahi oldukça düşük olan sürtünme katsayısı sayesinde, sistemin uzun süreli çalışmasında aşınma kaynaklı problemlerin en aza indirileceği öngörülmektedir. Ortamda bir yağlayıcı bulunması durumunda ise, yüzeyler arasındaki sürtünme daha da azalacağından, sistem verimi artacaktır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, literatürde DLC kaplamaların düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direncine sahip olduğuna ilişkin bulgularla tutarlılık göstermektedir. Uygulanan yöntem sayesinde çelik-çelik eşlenik sistemlerde bronz kullanımına teknik ve ekonomik olarak güçlü bir alternatif sunulmuştur. Elde edilen bulgular, özellikle kompakt dişli kutusu tasarımları, düşük bakım ihtiyacı ve daha düşük maliyetli üretim hedefleyen uygulamalarda DLC kaplamalı çeliklerin tercih edilebilirliğini desteklemektedir.



7. ÖNERİLER

- Kaplama performanslarının değerlendirilmesi için dişli kutusu üzerinde karşılaştırmalı test gerçekleştirilebilir;

Çalışmada kullanılan ball-on-flat deney düzeneği, kaplamaların temel tribolojik eğilimlerini ortaya koymak açısından yararlıdır; ancak saha koşullarına yakın değerlendirme yapılabilmesi için gerçek bir dişli kutusu test sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, biri kaplamalı çelik sonsuz dişli – çelik vida içeren, diğeri ise geleneksel bronz sonsuz dişli – çelik vida içeren olmak üzere iki ayrı redüktör sistemi hazırlanabilir. Her iki sistem, eşdeğer yük, hız ve sıcaklık koşulları altında çalıştırılarak aşınma, sürtünme, ısınma ve tork iletimi gibi performans parametreleri karşılaştırmalı olarak analiz edilebilir. Test sonrasında kaplamalı çelik dişli yüzeylerinden alınacak SEM görüntüleri ile aşınma morfolojileri detaylı şekilde incelenerek, kaplamanın yüzey koruma kapasitesi doğrudan gözlemlenebilir.

- Kaplama-yağ etkileşimi incelenebilir;

Farklı yağlayıcı türleri (örneğin katı katkı, düşük viskoziteli veya sentetik bazı yağlar) kullanılarak, kaplamaların yağlama ortamına verdiği tepkilerin tribolojik performans üzerindeki etkisi analiz edilebilir.

- Kaplama kalınlığının tribolojik performans üzerindeki etkileri incelenebilir;

Aynı kaplama malzemesinin farklı kalınlıklarda uygulanması durumunda aşınma, sürtünme ve yüzey morfolojisi üzerindeki etkileri araştırılabilir.

- Kaplama sistemlerinin çok katmanlı veya hibrit yapılandırmalarla değerlendirilebilir;

Farklı kaplama türlerinin bir arada kullanılmasıyla elde edilen çok katmanlı sistemler tribolojik performansın daha da artırılmasına olanak sağlayabilir. Bu sayede hem yüzey sertliği hem de düşük sürtünme katsayısı aynı anda elde edilerek, çelik-çelik temaslı sistemlerin dayanımı iyileştirilerek farklı kaplama alternatifleri oluşturulabilir.

- Kaplama öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülüğü karşılaştırmalı olarak ölçülebilir;

Kaplamaların yüzey morfolojisi üzerindeki etkilerini daha sağlıklı değerlendirebilmek adına, her numunenin kaplama öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülüğü (örneğin Ra, Rz) ölçümleri gerçekleştirilmelidir. Bu sayede aşınma davranışı ve yüzey etkileşimleri sayısal olarak daha güçlü temellere dayandırılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Mühendislik Bilgileri. (t.y.). *Yüzey sertleştirme işlemleri*. <https://www.muhendislikbilgileri.com/?pnum=160&pt=YS1>
- [2] Teknik Ürünler. (t.y.). *Düz dişli nedir, nasıl çalışır, avantajları nelerdir?*. <https://www.teknikurunler.com/duz-disli-nedir-nasil-calisir-avantajlari-nelerdir-rehber/>
- [3] AEB Dişli Makine. (t.y.). *Düz ve helis dişliler*. <https://www.aebdislimakine.com/duz-ve-helis-disliler/>
- [4] Onay Dişli. (t.y.). *Dişli çeşitleri hakkında bilgi*. <http://www.onaydisli.com/detay.php?id=1607320967>
- [5] Makina Eğitimi. (t.y.). *Dişli çeşitleri*. <https://www.makinaegitimi.com/disli-cesitleri/>
- [6] KHK Gears. (t.y.). *Hypoid gears*. https://khkgears.net/new/hypoid_gears.html
- [7] Maktoloji. (2018, Ekim). *Planet dişli sistemleri nasıl çalışır?* <https://www.maktoloji.com/2018/10/planet-disli-sistemleri-nasil-calir.html>
- [8] PGR Gear. (t.y.). *Planet dişliler*. <https://www.prggear.com/urunlerimiz/planet-disliler.html>
- [9] Sağlam, M., (2024). *Globoid Dişli Sistemleri için Alternatif Dişli Malzemelerinin Belirlenmesi ve İncelenmesi [Yüksek lisans tezi]*. Sakarya Üniversitesi
- [10] TurkRED. (t.y.). *Dişli setleri hizmeti*. <https://turkred.com/tr/services/gearsets-detay/>
- [11] Polat Redüktör. (t.y.). *Sıkça sorulan sorular*. <https://www.polatreduktor.com.tr/sikca-sorulan-sorular/>
- [12] Davis, J. R. (Ed.). (2001). *Surface engineering for corrosion and wear resistance*. ASM international.
- [13] Holmberg, K., & Matthews, A. (2009). *Coatings tribology: properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering* (Vol. 56). Elsevier.
- [14] Est Yüzey Kaplama. (t.y.). *Kuru film yağlama kaplaması - Technocoat*. <https://estyuzeykaplama.com/hizmetler/kuru-film-yaglama-kaplamasi-technocoat/>
- [15] Oerlikon Balzers. (t.y.). *BALINIT DLC: Elmas benzeri karbon kaplama*. <https://www.oerlikon.com/balzers/tr/tr/portfoy/balzers-yuezey-coezuemleri/pvd-ve-pacvd-esasli-kaplamalar/balinit/karbon-esasli/balinit-dlc/>
- [16] Dasroll. (t.y.). *Sert krom kaplama*. <https://www.dasroll.com/endustri/sert-krom-kaplama>

- [17] Donnet, C., & Erdemir, A. (Eds.). (2007). *Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications*. Springer Science & Business Media.
- [18] Ader Savunma. (t.y.). *Kati film yağlayıcı*. <https://adersavunma.com.tr/hizmetlerimiz/kati-film-yaglayici>
- [19] Uysal, M., Algül, H., Duru, E., Kahraman, Y., Alp, A., & Akbulut, H. (2021). Tribological properties of Ni–W–TiO₂–GO composites produced by ultrasonically–assisted pulse electro co–deposition. *Surface and Coatings Technology*, 410, 126942.
- [20] Duru, E., Öztürk, A., Uysal, M., Akbulut, H., & Aslan, S. (2022). Effect of W Concentration on Hardness and Wear Properties of Ni-BW Coatings. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 610-616.
- [21] Yli-Pentti, A. (2014). Electroplating and electroless plating.
- [22] Hielscher Ultrasonics. (t.y.). *Dissolving – High-performance dissolvers*. <https://www.hielscher.com/tr/dissolving-high-performance-dissolvers.htm>
- [23] Sanayi Malzemeleri. (t.y.). *WF-MIA-1 ısıtıcılı manyetik karıştırıcı*. <https://www.sanayimalzemeleri.com/wf-mia-1-isticili-manyetik-karistirici>
- [24] Mukras, S. M. (2020). Computer simulation/prediction of wear in mechanical components. *Advances in tribology*, 2020(1), 8867351.
- [25] Grill, A. (1999). Diamond-like carbon: State of the art. *Diamond and Related Materials*, 8(2–5), 428–434.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Feyza Hilal SAĞLAM

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2025, Üniversite, Makina Mühendisliği, Makine Tasarım ve İmalat

MESLEKİ DENEYİM:

- Temmuz 2021- Devam Ediyor : Turkred Redüktör – Proje Mühendisi

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- SAĞLAM F. H. (2025, 4-6, Nisan). 11th International Congress on Innovation Technologies & Engineering. *Dişli Sistemlerinde Çelik Malzemelerin Eşlenik Çalışma Performansının Artırılmasına Yönelik Çeşitli Kaplama Yöntemlerinin Belirlenmesi ve Performans Analizi*, İzmir, Turkey.