



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**DÜZ DİŞLİ ÇARKLARDA WS_2 , WC/C , MoS_2
KAPLAMALARININ YÜZEY AŞINMASI VE
YORULMAYA ETKİSİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ**

ABDULL GHAFOOR SHAIB

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA

İstanbul, 2021



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**DÜZ DİŞLİ ÇARKLARDA WS_2 , WC/C , MoS_2
KAPLAMALARININ YÜZEY AŞINMASI VE
YORULMAYA ETKİSİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ**

ABDULL GHAFOOR SHAIB
(523218991)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA

İstanbul, 2021

ÖNSÖZ

Talaşlı imalat çalışmalarında üretilen parçaların minimum maliyet ve maksimum kaliteye sahip olmaları istenmektedir. Talaşlı imalat yöntemi ile üretilen bu ürünlerin kalitesi öncelikli olarak istenen yüzey kalitesi ve ölçü tamlığına göre belirlenir. Bu çalışma sanayii sektörü için ve bilimsel çalışma yapacak olan mühendisler için bu konuda yapılan ve örnek teşkil edecek önemli bir deneysel uygulamadır. Yapılan deneysel çalışmada elde edilen verilerde dişli çark kaplamalarının yüzey aşınmaları ve çalışmanın yorulmaya etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu tez çalışması desteğiyle birçok kişiye akademik ve uygulamalı olarak katkıda bulunacağını umut ediyorum. Öncelikle bu çalışma boyunca bütün bilgileriyle bana ışık tutup, yön veren ve tez çalışmanın her aşamasında desteğini esirgemeyen yol gösteren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Dişli çarkların hazırlanmasında bana yardımcı olan Yeksa Makina firması (www.yeksamakina.com) çalışanlarına ve yetkilisi Sayın Ali KILIÇ beyefendiye dişli çarkların hazırlanmasında gösterdiği sabır ve desteklerinden dolayı çok çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmanın numunelerin hasar tespit işlemine bana yardımcı olan Şirvanlı Alüminyum Döküm ve Metal İşleme Sanayi firması (www.sirvanli.com/tr) dişli çarkların aşınma muayenesinde gösterdiği sabır ve desteklerinden dolayı çok çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmada dişli çarkların yüzey kaplamalarını hazırlayarak yapan ve istenilen kaplamaları yapmak için gerekli olan kaplama malzemesini yurt dışından getirerek bize katkı sağlayan Prokap Makine'ye (<https://prokap.com.tr>) çok çok teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışma materyallerinin hazırlanmasında kaplama işlemleri ve deneysel çalışma setinin kurulumu aşamalarında bana destek olan ve bilgileri ile beni yönlendiren çok değerli Doç.Dr. Memduh KURTULMUŞ hocama çok teşekkür ederim. Ayrıca deneysel çalışmada bana destek veren Marmara Üniversitesi ailesine, tezimin tamamlanmasına imkân sağlayan ve tez çalışmam süresince her zaman bana sabır gösterdikleri, motive ettikleri, zorlukları benimle paylaştıkları ve yanımda oldukları için aileme en derin sevgilerimi ve saygılarımı sunarım.

Eylül 2021

Abdull Ghafoor SHAIB

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
SEMBOLLER.....	ix
KISALTMALAR.....	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xv
1. BÖLÜM	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür	3
1.3. Mühendislikte Dişli Çarkların Teknolojik Gelişmeleri	7
1.4. Dişli Mekanizmaların Teknolojide ve Hayatımızda Önemi.....	9
1.5. Dişli Mekanizmaların Kullanım Alanları	9
1.6. Düz Dişli Çarklar.....	10
1.6.1 Düz Dişli Çarkların Temel Kavramları ve Boyutlandırılması.....	10
1.6.2. Dişlerin Profil Eğrileri	12
1.6.3 Kavrama Olayı.....	13
1.6.3.1. Kavrama Açısı	14
1.6.4. Düz Dişli Çarkın Mukavemet Hesabı	15
1.6.4.1. Diş Kuvveti.....	15
1.6.4.2. Diş Dibi Gerilmeleri	16
1.6.4.3. DIN Standardına Göre Diş Dibi Gerilme Hesabı	17

1.6.4.4. Düz Dişli Numunelerin Ölçüleri.....	18
1.6.5. Düz Dişli Numunenin Mukavemet Hesabı.....	19
1.5. Diş Profilleri Arasındaki Yüzey Basıncı	20
1.6. Tribolojik Sistem ve Aşınma	21
1.6.1. Aşınmanın Tanımı ve Türleri	21
1.6.1.1 Abrasiv Aşınması	22
1.6.1.2. Adhesiv Aşınması.....	24
1.6.1.3 Yorulma (Pitting) Aşınması.....	25
1.7. Kaplamalı Düz Dişlilerin İşlevselliği	26
1.7.1. Tungsten Disulfür (WS_2) ve Molibden Disulfürün (MoS_2) Kristal Yapısı	26
1.7.2. Tungsten Karbon Karbür (WC/C) Tanıtımı ve Kullanım Alanları	27
2. BÖLÜM MATERYAL VE MALZEME	28
2.1 Materyal ve Malzeme	28
2.1.1 FZG Deney Seti Tasarımı	29
2.2 Düz Dişli Çark Üretiminde Kullanılan Malzeme	29
2.2.1 AISI 316 Paslanmaz Çelik.....	30
2.2.1.1 AISI 316 Çelik Malzeme Kimyasal Özellikler.....	30
2.3. Düz Dişli Numunelerin Ölçüleri.....	31
2.4. Düz Dişli Çark Kaplama Yöntemleri	33
2.4.1. Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi (PVD)	33
2.4.2. Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi (CVD)	34
2.4.3. Plazma Püskürtme Yöntemi ile Kaplama	34
2.5. AISI 316 Paslanmaz Çelik Düz Dişli Çarkların Kaplaması	35
2.6. Kaplama Malzemesi Seçimi	37

2.6.1. AISI 316 Paslanmaz Çelikten İmal Edilen Düz Dişli Numunenin Aşınma Olayı	37
2.6.2. Deneysel Çalışmada Düz Dişli Çarkın Tungsten Disulfür (WS ₂) Kaplaması	38
2.6.3. Deneysel Çalışmada Düz dişli Çarkın Tungsten Karbon Karbür (WC/C) Kaplaması.	38
2.6.4. MoS ₂ (Molibden Disulfür) Tanıtımı ve Kullanım Alanları	40
2.6.5. MoS ₂ 'nin Mekanik Özellikleri	40
2.6.6. Deneysel Çalışmada Düz Dişli Çarkın Molibden Disulfür (MoS ₂) Kaplaması	41
2.7 Mil Malzemesi ve Mil Mukavemet Hesabı	42
2.8 Deneysel Çalışmada Flanş Kullanılması	44
2.8.1 Flanşın Mukavemet Analizi.....	46
2.9. FZG Deney Seti İçin Rulman Seçimi	47
2.10. Deneysel Çalışmada Kullanılan Hassas Terazî	49
2.11. Deneysel Çalışmada Kullanılan Yüzey Pürüzlülük Cihazı	50
2.12. Deneysel Çalışmasında Kullanılan Elektro Mikroskop Cihazı	51
2.13. Deneysel Çalışma Setinin Bağlandığı Torna Tezgâhı	52
2.14. Deneysel Uygulamada Kullanılan Diğer Tezgâhlar	53
3. BÖLÜM DENEYSEL ÇALIŞMA.....	55
3.1 Araştırma Metodu.....	55
3.2. Aşınma Ölçüm Yöntemi.....	57
3.3. İşlemden Önce Düz Dişlinin Diş Profilin Yüzeyin Muayenesini Edilerek Veri Oluşturması.....	57
3.4. Deneysel Çalışma 250.000. Dönme Tekrarından Sonra Dişlinin Muayenesinin Yapılması.....	62

3.5. Deneysel Çalışma 500.000. Dönme Tekrarından Sonra Dişlinin Muayenesinin Yapılması.....	68
4. BÖLÜM SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	74
4.1. Deney Numuneleri FZG Setinde Çalışması Sürecine Kadar Yapılan İşlemler ve Aşamalar	74
4.2. Kaplama Etkisinin Tartışması ve Değerlendirmesi	75
4.3. ÖNERİLER	76
5. KAYNAKLAR	82
6. Ekler.....	90
6. Özgeçmiş.....	95

ÖZET

DÜZ DİŞLİ ÇARKLARDA WS_2 , WC/C , MoS_2 KAPLAMALARININ YÜZEY AŞINMASI VE YORULMAYA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Kaplama işlemleri yüzey aşınması ve yorulmaya etkisi açısından makine imalat sektöründe teknolojinin gelişmesi ile daha çok önem kazanmaktadır. Tasarım sonucunda makinelerde kullanılan makine parçaları, operasyon sürecinde yıpranmaktadır. Tribolojide makinelerde oluşan bu yıpranmaya aşınma adı verilir. Aşınma, iki makine elemanının birbirine bağlı hareketi ve güç iletim sırasında yüksek basınç altında kalarak kalıcı deformasyona uğraması ile oluşur. Hareket ve güç ileten dişli çark mekanizmalarında da pinyon tarafından dişli çark'a kuvvet iletilir. Bu sırada dişlilerin diş yüzeyinde yüksek basınç oluşumu nedeni ile diş yüzeylerinde aşınmalar ve dişlilerin kenarlarında kırılmalar meydana gelmektedir. Bu süreçlerin takibi ve gerekli durumlarda aşınmaları önlemek için gerekli tedbirlerin alınması makine sektöründe en önemli hususlardan biridir. Mekanik sistemlerde aşınma olayının ortadan kaldırılması ne kadar ulaşmak istenilen beklenti olsa da bilim adamları ve ilgili alanda çalışan mühendisler ancak aşınma olayını minimize etmenin yollarını deneysel çalışmalar ile araştırmaktadır. Dinamik ve yüzey temaslı makine parçalarından düz dişli çarkların diş yüzeyinden aşınmayı azaltan en önemli yöntemlerden yağlama işlemi geçse de yüksek gerilme altında çalışan düz dişlinin diş yüzeylerini kaplama yöntemleri ile geliştirmektedir. Bu metotlardan birisi yüksek gerilme altında çalışan yüzeyleri çalışma şartlarına uygun kaplama uygulaması geçmektedir.

Bu çalışmada AISI 316 çelik malzemesinden imal edilen düz dişliler, WS_2 , WC/C , MoS_2 , birbirinden farklı kaplama malzemesi ile kaplanmıştır. Deneysel çalışmada dişlileri çalıştıran deney düzeneği kurulmuştur. Çalışma sürecinde diş profili yüzeylerinde oluşan aşınmaların parametrik değerleri incelenmiştir. Kaplama etkisinin incelemesi ile düz dişlinin diş yüzeyinin üzerine hasar analizleri yapılmıştır. Hasar analizi için veriler binde bir hassas Precisa terazi, Mitutoyo pürüzlülük cihazı ve Nikon SMZ800N stereo mikroskop ile toplanmıştır. Yapılacak hasar analizleri neticesinde

yüzeylere uygulanan WS₂, WC/C, MoS₂ kaplamalar dikkate alınarak karşılaştırmaları yapılmıştır.

İncelenen çalışmalar dişli çark mekanizmalarının çalışma şartları altında maruz kaldıkları problemleri tespit edilmiştir. Bu problemler için çözüm önerileri sunuldu ve bu çözüm önerilerinin karşılaştırmaları yapılmıştır.

Deneysel sonuçlar ağırlık kaybının büyük ölçüde dönme tekrarına bağlı olduğunu göstermiştir. Sırası ile hız ve kaplama malzemesi cinsi takip etmiştir. Optimum test parametreleri ağırlık kaybında ve yüzey pürüzlülük değerinde WS₂ kaplaması olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Düz dişli çark, Katı yağlayıcı, WS₂, WC/C, MoS₂, Yüzeysel kaplama, Aşınma, Yorulma etkisi, Deneysel inceleme.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WS₂, WC/C, MoS₂ COATINGS ON SURFACE WEAR AND FATIGUE IN SPUR GEAR WHEELS

Coating processes gain more importance with the development of technology in the machinery manufacturing sector in terms of its effect on surface wear and fatigue. The machine parts used in the machines are worn during the operation process. In tribology, this event is called wear. Wear occurs when two machine elements have relatively motion and are in relative contact under high pressure during power transmission. In gear wheel mechanisms that transmit motion and power, due to the high pressure on the tooth surface of the gears during the transmission of force from the pinion to the gear wheel, wear on the tooth surfaces and fractures on the edges of the gears occur. It is one of the most important issues in the machinery industry to follow these processes and take necessary precautions before wearing out occurs. Although it is an expectation to eliminate the wear phenomenon from mechanical systems, scientists and engineers tried ways to minimize the wear phenomenon. Because wear is in the nature and it cannot be eliminated from mechanical systems. Even though the most famous methods of reducing wear from the tooth surface of spur gear is lubricating method, the tooth surfaces of spur gear that are operating under high stress are developed by coating methods. One of these methods is the application of suitable coating. Spur gears made of AISI 316 Steel material will be coated with different coating method such as WS₂, WC / C, MoS₂. In the experimental study, the parametric values of the wear formed on the tooth profile surfaces during the working process of the gears will be examined. In addition, the effects of different coatings that applied to spur gear will be examined. Data for damage analysis were collected with a one-thousandth precision Precisa balance, Mitutoyo Roughness Tester, and Nikon SMZ800N Stereo Microscope. The investigated studies determined the problems that gear wheel mechanisms were exposed to under operating conditions. Solution suggestions were presented for the detected problems. Comparisons of these solution suggestions were made.

Experimental results showed that weight loss was largely dependent on rotation repetition. Speed and coating material type followed, respectively. Optimum test parameters showed the WS₂ coating at weight loss and surface roughness value.

Keywords: Spur gear, Solid lubricants, WS₂, WC/C, MoS₂, Surface coating, Wear, Fatigue effect, Experimental investigation.



KISALTMALAR

AISI 316: 316 Paslanmaz Çelik

WS₂: Tungsten Disulfür

WC: Tungsten Karbür

WC/C: Tungsten Karbon Karbür

MoS₂: Molibden Disulfür

TiC: Titanyum Karbür

FZG: Güç Devre Dolaşımı Deney Seti

PVD: Fiziksel Buhar Biriktirme

CVD: Kimyasal Buhar Biriktirme

DLC: Elmas Benzeri Karbon

HSS: Yüksek Hız Çelikleri (Seri Çelik)

TiN: Titanyum Nitrür

TiCN: Titanyum Karbonitrür

CrN: Krom Nitrür

ZnN: Çinko Nitrür

CrN: Krom Nitrür

TiAlN: Titanyum Alüminyum Nitrür

WS₂-Ni: Tungsten Disulfür Nikel Kompozit

B: Bor

B₄C/C: Bor Karbon Karbür

SEM: Elektronik Tarama Mikroskobu

EDS: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi

CNC: Bilgisayar Sayısal Kontrolü

SEMBOLLER

n: Devir sayısı (dev/dak)

D: Düz dişli çapı (mm)

μ : Sürtünme katsayısı

F: Toplam normal kuvvet (N)

M: Tork (Nm)

Pc: Güç (KW)

η : Verim

Ra: Ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm)

σ : Normal gerilmesi (N/mm^2)

τ : Kesme gerilmesi (N/mm^2)

Π : Pi sayısı

μ : Mikron

Ni: Nikel

Cu: Bakır

Al: Alüminyum

Zn: Çinko

Sn: Kalay

Cr: Kromyum

Ag: Gümüş

Au: Altın

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Mühendislikte En Eski Dişli Çarklar	8
Şekil 1.2. Düz Dişli Türleri (a) Dış Alın Düz Dişli (b) İç Düz Dişli (c) Kremayer ve Pinyon Düz Dişlileri	10
Şekil 1.3. Düz Dişli Boyutları ve Geometrisi.....	11
Şekil 1.4. Dişlinin çalışan dişin yüksekliği ve dişler arasında boşluklar	12
Şekil 1.5. (a) Düz Dişli Çarkın Profili (b) Düz Dişli Çarkın Evolvent Eğrisi (c) Düz Dişli Çarkın Sikloid Eğrisi	13
Şekil 1.6. Eş Çalışan Evolvent Profilli Dişlilerin Kavrama Eğrisi.....	13
Şekil 1.7. Düz Dişli Çark Yuvarlanma ve Temas Noktaları	14
Şekil 1.8. Kavrama Doğrusu ve Kavrama Açısı	14
Şekil 1.9. Düz Dişlerde Aşınmanın Durumu C Noktasında Aşınma ve Kayma Yoktur	15
Şekil 1.10. Düz Dişlere Etkiyen Kuvvetler	16
Şekil 1.11. DIN Standartına Göre Diş Dibi Gerilme Hesabı.....	17
Şekil 1.12. G Noktasında (Diş Tabanında) Oluşan Gerilmeler	18
Şekil 1.13. Eş Çalışan Düz Dişlinin Dişlerinde Oluşan Gerilmeler	18
Şekil 1.14. Dişli Çarklarda Hertz Yüzey Basıncı	20
Şekil 1.15. Temel Aşınma Tipleri (1) Abrasiv Aşınması (2) Adhasiv Aşınması (3) Yorulma Aşınması	21
Şekil 1.16. Abresiv Aşınması Oluşumu	22
Şekil 1.17. Diş Yüzeylerindeki Abrasiv Aşınmanın Görünümü	23
Şekil 1.18. Adhesiv Aşınması Oluşumu Durumları	24
Şekil 1.19. Düz Dişlide Dar Tolerans, Yüksek Hız ve Yüksek Basınç Nedeni ile Oluşan Adhesiv (Yenme) Aşınması	25
Şekil 1.20. Deneysel Çalışmada Düz Dişli Çarklarda Oluşan Yorulma (Pitting) Aşınması.....	25

Şekil 1.21. Geçiş-Metal Dikalkojenitlerinin 3-Boyutlu Şematik Gösterimi ve Yapımı	27
Şekil 2.1. FZG Deneyisel Uygulama Çalışması Test Düzeneği.....	29
Şekil 2.2. Düz Dişlilerin Ölçülendirilmesi	32
Şekil 2.3. Paslanmaz Çelikten İmal Edilmiş Düz Dişli Çark Görüntüsü	32
Şekil 2.4. Kaplama Yöntemin Sınıflandırması.....	33
Şekil 2.5. PVD İşleminin Şeması: (a) Pvd Püskürtme ve (b) Buharlaştan PVD.....	34
Şekil 2.6. Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemleri (CVD) Şematiği	34
Şekil 2.7. Plazma Püskürtme Yöntemi ile Kaplama İşlemi	35
Şekil 2.8. Prokap Makine Firmasında Numunelerin WS ₂ , WC/C, MoS ₂ ve Termal Sprey Yöntemi ile Yüzey Kaplaması Uygulaması	36
Şekil 2.9. Prokap Makine Firmasında AISI 316 Paslanmaz Çelikten Numunelerin WS ₂ , WC/C, MoS ₂ ve Termal Sprey Yöntemi ile Yüzey Kaplamaları Yapılmıştır... 36	
Şekil 2.10. Kaplama Yapılmamış Düz Dişlinin Diş Yüzeyin Görüntüsü	38
Şekil 2.11. WS ₂ Kaplamalı Düz Dişli Numunenin Diş Yüzeyin Görüntüsü	39
Şekil 2.12. WC/C Kaplamalı Düz Dişli Numunenin Diş Yüzeyin Görüntüsü.....	40
Şekil 2.13. MoS ₂ Kaplamalı Düz Dişlinin Diş Yüzeyin Görüntüsü	42
Şekil 2.14. FZG Deney Setinde Hareket ve Gücü Dişlileri Dağıtan Miller.....	43
Şekil 2.15 FZG Deney Setinde Kullanılan Millerin Ölçülendirilmesi.....	44
Şekil 2.16. FZG Deney Düzeneyinde Kullanılan Flanş Takımı.....	45
Şekil 2.17. FZG Deney Düzeneğinde Kullanılan Flanş Takımın Ölçülendirme.....	46
Şekil 2.18. Çift Sıralı Yatak Takımı Ölçülendirmesi, Teknik Resmi ve özellikleri	48
Şekil 2.19. FZG Deney Setinde Kullanılan Rolman Yatak Takımı	48
Şekil 2.20. Binde Bir Hassasiyeti Sahip Terazide Numunelerin Ağırlığı Ölçümü	48
Şekil 2.21. Düz Dişli Numunenin Diş Yüzeyin Pürüzlülük Değeri Mitutoyo Pürüzlülük Cihazı ile Okunmuştur	51

Şekil 2.22. Düz Dişli Numunenin Diş Yüzeyin Muayenesi İçin Nikon Smz800n Stereo Mikroskop Cihazı kullanıldı.....	52
Şekil 2.23. Montajı Yapılan FZG Deney Seti ve Uygulama Çalışması Tezgâhı, Smarc LC360B Universal Torna Tezgâhı	53
Şekil 3.1 FZG Deneysel Uygulama Çalışması Test Düzeneği.....	55
Şekil 3.2. İşlemden Önce Kaplamasız Dişlinin Diş Yüzeyin Görüntüsü	60
Şekil 3.3. İşlemden Önce WS ₂ Kaplamalı Düz Dişlinin Diş Yüzeyin Görüntüsü	60
Şekil 3.4. İşlemden Önce WC/C Kaplamalı Düz Dişlinin Diş Yüzeyin Görüntüsü ..	61
Şekil 3.5. İşlemden Önce MoS ₂ Kaplamalı Düz Dişlinin Diş Yüzeyin Görüntüsü ..	61
Şekil 3.6. Uygulama Çalışması FZG Deney Setine 150 Nm Tork Yükleme	62
Şekil 3.7. Deneysel Uygulama 250000 Dönme Tekrarından Sonra Kaplamasız Düz Dişli Yüzey Mikroskop Görüntüsü	65
Şekil 3.8. Deneysel Uygulama 250.000 Dönme Tekrarından Sonra WS ₂ Kaplamalı Düz Dişli Yüzey Mikroskop Görüntüsü	66
Şekil 3.9. Deneysel Uygulama 250.000 Dönme Tekrarından Sonra WC/C Kaplamalı Düz Dişli Yüzey Mikroskop Görüntüsü	66
Şekil 3.10. Deneysel Uygulamada 250.000 Dönme Tekrarından Sonra MoS ₂ Kaplamalı Düz Dişli Yüzey Mikroskop Görüntüsü	67
Şekil 3.11. Deney Çalışmada 500.000 Dönme Tekrarından Sonra Kaplamasız Düz Dişli Yüzeyi Mikroskop Görüntüsü	71
Şekil 3.12. Deney Çalışmada 500.000 Dönme Tekrarından Sonra WS ₂ Kaplamalı Düz Dişli Yüzeyi Mikroskop Görüntüsü	72
Şekil 3.13. Deney Çalışmada 500.000 Dönme Tekrarından Sonra WC/C Kaplamalı Düz Dişli Yüzeyi Mikroskop Görüntüsü.....	72
Şekil 3.14. Deneysel Çalışmada 500.000 Dönme Tekrarından Sonra MoS ₂ Kaplamalı Düz Dişli Yüzeyi Mikroskop Görüntüsü.....	73
Şekil 4.1. Kaplamasız Düz Dişli Çarkın Üç İşlem Aşamadaki Mikroskop Görüntüsü	78
Şekil 4.2. WS ₂ Kaplamalı Düz Dişli Çarkın Üç İşlem Aşamadaki Mikroskop Görüntüsü	78

Şekil 4.3. WC/C Kaplamalı Düz Dişli Çarkın Üç İşlem Aşamadaki Mikroskop Görüntüsü.....	79
Şekil 4.4. MoS ₂ Kaplamalı Düz Dişli Çarkın Üç İşlem Aşamadaki Mikroskop Görüntüsü.....	80



TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Düz Dişli Çark Termonolojisi	12
Tablo 2.1. FZG Deney Düzeneğe Yükleme Tablosu.....	28
Tablo 2.2. Düz Dişlinin İmalatında Kullanılan Malzeme Tablosu	30
Tablo 2.3. AISI 316 Çelik Malzeme Kimyasal Özellikler.....	31
Tablo 2.4. Düz Dişlinin Kaplama Özellikleri Tablosu	37
Tablo 2.5. Kaplama Malzemenin Kimyası Formulu ve Kaplama Kalınlığı	41
Tablo 2.6. Deneysel Çalışma Aşamalarında Düz dişli Ağırlık Verileri	50
Tablo 2.7. Nikon SMZ800N Stereo Mikroskobu Teknik Özellikleri	52
Tablo 3.1. FZG Deney Setinde Deneysel Çalışması Yönlendirme Tablosu	56
Tablo 3.2. Düz Dişli Çarka Yükleme ve Çalışma Dönme Tekrarı Tablosu	56
Tablo 3.3. Deneysel Çalışma Seti Düz Dişli Takımları Boyutsal Özellikleri ve Kaplama Çeşitleri.....	57
Tablo 3.4. Deneysel Çalışmada İşlemden Önce Dişli Numunesinin Kütlesi	58
Tablo 3.5. Düz Dişli Deneysel Çalışmasında Önce Diş Profilin Yüzeyinde Oluşturduğu Yüzey Pürüzlülük Değerleri	59
Tablo 3.6. Deneysel Çalışmada Düz Dişli Diş Yüzeyin İşlemden Önce Yüzey Pürüzlülük Değerleri.....	59
Tablo 3.7. Düz Dişli Numunenin 250.000 dönme tekrarından sonra Kütlesi.....	63
Tablo 3.8. Düz Dişli Çarkın 250.000 Dönme Tekrarından Sonra Diş Profilin Yüzeyinde Oluşturduğu Yüzey Pürüzlülük Değerleri	64
Tablo 3.9. Düz Dişlinin Diş Yüzeyin 250.000 Dönme Tekrarından Sonra Pürüzlülük Değerler Tablosu	64

Tablo 3.10. Deneysel Çalışmada Düz Dişli Numunenin 500.000 işleminden Sonra Ağırlığı.....	69
Tablo 3.11. Deney Çalışmasında Düz Dişli Çarkın 500.000 Dönme Tekrarından Sonra Diş Profili Yüzey Pürüzlülük Değerleri	70
Tablo 3.12. Düz Dişlinin Diş Yüzeyi 500.000 Dönme Tekrarından Sonra Pürüzlülük Değeri Grafiği.....	70
Tablo 4.1. Düz Dişlinin Ağırlıklarında Oluşan Yüzdelik Farkı.....	74
Tablo 4.2. Düz Dişli Ağırlık Kaybı ile Aşınma Belirleme Tablosu	75
Tablo 4.3. Düz Dişli İşlem Sırasında Diş Yüzey Pürüzlülük Değişim Tablosu	76

BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

Hareket ve güç ileten iki dişli çark mekanizması, pinyon tarafından dişli çarka kuvvet iletim sırasında dişlilerin diş yüzeylerinde yüksek basınç oluşur. Buna Hertz gerilimi adı verilir. Hertz gerilim altından dişlinin diş yüzeyinde hasarlar meydana gelir. Bu hasarlar kendini diş yüzeylerinde aşınma, çizilme ve kırılma şeklinde ortaya çıkartır. Bu istenmeyen hasarları minimuma indirmek için deneysel çalışmalar ve hasar analiz yöntemleri yüzey kaplama işlemi uygulanır [1]. Deneysel çalışmada ve endüstrinin farklı alanında kullanılan metalik malzemelerin korozyona ve aşınmaya karşı mukavemetini yükseltmek ve kullanım alanlarındaki verimini arttırmak amacı ile çeşitli kaplama yöntemleri uygulanır. Demirden imal edilen ürünlerin mukavemetini korozyona karşı yükseltmek için en çok Ni, Cu, Al, Zn, Plastik, Boya, Sn (kalay), Cr, Ag ve Au gibi malzemeler ile yüzeyleri kaplanarak aşınma dayanımı artırılır [2, 5]. Yüksek basınç altında çalışan dişli çarkların aşınmaya karşı mukavemetini yükseltmek amacı ile yapılan kaplamalar dişli çark malzemesinin üzerlerine uygulanır [2]. Makinelerde kullanılan paslanmaz çelik dişli çarkların kaplamasında en çok WS₂, MoS₂, CrN ve kesici takımların kaplamasında CrN, CrAlN, ZnN, TiAlN gibi kaplama malzemelerin karışımı ile yüzey kaplama proseslerinde kullanılır [3]. Literatürde yüzey kaplamaların metotları, kullanılış yerleri ve kaplamanın verdiği sonuçları ile ilgili çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. İncelenen çalışmalar sonucunda dişli çarkların kaplaması üzerine yeterince çalışma yapılmadığı görülmüştür. Bu çalışmanın önemi ve özgün değeri de dişli çarkların kaplamaları üzerinde bilimsel çalışma alanını genişletmek, dişli çarkların çalışma prensibine uygun kaplama malzemeleri tespit etmek, uygun kaplama metodu kullanarak düz dişlinin diş yüzeyine uygulamak ve deneysel çalışmalar ile düz dişli çarkların mukavemetini aşınmaya ve kırılmaya karşı yükseltmektir. Yüzey kaplama işlemi düz dişlinin diş yüzeyine uyguladıktan sonra dişli çarklar hem teori hem pratik açıdan analiz edilecektir. Deneysel çalışmada, dişlinin her 100.000 dönme tekrarından sonra sistemi durdurarak FZG (kapalı devre güç dolaşımı sistemi) deney setinden denek dişlileri diş kutusundan çıkartılacaktır. Ardından dişli basınçlı hava ile kurutulacaktır ve 1/1000 gr hassasiyetli elektronik terazi ile tartıp aşınma miktarı belirlenecektir. Dişin yüzeyinde aşınma dağılımını belirlemek için optik

mikroskobu, SEM, EDS ve yüzey pürüzlülük cihazı kullanılarak dişlinin diş yüzeyi analiz edilecektir [52]. Deneylerden toplanan verilerin istatistiksel analizi yapılacak ve analiz sonuçları değerlendirilecektir. Teknik bir sorun olan aşınma ekonomiyi de yakından ilgilendirmektedir [3].

Bu çalışma AISI 316 çelik malzemesinden imal edilen düz dişlileri WS₂, WC/C ve MoS₂ farklı üç kaplama malzemeler ile kaplanarak dişlilerin çalışma sürecinde diş profili yüzeyinde oluşan aşınmaların parametrik değerleri incelemeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada yüzeyde aşınma dağılımında yüzey pürüzlük ölçer cihazı ile ölçülecektir. İstenen dönme sayısına kadar çalışma altına alınmış dişlilerin diş yüzeyinde oluşan ortalama pürüzlük değeri (Ra) istatistik bilgiler ile ifade edilmiştir [4]. Aşınma miktarı dişli çarkların çalıştırılmadan önceki ve çalıştırdıktan sonraki ağırlık farkı listesi tablo halinde gösterilecektir. Düz dişli çarkın operasyon sürecinden sonraki durumu aşınma dağılımı, aşınma miktarı açısından ya da dişli çarkların yüzeylerinde oluşacak hasarlar açısından birim zamanda devir sayısına (dev/dak) ve dönme tekrarına doğru orantılı olacağı beklenmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan düz dişli çarklar üç farklı kaplama yapılmış malzemelerden yüzey işleme işleminden geçmiş olacaktır. Bu kaplama yöntemleri, WS₂, WC/C ve MoS₂ olarak literatüre dayanarak karar verilmiştir [4,7,65]. Deneysel çalışmanın hedefi kaplama yöntemleri ile titreşim, aşınma, gürültü, zaman kaybı, enerji kaybı ve diğer etkili olabilecek olumsuz etkileri azaltmak ve kaplama yöntemlerinin avantajlarını dikkate alarak en uygun karşılaştırmalarını yapmaktır. Bu çalışma literatüre ve imalat endüstrisine yararlı katkılar da bulunacaktır.

1.2. Literatür

Gök, M. S. (2017). Yaptığı çalışmada; aşınma davranışlarını inceleyerek aşınmanın ekonomiye verilen etkilerini açıklamaktadır. Aşınma sebeplerinden açığa çıkan malzeme kayıpları, ülkelerin yıllık brüt milli hasılatının %6-7 sinin oluşturduğu saptanmıştır [65]. Dolayısı ile dişli çarkların aşınma ile ilgili ve diğer makine parçalarının aşınmaları ile ilgili çalışmalar ekonomik ve çalışmada zaman kayıpları açısından da önemlidir. Deneysel çalışmada belirlenen kriterler optimize edilerek elde edilen sonuçlar karşılaştırmıştır. Ekonomik olarak ele alındığında bu çalışma önem arz etmektedir. Dişli çark yüzey iyileştirme metotlarından taşlama, sıcak dalma ve kaplama

gibi yüzey iyileştirme işleminden geçerek sağlanır [24]. Böylece dişlinin diş yüzeyini hasar görmeye karşı mukavemetini artırır.

Shaib, A.G., (2020), yaptığı çalışmada; dişli çarkların tarihçesi, çeşitleri ve biçimlerinden bahsederken dişli çarkların kullanım alanı ile ilgili dişli çarkların sadece sanayide kullanılan makine elemanları olarak sınırlı kalmayıp oyuncak teknolojilerinde de geniş kullanım alanına sahip olduğunu ifade etmiştir. Çocukların teknolojik oyuncaklarında kullanılan dişli çark mekanizmaları sadece hareket iletimi amacıyla kullanıldığını ve bu alanda dişli çarkların ömrü ve aşınma olayı pek göz önünde bulunulmadığını belirtmiştir. Günümüzde dişli çarkın kullanılması hakkında bilinen en iyi örnek ise dişli çarkların otomobillerin vites kutusunda ve sanayide kullanılan tüm mekanik makinelerde kullanılmalarıdır [53].

Akpolat, A., (2018), çalışmasında dişli çarkların dişlerini açan kesici takımın diş ucu yarıçapı diş dibi eğilme gerilmesinin etkileri üzerinde çalışmada bulunmuştur. Kesici takım diş ucu yarıçapı büyüdükçe dişlilerin diş dibinde aşınmalar, güç kaybı meydana geldiğini ve kesici takımın diş ucun yarıçapı küçüldükçe dişlilerin diş dibi kalınlığı kıaldığından eğilme gerilmesi altında zorlandığını açıklamıştır [25].

Tunalioglu, M, Ş., ve ark., (2012), aşınmanın hasarlarının azaltılması için yaptıkları çalışmada iç dişli çarklarda oluşan aşınmayı incelenmişlerdir. Çalışma prensiplerinde FZG kapalı devre güç dolaşım sistemine benzer deney düzeneğini kurarak iç dişli çarklarda oluşan yorulmayı ve aşınmayı incelemişlerdir. Teorik hesaplama yöntemi olarak sonlu elemanlar metodu kullanarak, sonuçları fotoelektrik deneylerle karşılaştırmışlar. Deney planlarında ise iç dişli çarklarda aşınmayı 2000 dev/dak motor hızında ve üç farklı yükleme durumu (50 Nm, 100 Nm, 150 Nm) ile incelemişlerdir [6].

Flodin, A., (2000), aşınma ile ilgili yaptıkları doktora tezinde dişli çarkların operasyon sürecinde aşınma olayını incelemiş ve çalışmasında FZG deney seti kullanarak düz ve açısal dişlileri deney numunesi olarak kullanmıştır. Operasyon sürecinde dişlilerde oluşan aşınma miktarını ve yüzeylerde hafif aşınma dağılımını FZG deney seti ile öğrenmeye amaçlamıştır. Aşınma miktarını ve diş yüzeyinde aşınma dağılımını belirlemek için optik mikroskopu, SEM, EDS kullanmıştır. Çalışma sonucunda, dişli çarklarda ilk operasyonda aşınma oluşumun hızı çok yüksek olduğu görülmüştür. Bu

yıpranmışlık dişli çark sisteminde diğer hasarları meydana getirir. Aşınma, yüzeyde yüksek basınç oluşumu, yüzeylerde sıvılaşma oluşumu, yüzeylerde sertlik dengesizlik, dişlerde kırılmaların oluşumu gibi hasarlara yol açmaktadır [54].

Karataş, Ç., ve ark., (2001), yaptıkları çalışmada AISI 5115 çeliğinden imal edilen dişli çarkın diş dibinde kalıcı gerilmeleri incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmanın amacı, dişli çarklar üzerine uygulanan sementasyon işleme, nitrürleme, indüksiyonlama, talaş kaldırma, ısıtma işlemi ve alev işlemlerinin dişli çarkların diş yüzeyindeki mukavemetine etkisinin incelemişlerdir. Deney sonucunda; AISI 5115 çelik malzemesinden imal edilen ve sementasyon işlemine tabi tutulmuş dişli çarklar dâhili ve kalıcı gerilmelere maruz kalır. Bu kalıcı gerilme 5- 200 mikron derinliğe kadar parçaya nüfuz eder. Bazı imal usullerinde ise kalıcı gerilme nüfuzu 50-2000 mikron veya biraz daha fazlasıdır. Oluşan kalıcı yüzey gerilmesi sonucunda diş dibi yüzeyinde ortalama 470 MPa değerinde kalıcı basma gerilmeleri oluştuğu görmüşlerdir. Sementasyon işleminden kaynaklanan bu kalıcı basma gerilmesi yüzeyden yaklaşık 20 mikron derinliğe kadar basma gerilmesi olarak, yüzeyden 20 mikron derinlikten sonra çekme gerilmesi olarak devam edeceğini tespit etmişlerdir [7].

Literatür tarama sırasında dişli çarklar gibi yüksek basınç altında çalışan diğer makine parçalarının kaplamasına da araştırmıştır.

Can, M., (2016), çalışmasında, burç imalatında kullanılmak üzere 100Cr6 çeliğin 15 dev/dak hızında indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi uygulamıştır. Sertleştirme işlemi sonrasında merkeze doğru sertlik ve içyapı değişimi incelenmiş, sertleşmiş tabaka kalınlığını belirlenerek çalışma yapmıştır. İmal edilecek burcun dış ölçüleri sertleşen tabaka olmak koşuluyla indüksiyonla sertleştirilen yüzeylere BALL ON DISK tipi aşınma deneyi; kuru ortamda, oda sıcaklığında, 49,2 mm/sn kayma hızında, 2,5, 5 ve 10 N'luk kuvvetler altında yapmıştır. Çalışmanın veri toplama sonucunda sürtünme katsayıları elde edilmiş, aşınan yüzeylerdeki aşınma izleri optik ve elektron mikroskobu ile analizleri yapmıştır. Deneyler sonucunda, indüksiyon işlemi ile yüzeyde belirlenen martenzitik yapıya ulaşılmıştır ve çekirdek sertliğinden yaklaşık 2,5 kat daha fazla yüzey sertliği elde etmiştir. Aşınma deneylerinde en fazla ağırlık kaybı 5 N kuvvet uygulandığında meydana geldiğini sonucu elde etmiştir [26].

Alamdari Ilkhchi, A., (2019), yüksek lisans tez çalışmasında ASTM F75 Co-Cr-Mo alaşım çeliğinin abrasiv aşınma davranışlarını inceleme yapmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan bu malzemenin seçiminin nedeni, ASTM F75 Co-Cr-Mo, son yıllarda havacılık ve deniz sanayisi ve en önemlisi, biyo-malzeme olarak tıp ve dişçilik uygulamalarında kullanıldığıdır. Bu özelliklere ek olarak, Co-Cr-Mo alaşımı yük taşıma kabiliyetleri ile beraber sahip oldukları yüksek aşınma ve korozyon dirençleri sayesinde biyomedikal alanda oldukça tercih edilen bir malzemedir. Onun çalışmasında, döküm yöntemi ile ASTM F75 Co-Cr-Mo alaşımından hazırlanan deney numuneler disk üzeri pim aşınma cihazında farklı zımparalarla abrasiv aşınma testlerine tabii tutulmuştur. Kullandığı abrasiv kâğıtları 400, 600 ve 800 meşlerde seçilmiş olup 5, 10 ve 20 N yükler altında abrasiv aşınma deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneyler 22 sıcaklıkta ve 0,8 m/s gerçekleştirilmiş. Bulunan elementlerin ve kimyasal bileşiklerin araştırılması için EDS elementel analizi, yüzeylerin kaliteleri ve pürüzlüklerinin incelenmesi için yüzey pürüzlülükleri özel cihazla ölçülmüşlerdir. Elde edilen sonuçlar, daha küçük aşındırıcı boyutlarda yapılan abrasiv aşınma testlerinde daha az ağırlık kaybı olduğunu göstermiştir. Aşınma yüzeyleri analiz edildiğinde daha kaliteli yüzeyler, daha yüksek meshlerde yapılan abrasiv aşınma deneylerinde bulmuştur [67].

Alkan.S., (2019), deneysel çalışmada Nitür esaslı seramik ince film kaplamaların deniz suyu ortamındaki tribokorozyon davranışlarını incelemiştir. Kaplamanın yüzey çalışmasına etkisinin, denizcilik endüstrisinde çeşitli makine parçalarının yapımında kullanılan, paslanmaz çeliklerle benzer mekanik özelliklere sahip, görece olarak ucuz AISI 4140 karbon çeliği kullanılmıştır. Çalışmanın verimliliğinin kontrol edilmesi amacıyla aynı şartlar altında AISI 316 paslanmaz çelik üzerinde de tribokorozyon deneyleri gerçekleştirilerek karşılaştırmalı değerlendirmeler yapmıştır. Kaplamaların yapısal özellikleri taramalı elektron mikroskopu (SEM), X ışınları kırınımı (XRD), enerji dağılımlı ölçümü (EDS) ve optik mikroskop kullanarak belirlemiştir [68].

Basımuk, U. L.ve ark. (2013), dişli çarklarda kaplama etkisini sünek malzemeler üzerinde uygulamışlardır. Çalışmada sünek malzemelerden diş yüzeyleri kaplamışlardır. Kaplanmış dişli çarkları operasyon altında almışlardır. Operasyondan sonra dişli çarkların diş yüzeylerinde meydana gelen aşınmayı incelemiştir. Deney seti olarak 5B725 modeli yalpalama tornayı kullanmışlardır [8].

Huaiju Liu., ve ark. (2016), düz dişli çarkın diş yüzeyinde işlediği kaplama malzemesinin elastisite modülü, dişli çarkın ana malzemesinin elastisite modülüne oranını ve kaplamanın kalınlığı arasında ilişkiyi incelemişlerdir. Çalışmalarında E_c/E_s (1,8) H_c (0, 160) μm aralığında çalışmalarını sınırlandırıp ve sonuçlar elde etmişlerdir. Bulgular; kaplama kalınlığı 10-190 μm yükselir ise E_c/E_s oranı da yükseldiği; kaplama kalınlığı 90 μm den yüksek olduğu durumlarda kaplama kalınlığı E_c/E_s oranına etkilemediğidir. Bunlar deney çalışmalarını $T1=1100$ Nm, $N1=1100$ dev. / dak ve dişlerin yüzeyindeki hissedilen sürtünme kat sayısının değerleri ile ilerlemişler. Son seneler değil eski zamandan biri dişli çarklar üzerinde kaplama uygulamaları ile ilgili çalışmalar başlamıştır [9].

Xu, S. ve ark., (2014), korozyona ve aşınmaya karşı metalin mukavemetini yükseltmek için WS_2 ve WS_2-Ni kaplama malzemeleri ile deney numunelerin yüzeylerini işlemişlerdir. Çalışmaların sonucunda WS_2 kaplama malzemesi 5% Ni elementi içeriyor ise kaplama malzeme karışımı aşınmaya ve korozyona karşı iyi mekanik özelliği gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Kaplama karışımı 10.3% den fazla Ni elementi içeriyor ise kaplama karışımı kırılkan olup daha düşük mukavemete sahip olacağının kanaatine varmışlardır [10].

Martins, R. C. Ve ark, (2006), yaptıkları çalışmada; FZG güç devre dolaşımli deney tezgâhı kullanmıştır. 1000 dev/dak hız ile dişli çarklar arasında 141.2, 275.1, 453.0 Nm tork, 2000 dev/dak ile 141.1, 275.1, 453.0 Nm tork ve 3000 dev/dak ile 141.2, 275.1, 453.0 Nm tork altında dişli çarkları test etmişler. Çalışmasının sonucunda dişli çarklar için uygun kaplama malzemeleri MoS_2 , WC/C olduğu, MoS_2/Ti kaplaması diğer tüm kaplama yöntemlere göre mekanik özelliği açısından daha sert olduğunun sonucuna varmışlardır [1].

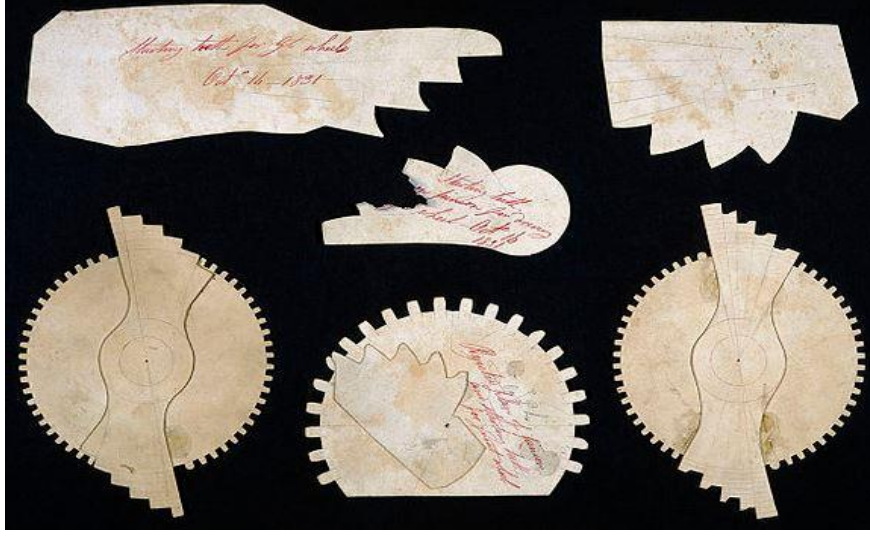
Yapılan çalışmalara bakıldığında dişli çarklarda operasyon sürecinde oluşan aşınmaları hakkında bilim adamları ve makine mühendisleri çok sayıda çalışmalar yapmışlardır. Konu ile ilgili bilimsel çalışmalar çok önemli olduğu için hala da çok sayıda çalışmalara devam etmektedirler. Dişli çarklar için uygun kaplama malzemeleri MoS_2 , MoS_2/Ti , MoS_2/Cr , B_4C/C , WC ve WC/C ve bunların karışımları listelenebilir. Mo (Molibdenim), W (Tungsten) ve B (Bor) malzemesinden karışım oluşturarak, oluşan karışımı dişli çark kaplama malzemesi olarak kullanılabilir.

Yapılan deneysel çalışmalar, kaplamaların düşük sürtünme katsayısı ile daha iyi yüzey sertliği oluşturduğunu dişlilerin aşınmaya karşı performansını artırdığını göstermiştir [14]. Hertzian stresi altında çalışan dişli çarkların aşınmaya karşı direncini artırmaya yönelik kaplama yöntemleri çoğunlukla PVD, DVD, CVD, termal püskürtme kaplama teknikleridir [17, 19, 20]. Kaplamaların dişli mekanizmaları gibi hareket ve moment aktarım ekipmanına uygulanması, verimliliklerini artırabilir ve enerji kaybını azaltabilir.

Literatür taramasının sonucu; Molibdenim ve Tungsten malzemelerin karışımın dişli çarklar üzerinde kullanışları hakkında yeterince çalışmalar yapılmadığı görülmüştür. Bu çalışmada W (Tungsten) ve Mo (Molibdenim) elementlerinden WS_2 , WC/C ve MoS_2 karışımı oluşturacaktır. Tungstenin hangi karışımı dişli çarklar için daha uygun olduğunu optimizasyon edilerek Molibdenin karışımı ile karşılaştıracaktır. Böylece, dişli çarkların kaplama yöntemleri alanındaki eksikleri giderilecek ve faydalı literatür kaynağı oluşturulacaktır. Bu çalışmada, dişli çark aşınması üzerine çalışmalarına paralel veya farklı bir FZG deney seti kurulacaktır. Deney seti Microweily Model Ty-360X100 Tornasına montaj edilerek test numuneleri deney altına alınacaktır.

1.3. Mühendislikte Dişli Çarkların Teknolojik Gelişmesi

Dişli çarkların, hareketi veya gücü dönen bir milden diğerine iletmek amacıyla kullanılan önemli makine elemanıdır. Dişli çark mekanizmaları endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır. Mekanik saat mekanizmasında kullanılan küçük boyutlu dişli çark mekanizması ile gemi sektöründe devasa boyutta kullanılan dişli çarklar kadar geniş kullanım alanı mevcuttur. Dişli çarklar, tarihi açıdan eski ve önemli bir makine elemanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Dişli çarklar binlerce yıllık tarihe sahiptir. Dişli çarklar, binlerce yıl önce Mezopotamyalılar tarafından sulama tesislerinde kullanıldığı ve Romalıların ise biraz daha geliştirerek su değirmenlerinde kullandığı görülmektedir [69]. Günümüzde dişli çarklar hareket ve güç aktarımı, tork ve suret değişimi ihtiyaç duyulan teknolojinin geniş alanında kullanılmaktadır. Şekil 1.1’de mühendislikte en eski dişli çarklar gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Mühendislikte En Eski Dişli Çarklar [69].

En eski dişli çark dört yüz yıl MÖ Çin’de geliştirilmiştir [54] ki Çin’in Henan ilindeki Luoyang müzesinde bulunmaktadır. Dişliler resmi olarak 400 MÖ Aristoteles’te momentum yönü değiştiren bir mekanik mekanizmanın elementi olarak geçmiştir. En eski dişli çark mekanizması astronomi konumları hesaplanan Antikitera mekanizması Avrupa’da bulunmuştur ki 150-100 MÖ yıllara dayanır [70]. Dişli çarklar milattan yüz yıl önce eski mısır Heron of Alexandria çalışmalarında matematiksel ifadeleri ile görülmektedir [55]. Dişli çarklar (287-212) MÖ eski Yunan matematikçi Arşimet tarafından büyük ölçüde geliştirilmiştir [11]. On sekiz ve on dokuz yüzyıllarında buharlaştırmacılar, rulmanlar, piston silindir mekanizmaları ve dişli çarklar mekanizmaları icat edilmiş ve o dönemin sanayisinde kullanılmıştır. Yüzyıllardır dişli çark profilleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Kırılma ve aşınmaya dayanıklı diş profili tasarlanmıştır ancak makine mühendisleri diş görüntüsü tasarımında gerekli düzeyde teorik bilgileri sahip değillerdi. Asırlar boyu diş profiller üzerinde süren uzun çalışmalar sonucu bu problemin çözümü diş profillerinde episikloit, evolvent ve daire açınımı profillerinin kullanılmasıyla çözüldü. Dişlerin profili üzerinde hala çalışma devam etmesinin yanı sıra profillerde mevcut olan geometrik özelliklerin üzerinde de çalışmalar mevcuttur. Günümüzde bilgisayar sayısal kontrolü (CNC) makineleri ile düşük toleransta, yüksek hassasiyette, gelişmiş teorik yazılım vasıtası ile seri ve tek çeşit sipariş şeklinde Dişli çarklar üretilmektedir [63].

Shaib, A. G., (2020), [53], dişli çark kitabında dişli çarkların çeşitleri ve biçimlerinden bahsederken; dişli çarkların kullanım alanı ile ilgili olarak; Dişli çarklar sadece sanayide kullanılan makine elemanları olarak kalmıyor. Hareket ve güç iletim ihtiyacı duyulan tüm mekanik mekanizmalarında teknolojik parçalarında kullanılıyor.

1.4. Dişli Mekanizmaların Teknolojide ve Hayatımızda Önemi

Teknolojik gelişmeler dikkate alındığında; dişli çarklar olmadan elektrik üretilemez, enerji transferi gerçekleşemez, transport hizmetleri durur ve bu sisteme bağlı çalışmalar üretilemez hale gelecektir. Hareket ve güç iletim isteklerine ulaşmak için dişli çark mekanizmalarına benzer dişli-kasnak ve kayış-kasnak mekanizmaları da kullanılır. Kayış-kasnak ile hareket ve güç iletim mekanizmalarında çevrim oranının değişkenliği çok önemli değildir. Teknolojik mekanizmalarda çevrim oranının önemli olduğu, yağlama işlemi gerektirmemesi, sessiz çalışması, verimli olması ve dişli çark mekanizmasına göre düşük güç ile çalışması iletimin önemli olduğu yerlerde dişli-kasnak mekanizması kullanılır [39]. Çevrim oranı, yüksek tork ve verimin çok hassas olduğu teknolojik tasarımlarında dişli çark mekanizmaları kullanılmaktadır.

İki çeşit hareket ve kuvvet iletimi bulunur; şekil bağı ve kuvvet bağı(sürtünme). Zincir mekanizması, dişli çarklar mekanizması, dişli kasnaklar mekanizması şekil bağı olarak ve kayış kasnak mekanizması, sürtünmeli çarklar mekanizması kuvvet bağı olarak açıklanır [20].

1.5. Dişli Mekanizmaların Hareket İletim Mekanizmaları

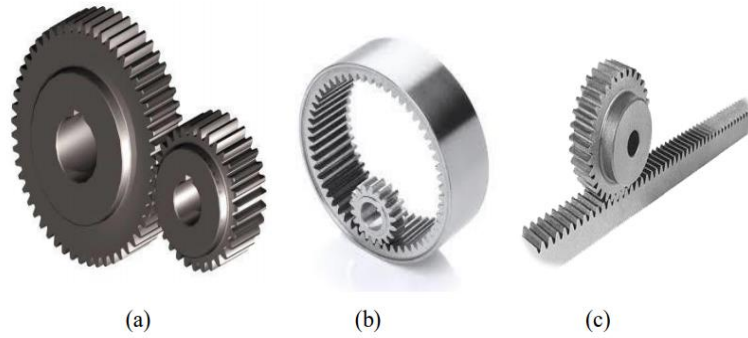
Hareket nakli, şekil bağı ve kuvvet bağı (sürtünme) ile gerçekleşmektedir. En önemli güç ve hareket iletim mekanizmaları; dişli çark, kayış-kasnak, zincir ve sürtünmeli çark mekanizmalarıdır. Dişli çark mekanizması güç ve hareket iletimde diğer güç ve hareket iletim mekanizmalara göre makinelerde somun, cıvata, rondela gibi makine elemanları olarak kullanılmaktadır.

Shaib A. G., (2020), [53], yaptığı çalışmada Sanayide kullanılan makinelerde de hareket ve güç yüksek hassasiyetli iletim amacıyla makine elemanı olarak montaj edilmiştir. Şekil değiştirmeden ve bağıl kaymaya izin vermeden hareketi iletebilme özelliğine sahip olduğundan kontrol ölçüm cihazlarda da kullanılmaktadır. Her otomobil vites kutusunda dişli çarklar kullanılmıştır. Ulaşım alanında kullanılan otobüs, metro, tren,

tramvay, yük taşımacılıkta ve diğer tüm araçlarda da dişli çark mekanizmaları kullanılmıştır. Gemicilik ve havacılık sektöründe dişli çark mekanizmaların kullanımı vazgeçilmezdir. Sonuç olarak hayatımızın her alanında dişli çark mekanizması kullanılmaktadır.

1.6. Düz Dişli Çarklar

Düz dişli çarklar diskin veya silindirin radyal doğrultusunda çıkıntılar oluşturarak üretilir. Düz dişli çarkların dişlerin kenarları düz olup dönme eksenine paraleldir. Düz dişli çarklar hareket ve güç iletim, dönen milin devir sayısını küçültüp büyütmek ve momenti değiştirmek amacıyla makine elementi olarak makinelerde kullanılmaktadır. Düz dişli çarklar dönme hareketi bir milden diğer mile üzerindeki dişlerin birbirini kavrayarak dönmesi ile iletilir [35]. Şekil 1.2’ de Düz Dişli Türleri (a) Dış Alın Düz Dişli (b) İç Düz Dişli (c) Kremayer ve Pinyon Düz Dişlileri gösterilmiştir.



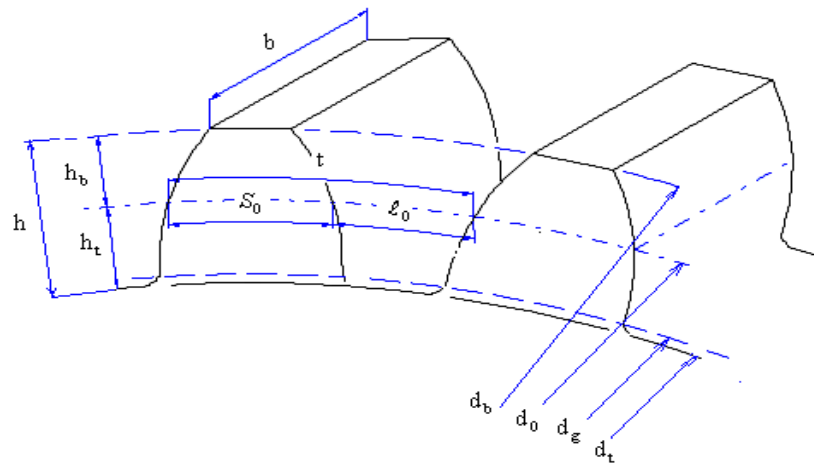
Şekil 1.2. Düz Dişli Türleri (a) Dış Alın Düz Dişli (b) İç Düz Dişli (c) Kremayer ve Pinyon Düz Dişlileri.

1.6.1 Düz Dişli Çarkların Temel Kavramları ve Boyutlandırılması

- **Adım (t):** Bölüm dairesi üzerinde bir diş kalınlığı ile bir diş arası boşluğu kapsayan uzunluğa diş adımı denir. Adım t veya p ile makine elemanlar kitaplarında gösterilir.
- **Modül (m):** Dişlinin bölüm dairesi çapının diş sayısına bölünmesi ile ortaya çıkan değerdir. Modül metrik sisteminde m ile gösterilir. $m = \frac{d_0}{z}$ Şeklinde ifade edilir. Burada d_0 dişlinin bölüm dairesi çapı ve z dişlinin diş sayısıdır.

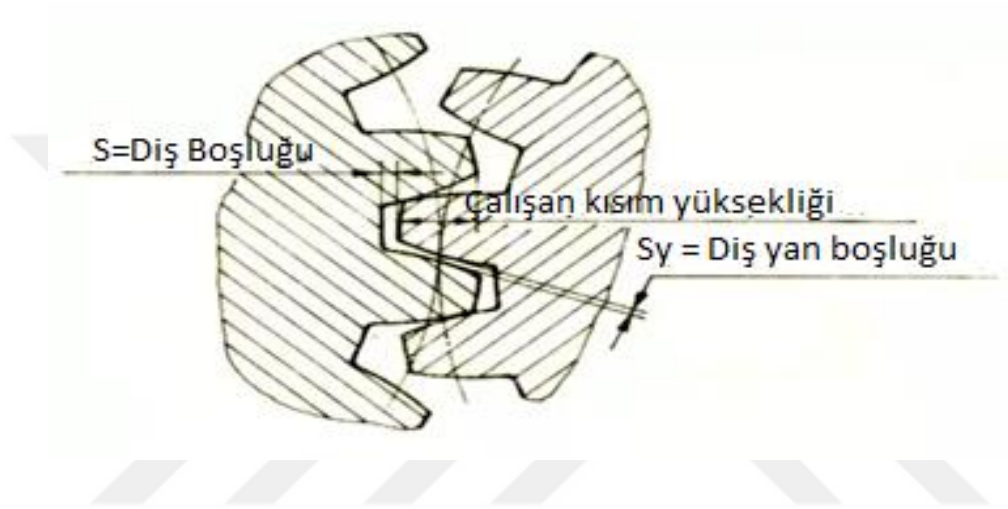
Modülün başka bir ifade ile $z \times t = \pi \times d_0$, dişlinin diş sayısı çarpı adım bölüm dairesinin çevresine eşittir. $m = \frac{d_0}{z} = \frac{d_0}{\frac{\pi \times d_0}{t}} = \frac{t}{\pi}$ Şeklinde ifade edilir.

- **Bölüm Dairesi (d_0):** Bölüm dairesi dişli çark büyüklüğünü belirleyen ve üzerinde dişlerin taksimatı yapılan dairedir (Şekil 1.3).
- **Diş Başı Dairesi Çarpı (d_b):** Dişlerin üst kısmından geçen dairenin çapıdır d_b ile gösterilir. Düz dişli çarklarda bölüm dairesinin çapı ile modülün iki katının toplamından elde edilir ($d_b=d_0+2m$).
- **Taban (Gövde) Dairesi Çapı (d_g):** Dişlerin alt kısmından geçen dairenin çapıdır d_g ile gösterilir.
- **Diş Baş Yüksekliği (h_b):** Dişlinin bölüm dairesi ile dişlinin diş üstü arasında uzaklıktır h_b ile gösterilir. Düz dişlilerde bu yükseklik genellikle modüle eşittir ($h_b=m$).
- **Diş Taban Yüksekliği (h_t):** Dişlinin bölüm dairesi ile diş dibi arasında uzaklıktır h_t ile gösterilir. Düz dişlilerde bu yükseklik 1,166m kadardır. ($h_t=1,166xm$). Diş taban yüksekliği dişlinin cinsine ve çalışma şartlarına göre değişmektedir.
- **Diş Yüksekliği (h):** Düz dişli çarklarda diş başı yüksekliği dişlinin üst dairesi ile dişlinin temel dairesi arasında uzaklıktır h ile gösterilir. Diş başı yüksekliği düz dişli çarklarda 2m dır ($h=2xm$). Şekil 1.3'te düz dişli boyutları ve geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Düz Dişli Boyutları ve Geometrisi.

- **Diş Yan Boşluğu (s_y):** Eş çalışan dişler birbiri üzerinde operasyon sırasında yuvarlanarak dönerken döndürülen ve döndüren diş profilleri arasında kalan boşluktur S_y ile gösterilir.
- **Diş Boşluğu (s):** Eş çalışan dişli çiftinde birbiri üzerinde yuvarlanarak döneme hareketi yaparken birinin diş üstü diğerinin diş dibi arasında kalan boşluğa diş boşluğu denir. Diş boşluğu S ile gösterilir. Şekil 1.4'te düz dişlinin dişler arasında boşluklar gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Dişlinin Çalışan Dişin Yüksekliği ve Dişler Arasında Boşluklar [72].

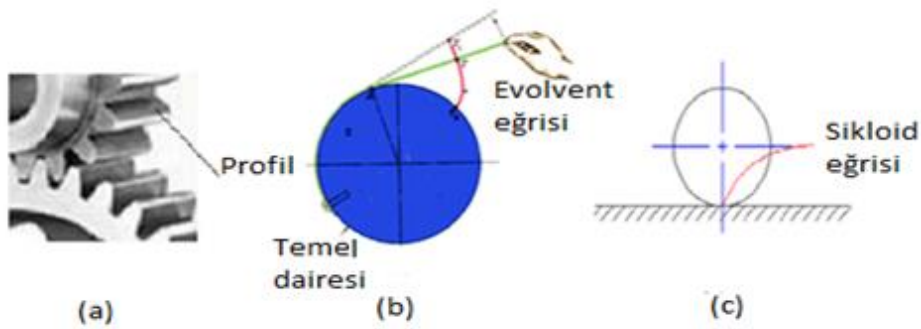
Makine mühendisliğinde düz dişlinin geometrisi Tablo 1.1 de listelenen tanımlamalar ile ifade edilir. Bu kavramların birbinine matematiksel bağlantıları vardır. Bu matematiksel ilişkiler ile dişli mekanizmasının tasarımında hem geometri tasarımı hem de mukavemet tasarımında kullanılır.

Tablo 1.1 Düz Dişli Çark Terminolojisi.

Düz Dişli Çark Terminolojisi İsim ve Sembolleri	
Diş Başı Yüksekliği	h_b
Diş Taban Yüksekliği	h_t
Diş Yüksekliği	$h=h_b+h_t$
Bölüm dairesi adımı (Adım)	$t=\pi m$
Diş Kalınlığı	S_0
Diş Boşluğu	l_0
Diş Genişliği	$b=w_m m, b=w_d d_0$
Bölüm Dairesi Çapı	$d_0=mz$
Diş Başı Dairesi Çapı	$d_b=d_0+2h_b$
Taban Dairesi Çapı	$d_t=d_0-2h_t$
Temel (gövde) Dairesi Çapı	d_g

1.6.2. Dişlerin Profil Eğrileri

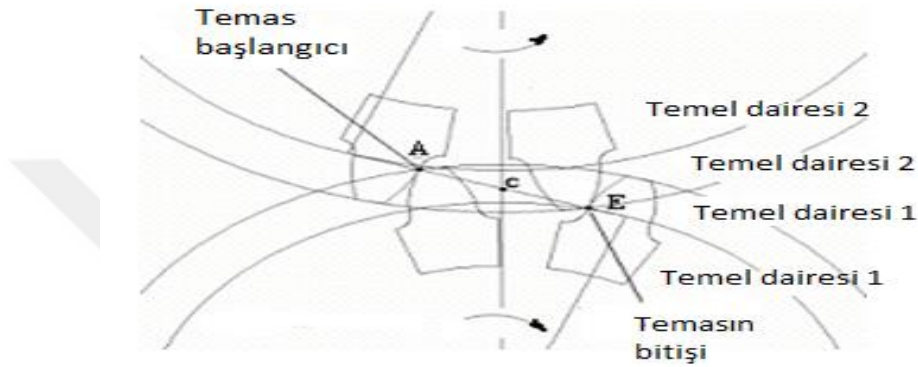
Dişlerin yan yüzey eğrisine profil denir. Dişli kullanım alanında en çok evolvent diş profili ve sikloid profili eğrisi kullanılır. Evolvent eğrisi bir doğrunun bir noktası sabit bir daire üzerinde kaymadan yuvarlanarak oluşturduğu eğridir [71]. Sikloid eğrisi; bir daire üzerindeki bir noktası bir doğru üzerinde kaymadan yuvarlanması halinde çizdiği eğriye sikloid eğrisi denir. Burada deney altında açınacak dişlinin diş profilleri evolvent profiline sahiptir. Şekil 1.5.'de (a) Düz Dişli Çarkın Profili (b) Düz Dişli Çarkın Evolvent Eğrisi (c) Düz Dişli Çarkın Sikloid Eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 1.5. (a) Düz Dişli Çarkın Profili (b) Düz Dişli Çarkın Evolvent Eğrisi (c) Düz Dişli Çarkın Sikloid Eğrisi [71].

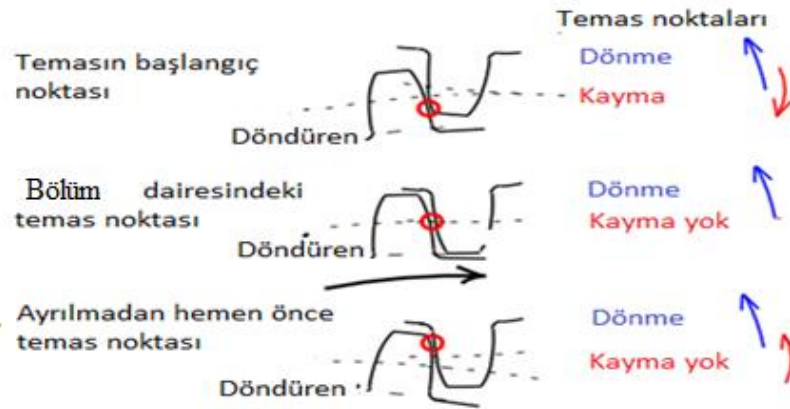
1.6.3 Kavrama Olayı

Dişli çarklarda diş profilin kavraması, hareket iletim sırasında döndüren dişlinin diş tabanın döndürülen dişlinin dişin baş noktası ile temasa geçmesi ile kavrama olayı başlar döndüren dişlinin dişin en baş noktası ile döndürülen dişlinin diş taban noktasından ayrılması ile biter [37]. Şekil 1.6’ da eş çalışan evolvent profilli dişlilerin kavrama eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Eş Çalışan Evolvent Profilli Dişlilerin Kavrama Eğrisi.

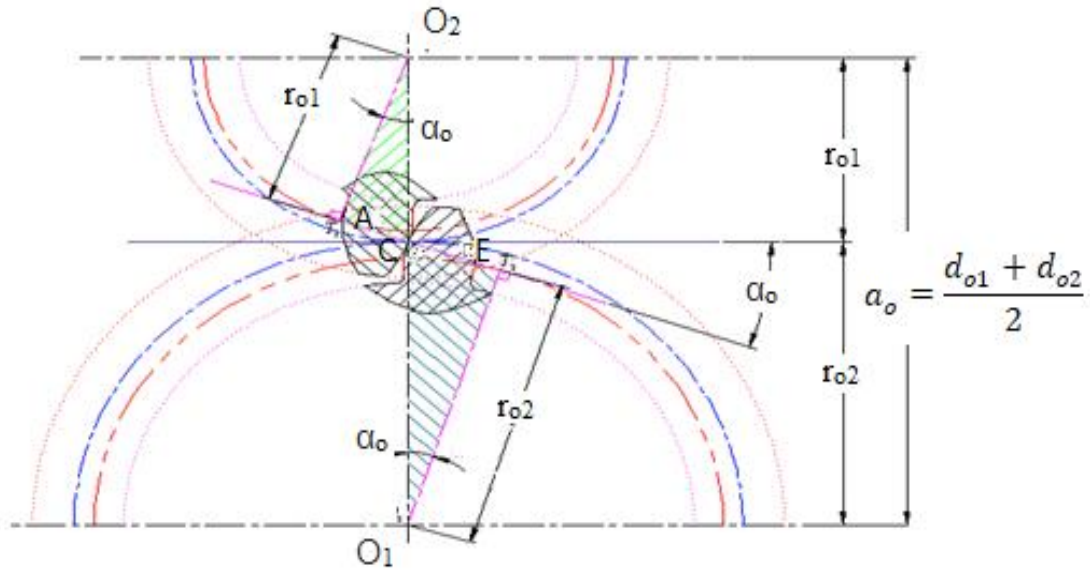
Eş çalışan düz dişli çarkların profillerin çalışma sırasında temas noktaları kavrama eğrisini verir. Bu kavrama eğrisi evolvent profiline sahip dişli çarklarda bir doğrudur ve buna kavrama doğrusu adı verilir. Bu doğru dişlilerin temel dairelerine teğet ve diş profillerin temas noktalarına diktir. Şekil 1.7 ‘de dişlide yuvarlanma ve temas noktaları gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Düz Dişli Çark Yuvarlanma ve Temas Noktaları [12].

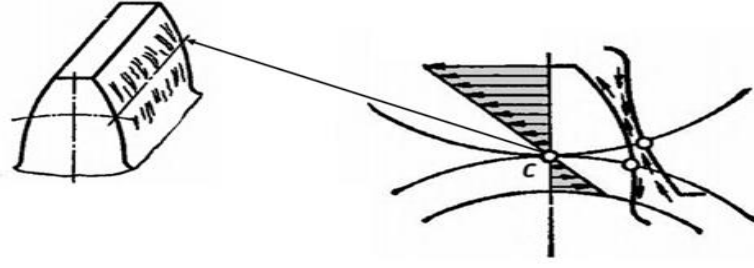
1.6.3.1. Kavrama Açısı

Kavrama açısı, yuvarlama dairelerinin ortak teğeti ile kavrama doğrusu arasında oluşan açıdır. O_1 , O_2 dairelerin temas noktası ile kavrama doğrusu birbirini kestiği noktada rölatif hareket açıdan ölü nokta olarak adlandırılır ve C ile gösterilir. C noktası aynı anda bölüm dairesinin üzerinde bir noktadır. Dişli bir ile dişli iki çalıştırıldığında diş profillerinde temas noktası, temas başlangıç noktasında bölüm dairesi noktasına kadar (C noktasına kadar) diş yüzey profilinde hem dönme hareketi var hem eş çalışan dişlerin birbirine göre kayma hareketi vardır. C noktası bölüm dairesi üzerinde bulunduğundan bu noktada kayma hareketi oluşmaz. Böylece düz dişli profili C noktasında sadece basınç gerilmesi oluşur. Düz dişli çarklarda kavrama açısı α_o ile gösterilir. Şekil 1.8’de kavrama doğrusu ve kavrama açısı gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Kavrama Doğrusu ve Kavrama Açısı [38].

Diş profilleri hareket iletim sırasında birbiri üzerinde kayma hareketi ve dönme hareketi gerçekleştirir. Profillerin birbiri üzerinde kayması sonucu dişlerde adhezyon aşınması meydana gelir. Ancak diş profilleri C noktasında sadece dönme hareketi mevcut ve kayma hareketi yok iken adhezyon aşınması oluşmaz. Kayma hızı kavramanın başlangıcındaki ve sonundaki noktalarda büyük olduğunda adhezyon aşınmanın değeri de bu noktalarda büyüktür. Şekil 1.9’da düz dişli diş yüzeyinde aşınmanın durumu gösterilmiştir.



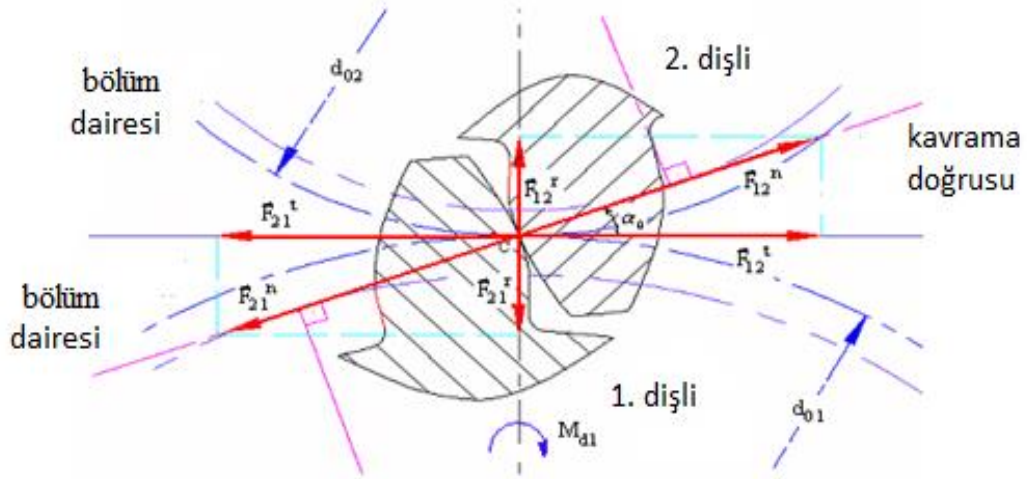
Şekil 1.9. Düz Dişlerde Diş Yüzeyinde Oluşan Aşınmanın Durumu [57].

1.4. DÜZ DİŞLİ ÇARKLARDA MUKAVEMET HESABI

1.4.1. Diş Kuvveti

Düz dişli çarklar moment iletmeleri sırasında döndüren dişli tarafından döndürülen dişliye kavrama doğrusu boyunca normal kuvvet f_n etki eder. Eş çalışan dişlileri operasyon altında normal kuvvetin dışında dişli çark mekanizmasında oluşan titreşimden kaynaklanan dinamik kuvvetleri, dişli çarkın ve mekanizmanın imalatında tasarımdaki ve üretimdeki kalitesizlikten ortaya çıkan ek kuvvetleri altında zorlanır [58]. Dişli çarkın mukavemet hesabı yapılırken kuvvetlerin kesin bir değer olarak hesaplaması zor olduğundan deneylerde elde edilen katsayılar ile bu kuvvetlerin etkileri düz dişli çark mukavemet hesabına dahil edilir. Dişlilerin operasyon sürecinde döndüren dişliden döndürülen dişliye moment iletirken kuvvet eş çalışan dişlerin kavrama doğrusu boyunca etki eder. Bu kuvvet diş kuvveti veya normal kuvveti olarak da adlandırılır [55].

Birlikte çalışan çift dişlerin C yuvarlanma noktası bölüm dairesi üzerinde bulunduğu takdirde diş kuvvetinin teğetsel bileşeni, $F_t = F_n \cdot \cos(\alpha_0)$ ve radyal bileşeni, $F_r = F_n \cdot \sin(\alpha_0)$ olur. Burada α_0 kavrama açısı değeri teorik olarak minimum diş sayısı olarak bulunur. Teğetsel kuvvet ile iletilen moment $M_{ab} = \frac{F_t \cdot d_0}{2}$ olarak ifade edilir. Şekil 1.10'da düz dişlilerde etkiyen kuvvetler gösterilmiştir.



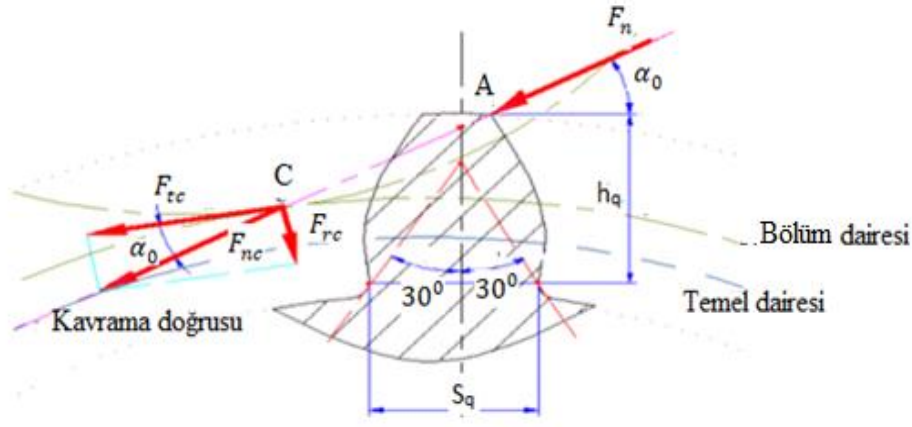
Şekil 1.10. Düz Dişlere Etkiyen Kuvvetler [38].

1.4.2. Diş Dibi Gerilmeleri

Eş çalışan dişlilerde eğilmeden en büyük gerilme diş tabanında meydana gelir. Çalışmada çekme olduğu diş tabanındaki kırılmalar o bölgede bir çatlak ile başlar zamanla bu çatlak büyür, tasarımdaki eğilme gerilmeyi taşıyamayacak haline gelir ve birdenbire kopma meydana gelir. Burada deney çalışmasında ele alınan düz dişli çarklar deney tasarımdaki diş dibi emniyet gerilmesinin altında çalıştırılarak oluşan gerilmeler incelenmiştir.

1.4.3. DIN Standardına Göre Diş Dibi Gerilme Hesabı

Din standardına göre kavrama, kuvvetin etki noktası eş çalışan dişlilerin kavramanın başlangıcı A noktasıdır. Bu yöntemle göre diş dibi kırılma kesiti kalınlığı S_q , diş simetri eksenini ile 30° lik açı yapan iki doğru çizilmesi ile belirlenir. Eğilme gerilmesine sebep olan normal kuvvetin diş tabanından mesafe h_q ise kavrama doğrusunun diş simetri eksenini kesti nokta ile diş tabanı kırılma kesiti arasındaki uzaklıktır. Şekil 1.11’de DIN standardına göre diş dibinde oluşan gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 1.11. DIN Standartına Göre Diş Dibi Gerilme Hesabı [38].

Dişlinin diş dibi gerilmesi hesaplamasında diş dibinde oluşan kesme gerilmesi çok küçük olduğundan çoğu hesaplarda yalnız eğilme gerilmesi ve basma gerilmesi göz önüne alınır.

$$\text{Eğilme gerilmesi } \sigma_e = \frac{F_{tc} \cdot h_q}{\frac{1}{6} b \cdot s_q^2} \quad (1.1)$$

$$\text{Basma gerilmesi } \sigma_b = \frac{F_{rc}}{b \cdot s_q} \quad (1.2)$$

Kırılma olayı çekme gerilmesinin bulunduğu G noktasında başladığına dikkat edilirse bu noktaya karşılık gelen toplam gerilme formülü 1.3. İle ifade edilir. G noktasına diş tabanında gelen gerilmeler şekil 1.12’te gösterilmektedir.

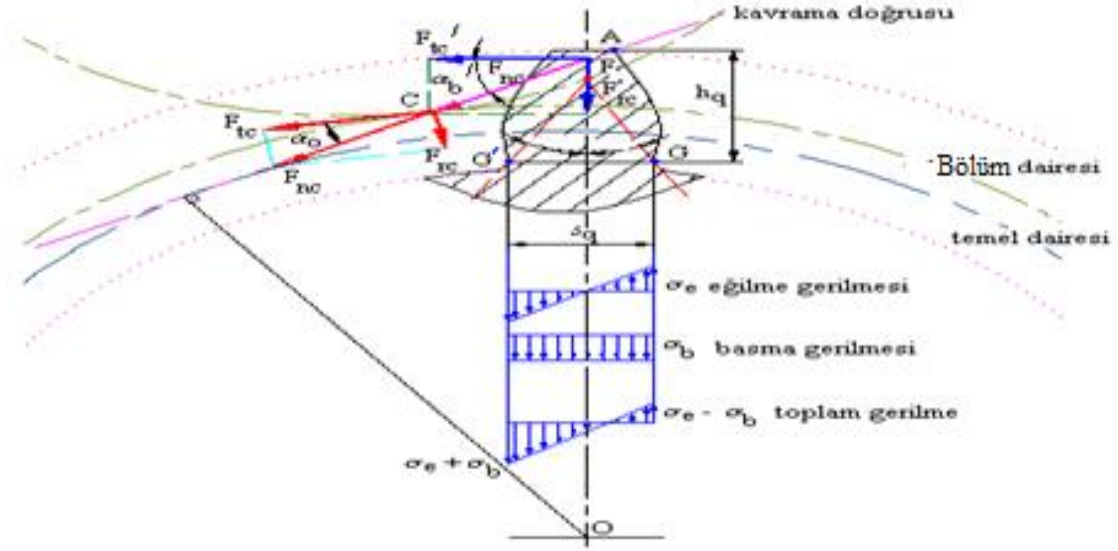
$$\sigma_{\text{top}} = \sigma_e - \sigma_b = \frac{6 F_{nc} \cos \alpha'_b \cdot h_q}{b \cdot s_q^2} - \frac{F_{nc} \sin \alpha'_b}{b \cdot s_q} \quad (1.3)$$

$$\text{Veya } F_{nc} = \frac{F_{tc}}{\cos \alpha_0} \text{ değeri kullanılırsa;}$$

$$\sigma_{\text{top}} = \frac{F_{tc}}{b} \frac{\cos \alpha'_b}{s_q \cdot \cos \alpha_0} \left[\frac{6 \cdot h_q}{s_q} - \text{tg} \alpha'_b \right] \quad (1.4)$$

Düz dişlinin merkezine doğru etkiyen kuvvetten dolayı diş dibinde basınç gerilmesi oluşur. Düz dişlinin dönmesi için bölüm dairesine teğet geçen kuvvet diş dibinin bir

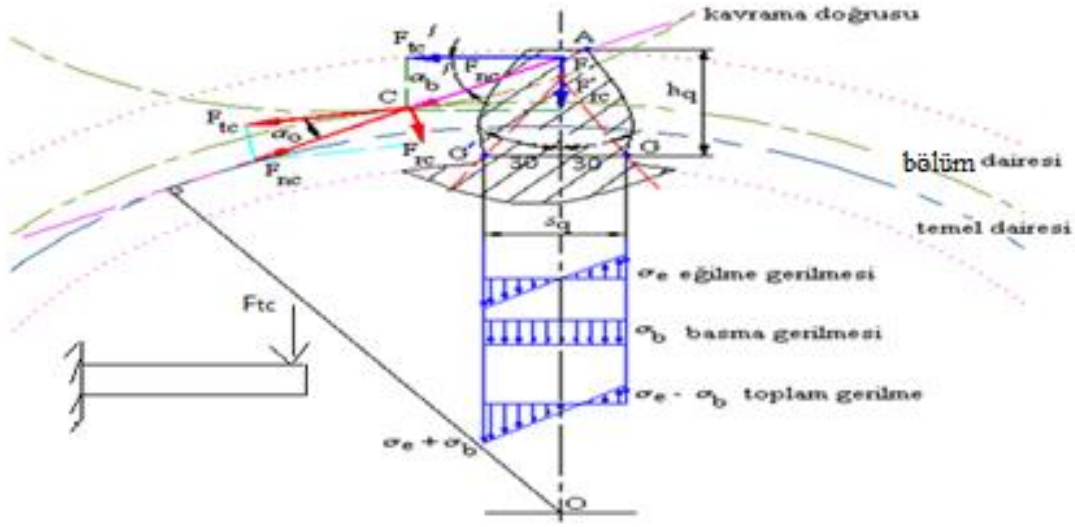
kenarında basınç gerilmesi ve diğer kenarında ise çekme gerilmesini sebep olur. Dişlinin dişleri bu iki gerilmenin vektörel toplamının altında zorlanır. Şekil 1.12’de diş tabanında oluşan gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 1.12. G Noktasında (Diş Tabanında) Oluşan Gerilmeler [38].

1.4.4. Düz Dişli Numunenin Mukavemet Hesabı

Çalışmada numune olarak ele alınacak düz dişlilerin mukavemetinde DIN standart yöntemine uygun kullanılmıştır [61]. Bu yöntemde düz dişlinin her bir dişi ankastre bir kol gibi kabul edilmiştir. Hesaplama tek diş çalışmanın en zorlandığı durumu göz önünde bulundurulur. Bir diş yalnız olarak yüklenen kuvveti eş dişlinin dişine aktarması anlamına gelmektedir. Şekil 1.13’te eş çalışan düz dişlinin dişlerinde oluşan gerilme gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Eş Çalışan Düz Dişlinin Dişlerinde Oluşan Gerilmeler [38].

DIN standardına göre ye göre $h_q = 2 \cdot m$ ve $\alpha_0 = 20^\circ$

$$\tan(30) = \frac{s_q}{h_q}, \quad h_q = 2 \cdot m, \quad s_q = 4 \cdot m \cdot \tan(30), \quad s_q = 4 \cdot 4 \cdot \tan(30) = 9,24mm \quad (1.5)$$

$$\sigma_e = \frac{F_{tc} \cdot h_q}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot s_q^2}, \quad \sigma_b = \frac{F_{rc}}{b \cdot s_q} \quad (1.6)$$

$$\alpha_f + \alpha_0 = \alpha_b \quad (1.7)$$

$$\tan(\alpha_f) = \frac{m}{s_q}, \quad \alpha_f = \tan^{-1}\left(\frac{m}{s_q}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{4}{9,24}\right) = 23,4^\circ \quad (1.8)$$

$$\alpha_b = \alpha_f + \alpha_0 = 23,4 + 20 = 43,4^\circ$$

$$\sigma_{top, çek} = \sigma_e - \sigma_b = \frac{F_{tc} \cdot \cos \alpha_b}{b \cdot s_q \cdot \cos \alpha_0} \left(\frac{6 \cdot h_q}{s_q} - \tan \alpha_b \right) \quad (1.9)$$

$$\sigma_{top, çek} = \frac{F_{tc} \cdot \cos 43,4}{25mm \cdot 9,24mm \cdot \cos 20} \left(\frac{6 \cdot 8}{9,24} - \tan 43,4 \right) = 0,014 \cdot F_{tc}, \quad çekme \quad (1.10)$$

Kırılma aşınması çekme gerilmesinden kaynaklandığı için toplam basma gerilmesinin hesaplamasına gerek kalmamaktadır. Dişli çarklar en çok çekme gerilmesi altında zorlandığından çalıştırma sırasında yorulur ve kırılır [61].

Emniyet kat sayısı ve diğer faktörlerin toplamını yaklaşık 2 kabul edilir.

$$\sigma_{em} = \frac{\sigma_y}{2} = \frac{170}{2} = 85 \text{ MPa} \quad (1.11)$$

$$\sigma_{top,çek} \leq \sigma_{em} = 85 \text{ MPa} \quad (1.12)$$

$$\frac{0,014 \cdot F_{tc}}{mm^2} = 85 \frac{N}{mm^2} \gggggg F_{tc} = 6071 \text{ N} \quad (1.13)$$

$$F_{nc} = \frac{F_{tc}}{\cos \alpha_0} = \frac{6071}{\cos 20}, \quad (1.14)$$

$$F_{nc} = 6461 \text{ N} \gggggg \text{ Bu kuvvete göre deney setine yükleme yapılacaktır}$$

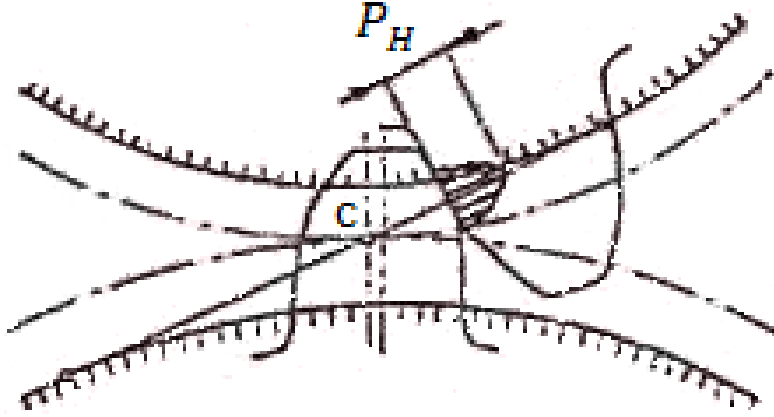
Yukarıdaki düz dişli mukavemet hesabına göre deney setinde kullanılan düz dişlilere maksimum 6460 N'luk kuvvet uygulanabilir. Bu maksimum yükleme durumuna göre deney setin kalan parçaları tasarlanmıştır ve seçilmesinde göz önünde alınmıştır.

1.5. Diş Profilleri Arasındaki Yüzey Basıncı

Eş çalışan düz dişli profillerin temas noktasında Şekil 1.14'te gösterildiği gibi Hertz tipi yüzey basıncı meydana gelmektedir [50]. Bu yüzey basıncı ifade edebilmek için Şekil 1.14'te gösterilen temasta bulunan yüze çizgisinin iki silindir gibi ele alınır. Bu silindirlerin temas yüzeyinde F_n normal diş kuvvetinin etkisi altında oluşan yüzey basıncı

$$P_H = \sqrt{\frac{F_n \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot b \cdot \rho}} \quad (1.15)$$

şeklinde yazılır [50]. Şekil 1.14'te dişli çarklarda Hertz yüzey basıncı gösterilmiştir.



Şekil 1.14. Dişli Çarklarda Hertz Yüzey Basıncı [50].

Burada E eşdeğer elastisite modülü;

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{2} \left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right] \quad (1.16)$$

(v) Dişlide kullanılan malzemenin poisson oranı çelik için 0,3 alınır ve (ρ) eşdeğer eğrilik yarıçapı 1.17 formülünden bulunur.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_1} \mp \frac{1}{\rho_2} \quad (1.17)$$

Düz dişlilerin diş profil eğrilik yarı çapı evolvent eğrisinden hesaplanır.

$$\rho = \frac{(1+\dot{y}^2)^{3/2}}{|\ddot{y}|} \quad (1.18)$$

1.18, ifadesinden diş profilin eğrilik yarıçapı hesaplanmıştır. Bu matematiksel ifadede $\dot{y}$ evolvent profil eğrinin birinci türevidir ve $|\ddot{y}|$ evolvent profilin ikinci türevin mutlak değeridir.

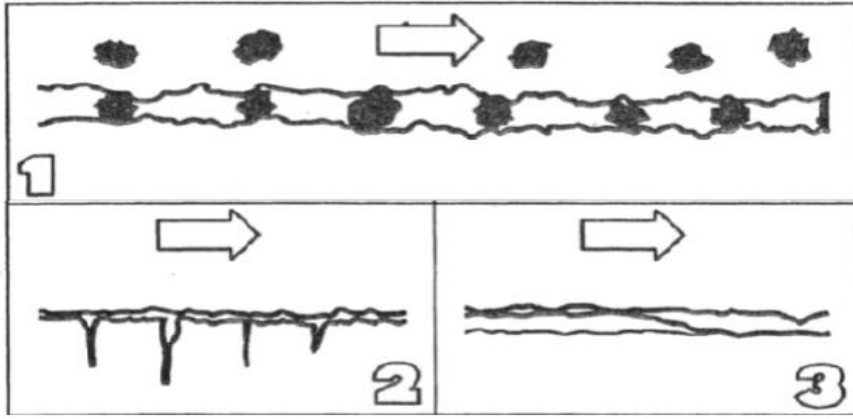
1.6. TRİBOLOJİK SİSTEM VE AŞINMA

1.6.1. Aşınmanın Tanımı ve Türleri

Aşınma, kullanılan malzemelerin başka malzemelerle temas halinde dış etkenlerden dolayı malzeme yüzeyinden küçük parçacıkların kopması ile malzeme yüzeyinde istenmeyen değişiklikler meydana gelmiştir. Bu istenmeyen olaya aşınma denir. DIN

50320'e göre aşınma; katı cisimlerin yüzey alanlarındaki tribolojik zorlanma sonucu sürekli artan malzeme kaybı şeklinde ifade edilir. Aşınma için aşındırıcı ve aşınılan arasında mekanik etkenlerden sürtünme var olması, yavaş, sürekli olması ve malzeme yüzeyinde değişiklik meydana gelmesi gerekmektedir. Aşınma ile ilgili çalışmalar bilim adamlarına büyük ışık tutmuştur. Eş çalışan düz dişli çarklar işlem esnasında çeşitli yük faktörlerinin nedeni olarak üç temel aşınma mekanizmasının performansına etki eder [27].

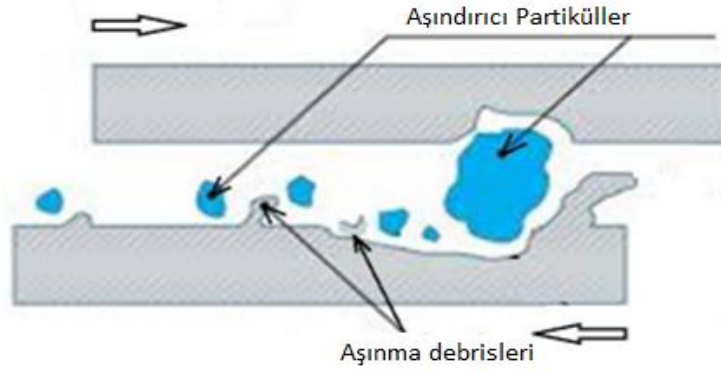
1. Abrasiv aşınması
2. Adhesiv (Scuffing) aşınması
3. Yorulma (Pitting) aşınması. Şekil 1.15'da temel aşınma tipleri (1) Abrasiv aşınması (2) Adhasiv aşınması (3) Yorulma aşınması göstermiştir.



Şekil 1.15. Temel Aşınma Tipleri (1) Abrasiv Aşınması (2) Adhasiv Aşınması (3) Yorulma Aşınması [27].

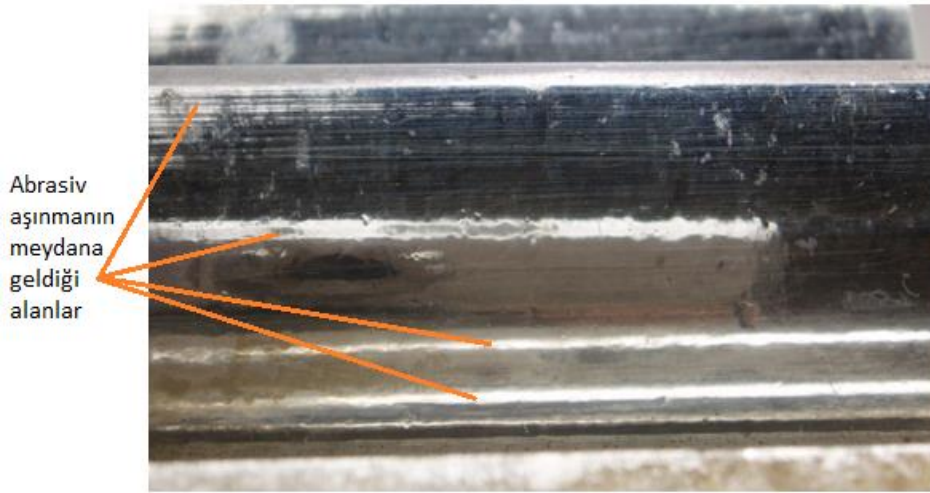
1.6.1.1. Abrasiv Aşınması

Sert malzemenin yüzey pürüzleri ile daha az sert malzemenin yüzey pürüzlerin teması ile yumuşak malzemenin yüzeyinde malzeme kaybı olarak bilinir. Bu temasta malzeme yüzeyleri birbirine göre bağıl harekete sahiptir. Temas sırasında sert olan yüzey yumuşak olan yüzeyde plastik deformasyona neden olur. Abrasiv aşınmanın oluşması için iki durum söz konusudur. Birincisi sürtünen yüzeylerden biri daha serttir ki buna iki cisimli abrazyon denir [27]. Bu tür abrazyon dişli çark mekanizmalarında görünse de daha çok talaşlı imalat işlemlerinde görülür. İkinci durumda ise sert malzeme iki yüzey arasında bulunur. Şekil 1.16'de abrasiv aşınması oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 1.16. Abresiv Aşınması Oluşumu.

Yüzeylerden birini veya her ikisini de aşındırabilir. Buna üç cisimli abrazyon aşınması denir. Dişli çark mekanizmasından ve parlatma işlemlerinde bu durumu açıkça görülmektedir. Bu nedenlerden dolayı dişlinin diş yüzeylerinde oluşacak abresiv aşınmaya karşı koruma sağlamak için yüzey kaplama yöntemleri ile temas yüzeylerinin sertleştirilmesi ve yağlayıcı madde kullanımı önerilmektedir [41]. Şekil 1.17’de diş yüzeylerde oluşan aşınmanın durumu gösterilmektedir.

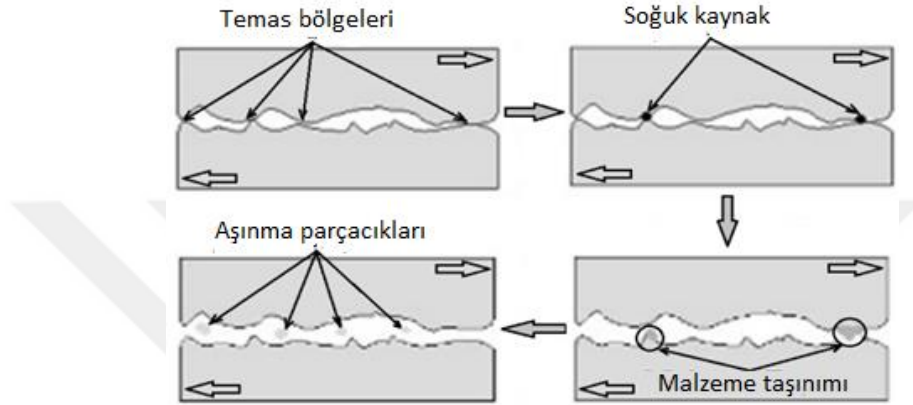


Şekil 1.17. Diş Yüzeylerindeki Abrasiv Aşınmanın Görünümü.

1.6.1.2. Adhesiv Aşınması

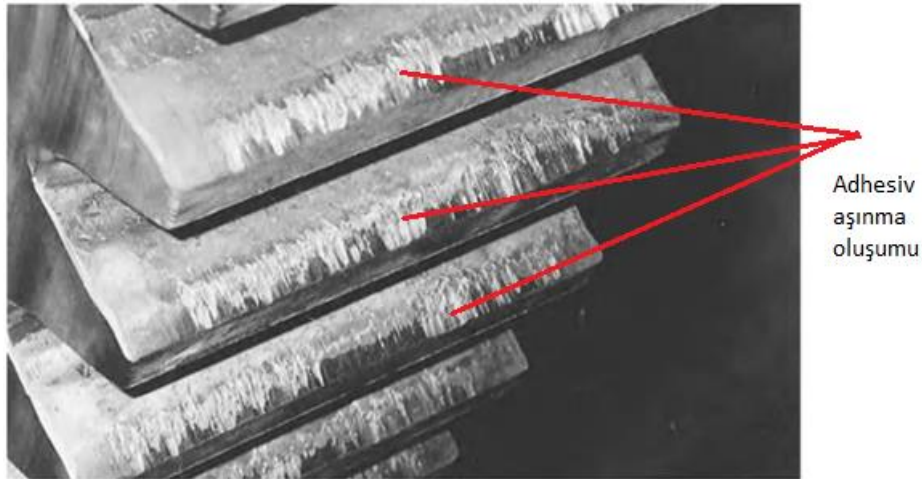
Birbirine göre rölatif olarak harekete sahip ve aynı anda temas halinde çalışan iki metal parçanın yüzeyleri yüksek noktalardan temas ederler. Bu durumda temas noktalarında çok yüksek basınç meydana gelir. Yüksek basınç nedeni ile metaller akma sınırından geçer ve temas bölgelerinde soğuk mikro kaynak oluşur. Temas yüzeylerinin rölatif

hareketinin sonucunda mikro kaynaklar kırılır. Yumuşak metal malzeme yüzeyinde küçük kütle zerrelere koparılır [47]. Bu şekilde meydana gelen aşınma adhesiv aşınma olarak isimlendirilir. Şekil 1.18’de Adhesiv aşınması oluşum durumları gösterilmiştir. Düz dişli çarklarda oluşan bu tip aşınmaya en fazla tesir eden faktörler temas eden diş yüzeyin sertliği, diş yüzey kaliteleri ve moment iletim sırasında diş yüzeyinde oluşan basınçtır [58].



Şekil 1.18. Adhesiv Aşınması Oluşumu Durumları.

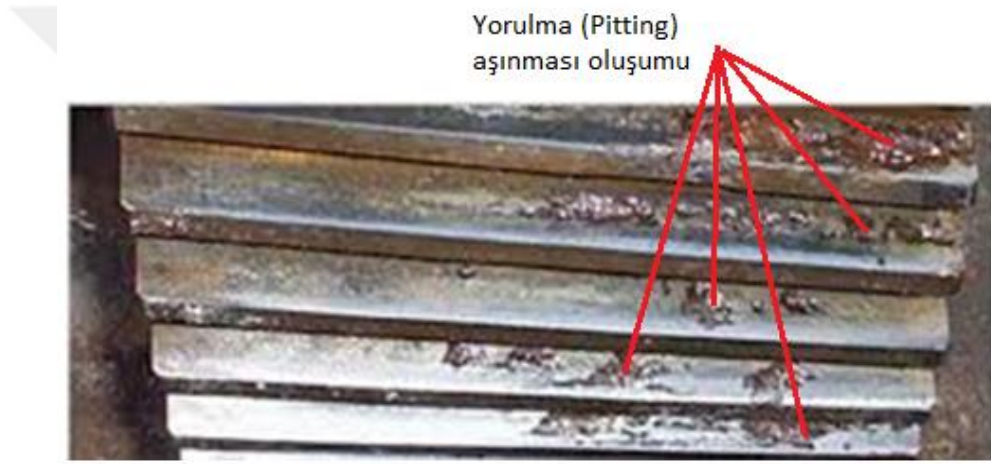
Adhesiv aşınma düz dişli çark mekanizmalarında çok açık bir şekilde kendini göstermektedir. Bu çalışmada AISI 316 paslanmaz çelik malzeme ile üretilen düz dişli çarklarda oluşan Adhasiv aşınma durumu Şekil 1.19’de görülmektedir.



Şekil 1.19. Düz Dişlide Dar Tolerans, Yüksek Hız ve Yüksek Basınç Nedeni ile Oluşan Adhesiv (Yenme) Aşınması.

1.6.1.3. Yorulma (Pitting) Aşınması

Yorulma (pitting) aşınması, çalışma sırasında metal parçaların yüzeyinde küçük kırıkların oluşması ile başlar ve büyük malzeme kütlesinin malzemeden kaybı ile sona erer. Yorulma aşınması dişli çarklar, rulmanlı yataklar ve kam mekanizmaları gibi birbiri ile sürekli temas halinde olan yüzeylerde en çok görülen aşınma türüdür [59]. Bu tip aşınma kayma gerilmesi maksimum olduğu yüzeylerde plastik deformasyon ile başlar zamanla bu deformasyon yüzeye ilerleyerek yüzeylerde çukurlar olarak meydana gelir [36]. Şekil 1.20’de düz dişli çarklarda yorulma (pitting) aşınması oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 1.20. Deneysel Çalışmada Düz Dişli Çarklarda Oluşan Yorulma (Pitting) Aşınması.

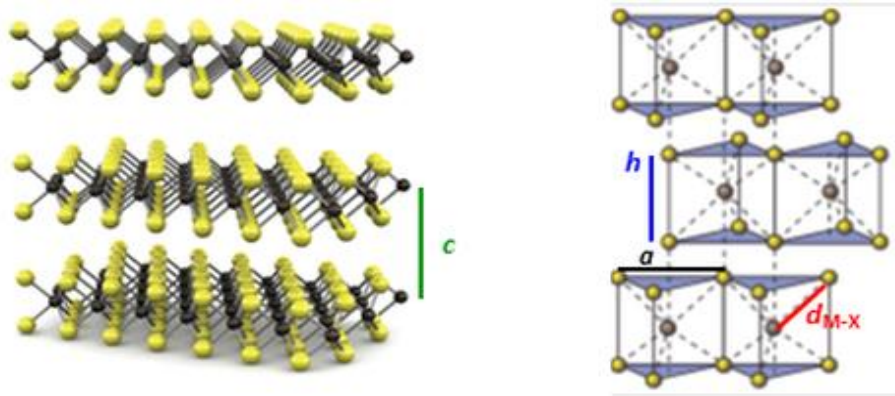
1.7. Kaplamalı Düz Dişlilerin İşlevselliği

Makine tasarımında gücü veya hareketi ileten dişli çark dişli olarak bilinir. Dişli endüstrisinde, bir makine parçasından başka bir makine parçasına hareket ve moment (tork) iletmek için yalnızca tek bir amaç için kullanılan birçok dişli şekli mevcuttur. Silindirik olan ve dönme eksenine paralel olarak kesilmiş düz dişlere sahip olan en basit dişli biçimine düz dişli denir. Düz dişliler, üretken fabrikalarda ve evlerimizde kullanılan bantlar, otomobiller, rüzgâr türbinleri, uçaklar ve diğer küçük veya büyük makineler gibi birçok makinede büyük ölçüde kullanılmaktadır [28]. Dinamik mekanizmalar daha fazla enerji tüketimi, gürültü yapımı, titreşim ve diğer güç kaybı

gibi olayları düz dişlinin performansına olumsuz etkilere sahiptir. Yağlama çizilme, sürtünme ve mikro kırıklar gibi aşınmayı azaltmak için dişlinin profil yüzeyinde yaygın olarak uygulanır. Ancak dişli mekanizmalarında yağlama uygulaması muazzam bir performansa sahip olmasına karşın tüm eş çalışan dişli çiftlere tasarım ve çalışma şartları yağlama imkânı vermediğinden yağlama uygun olmayabilir [29]. Mesela uzay makinesi ekipmanlarında, uçakta ve karbon yağlayıcının tercih etmediği diğer ilgili alanlarda kullanılan dişli mekanizmalarına yağ veya gres sürtünmeyi azaltıcı malzeme olarak kullanılmaz. Karbon bazlı yağlayıcıların yararlı olmadığı veya yeterli işleve sahip olmadığı uygulama alanlarında katı yağlayıcı kaplamaları onların yerine daha üstün işlev sunar [30]. Yağlayıcı madde veya temas yüzeylerde kaplama olmadan düz dişlinin çalıştırıldığı sistemin performansı düşer. Bu nedenle, dişli mekanizmasının çalıştırılması sırasında dişlilerin dişleri temasa geçme ve temastan ayrılma olayından kaynaklanan gürültü, titreşim, termal genleşme ve parçacık kayıpları meydana gelir. Bu istenmeyen fenomeni çözüm seçeneklerden kaplama yöntemi ile önlenabilir.

1.7.1. Tungsten Disulfür (WS_2) ve Molibden Disulfürün (MoS_2) kristal yapısı

Metal geçiş dikalkojenit (TMDC) için genel formül MX_2 'dir, burada M bir geçiş metal atomu ve X kalkojen atomunu temsil eder. Bu yapılar, X-M-X şeklinde çok katmanlı bir yapıya sahiptir. Kalkojen atomları, altıgen düzlemde bir metal atomları düzlemi ile ayrılır. Bu durum Şekil 1.21'de gösterilmektedir. Bitişik katmanlar, zayıf van der Waals etkileşimi yoluyla yığın kristalde farklı şekillerde bir arada bulunur. Metal geçiş dikalkojenitlerin genel simetrisi, hegzagonal veya rhombohedron koordinasyonuna sahip bir metal atomu ile, altı yüzlü veya eşkenar dörtgen şeklindedir [21].



Şekil 1.21. Geçiş-Metal Dikalkojenitlerinin 3-Boyutlu Şematik Gösterimi ve Yapımı.

1.7.2. Tungsten Karbon Karbür (WC/C) Tanıtımı ve Kullanım Alanları

Tungsten karbon karbür, WC/C kimyasal sembolüne sahiptir, ancak endüstride basitçe karbür olarak adlandırılabilir. Tungsten tek başına yoğun, açık gri bir metaldir ve korozyona karşı çok yüksek dirence sahiptir. Sertliği, güçlendirilmiş çelik veya zümrütlere benzer aynı zamanda biraz sünektir ve bir tel halinde ekstrüde edilebilir [42].



BÖLÜM 2. MATERYAL VE METOT

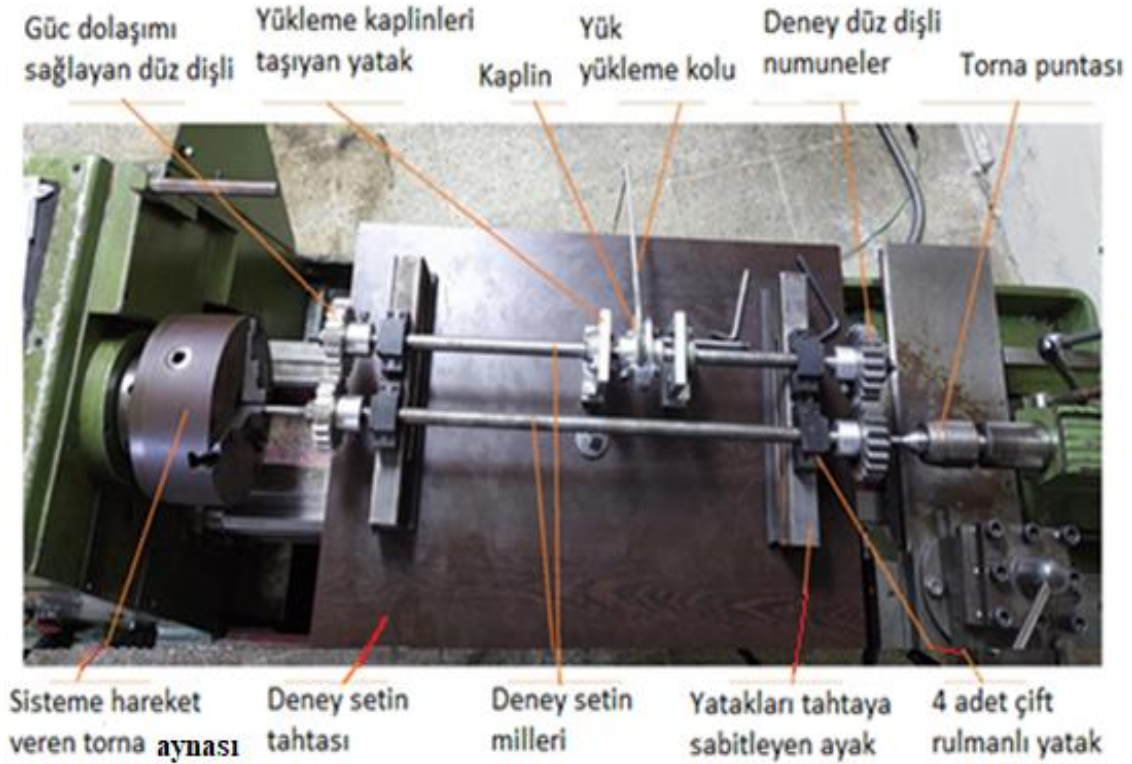
2.1. FZG Deney Seti Tasarımı Literatür Kısmı

FZG (Almanca: Forschungsstelle Für Zahnräder und Getriebebau, Türkçesi: Dişli ve dişli üretimi için araştırma merkezi) [23]. FZG güç dolaşımli deney setinde sisteme yükleme yapılır. Yükleme yapıldıktan sonra sistem kilitlenir böylece sisteme yüklenmiş olan tork sürekli sistem içinde kalıcı yük olarak kalır. Güç dolaşımli deney seti ana parçalarını oluşturan düz dişli çarklar, hareket milleri, flanşlar ve flanşları birbirine bağlayan mekanizeler kalıcı iç zorlanma içinde kalır. FZG deney seti çeşitleri bulunmaktadır kullanım amaçlarına göre tasarlanır, imal edilir ve kullanılırlar. FZG deney seti yağ özellikleri inceleme ve yağ kalitesini belirlemede de hidrolik sektöründe kullanılır. Literatüre bakıldığında birçok araştırmacı, dişli veya yağ üzerinde çalışmalarında FZG deney seti kullanmışlar. Mesela Krantz T. vd. AISI 9310 ince gres yağın özelliğini incelemek amacıyla çelikten yapılmış düz dişlileri FZG deney setine benzer NASA düz dişli yorulma test cihazı kullanmışlar [5]. Flodin A. tarafından 2000 yılında yayınlanan tez, FZG güç dolaşımli dişli test düzeneğinde test edilen düz dişlilerin aşınmasını ve dişlinin diş yüzeyinde aşınma dağılımını açıklamıştır [51]. Bu tez çalışmada deney düzeneği 150 Nm torku rahatlıkla taşıyabilecek şekilde tasarlanmıştır. Sisteme 50 Nm, 100 Nm ve 150 Nm olarak seviyeli tork yükleme hassasiyeti sahiptir. Bu seviyeli yükleme, tork kolu ile tablo 2.1'e göre yükleme yapılır.

Tablo 2.1. FZG Deney Düzeneğe Yükleme Tablosu.

No	Moment kolu	Yüklenecek kütle	Yüklenecek ağırlık	Yükleme seviyesi	Çalıştırılacak hız
	L (m)	M (Kg)	W (N)	T (Nm)	N(dev/dak)
1	0,1	30	300	30	500
2	0,2	30	300	60	500
3	0,3	30	300	90	500
4	0,4	30	300	120	500
5	0,5	30	300	150	500

Bu deney çalışmasında oluşturulduğu deney düzeneği DIN standartı FZG deney düzeneğine işlev açıdan ve şekil açıdan benzerliğine sahiptir. Standart deney setleri yağlama kutusuna sahipken bu deney düzeneği yağlama imkânı vermez çünkü kaplanan numuneler kaplamanın gereği kuru ortamda veya açık ortamda çalıştırması istenmiştir. Standart FZG deney setlerine bir elektrik motor bağlı iken, çalışmaya yönelik oluşturulduğu deney seti Smarc LC360B Universal Torna tezgahına montajlıdır. Sisteme dışarıdan verilen hareket torna aynasından aşamalı hızlarla verilmektedir. Çalışmaya yönelik deney düzeneğinde kullanılan Çift Sıralı Bk Vidalı Mil Uç Yatakları farklı modül ve diş sayısına sahip düz dişlilerin çalıştırmasına izin verilmektedir. Şekil 2.1. FZG deneysel uygulama çalışması test düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 2.1. FZG Deneysel Uygulama Çalışması Test Düzeneği.

2.2 Düz Dişli Çark Üretiminde Kullanılan Malzeme

Düz dişli mumuneler için seçilen malzeme AISI 316 paslanmaz çeliktir. Çalışmada ele alınan düz dişli çark kaplandıktan sonra açık hava veya kuru ortamda yağlama olmadan kullanılmıştır. Onun için dişlinin gövdesi korozyon aşınmasına maruz kalmasın diye paslanmaz çelik tercih edilmiştir. Çalışmada korozyon aşınması dikkate alınmıştır.

Seçilen dişli çark malzemesi dişli çarkların mukavemet ve yüzey basıncı bakımından yük taşıma kabiliyetlerini önemli ölçüde etkiler. Genellikle g iletlen dişli çarklar çelikten, yalnız devir iletlen dişli çarklar (hassas cihaz tekniğinde) bronz naylon ve sinterlenmiş malzemededen, önemsiz ve çok düşük hızlarda çalışan dişli çarklar dökme demirden imal edilebilir. Dişli ark imalinde en çok kullanılan malzeme elik malzemesidir [34]. Isıl işlem dişli çarkların çalışma kabiliyetini önemli ölçüde etkiler. Bundan dolayı dişli çark malzemelerinin seçiminde ısıl işlem önemli bir rol oynar. Teknolojik alanında kullanılan tüm dişli çarkların ısıl işleminden geçmemektedir.

2.2.1 AISI 316 Paslanmaz elik

AISI 316 paslanmaz elik malzemelerin korozyona dayanımı kimyasal içeriğı sayesinde sert koşullu ortamlarda (deniz suyu, asidik sıvılar vs.) dahi çok iyidir. AISI 316 paslanmaz elik malzemenin yüksek kalitede olması nedeni ile geniş kullanım alana sahiptir. Örneğın sıvıların kazanlarında, gıda tesislerinde, kimya ve petrokimya endüstrisinde, makine parçalarında örneğine millerde, flanşlarda, dişlilerde, yataklarda ve sayrı makine elemanın imalatında kullanılır. Malzemenin mekanik özellikleri ve genel zellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Düz Dişlinin İmalatında Kullanılan Malzeme Tablosu.

316L Paslanmaz elik	
Genel zellikler	Açıklama
Korozyona Dayanımı	Bu malzemenin korozyona dayanımı oldukça iyidir.
Mekanik zellikleri	316 kalite malzeme, 304 kalite malzemeye benzer mekanik özellikler göstermektedir.
Dvlebilmeye Yatkınlığı	Bu kalite paslanmaz elik, iyi bir dövülebilme yatkınlığına sahiptir.
Kaynak Yapılabilirliği	Bu kalite paslanmazın kaynak yapılabilirliği iyidir.
İşlenebilirliği	Korozyona dayanımın önemsiz olduğu ortamlarda, 303 veya 430F kalite paslanmaz elik ürünler tercih edilebilir.
Oda Sıcaklığındaki Mekanik zellikleri	
Kalite	316L (1.4404), X2CrNiMo17-12-2
Kopma mukavemeti	Min 485 MPa
Akma mukavemeti, (%0,2)	Min 170 MPa
Sertlik, Rockwell (HBW)	Max 192 HBW

2.2.1.1 AISI 316 Çelik Malzeme Kimyasal Özellikler

AISI 316 paslanmaz çeliğin içerisinde molibden ve ekstra nikel ilavesi ile elde edilen bir çeşit paslanmaz çeliktir. AISI 316 paslanmaz çelikler %16 krom ve %10 nikelden oluşur. Ayrıca %2 molibden içerir. AISI 316 kalite paslanmaz çeliğin en belirgin özelliklerinden biri molibdenin sağladığı ekstra korozyon direncidir. Ayrıca yüksek sıcaklıklara karşı direnci vardır. Korozyon koşullarının çok yüksek olduğu ortamlarda (asit, deniz suyu vb.) dahi dayanım performansını uzun süre korur. Yine AISI 316 çelik çok yüksek bir kırılma mukavemetine sahiptir. “Ultimate Strength” olarak tanımlanan bu kırılma mukavemeti, yani mükemmel mukavemet molibden ile sağlanmaktadır. Üretim olarak AISI 316 paslanmaz çelik; Çubuk, altıgen, düz veya kare şekillerde ve farklı kalınlıklarda üretilmektedir. Özellikle sıvı kimyasalların yoğun olarak kullanıldığı ve sıcak su buharının hâkim olduğu ortamlarda zorlu korozyon koşullarına dayanabilmesi için AISI 316 kalite paslanmaz çelik kullanılabilir. Çalışmada kullanılacak düz dişliler hidrolik yağ ortamının dışında, kuru veya nemli bir ortamda tasarlanan düz dişli mekanizmalarında kullanılacağı için numune imalında AISI 316 paslanmaz çelik tercih edilmiştir [31]. Tablo 2.3’te AISI 316 paslanmaz çeliğin kimyasal özelliği verilmiştir.

Tablo 2.3 AISI 316 Çelik Malzeme Kimyasal Özellikler.

Kimyasal Bileşimi								
Kalite	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
316 (1.4401)	0,08 max	2	0,045	0,03	1	16,0-18,0 arası	10,0-14,0 arası	2,0-3,0 arası

2.3. Düz dişli numunelerin ölçüleri

Bu çalışmada deney numunesi olarak kullanılan düz dişli numunenin boyutları şekil 2.2’de verilmiştir. Numuneler 316 paslanmaz çelik malzemesinden Evren Dişli atölyesinde imal edildi. Azdırma tezgâhında 10 adet dişli çekildikten sonra bu numunelerden 6 tanesi ikişer ikişer MoS₂, WS₂ ve WC/C kaplama malzemeleri ile Prokap Makine firmasına kaplama işlemi için gönderildi. Kalan dört tane düz dişliden iki tanesi devre güç dolaşımı sağlamak için deney setinde kullanıldı ve iki tanesi ise

kaplamalı düz dişlilerin şartların altında FZG deney setinde işleme sokuldu. Şekil 2.2 Düz dişlilerin ölçülendirilmesi gösterilmiştir.

Malzeme: 316L Paslanmaz çelik

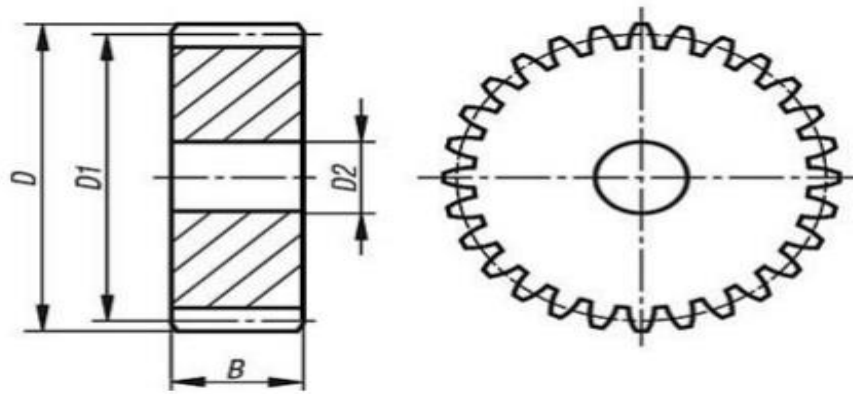
Modül; $m=4$ mm

Diş sayısı; $Z=20$

Dış çap; $D = 88$ mm

Bölüm çapı; $D1= 80$ mm

Genişlik; $B = 25$ mm



Şekil 2.2 Düz Dişlilerin Ölçülendirilmesi.

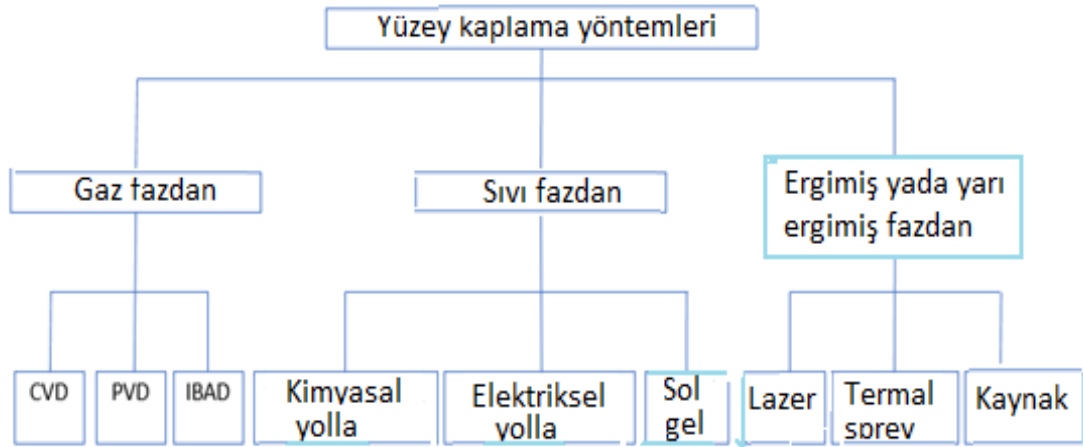
On adet düz dişli AISI 316 paslanmaz çelik malzemesinden Evren Dişli atölyesinde açtırdıktan sonra 6 tanesi üç farklı kaplama malzemesi ile kaplaması içi kaplama işlemine ayrıldı. İki tanesi kaplamasız olarak işleme sokuldu ve iki tanesi ise güç devre dolaşımı için kullanıldı. Güç devre dolaşımı sağlayan iki dişli işlem süresi boyunca FZG makinesinde takılı kalır ve muayene işlemine girmez. Düz dişli çark çapı, kalınlığı, diş sayısı hepsi aynı şartlarda hazırlanmıştır. Şekil 2.3'te AISI 316 paslanmaz çelikten imal edilen düz dişli çarklar gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Paslanmaz Çelikten İmal Edilmiş Düz Dişli Çark Görüntüsü.

2.4. Düz Dişli Çark Kaplama Yöntemleri

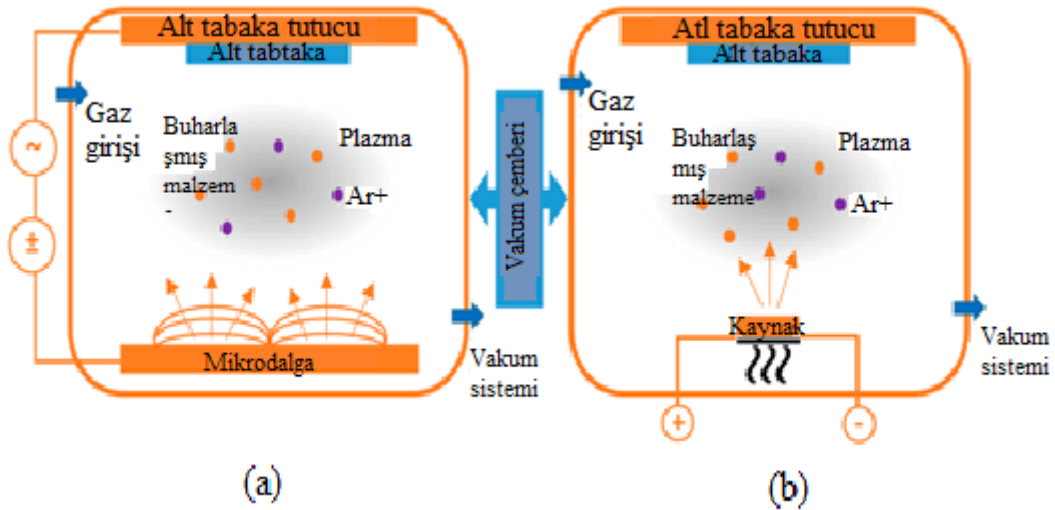
Rulman yatakların, dişlilerin, pistonlu kayma mekanizmaların ve diğer teknolojik parçaların tribolojik özelliklerini yükseltmek için bunların yüzeyine uygun malzeme ile ince veya kalın kaplama yapılır. Fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma- termal püskürtme teknikleri gibi birçok kaplama işlemi geliştirilmiştir [13]. Metalik aşınma direncini artırmak ve endüstrinin farklı alanlarındaki makinelerin verimini artırmak üzere çeşitli kaplama yöntemleri uygulanmaktadır. Yüzey kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Kaplama Yöntemin Sınıflandırması.

2.4.1. Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi (PVD)

Fiziksel buhar biriktirmede (PVD) yönteminde kaplanan malzeme buhar fazına dönüştürülür ve daha sonra kaplanacak parçanın yüzeyinde ince tabaka olarak yoğunlaştırılır [15]. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniği, metaller, alaşımlar, seramikler, camlar, yarı iletkenler ve hatta polimerler gibi çok çeşitli malzemelerin kaplanması için kullanılabilir [48, 60]. Şekil 2.5’de PVD işlem şeması gösterilmiştir.



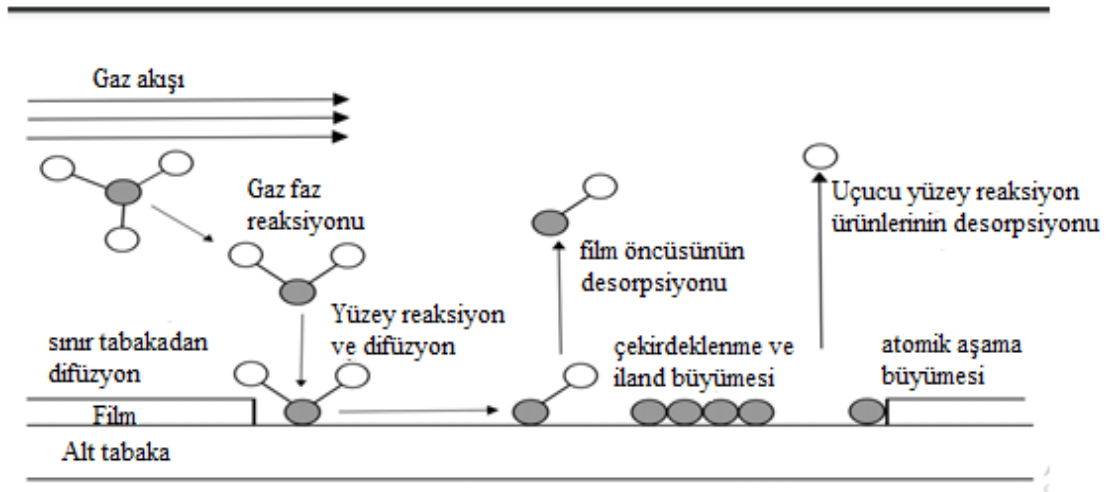
Şekil 2.5. PVD İşleminin Şeması: (a) Pvd Püskürtme ve (b) Buharlaşan PVD [15].

Çelik malzemesinden imal edilmiş makine ve konstrüksiyon parçalarının yüzeyine aşınma direncin yükseltmek amacıyla PVD kaplama tekniği uygulamaları

yapılmaktadır. Deney çalışmasında kaplama malzemesi olarak Molibden (Mo), Krom (Cr), Titanyum (Ti), Bakır (Cu), Tungsten (W), Nikel (Ni), Gümüş (Ag), Alüminyum (Al) ve bunların Nitrürleri, Sülfürler, Karbürler ve Karbonitler gibi malzemeler kullanılmaktadır [15, 46].

2.4.2. Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi (CVD)

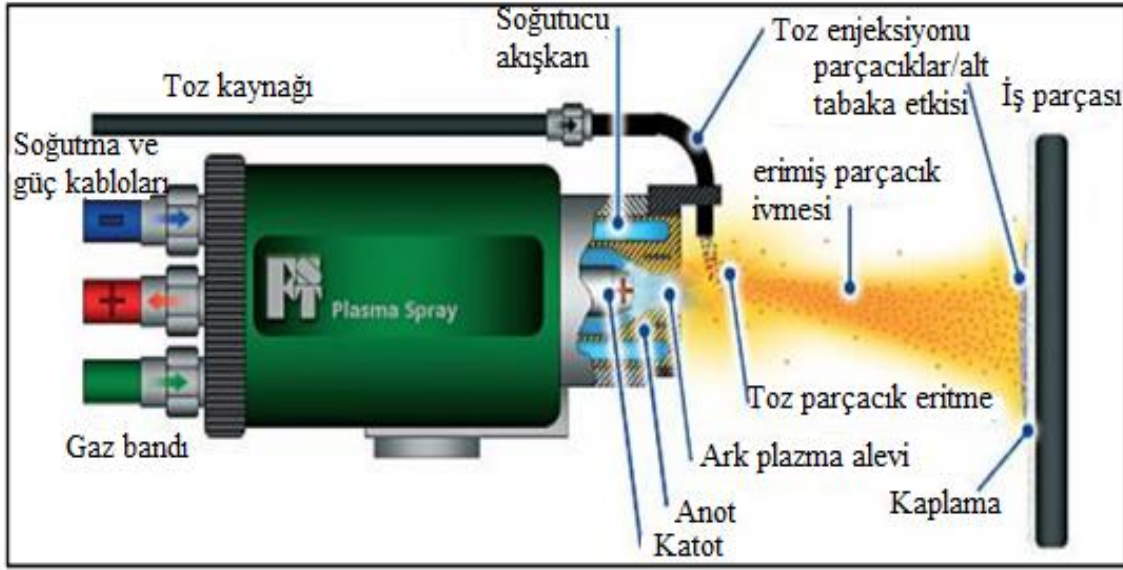
Kimyasal buhar biriktirme (CVD), makine ve konstrüksiyon parçaların yüzeyinde aşınmaya karşı dirençli ince tabaka oluşturmak adına saf veya kompozit malzemenin toz şeklinde, kaplanacak parça yüzeyinde prekürsör olarak adlandırılan diğer gaz halindeki moleküller ile kimyasal olarak reaksiyona sokulması işlemidir [13]. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) tekniği düşük basınçlı ortamda plazma desteği ile uygulanacaktır. Şekil 2.6’de Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemleri (CVD) şematik olarak uygulanır.



Şekil 2.6. Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemleri (CVD) Şematiği [16].

2.4.3. Plazma Püskürtme Yöntemi ile Kaplama

Plazma püskürtme tekniği, kaplama malzemesinin erimiş veya yarı erimiş damlacıklar halinde kaplanacak makine veya konstrüksiyon parçalarının yüzeyinde biriktirmek için geliştirilmiş bir yöntemdir. Plazma püskürtmeli kaplama tekniği, farklı uygulamalarda erozyon veya aşınma direncini arttırmak için mikro ve nano kompozit toz partikülleri kaplanacak parçaların yüzeyine biriktirilmesi için kullanılır [28]. Plazma püskürtme yöntemi ile kaplama işlemi Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Plazma Püskürtme Yöntemi ile Kaplama İşlemi [17].

Enerji kaynağı türlerine göre termal püskürtme teknikleri birbirinden farklıdır. Kaplama malzemeleri genellikle yakıt yanması, elektrik arkı veya plazma kullanılarak eritilir. Farklı kaplama teknikleri arasında, plazma püskürtme tekniği geniş alanında kaplama uygulama tekniklerden biridir [17].

2.5. AISI 316 Paslanmaz Çelik Düz Dişli Çarkların Kaplaması

Kaplama tekniklerinden (PVD, CVD, Plazma- Termal Püskürtme yöntemi) PVD ve Plazma- termal püskürtme kaplama teknikleri çoğunlukla WS_2 , WC / C , MoS_2 , BN gibi katı yağlayıcı kaplamaları kaplanacak parçaların üzerine biriktirilmesi için en çok kullanıldığını göstermektedir [43, 69]. Deneyisel çalışmada kullanılan numuneler termal püskürtme yöntemi ile kaplanmıştır. AISI 316 paslanmaz çelik ile üretilen düz dişli çarklar Prokap Makine firmasında Numunelerin Termal Püskürtme yöntemi ile kaplanması uygulaması yapıldı. Şekil 2.8’de numunelerin WS_2 , WC/C ve MoS_2 termal püskürtme yöntemi ile yüzey kaplaması uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Prokap Makine Firmasında Numunelerin WS_2 , WC/C ve MoS_2 Termal Püskürtme Yöntemi ile Yüzey Kaplaması Uygulaması.

Düz dişli çarkların gruplar halinde kaplama işlemleri yapıldıktan sonra deney setinde sıra ile kullanımı gerçekleştirildi. Kaplama işlemleri uygulandıktan sonra düz dişli çarklar Şekil 2.9'de gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Prokap Makine Firmasında 316 Paslanmaz Çelikten Numunelerin WS_2 , WC/C ve MoS_2 Termal Püskürtme Yöntemi ile Yüzey Kaplamaları Yapılmıştır.

Kaplama işlemi uygulaması ve kaplama kalınlığı akademik çalışmaya uygun yapılmıştır. Yapılan kaplama işleminde Termal Püskürtme kaplama yöntemi ile uygulanmıştır. Kaplama kalınlığı kaplama malzemesine göre 100 mikrondan 180 mikrona kalınlığında yapılmıştır. Tablo 2.4’de kaplama malzemesi ve kaplama kalınlığı bilgisi verilmiştir.

Tablo 2.4. Düz Dişlinin Kaplama Özellikleri Tablosu.

Kaplamanın özellikleri deney setinde çalıştırmadan önce				
Kaplama çeşiti	Kaplamasız	WS ₂	WC/C	MoS ₂
Kaplama malzemesi	Kaplamasız	Tungsten disulfür	Tungsten karbon karpit	Molibdenim disulfür
Kaplama kalınlığı (µm)	0	100-150	150-180	100-150
Yüzey sertliği (HBW)	192,00	310,42	515,35	137,43

2.6. Kaplama Malzemesi Seçimi

Dişlilerde kullanılabilen birkaç kaplama malzemeleri vardır. Örneğin MoS₂ (molibden disulfür), WC / C (tungsten karbür karbon), B₄C (bor karbon) [54], CrN (krom nitrür) [19] ve bunların kompozitleri uygun kaplama malzeme listesine girer. MoS₂, WC / C, BN, B₄C katı yağlayıcı olarak bilinir. Bu katı yağlayıcılar; kesici takımlar, dişliler, rulmanlar, IC motor ekipmanı, uzayda çalışan mekanizmaları ve makinelerin diğer elemanları gibi çeşitli mekanik mekanizmada kullanılmaktadır [68], WS₂, WC / C, BN ve MoS₂ düz dişlilerin performansını ve çalışma ömrünü artırmak üzere uygun kaplama malzemesi olarak bilinir [19].

2.6.1. AISI 316 Paslanmaz Çelikten İmal Edilen Düz Dişli Numunenin Aşınma Olayı

Bu çalışmada bir çift düz dişli kaplamasız olarak FZG deney setinde işleme sokuldu. Kaplamasız düz dişlide kaplamalı düz dişliler gibi belirlenen dönme tekrarı ve yükleme şartları altında aşındırıldı. MoS₂ kaplamalı, WC/C kaplamalı ve WS₂ kaplamalı düz dişli çarklar birbiri ile ve kaplamasız düz dişli çark ile aşınma miktarı ve dişlinin diş profil yüzey hasarı tespiti ile karşılanır. Kaplamasız AISI 316 paslanmaz çelikten imal edilen düz dişli takımı diş yüzeyi mikroskop altında Şekil 2.10’de gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Kaplama Yapılmamış Düz Dişlinin Dış Yüzeyin Görüntüsü.

2.6.2. Deneysel Çalışma Düz Dişli Çark Tungsten Disulfür (WS_2) Kaplaması

Tungsten disulfür (WS_2), geleneksel yağlayıcıların kullanılmadığı veya uygulamanın dişli motorlar veya şanzımanlar gibi daha uzun bir aşınma ömrü için kalıcı bir yağlayıcı gerektirdiği yataklar için mükemmel bir kaplamadır [18]. WS_2 , Motor ve mil yatakları gibi otomotiv bileşenlerinin yanı sıra şanzıman parçaları, diferansiyeller ve mafsalları daha az sürtünmeye sahip olmasını sağlar bu da daha uzun aşınma ömrü sağlar, gıcırta ve gürültüyü azaltır, daha az güç gerektirerek gaz tüketimini azaltır ve yakıt maliyetlerini düşürür. Tungsten Disulfür kaplamalı vidalı miller ve dişli çark mekanizmaları daha az sürtünmeyle daha sorunsuz çalışır ve sonuç olarak daha uzun ömürlü olurlar [22]. Tungsten disulfür Kaplamalı Kesici Takımlar daha iyi yüzey kalitesi sağlar ve daha uzun aşınma ömrüne sahiptir. Bu çalışmanın deney çalışmasında bir çift düz dişli WS_2 malzemesi ile kaplanmıştır. Şekil 2.11’de WS_2 kaplamalı düz dişli çark takımı gösterilmiştir.



Şekil 2.11. WS₂ Kaplamalı Düz Dişli Numunenin Diş Yüzeyin Görüntüsü.

2.6.3. Deneysel Çalışmada Düz Dişli Çark Tungsten Karbon Karbür (WC/C) Kaplaması

Tungsten karbon karbür kesim aletleri, kalıplar ve zimbalar gibi üstün aşınma veya şok direnci gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [23]. Bu çizilme direnci, testere kafaları veya matkap uçları, dişlilerin diş yüzeyleri, tuğla ve kiremit üretiminde kullanılan ekipman veya kırma makineleri gibi aşınmaya dayanıklı bileşenler oluşturmak için kullanışlıdır [44]. Bu çalışmada kullanılacak numunelerin bir çift düz dişli numunesi WC/C malzemesi ile kaplanmıştır. Şekil 2.12’de WC/C kaplama yapılmış düz dişli gösterilmiştir.



Şekil 2.12. WC/C Kaplamalı Düz Dişli Numunenin Diş Yüzeyin Görüntüsü.

2.6.4. MoS₂(Molibden Disulfür) Tanıtımı ve Kullanım Alanları

Molibden disulfür, molibden ve kükürtten oluşan inorganik bir bileşiktir. Kimyasal formülü MoS₂ dir. Bu bileşik bir geçiş metali dikalkojenit tek tabakalı olarak sınıflandırılır. Molibden için ana cevher olan mineral molibdenit olarak ortaya çıkan gümüş siyahı bir katıdır [19].

2.6.5. MoS₂'nin Mekanik Özellikleri

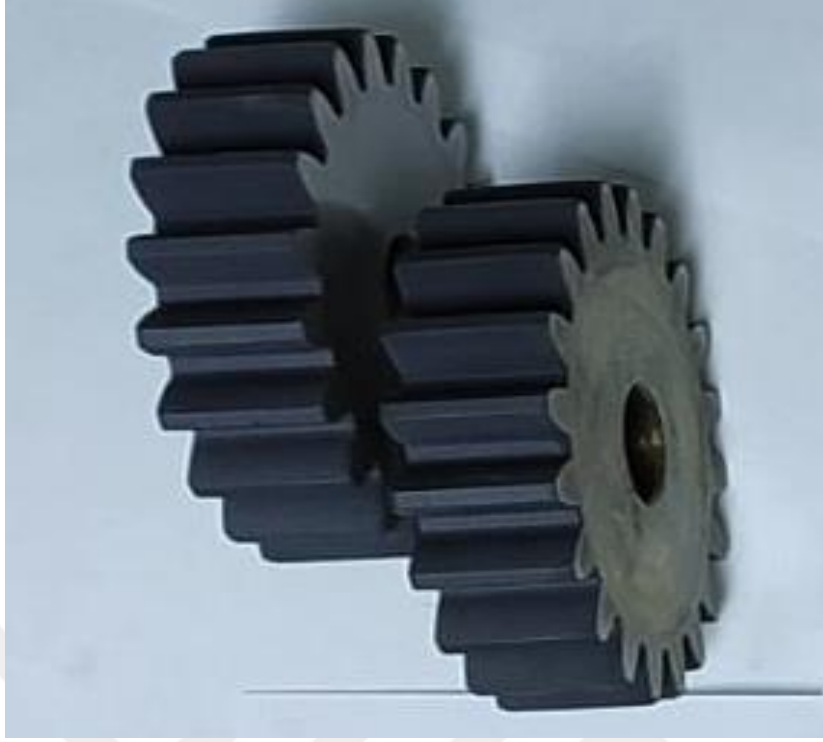
MoS₂ düzlem içinde altıgen kafes yapıya sahipken, düzlem dışındaki kristal kafes yapıları tamamen farklıdır. MoS₂ bir geçiş metali atomu (Mo) ve iki kalkojenit (S) atomu arasında üç hizalama katmanı oluşturur. Bu nedenle, MoS₂'nin elektronik ve mekanik özellikleri büyük ölçüde farklılık gösterir. MoS₂ yarı iletken özellikleri sergiler ve donanım uygulamalarında kullanışlıdır [5]. Deneysel çalışmada kullanılacak kaplama çeşitleri, kaplama kalınlığı ve kaplama işlemi uygulanmış düz dişli çarkların sayısı Tablo 2.3’de verilmiştir.

Tablo 2.5. Kaplama Malzemenin Kimyası Formulu ve Kaplama Kalınlığı

No	Sayım	Kaplama Malzemesi	Sembolu Formulu	Kaplama Kalınlığı (μm)
1 2	2 adet	Kaplamasız	Kaplamasız	0
3 4	2 adet	Tungsten Disulfür	WS ₂	100-150
5 6	2 adet	Tungsten Karbon Karpit	WC/C	150-180
7 8	2 adet	Molibden Disulfür	MoS ₂	100-150

2.6.6. Deneysel Çalışma Düz Dişli Çark Molibden Disulfür (MoS₂) Kaplaması

Molibden disulfür çok katmanlı bir yapıya ve altıgen kristale sahiptir, bu nedenle MoS₂ sürtünmeyi azaltmayı kolaylaştırır ve sürtünmeyi azaltmada rol oynayabilir. MoS₂ kaplaması düşük sürtünme katsayısına, mükemmel vakum sürtünme performansına ve güçlü radyasyon ortamına sahiptir, bu nedenle uzay makinelerinde veya kuru ortamlara yaygın olarak kullanılmaktadır [56]. MoS₂ kaplamalar ağırlıklı olarak fiziksel buhar biriktirme yöntemi, elektrostatik biriktirme, plazma püskürtme yöntemi ile üretilmektedir. Elektrostatik biriktirme ile hazırlanan kaplama en yüksek yapışma direncine ve yüzey sertliğine sahip olmaktadır [46]. Şekil 2.13'te deneysel çalışma düz dişli çark takımı molibden disulfür (MoS₂) kaplaması gösterilmiştir.



Şekil 2.13. MoS₂ Kaplamalı Düz Dişlinin Diş Yüzeyin Görüntüsü.

2.7 Mil Malzemesi ve Mil Mukavemet Hesabı

Deney tezgâhında düz dişlileri taşıyan, hareket ve güç aktaran miller AISI 4140 çeliği malzemesinden tasarlanarak yapıldı. Deney sentinde kullanılacak miller normal ve eğilme zorlanmaya maruz kalmayacak sadece burulma zorlanma altında hareketi devre dolaşımı sağlar. Miller yük aktarma sırasında zorlandığı tork (2.1) ifade ile belirlenir.

$$T = R \times F \quad (2.1)$$

Burada T: tork, R: kuvvet eksenine ile numune dönme eksenine arasında en kısa mesafe ve F: etkilenen kuvvettir.

(2-1) ifadesine göre çubuk üzerinde gelen zorlanmayı (2-2) formülü ile bulunur.

$$T = F_{nc} \cdot R_{Taksimat} = F_{nc} \cdot \frac{D_1}{2} = 6461N \cdot \frac{0,08m}{2} = 258 Nm \quad (2.2)$$

Düz dişli numuneleri döndüren metal çubuk için kullanılan malzeme AISI 4140 çeliği seçilmiştir. Kimyasal özellikleri ıslah çeliklerinin diğer çelik türlerine göre yüksek karbon içermekle beraber sertliği en çok sevilen özellikler arasındadır. Bu çelik

malzemesi Krank mili, yivli mil, aks mili ve kovani ile benzeri çeşitli parçalarda kullanılmaktadır. Ayrıca makineler, makine parçaları ve de aparatları, tarım araçları ve de makineleri, savunma sanayi üretimleri ile petrol ve gaz endüstrileri ile AISI 4140 çeliğinin yer bulduğu çeşitli kullanım alanlarıdır. Bu malzemenin akma mukavemeti 550 MPa dır. Çubukta kullanılacak malzemenin özellikler Ek-3'te verilmiştir. Şekil 1.14'de FZG deney setinde hareket ve gücü dişli çark mekanizmasına dağıtan miller gösterilmiştir.



Şekil 2.14. FZG Deney Setinde Hareket ve Gücü Dişlileri Dağıtan Miller.

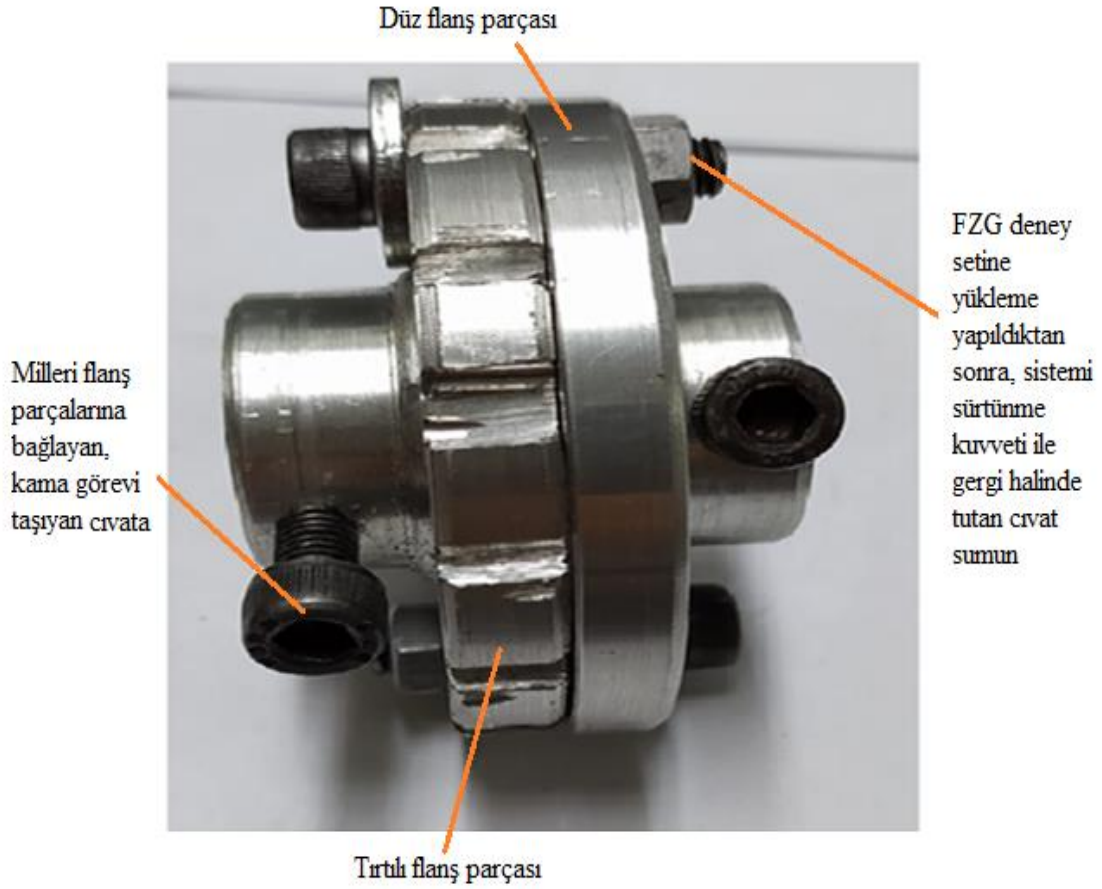
$$\sigma_{Ak} = 550 \text{ MPa}, \sigma_{Emniyet} = \frac{550}{2} = 275 \text{ MPa}, \tau_y = \frac{275}{1,40} \approx 198 \text{ MPa}$$

$$\tau_{max} \leq 198 \text{ MPa}$$

$$T = 200 \text{ Nm} \leq 258 \text{ Nm}, \text{ olarak kabul edilir}$$

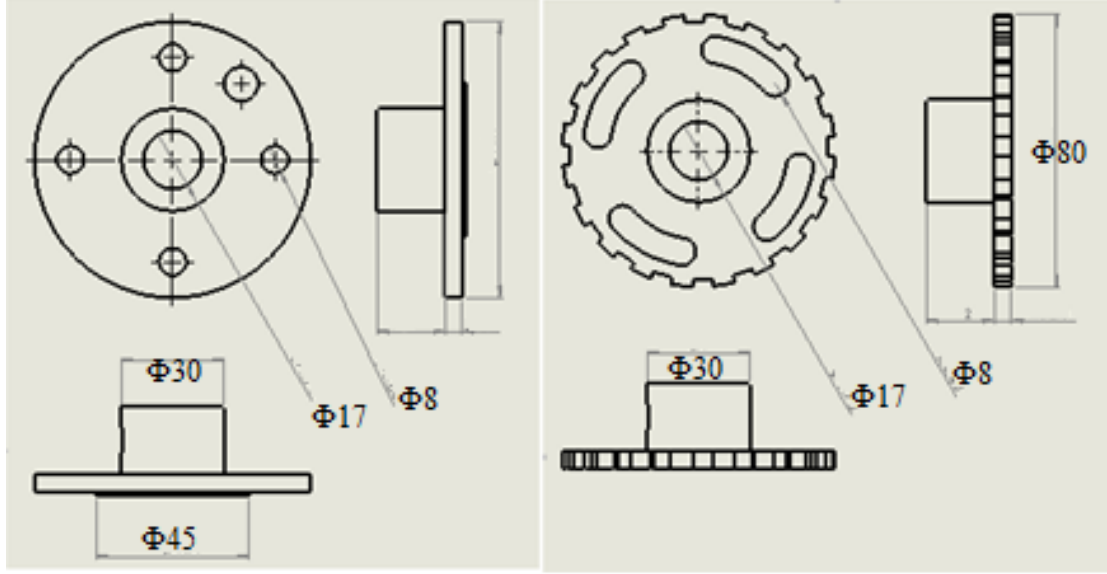
$$\tau_{mak} = \frac{T \cdot r}{\frac{\pi}{2} \cdot r^4} = \frac{T}{\frac{\pi}{2} \cdot r^3} = \frac{200}{\frac{\pi}{2} \cdot r^3} = 198 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \quad r = 8,6 \text{ mm}, d = 17,2 \text{ mm} \approx 18 \text{ mm}$$

(2.3)



Şekil 2.16. FZG Deney Düzeneyinde Kullanılan Flanş Takımı.

Yük yüklemesi sırasında flanşın diğer parçası bir metal çubuğu ile sabitlenir. Sistem tork yüklemesi yapıldıktan sonra eş çalışan flanş diskleri dört tane (8mm) cıvata ile bağlanır. Flanş disklerin temas yüzeylerinde sürtünmeli pabuç konulmuştur böylece flanş mekanizması (150 Nm) torku kayma olmadan sürtünme vasıtasıyla birbirine aktararak sisteme dolaştırır. Güç dolaşımı düz dişli deney setine dışlardan torna aynası ile hareket verilir. Deney düzeneği torna tezgâhına bağlanması ile sistemin hangi hızda çalıştığını kontrol etmesini sağlamış olur. Deney düzeneğinde çalışırken mevcut olan sürtünmeye karşı kadar torna tezgâhı zorlanacaktır. Yani düz dişli numuneler (150N.m) tork altında zorlanırken, bu yüksek tork altından zorlanmasının kaynağı torna tezgâhı değildir. Böylece deney düzeneği üzerinde fazla enerji harcamadan sistemi haftalarca, aylarca çalıştırılabilir. Düz dişli numuneler aşınma değişimi ve yorulmasını incelenebilir. Şekil 2.17’de FZG deney düzeneğinde kullanılan flanş takımının ölçülendirmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.17. FZG Deney Düzeneginde Kullanılan Flanş Takımın Ölçülendirmesi (mm).

2.8.1 Flanşın Mukavemet Analizi

Flanşlar Al. EN1050 malzemesinden üretilmiştir. Akma mukavemeti 85 MPa dır.

$$\sigma_{ak} = 85 \text{ MPa} \rightarrow \sigma_{emn} = \frac{85}{2} = 40 \text{ MPa} \quad (2.4)$$

$$\frac{F}{A} = < 40 \text{ MPa}$$

$$\frac{3571 \text{ N}}{\frac{\pi}{4} (85^2 - 17^2) \text{ mm}^2} = 0,85 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 0,85 \text{ MPa} \lll 40 \text{ MPa} \quad (2.5)$$

Deney düzeneğinde kullanılan flanş takımı mukavemet analizi açıdan sistemle çalışmaya uygundur.

2.8.2 Flanş Montajında Kullanılan Cıvatanın Mukavemet Hesabı

Eş çalışan dişliler sokulabilir cıvata bağlantısı ile birbirine montaj edilir.

$$F=?$$

$$F_s = \mu \cdot F, \quad (2.6)$$

$$r \cdot F_s = T \rightarrow F_s = \frac{T}{r} \quad (2.7)$$

Flanşın dış çapı 87 mm ve iç çapı 17 mm olduğundan sürtünme kuvvetin etkilediği yarı çap ise 35mm olarak hesaplanabilir.

$$r_{ort} = 35 \text{ mm.}$$

$$F_s = \frac{150 \text{ N.m}}{0.035 \text{ m}} = 4285 \text{ N} \quad (2.8)$$

(Al, sürtünme katsayısı, $\mu_{ort} = 1.20$).

$$F = \frac{F_s}{\mu} = \frac{4285}{1.2} = 3571 \text{ N} \quad (2.9)$$

3571 N Kuvveti flanş disklerle basınç olarak etkiler.

$$F_1 = \frac{3571 \text{ N}}{4} = 893 \frac{\text{N}}{\text{civata}} \quad (2.10)$$

Civata DIN 5.6 kalitesine göre mukavemet analizi yapılır. $\sigma_{akma} = 300 \text{ MPa}$ dır

Deney düzeneğinin flanş montajında 8 mm çaplı 4 adet ve mil – düz dişli çark montajında 8mm çaplı 4 adet civata kullanıldı.

$$\sigma_{min} = \frac{F}{A} \rightarrow F = A \cdot \sigma_{min} \quad (2.11)$$

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot (8\text{mm})^2 \cdot 300 \text{ N/mm}^2 = 15079 \text{ N} ; F_1 = 893 \text{ N.}, F > F_1$$

Deney düzeneğinin flanş montajında kullanılan 4 adet civata mukavemet analizi hesapları yapılmıştır. Deneyisel çalışmada sistemde kullanılması uygundur.

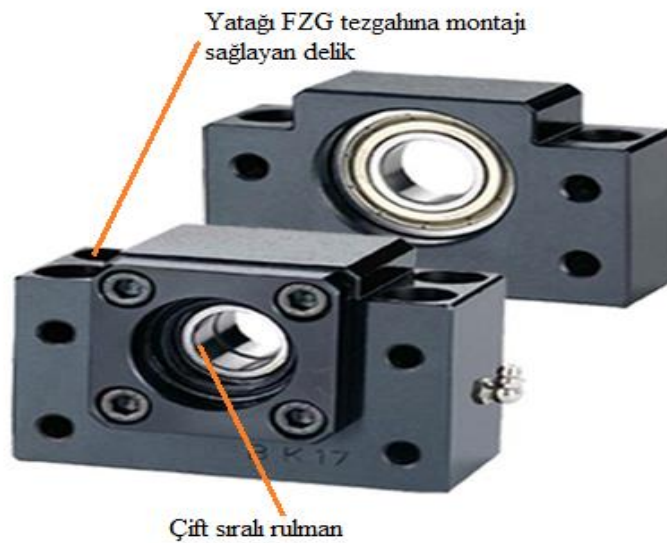
2.9. FZG Deney Seti İçin Rulman Seçimi

Numuneleri 1500 dev/dak hıza kadar çevirmesini sağlayabilen ve eksenel yük olarak 75N kuvveti rahatlıkla taşıyabilen rulman seçilmiştir. Rulman seçiminde farklı firmaların katalogları bakıldı. Deney setine Çift Sıralı Bk Vidalı Mil Uç Yatakları uygun görülmüştür. Şekil 2.18’de yatak ölçülendirmesi ve teknik resmi gösterilmiştir.

BK VE FK SABİT YATAKLAMALAR İÇİN VİDALI MİL UÇ İŞLEME ÖLÇÜLERİ						
Yatak Model No.	Vidalı Mil Çapı	Yatak Mil Çapı	B	E	F	Uç Vida Ölçüleri
BK 10	12/14/15	10	8	36	15	M10x1 16
BK 12	14/15/16	12	10	36	15	M12x1 14
BK 15	18/20	15	12	40	20	M15x1 12
BK 17	20/25	17	15	53	23	M17x1 17
BK 20	25/28	20	17	53	25	M20x1 15
BK 25	32/36	25	20	65	30	M25x1,5 18
BK 30	36/40	30	25	72	38	M30x1,5 25
BK 35	45	35	30	81	45	M35x1,5 28
BK 40	50	40	35	93	50	M40x1,5 35

Şekil 2.18. Çift Sıralı Yatak Takımı Ölçülendirmesi, Teknik Resmi ve özellikleri [74].

Bu yataklardan 4 adet deney setinde kullanılmıştır. Deney setin imalatında miller yataklara H7 boşluklu tolerans ile montajlamasına önem gösterilmiştir. Her yatak çift sıralı rulmanı sahiptir. Çift sıralı rulman yataklar yüksek açısal hızlarda titreşimi önleme özelliği taşımaktadır [64]. Şekil 2.19’de FZG deney setinde kullanılan çift sıralı rulmanlı yatak takımı gösterilmiştir.



Şekil 2.19. FZG Deney Setinde Kullanılan Rulman Yatak Takımı [74].

2.10. Deney Çalışmada Kullanılan Hassas Terazî

Ağırlık kaybı olarak aşınma belirleme yöntemi en eski ve maliyeti düşük yöntemi olarak geçmektedir [33]. Deney çalışmada binde bir hassasiyetli terazi ve on binde bir hassasiyetli teraziler ağırlık kaybı belirlemede kullanılmaktadır. Bu çalışmada kuyumcularda ve ilaç üretim sektöründe kullanılan binde bir hassasiyetli terazi Precisa markalı 1/1000 hassas terazi kullanılmıştır. Ağırlık kaybı ile aşınma belirlemede, düz dişli çark numuneleri FZG deney setinde çalıştırmadan önce ve çalıştırdıktan sonra üç aşama olarak ağırlık ölçülmüştür. Elde edilen verilerin farkı aşınma miktarı bilgisine verirler. Şekil 2.20’de deneysel çalışmada Precisa 1/1000 hassasiyetle ölçme yapan terazide kütle tartım uygulama çalışması gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Binde Bir Hassasiyeti Sahip Terazide Numunelerin Ağırlığı Ölçümü.

Numune ağırlıkları ölçüldüğü uygulama öncesi imalatı tamamlanan 8 adet düz dişli çark ağırlıkları ölçüldü. 2. Aşamada 6 tanesi 3 grup dişli takımları farklı kaplama yapıldı ve kaplama sonrası ağırlıkları tekrar ölçüldü. Son olarak deneysel uygulama sonrası oluşan aşınma kayıpların öğrenmek için aşınmadan sonra ölçümler tekrar yapılmıştır. Ölçümden elde edilen verileri Tablo 2.6’te listelenmiştir.

Tablo 2.6. Deneysel Çalışma Aşamalarında Düz dişli Ağırlık Verileri

Düz Dişlinin Ağırlık Ölçümü Tablosu					
Düz Dişli Tipleri	İşlemden Önceki	250000 Dönme Tekrarında Sonraki	Oluşan Aşınma Miktarı	500000 Dönme Tekrarında Sonraki	Oluşan Aşınma Miktarı
	Düz Dişlinin Ağırlıkları (gr)	Düz Dişlinin Ağırlıkları (gr)	Aşınma Kütlesi (gr)	Düz Dişlinin Ağırlıkları (gr)	Aşınma Kütlesi (gr)
Kaplamasız	729,217	728,204	1,013	727,897	1,320
WS2	882,972	882,612	0,360	882,436	0,536
WC/C	909,821	909,235	0,586	909,221	0,600
Mos2	905,228	904,503	0,725	904,268	0,960

2.11. Deneysel Çalışmada Kullanılan Yüzey Pürüzlülük Cihazı

Pürüzlülük ölçer, düz dişliler hareket ve güç aktarma sırasında yıpranıyor. Bu yıpranma dişlinin diş yüzeyinde kendini aşınma olarak gösterir. Dişlinin diş yüzeyinde aşınma dağılımı Mitutoyo pürüzlülük ölçer ile tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı yüzey profili bakımından evolvent eğrisinin altında ve üstündeki mikro sapmaların ölçümünü sağlayan cihazdır. Yüzey temas alanını, temas basıncını, sürtünme katsayısını, dişli mekanizmanın performansını ve sayrı etkileyen hassas bir kalite ölçüsüdür. Özellikle talaşlı imalat sonrasında parçanın yüzey kalitesini belirlemede veya kullanılmış parçaların hasar tespit edilmesinde kullanılır [35, 40]. Bu tez çalışmada pürüzlülük değerlendirme parametreleri olarak Ra (yüzey pürüzlülük değeri) ve diş profilinde aşınma dağılımının gözlemlenmesinde yetinmiştir. Şekil 2.21’te Muayene çalışmasında kullanılan yüzey pürüzlülük cihazı gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Düz Dişli Numunenin Diş Yüzeyin Pürüzlülük Değeri Mitutoyo Pürüzlülük Cihazı ile Ölçüldü.

2.12. Deney Çalışmasında Kullanılan Elektro Mikroskop Cihazı

Triboloji çalışmalarda incelenen deney numune yüzeylerinde oluşan hasarlar EDS, elektro mikroskop ile tespit edilir [32]. Düz dişlilerin diş yüzeylerinde oluşan aşınma ve kaplamaların aşınma üzerine etkileri belirleme yöntemlerinden biri tarayıcı elektronik mikroskop ile ilgili yüzeylerden görüntü çekmektir. Muayene çalışması laboratuvar ortamında titizlikle yapıldı. Çalışmada ölçme uzunluğu 300 μm seçildi ve 20x kadar taranan mikroskop görüntüsü büyütüldü. Muayene çalışmasında kullanıldığı Nikon SMZ800N mikroskobun teknik özellikleri Tablo 2.7’te verilmiştir.

Tablo 2.7. Nikon SMZ800N Stereo Mikroskobu Teknik Özellikleri.

Mikroskop Büyütme	5x, 10x, 20x , 50x ve 100x
Çalışma / Ölçme Uzunluğu	300 μm , 200 μm , 100 μm , 50 μm , 20 μm ve 1 μm
Koaksiyal Eksen (sağ-sol)	X: 76 (mm) ve Y: 52 (mm)

Deneyisel çalışmada düz dişlini diş profil yüzeyinden fotoğraflar Nikon SMZ800N stereo mikroskobu ile çekilmiştir. Şekil 2.22’de düz dişlinin diş yüzeyinde mikroskobu görüntüsü çekme uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Düz Dişli Numunenin Diş Yüzeyin Muayenesi Nikon Smz800n Stereo Mikroskop Cihazı ile Ölçüldü.

2.13. Deney Çalışma Setinin Bağlandığı Torna Tezgâhı

Deneysel uygulama çalışma setinin mekanizması torna tezgâhına monte edildi. Düz dişlileri taşıyan ve dönmelerini sağlayan miller de üniversite atölyesinde Smarc LC360B Universal Torna makine tezgâhında imal edilmiştir. Torna tezgâhı kendi ekseninde etrafında dönmekte olan katı (metal) bir iş parçası üzerinden doğrusal hareketi sahip kesici takım yardımı ile talaş kaldırma işlemi yapan bir çeşit tezgâhtır. Teknoloji ile birlikte gelişmiş torna tezgâhları kolaylıkla bulunması olsa da çalışmanın deneysel seti kurmasında klasik torna tezgâhı işimize görmüştür. Bunun yanında Smarc LC360B torna tezgâhı deney setin gövdesi olarak da kullanılmıştır. Bu tezgâh deney sisteminde oluşan doğal titreşimi önlemek ve farklı hızlarda numuneleri deney altında tabii tutulabilmesine sağlayan bir araçtır. Dene seti torna aynası ile gezer punta arasında bir ana mil tasarlanmıştır. Bu mil vasıtası ile hareket torna aynasından FZG deney setine

hareket verilir. FZG deney setinde kullanılan diğer iki mil parçaları ile hareket devresini tamamlar. FZG deney setinde kullanılan flanş ile sisteme yükleme yapılır. Sistem belirli zaman aralığında çalıştıktan sonra flanşın somunların çözmesi ile yüklenen yük kaldırılır ve düz dişli numuneler deney setinden çıkartılır. Şekil 2.23’de Universal Torna tezgâhın monte edilen FZG deney seti ve çalışması göstermiştir.



Şekil 2.23. Montajı Yapılan FZG Deney Seti ve Uygulama Çalışması Tezgâhı, Smarc LC360B Universal Torna Tezgâhı.

2.14. Deneyisel Uygulamada Kullanılan Diğer Tezgâhlar

Dişli Çark İmalatı Divizorlu Freze Tezgâhı: Tez çalışmasında numune olarak kullanıldığı düz dişli çark Dişli dünyası firmasında azdırma makinesinde imal edilmiştir. Azdırma makinesi fotoğrafı ek 5’te gösterilmiştir. Azdırma makinesi yuvarlanma metodu ile düz ve açısallı dişli çark açan tezgâhtır. Bu tezgâhlar freze kesicilerinden adını almıştır. Azdırma tezgâhı ile dişli çarklar istenilen kalite ve hassasiyette hızlı ve düşük fiyatta elde edilmiş olur.

Universal Freze Tezgâhı: Bu atölyeden Evrensan markalı freze tezgâhı deney setin düzlem-lamesi ve rulman yatağın imalı için kullanılmıştır. Freze tezgâhı endüstriyel

talaşlı imalatda kullanılan bir çeşit tezgâhtır. Bu tezgâh kendi eksenini çevresinde dönene bir kesici takım vasıtası ile iş parçasından talaş kaldırarak şekillendirme yapan makinedir. Bu tezgâh delme, yüzey işleme, azdırma vb şekil yapma işlemleri için kullanılır.

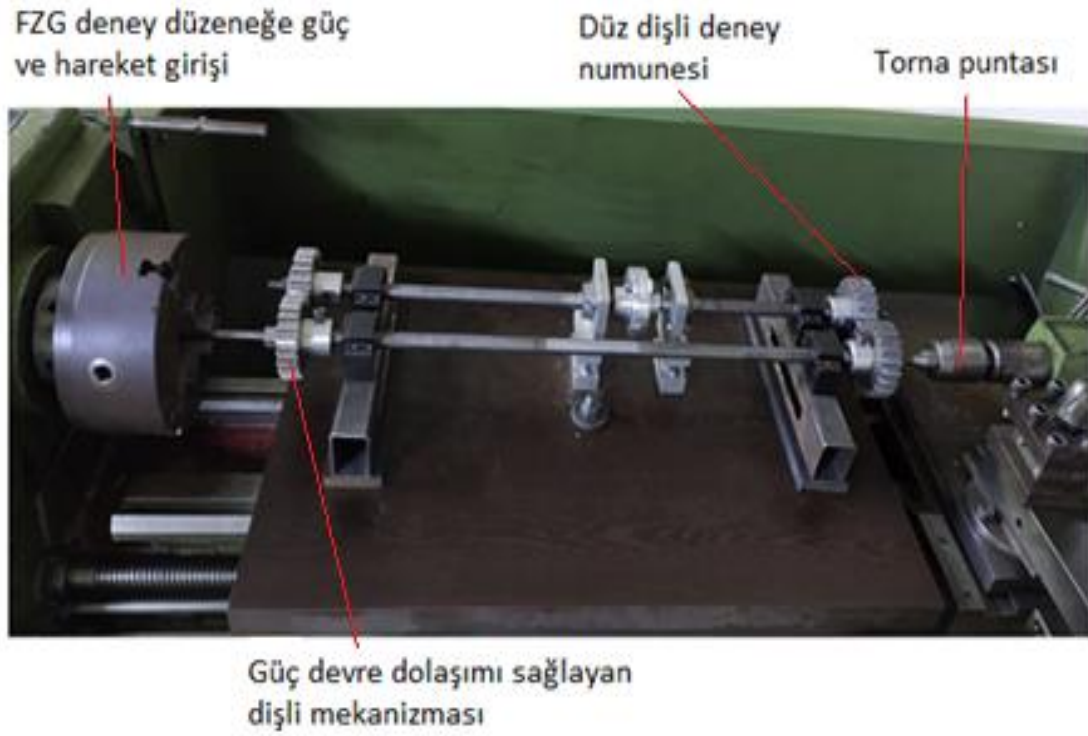
Universal Matkap Tezgâhı: Deney setinin elemanlarının delme işlemi de atölye de bulunan Tezsan markalı matkap kullanılmıştır. Matkap tezgâhı katı parçaların üzerine silindirik delikler açmak için kullanılan tezgâhtır. Matkap tezgâhları çeşitli büyüklükte ve tipte olsa da talaşlı imalat sektöründe görevleri silindirik delik çıkartmaktır.



BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 ARAŞTIRMA METODU

Bu tez çalışmasında araştırma olarak iki farklı aşama belirlenmiştir. İlk aşamada şekil 3.1’de gösterilen FZG deney seti kurulmuştur ve deneysel uygulaması yapılmıştır. Deneysel çalışmada 8 adet düz dişli çarkı numune olarak ele alınmıştır. İkinci aşamada düz dişlilerin çalıştırmasından önce, 250000 dönme tekrarında ve 500000 dönme tekrarından sonra 1/1000 hassas terazi, pürüzlülük ölçer cihazı ve mikroskop ile dişlilerin diş yüzeyinde oluşan aşınma ile ilgili veriler toplanmıştır. Ardından elde edilmiş verilerin analizi yapılmıştır. Şekil 3.1 FZG deneysel uygulama çalışması test düzeneği göstermiştir.



Şekil 3.1 FZG Deneysel Uygulama Çalışması Test Düzeneği

FZG deney setin kullanıma hazır hale geldiğinde, düz dişli deney numuneler dört grup halinde Tablo 3.1’de verilen yükleme, çalıştırma hızı, çalıştırma süresi ve çalıştırma dönme tekrarı kadar çalıştırılır. Toplam çalıştırma dönme tekrarı 500 bin olarak belirlenmiştir. Makine elemanları tasarımın ömür belirlemesinde 500 bin yükleme

tekrarı kırma noktası olarak kabul eder [61]. Bu çalışmada, aşınma olayı dört farklı deney numune düz dişli çark grubu 500 bin dönme tekrarı içinde incelemiştir.

Tablo 3.1. FZG Deney Setinde Deneysel Çalışması Yönlendirme Tablosu.

Deneysel Çalışmanın FZG Deney Setin Çalıştırma Şematiği							
FZG deney setin çalıştırma 1. aşaması				FZG deney setin çalıştırma 2. aşaması			
Dişli çeşidi	Hız (dev/dak)	Çalıştırma süresi (Saat)	Dönme tekrarı	Hız (dev/dak)	Çalıştırma süresi (Saat)	Dönme tekrarı	Toplam dönme tekrarı
Kaplamasız	500	8,3	250000	500	8,3	250000	500000
WS ₂							
WC/C							
MoS ₂							

Deneysel çalışmadan elde edilmiş verilerin analitik analizi yapılmıştır. Böylece düz dişli çarklarda aşınma üzerinde WS₂, WC/C, MoS₂ kaplamaların etkileri gözlemlenmiştir ve karşılaştırmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmada düz dişli çarkın belirli sürede çalışmasından sonra dişlinin diş yüzeyinde oluşan aşınma dağılımı ölçerek tespit edilmiş ve analizleri yapılmıştır. Düz dişliler yük aktarma koşulların her seviyesinde FZG deney seti durdurulmuştur dişlinin diş yüzeyinde gerçekleşen aşınmalar incelenmiştir. Devre dolaşım deney setinde numuneler Tablo 3.2’de gösterilen şartlar altında işleme sokulmuştur.

Tablo 3.2. Düz Dişli Çarka Yükleme ve Çalışma Dönme Tekrarı Tablosu.

Deney Çalışmasında Numunelerin Çalışma Şablonu							
Dişli Sayısı	Kaplama	Yük (Nm)	İşlemden Önce	Dönme Tekrarı	250000 Dönme Tekrarından Sonra	Dönme Tekrarı	500000 Dönme Tekrarından Sonra
2	Kaplamasız	150	Dişlinin diş diş yüzeyinden ölçüm alınacak	250000	Dişlinin diş diş yüzeyinden ölçüm alınacak	500000	Dişlinin diş diş yüzeyinden ölçüm alınacak
2	WS ₂						
2	WC/C						
2	MoS ₂						
2	Muayene çalışmasına girmeyen devre dolaşımı sağlayan düz dişli						

Numuneler çalışma konusuna uygun Evren Dişli atölyesinde azdırma tezgâhında kesilmiştir. Paslanmaz çelikten 8 adet numune silindire diş açtıktan sonra dişlilerin diş yüzeyine 100-180 µm kalınlığında kaplama işlemi gerçekleştirmiştir. Numunelerde bir çift dişli WS₂, bir çift dişli WC/C ve bir çift dişli de MoS₂ malzemesi ile kaplamıştır. FZG deney setinde düz dişli takımlarının boyutsal özellikleri ve kaplama türleri 3.3 tablosunda göstermiştir.

Tablo 3.3. Deneysel Çalışma Seti Düz Dişli Takımları Boyutsal Özellikleri ve Kaplama Çeşitleri.

Numunelerin Özellikleri					
Numune Sayısı	Diş Modülü	Dişli Çapı (mm)	Dişli Bölüm Dairesi Çapı (mm)	Diş Sayısı	Kaplama Özellikleri
2	4	88	80	20	Kaplamasız
2	4	88	80	20	WS ₂ (Tungsten Disulfür)
2	4	88	80	20	WC/C (Tungsten Karbon karpit)
2	4	88	80	20	Mos ₂ (Molibden Disulfür)
2	4	88	80	20	Güç Devre Dolaşımı Sağlayan

3.2. Aşınma Ölçüm Yöntemi

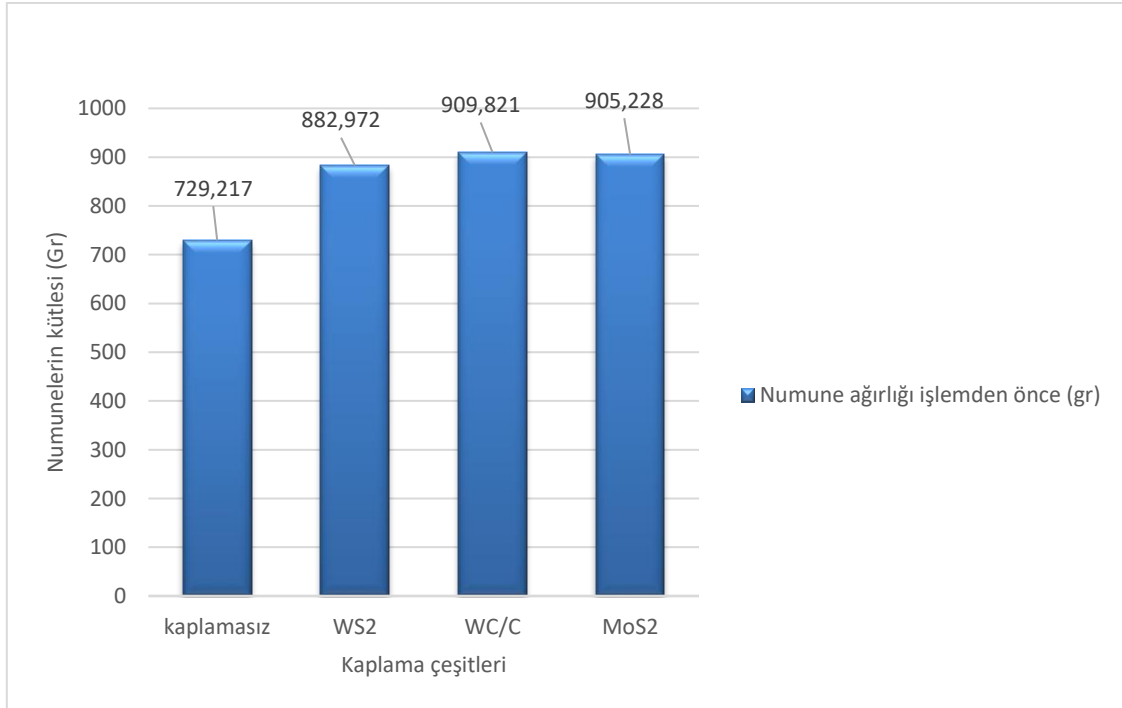
Bilimsel çalışmalarda kaplamanın aşınma üzerindeki etkisini incelemek için farklı yöntemler kullanılır. Hassas terazide ağırlık kaybı ölçümü, yüzeye pürüzlülük cihazı ile aşınan yüzeylerde pürüzlülük değerin ölçümü, normal fotoğraf makinesi veya mikroskop ile görüntü analizi yöntemi gibi aşınma muayene metotları vardır. Bu çalışmada düz dişli numuneler kapladıktan sonra FZG güç devre dolaşımli deney düzeneğinde çalıştırmadan önce ve belirlenen dönme tekrarından sonra mikroskop ile görüntüleri alınır, yüzey pürüzlülük cihazı ile pürüzlülük değeri okunur ve binde bir hassas (1/1000) terazide numunenin kütlesi tartılır. Böylece veriler oluşturulur. Oluşturulan veriler analiz edilir. Analiz sonuçları ile farklı kaplama malzemeleri birbirine karşılaştırılır ve kaplamanın etkisi ise kaplamasız numunenin verileri ile karşılaştırılır.

3.3. İşlemden Önce Düz Dişlinin Diş Profilin Yüzeyleri Muayenesi Yapılarak Veri Oluşturması

Güç devre dolaşımli deney setin montajı yapıldıktan sonra ve düz dişli numunelerin kaplaması yapıldıktan sonra numuneleri deney setinde işleme sokmadan dişlilerin diş yüzeyin ilk muayenesi yapılır. Bu muayenesinde işlemden önce dişlinin binde bir hassa terazide kütle ölçümü yapıldı. Aynı şekilde dişlilerin bir diş işaretlenir ve o dişin yüzeyin pürüzlülük değeri okunur ve mikroskop ile yüzey görüntüsü alınır. Deney çalışması 5 aşamadan geçmiştir. Birinci aşamada numuneler muayene edildi, ikinci aşamada numuneler FZG deney setinde çalıştırıldı, üçüncü aşamada numuneler muayeneye tabi tutuldu, dördüncü aşamada numuneler 500 bin dönme tekrarını tamamlaması için deney setinde işleme sokuldu ve beşinci aşamada numuneler tekrar muayene edildi.

Kaplamasız düz dişli ve WS₂, WC/C, MoS₂ malzemeleri ile kaplamalı olan düz dişlinin Precisa markalı terazi ile kütle tartısı yapılması işlemden önceki halini grafik Tablosu 3.4 de gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Deneysel Çalışmada İşlemden Önce Dişli Numunesinin Kütlesi.



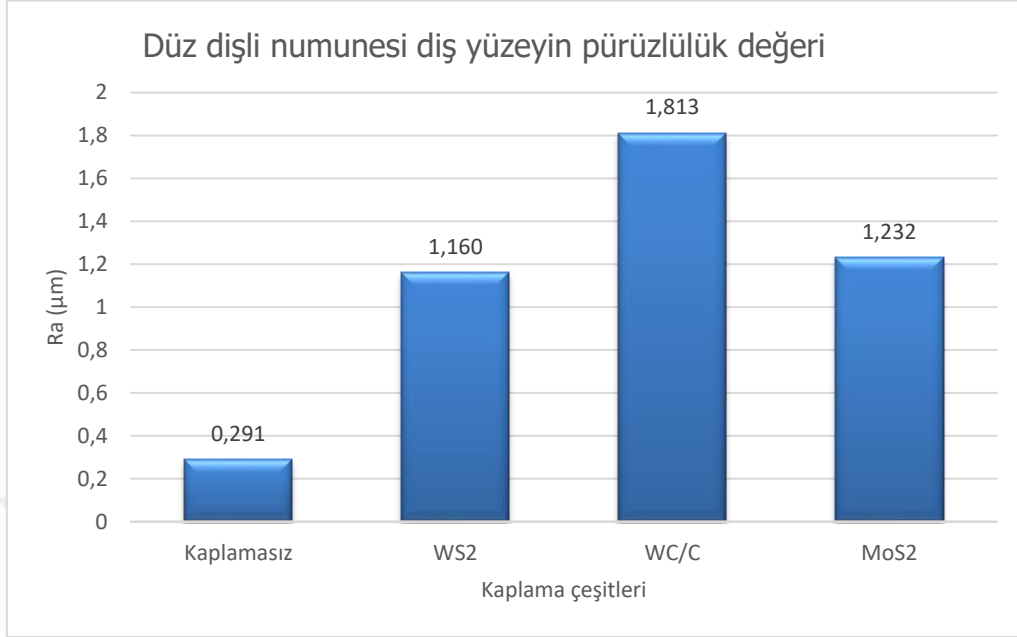
İşlemden önce AISI 316 paslanmaz çelikten imal edilen kaplamasız düz dişlinin ve WS₂, WC/C, MoS₂ malzemeleri ile kaplamalı olan düz dişlinin Mitutoyo pürüzlülük ölçer cihazı ile diş yüzey pürüzlülük değeri okunmuştur ve pürüzlülük değerleri Tablo 3.5’te

Tablo 3.5 Düz Dişli Deneyisel Çalışmasında Önce Diş Profilin Yüzeyinde Oluşturduğu Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

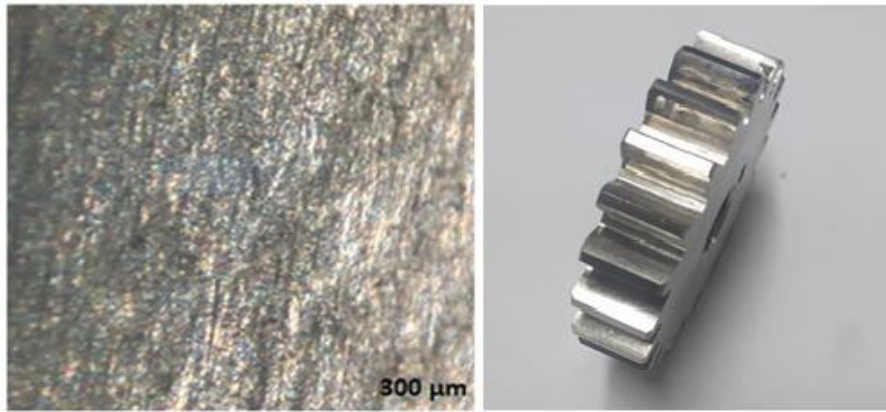
Düz Dişli Tipleri	Ra(μm) Ölçü - 1	Ra(μm) Ölçü - 2	Ra(μm) Ölçü - 3	Ra(μm) Ölçü - 4	Ra(μm) Ölçü - 5	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü, Ra (μm)
Kaplamasız	0,164	0,277	0,329	0,231	0,453	0,291
WS ₂	1,206	1,028	1,201	1,136	1,244	1,160
WC/C	1,649	1,832	1,679	1,841	2,062	1,813
MoS ₂	1,096	1,103	1,389	1,149	1,421	1,232

Deney çalışmanın düz dişli yüzey pürüzlülük grafiğine bakıldığında, kaplamasız düz dişli diş profil yüzeyin pürüzlülük değeri kaplamalı düz dişli diş yüzey pürüzlülük değerlerinden dört kat küçük olduğunu tespit edilmiştir. Düz dişli diş yüzey pürüzlülük ortalama ölçüm değerleri sütunlu grafiği 3.6’te verilmiştir.

Tablo 3.6. Deneysel Çalışmada Düz Dişli Diş Yüzeyin İşlemden Önce Yüzey Pürüzlülük Değerleri.



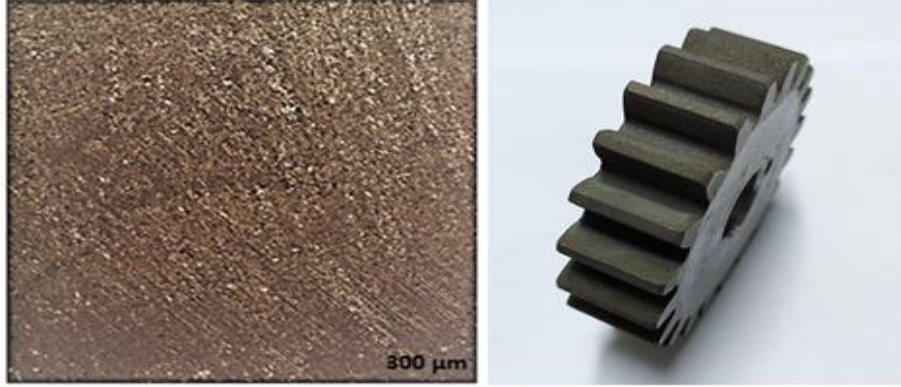
AISI 316 çelikten üretilen 8 adet düz dişliden iki tanesi kaplamasız olarak FZG deney setinde aynı şartlar altında işleme sokulmuştur. Kaplamasız düz dişli numune çifti işleme sokmadan önce kaplamalı numunelerde diş yüzey muayene uygulaması yapıldığı gibi bir çift kaplamasız düz dişliye de diş yüzey muayene uygulaması yapılmıştır. Şekil 3.2’de AISI 316 paslanmaz çelik malzemesinden imal edilen kaplamasız düz dişli diş yüzeyin mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.2. İşlemden Önce Kaplamasız Dişlinin Diş Yüzeyin Görüntüsü.

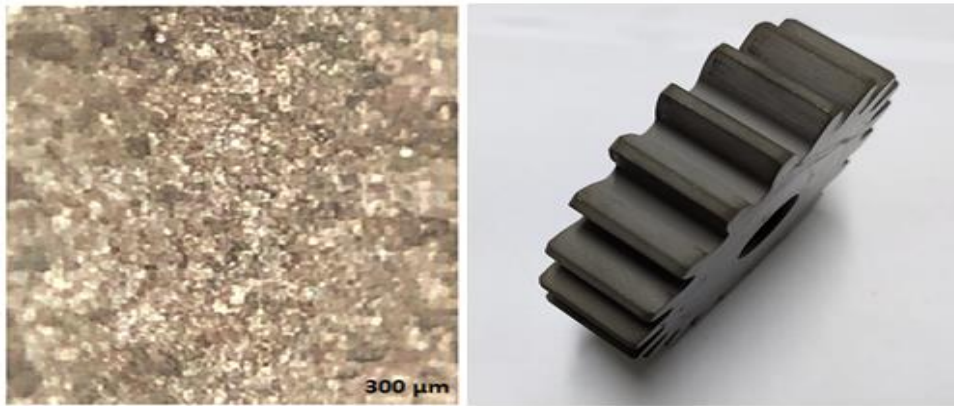
FZG deney setinde numuneleri çalıştırma işleminden önce WS₂ malzemesi ile kaplama yapılmış düz dişli çark numunesini muayene için diş yüzeyinden mikroskopla görüntüsü

alınmıştır. Bu görüntü gösteriyor ki kaplama malzemesi diş yüzey alanına heterojen bir şekilde dağılmıştır. Şekil 3.3’de İşlemden önce WS₂ kaplamalı düz dişlinin diş yüzeyin mikroskobik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.3. İşlemden Önce WS₂ Kaplamalı Düz Dişlinin Diş Yüzeyin Görüntüsü.

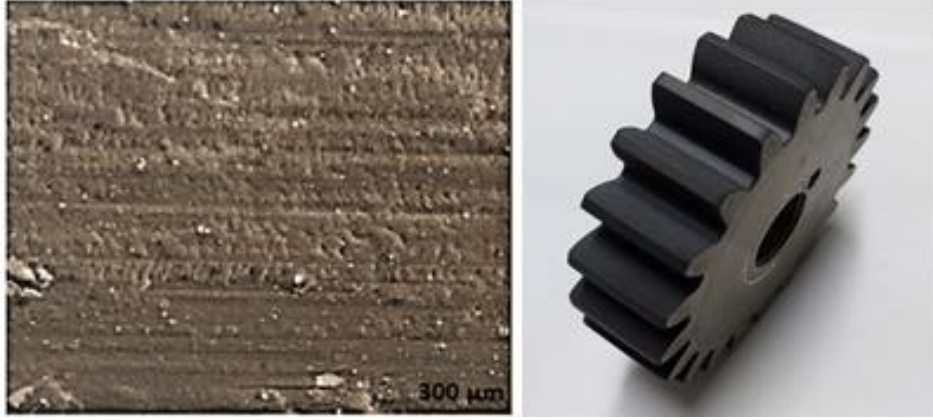
İki çift düz dişliye WC/C kaplama malzemesi ile kaplama işleme uyguladıktan sonra ve FZG deney setinde çalıştırma işleme sokmadan önce yüzey muayenesi yapıldı. Mikroskop görüntüsünde, kaplama malzemesi taneleri ve atomları birim alanda biriktirme yoğunluğu diğer iki kaplama malzemelerine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.4’de işlemden önce WC/C kaplamalı düz dişlinin diş yüzeyin mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.4. İşlemden Önce WC/C Kaplamalı Düz Dişlinin Diş Yüzeyin Görüntüsü.

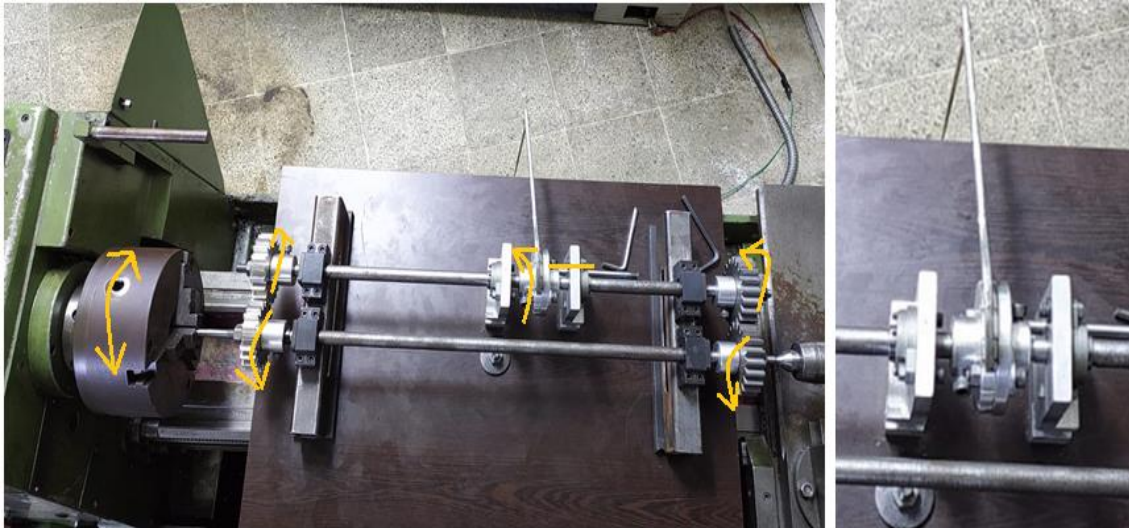
Çalıştırma işleminden önce AISI 316 paslanmaz çelikten imal edilen MoS₂ kaplamalı düz dişlinin diş yüzeyinden mikroskop ile görüntü alınmıştır. Kapsama malzemesi diş profil yüzeyine heterojen bir şekilde dağıldığını gözlemlenmiştir. MoS₂ kaplamalı düz

dişlinin diş yüzeyin Nikon SMZ800N stereo mikroskop görüntüsü Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5. İşlemden Önce MoS₂ Kaplamalı Düz Dişlinin Diş Yüzeyin Görüntüsü.

Uygulamada ikinci aşamasında, deney çalışması düz dişli diş yüzeyin muayenesinden sonra deney numuneleri FZG güç devre dolaşımli deney setine çalıştırması için bağlanır. Siteme flanş çifti ile yükleme yapılır ve sistem işleme çalıştırılır. Numuneler 250000 dönme tekrarından sonra oluşan aşınmalar analiz edebilmek için yeniden veriler ölçüm değerleri toplanır. Şekil 3.6’de deneysel uygulama 2. aşama düz dişli numunesi FZG deney setine bağlama ve sisteme 150 Nm tork yükleme yapılama işlemi ve deney seti çalıştırma durumuna hazır hale getirme işlemi gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Uygulama Çalışması FZG Deney Setine 150 Nm Tork Yükleme.

3.4. Deneysel Çalışma 250.000. Dönme Tekrarından Sonra Dişlinin Muayenesinin Yapılması

Deney numuneleri ve FZG deney seti hazır olduktan sonra önce düz dişlinin dış yüzeyinden veriler toplanır. Bu veriler hassas terazide kütle ölçümü, mikroskopla yüzey taraması ve yüzey pürüzlülük değerini ölçmektir. Ardından kaplama yapılmamış bir çift düz dişliyi devre dolaşımli deney setinde 250000 dönme tekrarı (yaklaşık 8 saat çalışması süresinde) deney setinde çalıştırıldı. Ondan sonra aşınma muayenesi için deney setinden numuneleri çıkartılıp hasar görmeden bir zarf içinde saklanır.

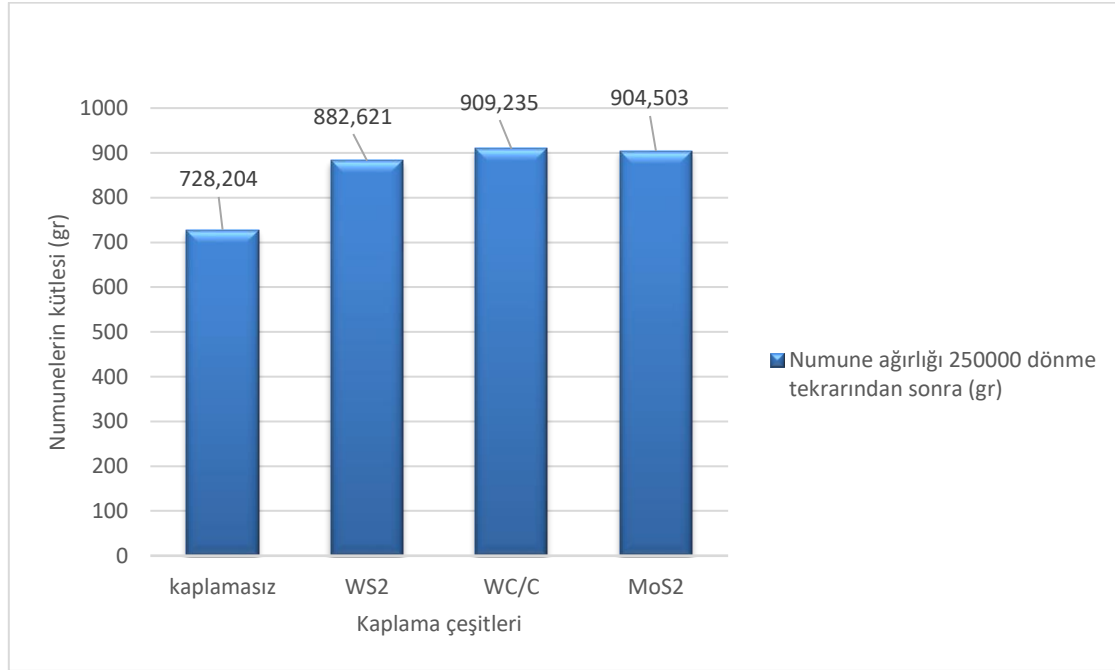
Tüm numuneler FZG deney setinde 500 dev/dak açısal hız ile çalıştırıldı. Tüm deney aşamalarında düz dişli numuneler 150 Nm tork, (250000 dev) / (500 dev/dak) ki eşittir 500 dakika veya 8,33 saat sürecine ve diğer ortak çalıştırma şartları altında çalıştırıldı.

Buna benzer ikinci aşamada WS₂, WC/C ve MoS₂ malzemesi ile dişlinin dış yüzeyi kaplanmış numuneleri devre dolaşımli deney setinde 250000 dönme tekrarı kadar çalıştırılır. Yine dış yüzeyinde oluşan aşınma tespiti için numune çifti deney setinden çıkartılıp hasar görmemesi özen göstererek bir zarf için saklanır.

Üçüncü aşamada ise kaplamasız, WS₂, WC/C ve MoS₂ katı yağlayıcı malzemesi ile kaplama yapılmış düz dişli çarklar dış yüzey muayene uygulamasına tabi tutulur. Hasar tespiti için muayeneye uygun ortamda bekletilir. Tüm numuneler güç devre dolaşımli deney setinde çalıştırdıktan sonra 1/1000 hassas terazi ile numuneler tartılır, işaretlenmiş dış yüzeyinden pürüzlülük değer okunur ve aynı işaretlenmiş dış yüzeyinden elektro mikroskop ile görüntü alınır. Dişli dış yüzey muayene sonucu verileri ile hasar tespiti yapılır.

Deneysel çalışmada ağırlık ölçümleri, kaplamasız düz dişlinin ve WS₂, WC/C, MoS₂ malzemeleri ile kaplamalı olan düz dişlinin Precisa markalı terazi ile kütle tartısı yapılmıştır. 250.000 dönme tekrarında sonra numunelerin ağırlık değerleri grafiği 3.7’de gösterilmiştir. Ölçülerin değerleri incelendiğinde en fazla ağırlık kaybı WC/C kaplamalı düz dişlide olduğu en az ise kaplamasız düz dişlide olduğu gösterilmektedir.

Tablo 3.7. Düz Dişli Numunenin 250 bin dönme tekrarından sonra Kütlesi.



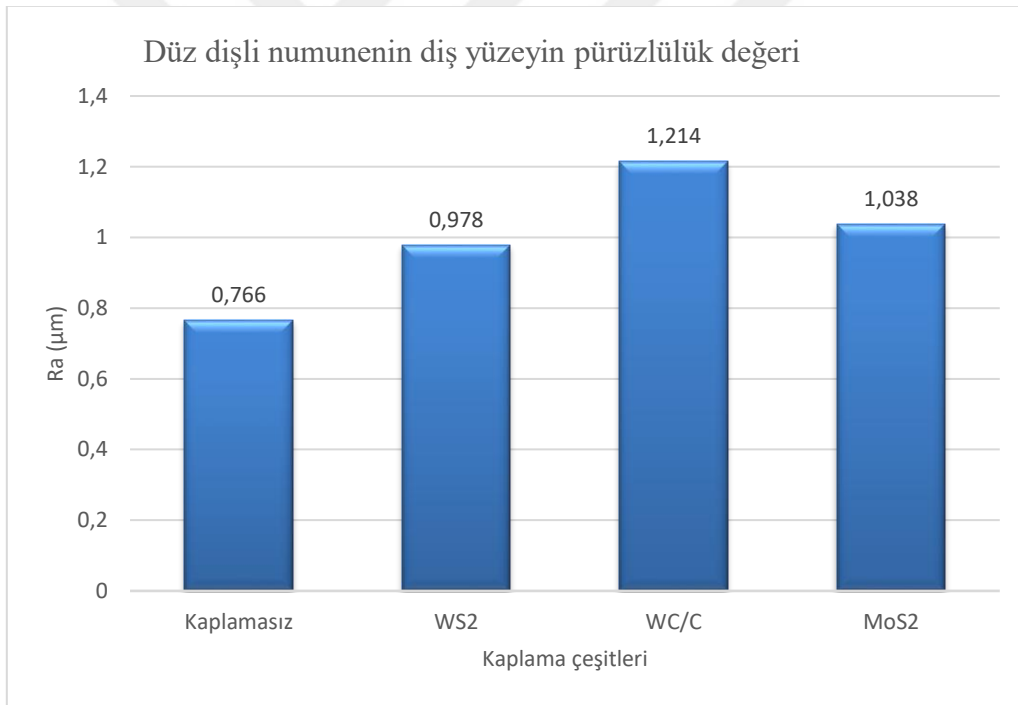
Deneysel uygulamada yüzey pürüzlülük değeri okuması, 250000 dönme tekrarında sonra AISI 316 paslanmaz çelikten imal edilen kaplamasız ve MoS₂, WS₂, WC/C malzemeleri ile kaplamalı düz dişlinin diş yüzeyinde yapılmıştır. Pürüzlülük değerler incelendiğinde en kaliteli yüzey kaplamasız dişli ve en kalitesiz yüzey WC/C kaplamalı dişlinin yüzeyi çıktığını tespit edilmiştir. Elde edilen veriler Mitutoyo pürüzlülük ölçer cihazı ile okundu ve diş yüzey pürüzlülük değeri 3.8 tablosunda verilmiştir.

Tablo 3.8. Düz Dişli Çarkın 250000 Dönme Tekrarından Sonra Diş Profilin Yüzeyinde Oluşturduğu Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

Düz Dişli Tipleri	Ra (μm) Ölçü - 1	Ra (μm) Ölçü - 2	Ra (μm) Ölçü - 3	Ra (μm) Ölçü - 4	Ra (μm) Ölçü - 5	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü, Ra (μm).
Kaplamasız	0,910	0,512	0,825	0,746	0,837	0,766
WS ₂	1,257	1,213	0,913	0,723	0,783	0,978
WC/C	1,217	0,927	1,081	1,381	1,463	1,214
MoS ₂	1,021	1,102	0,916	1,204	0,946	1,038

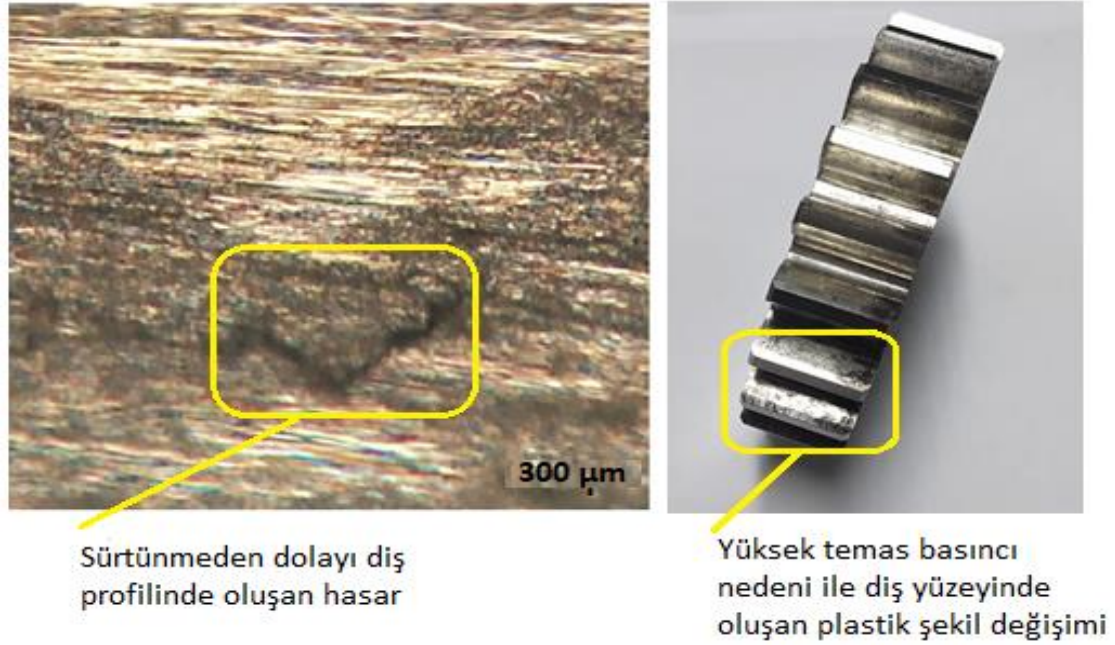
Deneysel çalışma düz dişli diş yüzey kalitesi verilerine bakıldığında, numunelerin ikinci aşama deneysel uygulamasından, kaplamasız düz dişli diş yüzey pürüzlülük değeri çalıştırma öncesi değerine göre yüksek bir değer olduğu tespit edilmiştir. Bunu nedeni de kaplamasız düz dişli çifti çalıştırma sırasında ve yük aktarma sırasında sürtünmeden dolayı yüzey kalitesi düşer diye yorumlanabilir. Kaplamasız numunelere tam zıt bir şekil’de kaplamalı düz dişli diş yüzey pürüzlülük değerleri 250000 dönme tekrarından sonra işlem öncesi yüzey pürüzlülük değerine göre düşük değerleri sahip olduklarına tespit edilmiştir. Deney çalışması 250000 dönme tekrarından sonra düz dişli diş yüzey pürüzlülük ortalama ölçüm değerleri sütunlu grafiği 3.9’te verilmiştir.

Tablo 3.9. Düz Dişlinin Diş Yüzeyin 250000 Dönme Tekrarından Sonra Pürüzlülük Değerler Tablosu.



Deneysel çalışmada kaplamasız dişlinin diş yüzey mikroskop görüntüsü incelendiğinde, diş yüzeyinde plastik şekil deformasyonu görülmüştür. Bölgesel plastik şekil değişimine sürtünme kuvveti neden oluğunu yorumlana bilmektedir. Düz dişli diş yüzeyi katı yağlayıcı özelliği sahip kaplama malzemesi ile kaplama işlemi uygulamakla, bağlı hareketi sırasında diş yüzeylerde oluşan sürtünme kat sayısını azaltılır. Kaplamasız düz dişli diş yüzeyinde oluşan diğer hasar, diş yüzeyinde mini kırıklar mikroskop

görüntüsünde görülmektedir. Şekil 3.7’de dişli diş yüzeyinde 250000 dönme tekrarında sonra oluşan yüzey aşınması gösterilmiştir. Tüm mikroskop çalışmasında dişlilerde alınan görüntüler 300 µm olarak alınmıştır.



Şekil 3.7. Deneysel Uygulama 250000 Dönme Tekrarından Sonra Kaplamasız Düz Dişli Yüzey Mikroskop Görüntüsü.

WS₂ kaplamalı düz dişlinin diş yüzeyi 250.000. dönme tekrarında sonra mikroskop görüntüsü incelendiğinde, Mikroskop görüntülerinde, kaplama sandviç birbiri üzerinde kayma yapıldığını ve sürtünme kuvvetine karşı direnmediğini gösterir.

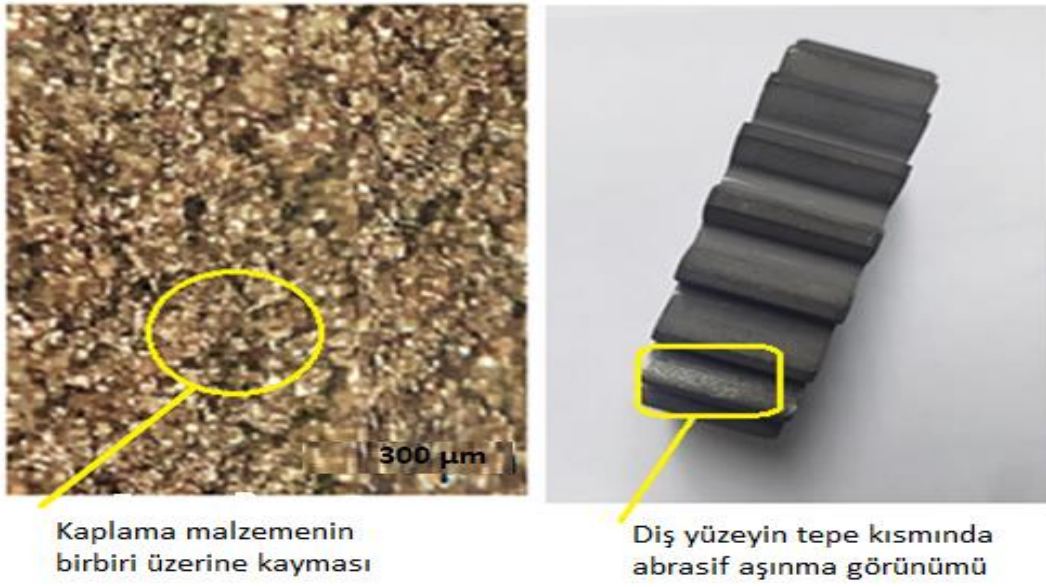
Kaplama işlemi ile sürtünme kat sayısı azalması sağlanmıştır. Böylece düz dişli diş yüzeyinde aşınma oluşum hızı düşmüş olduğu tespit edilmiştir. Deneysel çalışma sonrası (250.000. dönme tekrarı işleminden sonra) diş yüzeyinde oluşan hasar Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Deneysel Uygulama 250000 Dönme Tekrarından Sonra WS_2 Kaplamalı Düz Dişli Yüzey Mikroskop Görüntüsü.

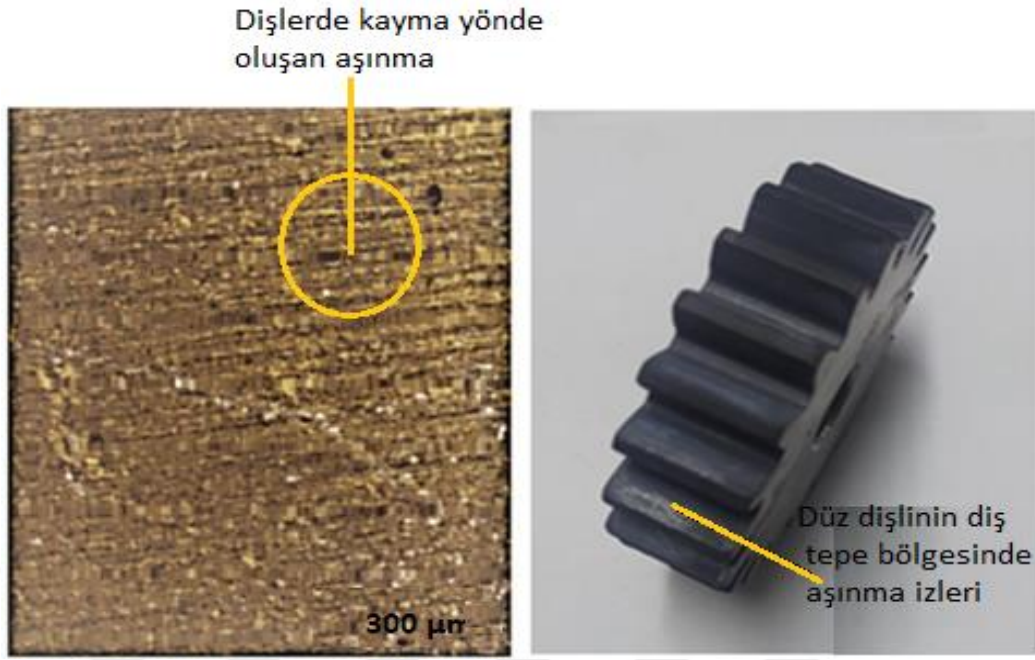
WC/C kaplama malzemesi mekanik açıdan diğer iki kaplama malzemesine göre daha sert olduğundan diş yüzey mikroskop görüntüsünde kaplama tabakasında kırılma görünmektedir. WC/C ile kaplanmış düz dişli çiftinde, kaplama malzeme taneleri birbiri üzerine kayması WS_2 ve MoS_2 kaplama malzemelerine göre az olduğunu tespit edilmiştir.

WC/C kaplama malzemenin yüzey sertlik değeri yüksek olduğundan diş yüzeylerde zorlanmadan dolayı şekil deformasyonu oluşmamıştır. Şekil 3.9’da deneysel uygulama 250.000. dönme tekrarından sonra WC/C kaplamalı düz dişli yüzey mikroskop görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Deneysel Uygulama 250000 Dönme Tekrarından Sonra WC/C Kaplamalı Düz Dişli Yüzey Mikroskop Görüntüsü.

250.000. dönme tekrarından sonra MoS_2 kaplamalı düz dişlinin diş yüzeyi Nikon SMZ800N Stereo Mikroskop altında görüntüsü incelendiğinde, dişli diş yüzeyin tepe kısmında ve dip kısmında kayma hareketi bulunduğu noktalarda aşınmalar olduğu gözlemlendi. MoS_2 kaplama malzemenin sertlik derecesi diğer iki kaplama malzemesine göre düşük olduğundan, beklendiği gibi dişli yüzeyi yüksek çizgisel basınç altında şekil değiştirmiştir. Bu yumuşaklık özelliği sürtünme katsayısının olumlu etkilediği de gözlemlenmiştir. Mikroskop muayenesi uygulamasında tüm dişli yüzeylerinden 300 µm olarak görüntüler alınmıştır. Şekil 3.10. Deneysel Uygulamada 250.000. dönme tekrarından sonra MoS_2 kaplamalı düz dişli yüzey mikroskop görüntüsü.



Şekil 3.10. Deneysel Uygulamada 250000 Dönme Tekrarından Sonra MoS₂ Kaplamalı Düz Dişli Yüzey Mikroskop Görüntüsü.

Deneysel çalışmada; 250.000. dönme tekrarından sonra dişlinin diş yüzey mikroskop görüntüleri ve çalışmasından önceki görüntüsü incelendiğinde WS₂ ve WC/C kaplamalı malzemeleri az hasar gördükleri ondan sonra MoS₂ malzemesi ile kaplama yapılmış düz dişli diş yüzeyinin daha çok aşındığı tespit edilmiştir. En çok belirgin aşınma kaplanmamış dişlide görülmektedir. WC/C kaplaması diğer iki kaplama malzemesine göre daha sert olduğundan pitting aşınmayı kendinden gösteriyor. Kaplanmamış diş profilin yüzeyinde çatlak ve plastik şekil deformasyon gözlemlenmiştir. Bu şekil değişikliğinin nedeni sürtünme ve yüzey kalitesi olduğundan tespit edilmiştir.

Bu demek oluyor ki bu çalışmada kullanılan kaplama malzemeleri diş ana malzemeler arasında film oluşturma yanında sürtünmeyi azaltıcı görevi de kendilerinden gösterilmiştir. Ne kadar MoS₂ katı yağlayıcı özelliği gösterse de WS₂ kaplama malzemesinin katı yağlayıcı özelliğinin yanında yüzey sertlik açısından aşınmaya karşı daha yüksek mukavemeti kendinden gösterdiğini tespit edilmiştir.

Numunelerin yüzey muayenesinden sonra dördüncü deneysel çalışma aşaması olarak tekrar düz dişli çiftleri güç devre dolaşımında deney setinde işleme sokulmuştur. Dördüncü aşama deneysel çalıştırmasında düz dişli çarklar 500.000. dönme tekrarı (8,3 saat)

tamamlanmış olur. FZG güç devre dolaşımli deney setinde numuneler belirlenen devir tekrarından sonra tekrar 1/1000 hassas terazide tartılır, pürüzlülük ölçer ile yüzey pürüzlülük değerleri okunur ve elektro mikroskopla yüzey görüntüsü alınır.

3.5. Deneyisel Çalışma 500.000. Dönme Tekrarından (8,3 saat) Sonra Dişlinin Muayenesinin Yapılması

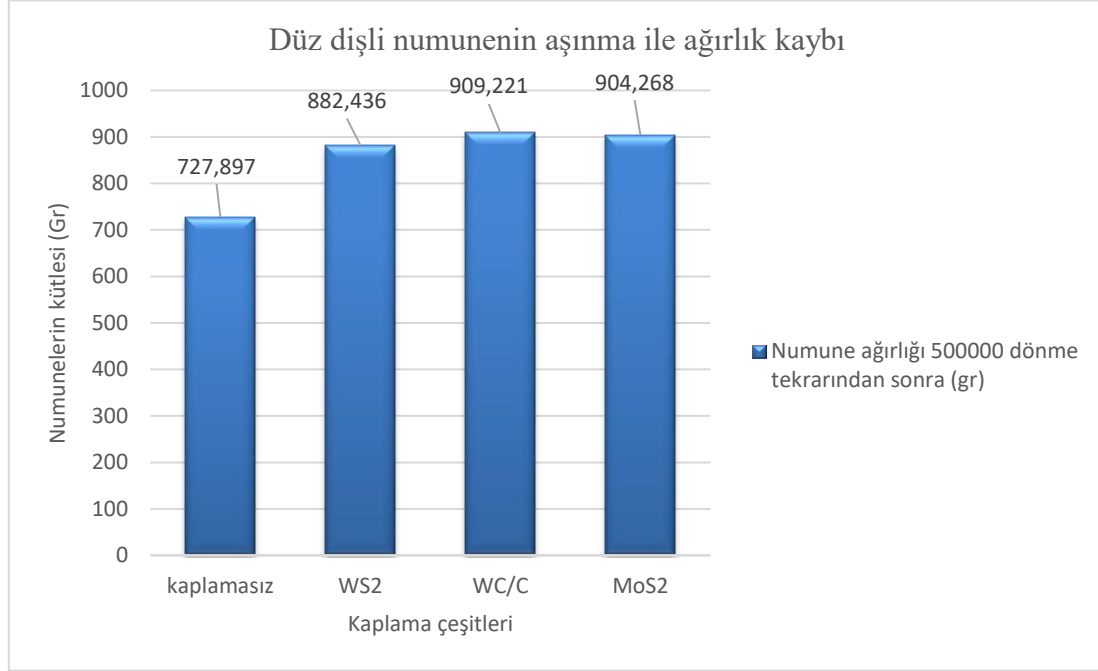
Düz dişlileri güç devre dolaşımli deney setinde 250000 dönme tekrarında sonra son aşama ki işleme sokmadan önce düz dişlinin diş yüzeyinden veriler toplanmıştır. Bu veriler binde bir hassas terazide kütle ölçümü, yüzey pürüzlülük değeri ölçmesi ve mikroskopla yüzey taraması işlemidir. Ondan sonra kaplama yapılmamış düz dişliyi devre dolaşımli deney setinde 500.000. dönme tekrarı (8,3 saat) tamamlaması için deney altıda tutup aşınmasını devam ettirmiştir.

Kaplamasız düz dişli çifti dördüncü işlem aşaması içi FZG deney setinde 500 bin dönme tekrarı uyguladıktan sonra aşınma muayenesi için deney setinden numune çifti çıkartıp hasar görmeden bir zarf içinde saklamıştır. Dördüncü aşamada WS_2 malzemesi ile dişlinin diş yüzeyi kaplamış numuneleri devre dolaşımli deney setinde 500.000. dönme tekrarını tamamlaması amacıyla çalıştırılmıştır. Yine diş yüzeyinde oluşan aşınma tespiti için numune çifti deney setinden çıkartılıp hasar görmemesine özen göstererek bir zarf için saklamıştır. Buna benzer WC/C katı yağlayıcı malzemesi ile kaplaması yapılmış düz dişli çark deney setinde deneye tabi tutulmuştur.

Aynı çalıştırma şartları altında bu numune de 500.000. dönme tekrarını (8,3 saat) tamamlaması için deney setinde çalıştırmıştır. Ondan sonra düz dişli çark çifti devre dolaşımli deney setinden çıkartılmıştır. Hasar tespiti için muayeneye bekletilmiştir. Belirlenen dönme tekrarının tamamlaması içi MoS_2 malzemesi ile kaplamalı numune çifti deney düzeneğinde 500.000. dönme tekrarına(8,3 saat) kadar yük altıda çalıştırmıştır. Ardından devre dolaşımli deney setinden numuneler çıkartılmıştır ve aşınma muayenesi için uygun bir zarfta saklanmışlardır. Tüm numuneler güç devre dolaşımli dene setinde çalıştırdıktan sonra aşağıdaki hasar tespiti ve aşınma tatbikleri yapılmıştır.

Kaplamasız düz dişlinin ve WS_2 , WC/C , MoS_2 malzemeleri ile kaplamalı olan düz dişlinin kütleleri Precisa markalı terazi ile tartma işlemi yapılmıştır. Ağırlık kaybı olarak belirlenen aşınma tespiti için elde eden veriler grafiği 3.10’de gösterilmiştir.

Tablo 3.10. Deneysel Çalışmada Düz Dişli Numunenin 500000işlemden Sonra Ağırlığı.



500.000. dönme tekrarında (8,3 saat) sonra AISI 316 paslanmaz çelikten imal edilen kaplamasız düz dişlinin ve WS_2 , WC/C , MoS_2 malzemeleri ile kaplamalı olan düz dişlinin Mitutoyo pürüzlülük ölçer cihazı ile pürüzlülük değerleri Tablo 3.11’de verilmiştir.

Tablo 3.11. Deney Çalışmasında Düz Dişli Çarkın 500000 Dönme Tekrarından Sonra Diş Profili Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

Düz dişli Tipleri	Ra (μm) Ölçü - 1	Ra (μm) Ölçü - 2	Ra (μm) Ölçü - 3	Ra (μm) Ölçü - 4	Ra (μm) Ölçü - 5	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Ra (μm)
Kaplamasız	0,789	0,876	0,822	0,854	0,781	0,824
WS_2	1,034	0,878	0,928	0,532	0,472	0,531
WC/C	1,112	0,819	0,756	0,831	1,062	0,732

MoS ₂	0,623	0,507	0,489	0,824	0,891	0,667
------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Aşınma deney düzeneğinde numuneleri 500.000. dönme tekrarında (8,3 saat) sonra, aşınma muayenesi işlemi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, kaplamalı numunelerin diş yüzey pürüzlülük değeri düşmeye devam etmiştir. Kaplama yapılmamış düz dişlinin diş yüzeyin pürüzlülük değeri 250.000. dönme tekrarına kadar artış göstermişti ve son işlemde yani 500.000. dönme tekrarından sonraki yüzey pürüzlük değeri düşük değer göstermiştir. Kaplama yapılmamış düz dişli çark çiftinde plastik şekil değişimi devam etmiştir ama bu tip aşınma kaplama yapılmış düz dişli numunelerin diş yüzeylerinde görünmemektedir. Deney çalışması 500.000. dönme tekrarından (8,3 saat) sonra düz dişli diş yüzey pürüzlülük ortalama ölçüm değerleri sütunlu Tablo 3.12’de verilmiştir.

Tablo 3.12. Düz Dişlinin Diş Yüzeyi 500000 Dönme Tekrarından Sonra Pürüzlülük Değeri Grafiği.



Dişli mekanizma çalıştırmasında dişli diş yüzeyi birbirine temas etmemesi için genellikle yağ kullanılır. Yağ maddesi diş yüzeylerde film tabakası oluşturur böylece sürtünme kuvveti azalır. Yağ kullanımı mümkün olmadığı uygulamalarda diş yüzeyi katı yağlayıcı kaplama malzemeleri ile birbirinde ayrılmasına sağlar. Deney çalışmasında, kaplamasız düz dişli yüzey mikroskop görüntüsü incelendiğinde, dişler

bağlı hareket sırasında birbiri üzerine kayma sırasında sürtünmeden dolayı plastik şekil deformasyona uğradığını tespit edilmiştir. Şekil 3.11’de plastik şekil deformasyonu malzeme içinde mini çatlaklara neden olarak aşınma oluşumu ve yüzey hasarı oluşumun gelişmesi göstermiştir.



Şekil 3.11. Deney Çalışmada 500000 Dönme Tekrarından Sonra Kaplamasız Düz Dişli Yüzeyi Mikroskop Görüntüsü.

Deney çalışmasında 500.000. dönme tekrarında (8,3 saat) sonra mikroskop görüntüsü incelendiğinde, WS_2 kaplamalı düz dişli numunesi MoS_2 kaplamalı düz dişli yüzey aşınmasına benzer hasar göstermiştir. Tungsten elementi iki sülfür elementi arasında kaldığından sandviç bir kaplama tabakasını oluşturmuştur.

Diş yüzeye paralel kuvvet etkilediğinde bu sandviç yapısı kaplama malzemesi yüzeye direnç göstermeden şekil değişimi gösterir. Böylece yüksek değerlerde sürtünme kuvveti oluşmasına engeller ve aşınma oluşumu kaplamasız duruma göre az oluşur. Şekil 3.12’de sürtünme kuvveti nedeni ile kaplama tabakası hareket yöne zıt direnç göstermeden şekil değişimine uğradığını göstermiştir.

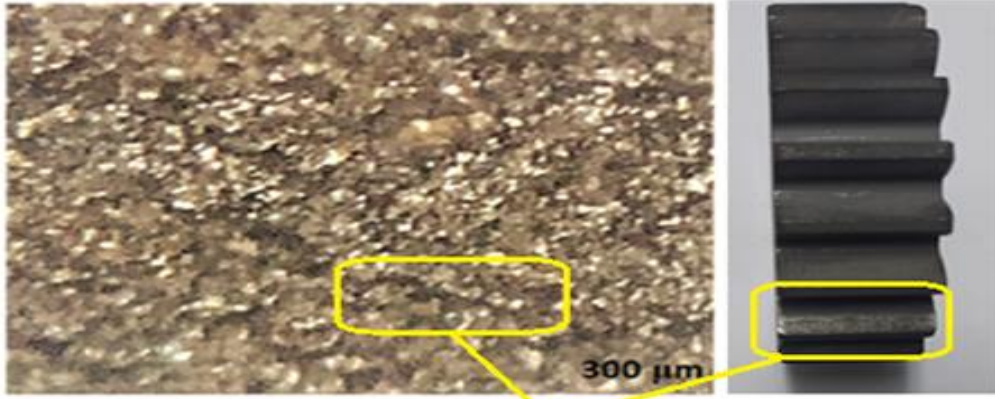


Şekil 3.12. Deney Çalışmada 500000 Dönme Tekrarından Sonra WS₂ Kaplamalı Düz Dişli Yüzeyi Mikroskop Görüntüsü.

Deney çalışmasında 500.000. dönme tekrarından (8,3 saat) sonra WC/C kaplamalı dişli yüzeyinde oluşun hasarı mikroskop görüntüsünde incelendiğinde, çizgisel aşınma diş yüzeyin tepe ve dip kısmında görüldüğü tespit edilmiştir.

Diş profilin bölüm dairesi geçen bölgede bağlı hareket sırasında diş yüzeylerin birbiri üzerinde kayma hareketi sahip olmadığı için bu bölgede aşınma oluşumu az görünmektedir.

WC/C kaplaması sandviç bir tabaka yapısına sahip olmadığı için kayma gerilmesinden dolayı plastik şekil değişim diş yüzeyinde görünmemiştir. Şekil 3.13. Deneysel çalışmada 500.000. dönme tekrarından sonra (8,3 saat) WC/C kaplamalı düz dişli yüzeyi mikroskop görüntüsü gösterilmiştir.



WC/C kaplama malzemesi sert bir malzeme olduğundan çizgisel aşınma az olmuştur

Şekil 3.13. Deneysel Çalışmada 500000 Dönme Tekrarından Sonra WC/C Kaplamalı Düz Dişli Yüzeyi Mikroskop Görüntüsü.

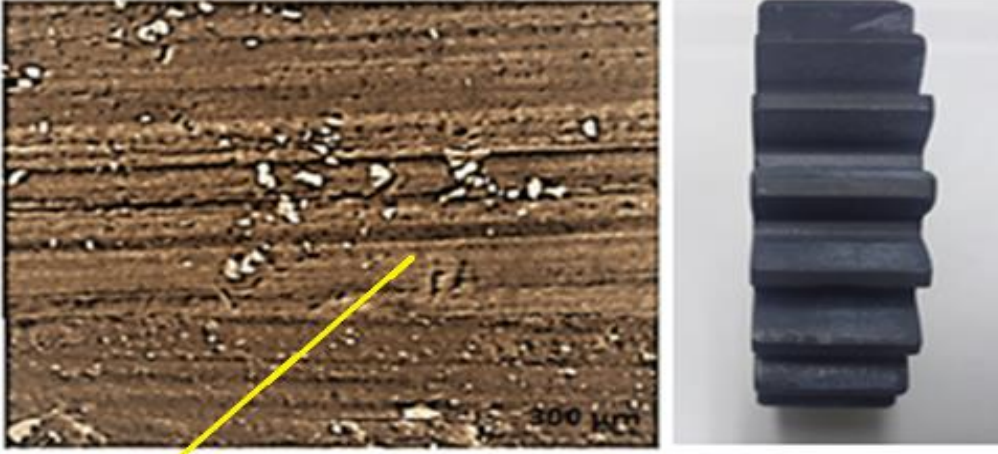
Deneysel Çalışmada 500.000. dönme tekrarından (8,3 saat) sonra AISI 316 paslanmaz çelikten imal edilen MoS_2 , kaplamalı düz dişlinin diş yüzeyin Nikon SMZ800N Stereo Mikroskop altında görüntüsü şekil 3.14de verilmiştir.

Mikroskop görüntüyü incelendiğinde, kaplama malzemesi kendi tabakası içinde kayma oluşturmıştır.

Dişler birbirine bağıl hareketi sonucunda yüzeyler birbiri üzerine kayar.

Kayma sırasında oluşan sürtünme kuvveti MoS_2 kaplamalı dişli numunesinde en az olduğunu tespit edilmiştir.

Bağıl hareketi sırasında direnç göstermeyen MoS_2 kaplaması aşınma oluşumu az gerçekleştiği tespit edilmiştir.



Dışlı profilleri birbirine kayması ile birlikte kaplama malzemesinin sandeviç tabakaları birbiri üzerine kayarak sürtünmeyi azaltır

Şekil 3.14. Deneyisel Çalışmada 500000 Dönme Tekrarından Sonra MoS₂ Kaplamalı Düz Dışlı Yüzeyi Mikroskop Görüntüsü.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Deney Numuneleri FZG Setinde Çalışması Sürecine Kadar Yapılan İşlemler ve Aşamalar

FZG (Güç devre dolaşımli deney seti) Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesinin Laboratuvarlarında imal edilmiştir. Deney seti parçalarının imalatında, numunelerin kaplama işlemlerinde ve hassas tribolojik ölçümlerinde Evren Dişli Makine, Prokap Makine ve Şirvanlı Alüminyum İmalat ve Döküm Firmalarından destek alınmıştır.

Deneyisel Çalışmada FZG deney seti hareket ve gücü ileten miller, yatakları taşıyan ayaklar, yük yükleme kolu, sisteme yük yükleme flanşları, flanş çifti taşıyan miller, milleri destekleyen rulmanlı ayak ve deney setinin tablası mühendislik tasarımına uygun olarak laboratuvar imkânları kullanılarak imalatını gerçekleştirdik.

AISI 316 paslanmaz çelikten düz dişliler Evren Dişli atölyesinin desteği ile dişli imalatları yapıldı. Ardından, açılan düz dişliler belirlenen kaplama malzemesi ile kaplaması için Prokap Makine firmasına gönderilmiştir. Numunelerin kaplamasından sonra düz dişlileri binde bir hassas terazide tartıp kütle belirlemesi yapılmıştır. Müteakip düz dişli numunelerin diş yüzey profilin pürüzlülük değeri ve mikroskopla diş yüzeyin görüntüsü Alüminyum İmalat ve Döküm firmasının atölyesinde muayene edilmiştir. Deney setinde kullanılan paslanmaz çelik malzemesi, rulmanlar ve cıvatalar ve diğer parça malzemeleri tedarik edilmiştir.

Numuneler beş aşama olarak deney çalışmasına tabi tutulmuştur. İlk aşamada, numuneleri deney setinde çalıştırmadan önce yüzey muayenesi yapılmıştır. Verileri elde ettikten sonra FZG deney setin montajı yapılmıştır ve Smarc LC360B Universal Torna makinesine sabitlenmiştir.

Uygulamada deney setinin torna tezgâhına bağlanmasının nedeni ise farklı devirlerde numuneleri çalıştırma imkânı ve sessiz çalışmasına izin vermesi ve deney setinin çalışma hassasiyetini yükseltmesi olarak tasarlanmıştır.

İkinci aşamada numuneler FZG deney setinde 150 N m yük altında 500 dev/dak hızla 250.000. dönme tekrarı kadar çalıştırılmıştır.

Üçüncü aşaması olarak dişli diş yüzey muayenesi yapılmıştır. Dördüncü aşamada numuneler FZG deney setinde 500.000. dönme tekrarı tamamlaması için önceki çalıştırma şartları altında çalıştırmıştır. Beşinci aşamada düz dişli diş yüzeylerinde meydana gelen aşınma incelemesi için diş yüzey muayenesi yapılmıştır. Aşınmadan dolayı düz dişlilerin diş yüzeylerinde hasar tespiti için binde bir hassas Precisa terazisi, Mitutoyo pürüzlülük cihazı ve Nikon SMZ800N stereo elektro mikroskop cihazı kullanılmıştır.

4.2. Kaplama Etkisinin Tartışması ve Değerlendirmesi

Deney çalışmanın sürecinde oluşturulan veriler yüksek titizlikte oluşturuldu. Deney numunelerin yüzeyinden ölçüm alım sırasında hata oluşmaması için özen gösterildi. Numunelerin kütlesi binde bir hassas terazide tartıldığında her ölçüm için numune beş kez tartıldı ve ortalaması alındı. Aynı şekilde yüzey pürüzlülük ölçüm sırasında düz dişli profilin tepe ve dip bölgelerinden en az beş yüzey pürüzlülük ölçer ile değer okundu ve ortalaması hesaplandı. Deneysel çalışmada muayene işlemine benzer mikroskop ile düz dişlinin diş yüzeyin muayenesinde de özen gösterildi. Muayene sisteminde titreşim olmadığından emin olduktan sonra yüzey taraması yapıldı. Yukarıda bahsedilen muayeneler ile numunelerde belirli dönme tekrarından sonra hasar tespiti yapabilmek için değişen faktörlerin verileri her aşamada kaydedildi. Verilerin analiz edilerek tablo oluşturuldu. Elde edilen ölçümler numunelerde oluşan kütle kaybı aşınmanın hızı, dönme tekrarı artışı ile azalmaktadır. Bunun nedeni de kaplamalı numunelerden kaplama malzemesi sürtünme kuvvetine karşı mukavemeti sahip olmamasıdır. Kaplamasız numunesi ise düz dişli imalatı sırasında oluşan yüzey kalitesizliğindendir. Tablo 4.1’te düz dişlinin ağırlıklarında oluşan yüzdelik farkı gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Düz Dişlinin Ağırlıklarında Oluşan Yüzdelik Farkı.

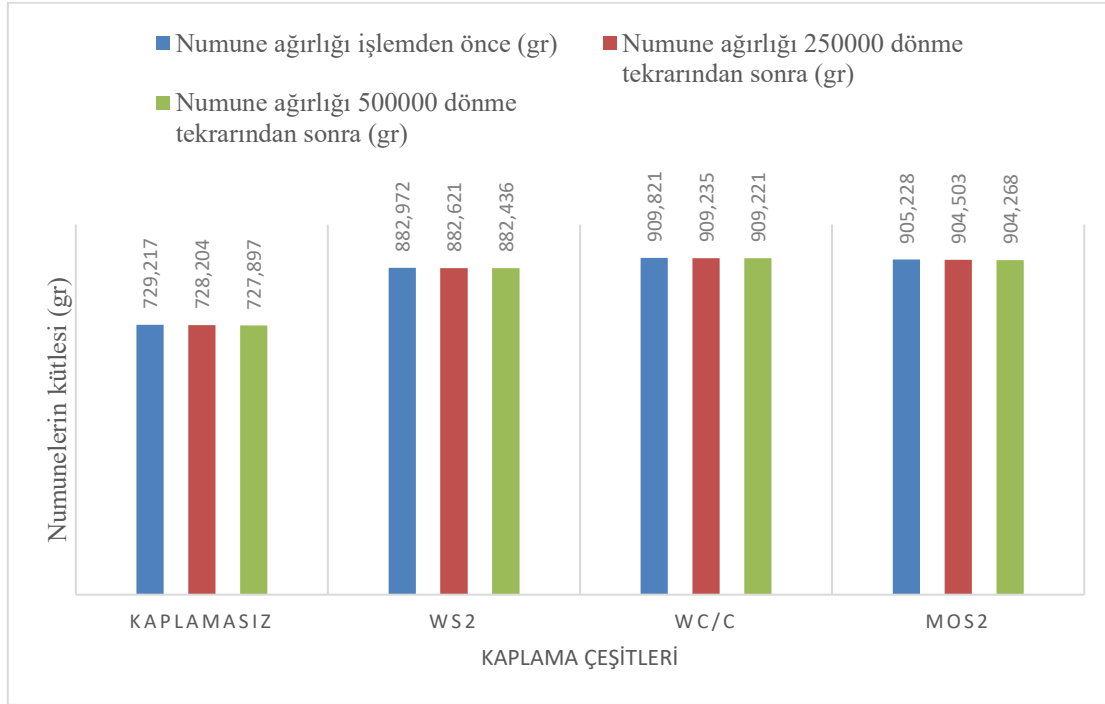
Düz Dişlinin Ağırlık Ölçümü Tablosu					
Düz Dişli Tipleri	İşlemden Önceki	250000 Dönme Tekrarında Sonraki	Oluşan Aşınma Miktarı	500000 Dönme Tekrarında Sonraki	Oluşan Aşınma Miktarı
	Düz Dişlinin Ağırlıkları (gr)	Düz Dişlinin Ağırlıkları (gr)	Aşınma Kütlesi (gr)	Düz Dişlinin Ağırlıkları (gr)	Aşınma Kütlesi (gr)
Kaplamasız	729,217	728,204	1,013	727,897	1,320
WS2	882,972	882,612	0,360	882,436	0,536
WC/C	909,821	909,235	0,586	909,221	0,600
Mos2	905,228	904,503	0,725	904,268	0,960

Bu yüzdelik ağırlık farkı, numunelerden aşınmadan dolayı kütle kaybın değerini verilmektedir. Hassas terazi ile kaydedilen verilere göre numunelerin 250.000. dönme tekrarına kadar aşınmadan dolayı kütle kaybı miktarı, 250.000. ile 500.000. dönme tekrarı çalıştırma sürecine kadar oluşan aşınmadan dolayı kütle kaybı miktarından daha fazla olduğunu tespit edilmiştir.

Deneysel uygulama süresince kütle kaybı olarak en az aşınma WS₂ kaplamalı düz dişli çarkta oluştuğunu ve en fazla kaplamasız düz dişli çarkta oluştuğunu tespit edilmiştir. Pitting aşınma ve plastik şekil değişimi faktörlerine göre kaplamasız olan düz dişli çifti diğer deney numunelerine göre daha fazla hasar gördüğünü gözlemlemiştir.

Deney çalışması boyunca düz dişli çarkların ağırlık kaybı bilgisi tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Düz Dişli Ağırlık Kaybı ile Aşınma Belirleme Tablosu.

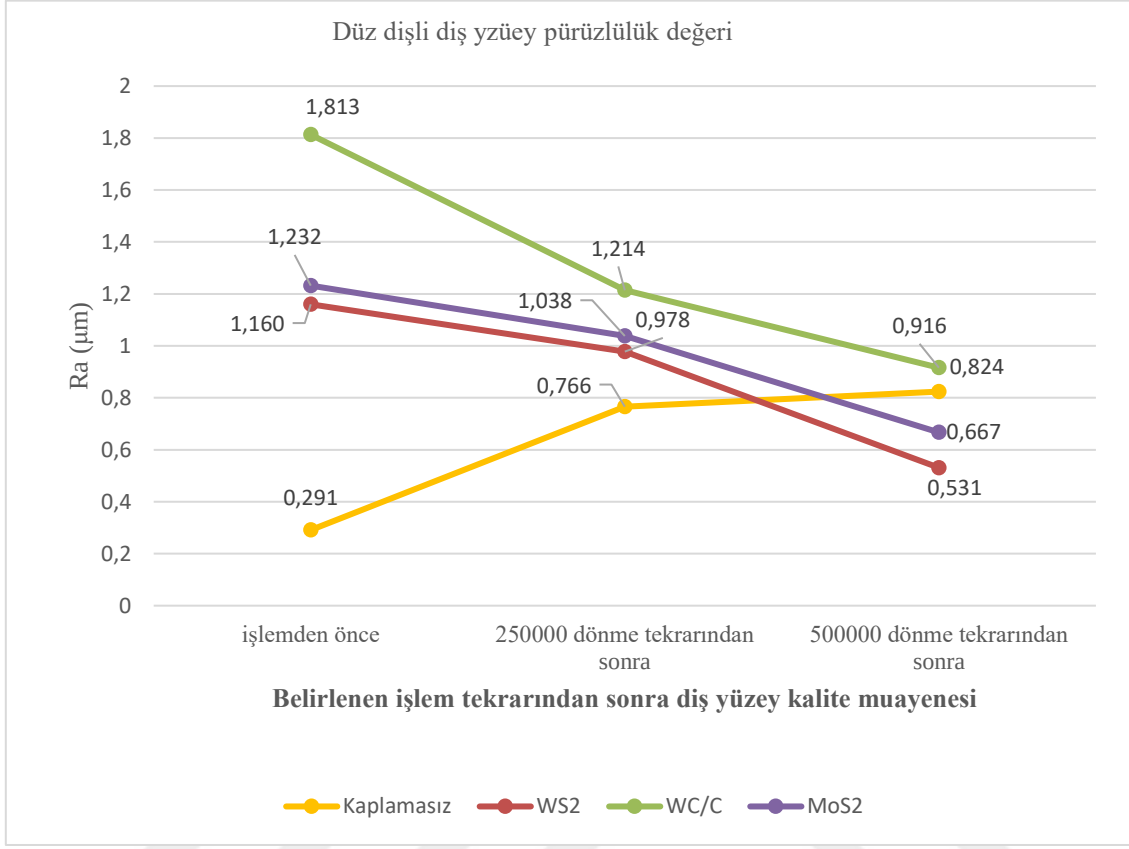


Aşınma oluşumun belirlemesi yöntemlerinde kütle kaybı gelmektedir. Tablo 4.2’de numunelerin işlem sırasında dönme tekrarına göre kütle kaybın hızı açıklamaktadır. Tüm numunelerin kaplamalı ve kaplamasız hepsinin kütle kaybın hızı dönme tekrarına ters ilişkide olduğunu göstermektedir. Yani deneysel çalışmanın 250.000. dönme tekrarına kadar oluşan aşınma numunelerin kütle kaybın hız, deneysel çalışmanın 250.000. ile 500.000. dönme tekrarı sürecine kadar oluşan kütle kaybın hızı daha yüksektir.

Dönme tekrarı ile beraber düz dişlinin diş yüzeyin pürüzlülük değeri azalır ve kaplama molekül malzemeleri birbirine paralel duruma gelir. Böylece tablo 4.3’e göre aşınma yüzey kalite yükselmesi ile aşınma oluşumunu azaltır.

Numunelerin kaplamasında kullanılan kaplama malzemeleri yağlayıcı özelliğini sahip olduğundan temas yüzeylerde sürtünme azaltmaktadır ve böylece aşınmaya sebep olan kuvvet azaltmaktır. Böylece kaplamalı düz dişli numunelerin diş yüzeyinde şekil deformasyonu uğramamakta ve ilerde kırık aşınma tipi aşınmayı önlemektedir.

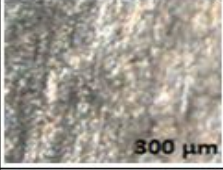
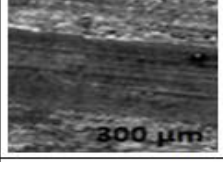
Tablo 4.3. Düz Dişli İşlem Sırasında Diş Yüzey Pürüzlülük Değişim Tablosu.



Tablo 4.3'e göre numuneler işlem altında yüzey kalitelerine artırmıştır. Yüzey kalite artışı en çok WS₂ kaplamalı düz dişli diş yüzeyinde tespit edilmiştir. İşlem başından kaplamalı düz dişli numunelerin diş yüzeyin pürüzlülük değerlerinde sürekli azaltma, ama kaplamasız düz dişlinin diş yüzeyin pürüzlülük değerlerinde sürekli artış görünmüştür.

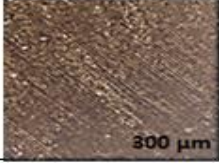
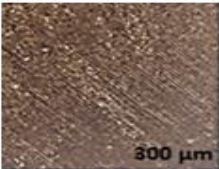
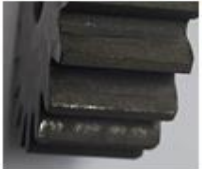
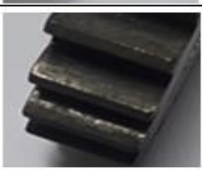
En çok WS₂ kaplamalı düz dişli diş yüzeyin ortalama yüzey pürüzlülük değeri düşmüştür. Kaplamalı numunelerin yüzey pürüzlülük değeri 250.000. dönme tekrarından sonra kaplamasız düz dişli yüzeyin yüzey pürüzlülük değerine göre yüksek olması yine dişlerin yüksek basınç altında zorlanma sırasında plastik şekil değiştirmemesidir. Yine tablo 4.3'ten öğrenilir ki numuneleri yüzey kaliteleşmenin hızı ikinci deney aşamasında düşmüştür. Eğer numuneler bir milyon ve daha fazlası dönme tekrarı kadar çalıştırılırsa yüzey pürüzlülük değeri dönme tekrarında bağımsız kalacak diye beklenir.

Deney muayene çalışmasında mikroskop görüntüsü incelendiğinde kaplamasız düz dişli diş yüzeyi dönme tekrarına bağlı olarak plastik şekil deformasyona maruz kaldığını tespit edilmiştir. Yüzeyler birbirine kayma sırasında sürtünmeden dolayı dişlinin diş yüzeyinde oluşan mini çatlaklar dönme tekrarına bağlı olarak büyüdüğünü mikroskop görüntüsünde görünmektedir. Şekil 4.1’de deney çalışmasında diş yüzeyin dibi ve tepe bölgesinde oluşan yüzey aşınma hasarı göstermiştir.

Numune çeşiti	İşlem aşaması	Mikroskop görüntüsü	Kamere görüntüsü
Kaplaması düz dişli	İşlemden Önce		
	250 bin dönme tekrarından sonra		
	500 bin dönme tekrarından sonra		

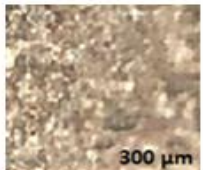
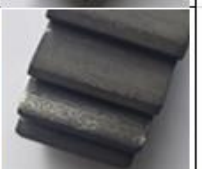
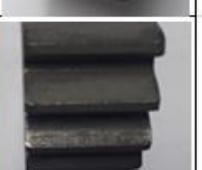
Şekil 4.1Kaplamasız Düz Dişli Çarkın Üç İşlem Aşamadaki Mikroskop Görüntüsü.

Deney çalışmada işlemden önce ve 500 bin dönme tekrarı sonrasına kadar WS₂ kaplamalı düz dişli diş yüzeyi mikroskop görüntüsü incelendiğinde, kaplama malzemenin yüzey kısmı dönme tekrarına bağlı kayma yönde yattığını tespit edilmiştir. Kayma yöne zıt direnç gösterme özelliği sahip olmayan WS₂ kaplama malzemesi ile aşınma oluşumu az oluştuğunu ve dişli diş yüzeyin ömrü uzadığı tespit edilmiştir. Şekil 4.2’de WS₂ deney çalışması boyunca mikroskop görüntüsünde görüntü ve hasar şekil değişimi göstermiştir

Numune çeşidi	İşlem aşaması	Mikroskop görüntüsü	Kamere görüntüsü
WS ₂ Kaplamalı	İşlemden Önce		
	250 bin dönme tekrarından sonra		
	500 bin dönme tekrarından sonra		

Şekil 4.2. WS₂ Kaplamalı Düz Dişli Çarkın Üç İşlem Aşamadaki Mikroskop Görüntüsü.

Deneysel çalışmada mikroskop görüntüleri incelendiğinde, WC/C kaplamalı düz dişli yüzeyinden malzeme kaybı sırasında yüzeyde yorulma aşınması olduğu tespit edilmiştir. Yorulma aşınması oluşması ile yüzey pürüzlülük değeri da yüksek oluğu görünmüştür. Şekil 4.3’de deneysel çalışma boyunca WC/C kaplamalı düz dişli görüntü değişimi gösterilmiştir.

Numune çeşidi	İşlem aşaması	Mikroskop görüntüsü	Kamere görüntüsü
WC/C Kaplamalı	İşlemden Önce		
	250 bin dönme tekrarından sonra		
	500 bin dönme tekrarından sonra		

Şekil 4.3. WC/C Kaplamalı Düz Dişli Çarkın Üç İşlem Aşamadaki Mikroskop Görüntüsü.

Mikroskop altında düz dişlinin diş yüzeyi incelendiğinde, işleme sokmadan numunelerin yüzeyi heterojen bir şekilde noktasal yükseltme ve alçalma görünmektedir. Şekil 4.4’de deneysel çalışma sonucunda belirli dönme tekrarından sonra düz dişlinin diş yüzeyindeki kaplama malzemesi rölatif hareket yönüne ters yönde düzeltmektedir ve kaplamasız düz dişlinin diş yüzeyi belirli bölgelerde hafif yüzey çatlak ve şekil değişimine mail göstermesi gösterilmiştir. Şekil 4.4’de deneysel çalışma aşamalarında oluşan aşınma olayı mikroskop görüntüsü olarak gösterilmiştir.

Numune çeşidi	İşlem aşaması	Mikroskop görüntüsü	Kamere görüntüsü
MoS ₂ Kaplamalı	İşlemden Önce		
	250 bin dönme tekrarından sonra		
	500 bin dönme tekrarından sonra		

Şekil 4.4. MoS₂ Kaplamalı Düz Dişli Çarkın Üç İşlem Aşamadaki Mikroskop Görüntüsü.

Mikroskop görüntülerinden şu sonuçları çıkartılabilir, tungsten disulfür (WS₂), Molibden disulfür (MoS₂) kaplamalı düz dişli çiftleri 500.000. dönme tekrarından sonra kendinden sünek özelliği gösterdiğini tespit edilmiştir ve yüzey sürtünme değeri daha düşük değerlerde tutulmuştur. Tungsten karbon karbür kaplama malzemesi ise sertlik açısından yüzeyin kalitesini yükseltmektedir ama yağlayıcı katı özelliği diğer iki kaplama malzemesine göre daha düşüktür. Sonuç olarak kaplamasız düz dişli çarkı, WS₂, WC/C ve MoS₂, kaplamalı düz dişli çarklar aşınma türüne göre birbirinden farklı özellikler göstermektedir. Aşınmaya neden olan sürtünme kuvveti faktörüne göre tungsten disulfür (WS₂) ve molibden disulfür (MoS₂) kaplamalı düz dişli çarkları, kaplamasız düz dişli çarkın ve tungsten karbon karbür (WC/C) kaplamalı düz dişli çarkına göre

daha uygun olduğunu tespit edilmiştir. Yüksek yüzey setliği ihtiyaç duyulan düz dişli çalışma mekanizmalarında tungsten karbon karbür (WC/C) daha uygun olduğuna ve katı yağlayıcı performans iyi olan aynı zamanda yüksek yüzey temaslı basınç altında çalışabilen kaplama malzemesi tungsten disulfür (WS₂) olduğuna tespit edilmiştir. Her hâlükârda karbon bazlı yağlayıcı malzeme kullanılmadığı düz dişli makine mekanizmalarında katı yağlayıcı özelliğe sahip (WS₂, MoS₂) ve WC/C malzemeler ile düz dişlinin diş profil yüzeyleri kaplamaları bu deneysel çalışması açısından daha verimli olduğu tespit edilmiştir. MoS₂ kaplama malzemesi sertlik derecesi açısından WS₂ kaplama malzemesine göre düşük olduğundan, yüksek yüzey basınç altında çalışan makine parçalarında, yüzey temas bölgelerinde toz halinde veya kullanılan karbon bazlı kayganlaştırıcı sıvıya ilave malzemesi olarak kullanılmasına daha uygun olacağına tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, çalışmada, karbon bazlı yağlayıcı madde kullanılmadığı makine mekanizmalarında düz dişlilerde oluşan aşınmayı önlemek veya azaltmak amacıyla, düz dişli numuneleri katı yağlayıcı özelliği sahip malzemeler WS₂, WC/C ve MoS₂ ile kaplanarak yüzey mukavemetini aşınmaya karşı yükseltmiştir. Numunelerin üzerinde kaplamaların eklerini incelemek için Marmara üniversitesi teknoloji fakültesindeki laboratuvarında FZG güç devre dolaşımli makine testi oluşturularak düz dişli çark numuneleri deney altında alınmıştır. Deneyde çalışmasında, numunelerin çalıştırma sırasında oluşan hasarı ve aşınma miktarını binde bir hassa terazi, yüzey pürüzlülük ölçer ve elektro mikroskop cihazı ile tespit edilmiştir. Bu çalışmada düz dişli çarklar üç farklı kaplama malzemesi ile kaplanmıştır. Yüzey sertlik açısından en iyi performansı WC/C buna müteakip WS₂ kaplama malzemeleri göstermiştir. MoS₂ kaplama malzemesinin yüzey sertliği ana malzemenin yüzey sertlik derecesinden daha düşük olmasına karşın kendinden sürtünme azaltıcı performansını en iyi gösteren kaplama malzemesi olduğuna tespit edilmiştir. Bu kaplamalar triboloji açısından birbirlerine mukayese edilerek hiyerarşik uygunluğu açıklanmıştır.

4.3. Öneriler

FZG test işlemlerinde Isı termal cihazı kullanılarak ısı ölçümleri yapılabilir. Ayrıca Gürültü (db), Ses Gürültü analizi çalışması yapılması tavsiye edilir. Düz dişli çarklar diğer dişli takımlarına göre daha sesli ve gürültülü çalışmaktadırlar. Bu nedenle ses analizi düz dişli çarklarda önemli bir problemdir. Bu konuda ayrıca çalışma yapılması tavsiye edilebilir.

Deneyisel çalışmalarda titreşim konusunda dikkate alınabilir. Dişli takımları çalışmalarında titreşim bazı uygulama noktalarında sorunlara sebebiyet vermektedir. Bu nedenle titreşim konusu ayrıca incelenebilir.

Düz dişli numunlerin aşınma inceleme yapılırken biz deneyisel uygulamalarda 500.000 dönme tekrarına kadar uygulama yaptık. Aynı çalışma üzerinde farklı dönme tekrarı ve farklı sürelerde ayrı çalışmalar yapılabilir. Buna göre tasarımı yüksek devir ve dönme tekrarına göre dizayn edilmelidir. Bu deneyisel çalışmanın bizden sonra bu konuda çalışma yapacak olan arkadaşlarımıza büyük katkı sağlayacağına inanıyorum.

5. KAYNAKLAR

Makale:

- [1] Martins R. C., Moura P.S. and Seabra J.O., (2006) “MoS₂/Ti low-friction coating for gears”, FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do porto, Portugal. Doi: [10.1016/j.triboint.2006.02.065](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2006.02.065).
- [2] Huaiju Liu, C. ve ark., (2016). “Tribological Evaluation of a Coated Spur Gear Pair”, State key laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing, 400044, China. Doi: [10.1016/j.triboint.2016.03.014](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.03.014).
- [3]. Kavaliauskiene L., Bendikiene R. and Ciuplys A., (2019). “Circular economy practice: From industrial metal waste to production of high wear resistant coatings”, Department of Production Engineering, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology, LT-51424, Kaunas, Lithuania. (Pp. 1225-1232). Doi: [10.1016/j.jclepro.2019.05.068](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.068).
- [4] Stastniak, P. ve ark., (2019). “Computer Aided Simulation Analysis For Wear Investigation Of Railway Wheel Running Surface”, Diagnostyka, 2019, Vol. 20, No. 3. Doi: [10.29354/diag/111569](https://doi.org/10.29354/diag/111569)
- [5] Ren, S. ve ark, (2017). “Functional regulation of Pb-Ti/MoS₂ composite coatings for environmentally adaptive solid lubrication”, Appl. Surf. Science. Doi.org/[10.1016/j.apsusc.2017.01.054](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.054)
- [6] Tunaoglu M.Ş. ve Tuç B., (2012). “İç Dişli Çarklarda Aşınmanın Deneysel Olarak İncelenmesi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Bölümü. Cilt:53 Sayı: 632. Ankara, Türkiye. AN MFS:83819025
- [7] Karataş, Ç. ve ark, (2001). “AISI 5115 Çeliğinden imal edilen dişlinin diş dibinde kalıcı gerilmelerin hesaplanması” Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 16, No 1. ISSN 1300-1884
- [8] Basiniuk, U. L. ve ark. (2013). “The Most Rational Topography of Tooth Working Surface Can be Formed by Various Methods Like the Cladding with A Flexible Tool

(CFT)", Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences, Belarus, UL. Akademicheskaya 12, Minsk, 220072 Belarus. [Doi.org/10.3103/S1068366613060044](https://doi.org/10.3103/S1068366613060044)

[9] Huaiju Liu, C. ve ark., (2016). "Tribological Evaluation of a Coated Spur Gear Pair", State key laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing, 400044, China. [Doi.org/10.1016/j.triboint.2016.03.014](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.03.014)

[10] Xu, S. ve ark. (2014). "Nonostructued WS2-Ni Composite Films for Improved Oxidation Resistance and Tribological Performance", Lanzhou institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Science, Lanshou 73000, PR, China. [Doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.024](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.024)

[11] Kaseem M., and Choe H. C., (2021). "The effect of in-situ reactive incorporation of MoOx on the corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy coated via micro-arc oxidation coating" Department of Nanotechnology and Advanced Materials Engineering, Sejong University, Seoul 05006, South Korea. [Doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109764](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109764)

[12] Neville W., and Sachs P.E., (2014). "Gears – and How Their World is Changing"

[13] Aytaç, A. and Malayoğlu U., (2018). "Comparison of PVD and JVD / DVD Thin Film Coatings by Physical Vapor Deposition Methods and a Conceptual, Academic and Theoretical Analysis on Industrial Applications of DVD Coating Technology" The Journal of Defense Sciences Volume 17, Issue 1. [Doi:10.17134/khosbd.427054](https://doi.org/10.17134/khosbd.427054).

[14] Hanon M. M., and Zsidai L., (2021). "Comprehending the role of process parameters and filament color on the structure and tribological performance of 3D printed PLA", Mechanical Engineering Doctoral School, Szent István Campus, MATE University, Gödöllő 2100, Hungary. [Doi:10.1080/10402000208982558](https://doi.org/10.1080/10402000208982558).

[15] Baptista A., Silva F., Porteiro J., Míguez J., and Pinto G., (2018). "Review Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands" School of Industrial Engineering, University of Vigo, Lagoas, 36310-E Marcosende, Spain. [Doi:10.3390/coatings8110402](https://doi.org/10.3390/coatings8110402).

- [16] Henrik P., and Elliott S. D., (2014). “Studying chemical vapor deposition processes with theoretical chemistry” *Theoretical Chemistry accounts*, (133), 5, 1476. [Doi:10.1007/s00214-014-1476-7](https://doi.org/10.1007/s00214-014-1476-7).
- [17] Amin S., Panchal H., (2016)., “A Review on Thermal Spray Coating Processes”, *International Journal of Current Trends in Engineering & Research (IJCTER)*, Volume 2 Issue 4, April 2016 pp. 556 – 563. [E-ISSN 2455–1392](https://doi.org/10.1007/s00214-014-1476-7)
- [18] Singh, H., Mutyala K. C., Mohseni, Scharf H. T. W., Evans R. D. & Doll G. L. (2015). “Tribological Performance and Coating Characteristics of Sputter-Deposited Ti-Doped MoS₂ in Rolling and Sliding Contact” Book, Department of Materials Science & Engineering, University of North Texas, Denton, Texas, 76203. [Doi:10.1080/10402004.2015.1015758](https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1015758).
- [19] Lin M., Wei-Xiang C., Hui L., Yi-Fan Z. and Zhu-De X. (2008). “Ionic liquid-assisted hydrothermal synthesis of MoS₂ microspheres”, Department of Chemistry, Zhejiang University, Hangzhou 310027, PR China. [Doi.org/10.1016/j.matlet.2007.06.062](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.06.062)
- [20] Shusheng X., Xiaoming G., Ming H. and Jiayi S., (2014). “Nanostructured WS₂–Ni composite films for improved oxidation, resistance and tribological performance”, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, PR China. [Doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.024](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.024)
- [21] Nossaa A., Cavaleirob A., Carvalhoc N.J.M., Kooic B.J. and De Hosson J.Th.M., (2005). “On the microstructure of tungsten disulfide films alloyed with carbon and nitrogen”, Escola Superior de Tecnologia e Gestaõ, Instituto Polite´cnico da Guarda, Guarda, Portugal. [Doi.org/10.1016/j.tsf.2005.02.018](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.02.018)
- [22] Napiórkowski J., Lemecha M. and Konat L., (2019)., “Forecasting the Wear of Operating Parts in an Abrasive Soil Mass Using the Holm-Archard Model” Chair of Vehicles and Machinery Exploitation, The Faculty of Technical Sciences, The University of Warmia and Mazury in Poland. [Doi:10.3390/ma12132180](https://doi.org/10.3390/ma12132180).

- [23] Trübswetter M., Götz J., Kohn B., Otto M. and Stahl K., (2021) “Effects of Different Hard Finishing Processes on Gear Excitation” Gear Research Centre (FZG), Department of Mechanical Engineering, Technical University of Munich/Gemany. [Doi.org/10.3390/machines9080169](https://doi.org/10.3390/machines9080169)
- [24] Can, M., (2016). “100Cr6 Çeliğinden Burç İmalatında İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme Uygulaması ve Aşınma Davranışının İncelenmesi”, Balıkesir Üniversitesinin, Fen Bilimler Enstitüsü.Balıkkessir, Türkiye. [Hdl.handle.net/20.500.12462/2875](https://hdl.handle.net/20.500.12462/2875)
- [25] Akpolat, A., (April 2018). “Kesici Takım Diş Ucu Yarıçapının Diş Dibi Eğilme Gerilmesinin Etkileri”, Joural of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Ankara, Türkiye. [Doi.org/10.17341/gazimmfd.416388](https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416388)
- [26] Can, M., (2016). “100Cr6 Çeliğinden Burç İmalatında İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme Uygulaması ve Aşınma Davranışının İncelenmesi”, Balıkesir [Hdl.handle.net/20.500.12462/2875](https://hdl.handle.net/20.500.12462/2875)
- [27] Chen W., Lei Y., Fu Y., and Hou L., (2021). “A study of effects of tooth surface wear on time-varying mesh stiffness of external spur gear considering wear evolution process”, State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun, Jilin, 130025, China. [Doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104055](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104055)
- [28] Karabaş M., ve Kayalı Y., (2019). “Plazma Püskürtme Kaplama Yöntemiyle Üretilmiş HA ve TiO₂ Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Hakkâri Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bil. Ve Müh. Böl., Hakkâri / Türkiye. [DOI: 10.18185/erzifbed.530698](https://doi.org/10.18185/erzifbed.530698)
- [29] Rao Ch. M., Venkatasubbaiah K., Rao K. J., (2016), “Experimental Investigation of Surface Roughness Characteristics Ra, Rq and Rz”, International Journal of Hybrid Information Technology, 9 (7): 373-388. [Doi:10.14257/Ijhit.2016.9.7.34](https://doi.org/10.14257/Ijhit.2016.9.7.34).
- [30] Etyemez A., (2019), “DLC Kesici Takım ve İşleme Parametrelerinin Yüzey Kalitesine ve Kesme Kuvvetlerine Etkilerinin İncelenmesi”, European Journal of Science and Technology, Sayı 16, S. 494-504. [Doi:10.31590/ejosat.573269](https://doi.org/10.31590/ejosat.573269).

- [31] Boswell, B., Islam, M.N., Davies, I.J., Ginting, Y.R., Ong, A.K., (2017), “A Review Identifying the Effectiveness of Minimum Quantity Lubrication (MQL) During Conventional Machining”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–20. [Doi.org/10.1007/s00170-017-0142-3](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0142-3).
- [32] Poole J. J., and Guidolin L. B. M., (2021), “Optical Microscopy and the Extracellular Matrix Structure: A Review” Department of Systems and Computer Engineering, Faculty of Engineering and Design, Carleton University 1125 Colonel By Drive, Ottawa, ON K1S 5B6, Canada. [Doi.org/10.3390/cells10071760](https://doi.org/10.3390/cells10071760)
- [33] Ismaeil K, Yalçinkaya S., (2020), “Investigation of Corrosion Effect in Petroleum Pipes”, *Technological Developments in Engineering*, Publisher Certificate No: 36934, pp: 256 -286, Güven Plus Grup A.Ş. Publications, Istanbul, Turkey. [E-ISBN: 978-605-7594-56-3](https://www.e-isbn.com/978-605-7594-56-3)
- [34] Yalcinkaya S., and Sahin Y., (2016), “Application of Taguchi Technique to Surface-Grinding of Mold Steel”, *Key Engineering Materials (Volume 689)*, Sayfalar 7-11, [Scientific.net/KEM.689.7](https://www.scientific.net/KEM.689.7)
- [35] Saxena A., Chouksey M., and Parey, A., (2018), “Measurement of FRFs of Coupled Geared Rotor System and the Development of an Accurate Finite Element Model”, *Mech. Mach. Theory* 123, 66–75, [Doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.01.010](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.01.010).
- [36] Liang X., Zhang H., Liu L., and Zuo M.J., (2016), “The Influence of Tooth Pitting on The Mesh Stiffness of a Pair of External Spur Gears”, *Mech. Mach. Theory* 106,1–15. [Doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.08.005](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.08.005).
- [37] Shen Z., Qiao B., Yang L., Luo W., and Chen X., (2019), “Evaluating the Influence of Tooth Surface Wear on TVMS Of Planetary Gear Set”, *Mech. Mach. Theory* 13, 206-223. [Doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.014](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.014).
- [38] Raghuwanshi N.K., and Parey A., (2017), “Experimental Measurement of Spur Gear Mesh Stiffness Using Digital Image Correlation Technique”, *Measurement* 111, 93–104, [Doi: 10.1016/j.measurement.2017.07.034](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.034).

- [39] Liu H., Liu H., Zhu C., and Zhou Y., (2019), “A Review on Micropitting Studies of Steel Gears”, *Coatings* 9, 42, [Doi:10.3390/coatings9010042](https://doi.org/10.3390/coatings9010042)
- [40] Ismaeil K, Yalçinkaya S., (2021), “Investigation Of The Corrosion Effects On Marine Vehicles Using Coating And Cathodic Protection Methods”, 5th International Engineering And Technology Management Congress Book, Book No: 36934, pp: 108-116, 24-25 April, Güven Plus Grup A.Ş. Publications, Istanbul, Turkey. [E-ISBN: 978-625 -7367-09-7](https://www.guvenplus.com.tr/978-625-7367-09-7)
- [41] Yalçinkaya S, Ismaeil K., (2021), “Experimental Investigation Of Corrosion Effects On The Nanocomposite Coated Petrol Boiler”, 7th International Engineering, Architecture And Design Congress, Book No: 36934, pp: 883-889, 21-22 May, Güven Plus Grup A.Ş. Publications, Istanbul, Turkey. [E-ISBN: 978-625 -7367-12-7](https://www.guvenplus.com.tr/978-625-7367-12-7)
- [42] Ibe H., Kato Y., and Yamada J., (2021), “Controlling WC/Co two-phase microstructure of cemented carbides additive-manufactured by laser powder bed fusion: Effect of powder composition and post heat-treatment”, FUJIMI INCORPORATED, Kakamigahara City 5090103, Japan. [Doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110034](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110034)
- [43] Qi X., Takata N., Suzuki A., and Kobashi M., (2020), “Laser powder bed fusion of a near-eutectic Al–Fe binary alloy: Processing and microstructure”, Department of Materials Process Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603, Japan. [Doi.org/10.1016/j.addma.2020.101308](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101308)
- [44] Zhang J., Lei j., Gu Z., and Tian H., (2020), “Effect of WC-12Co content on wear and electrochemical corrosion properties of Ni-Cu/WC-12Co composite coatings deposited by laser cladding”, Laser Technology Institute, TianGong University, Tianjin 300387, PR China. [Doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125807](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125807)
- [45] Hai Sun S., Hagihara K., and Nakano T., (2018), “Effect of scanning strategy on texture formation in Ni-25 at. %Mo alloys fabricated by selective laser melting”, Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita 565-0871, Japan. [Doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.060](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.060)

[46] Kresse T., Meinhard D., Bernthaler T., and Schneide G., (2018), “Hardness of WC-Co hard metals: Preparation, quantitative microstructure analysis, structure-property relationship and modelling”, Materials Research Institute, Aalen University of Applied Sciences, Beethovenstraße 1, 73430 Aalen, Germany. [Doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.05.003](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.05.003)

[47] Sun F.H., Zhang Z.M., Chen M., and Shen H.S., (2017) “Improvement of adhesive strength and surface roughness of diamond films on Co-cemented tungsten carbide tools” School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, PR China. [Doi.org/10.1016/S0925-9635\(02\)00345-X](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(02)00345-X)

[48] Bricín D., Spirit Z., and Safka J., (2020), “Development of the Structure of Cemented Carbides during Their Processing by SLM and HIP”, Department of Material Science and Technology, University of West Bohemia, Univerzitni 8, 301 00 Pilsen, Czech Republic. [Doi.org/10.3390/met10111477](https://doi.org/10.3390/met10111477)

Bildiri:

[49] Shaib A.G. ve Yalçinkaya S., (Aralık- 2020)., “Düz Dişli Çarklarda WS₂, MoS₂ Kaplamalarının Yüzey Aşınması ve Yorulmaya Etkisinin İncelenmesi”, 6. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: 39/2020 İstanbul/Türkiye. [E-ISBN: 978-605-7594-64-8](https://www.e-isbn.org/978-605-7594-64-8)

[50] Yalçinkaya S., Shaib A.G., (Aralık- 2020)., “MoS₂, WC/C Yüzey kaplı düz dişli çarkların yüzey aşınmasına yorulma davranışlarının incelenmesi”, 6. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: 39/2020 İstanbul/Türkiye. [E-ISBN: 978-605-7594-64-8](https://www.e-isbn.org/978-605-7594-64-8)

[51] Erkaya S. ve Ulus Ş., (2015). “Dişli Çark Mekanizmalarındaki Hataların Akustik Yöntemler ve Titreşim Metodu ile Karşılaştırmalı Analizi”, Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu, İzmir, Türkiye. [ISBN: 978-605-84220-0-1](https://www.e-isbn.org/978-605-84220-0-1)

Kitap:

[52] Joseph I. G., Dale E. N., Joseph R. M., Nicholas W.M. R., John Henry J. S. and David C. J., (2018). “Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis” Fourth Edition. (Pp. 65-75). [ISBN: 1461349699](#)

[53] Shaib, A. G., ve YALÇINKAYA, S. (2020), “Düz Dişli Çarklarda Kaplamanın Yüzey Aşınması ve Yorulmaya Etkisinin İncelenmesi”, Mühendislik Alanında Teknolojik Gelişmeler, Kitap, Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: 45/2020 ARALIK-2020, İstanbul / Türkiye. [E-ISBN: 978-605-7594-55-6](#)

[54] Derek J. ve Solla P. (2014). “On the Origin of Clockwork, Perpetual Motion Devices, and the Compass” E-book, Contributions from the Museum of History and Technology: Paper 6. [EAN: 4057664653352](#)

[55] Norton, Robert L., (2004), “Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines” 3th edition McGraw-Hill Professional PP: 462. [ISBN:007237960X](#)

[56] Tevrüz T. (2015). “Makina Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri Cilt 3” Çağlayan Kitabevi; Facsimile, İstanbul Turkey. [ISBN :9754360863](#)

[57] Temiz V. “Dişli Çark Mekanizmaları”, makine elemanlar 2, Dişli çarklar, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[58] Şahin Y., (2001)., “Talaş kaldırma prensipleri 2”, Kitap, Nobel Yayıncılık, 2, S: 490. [ISBN:9755912193](#)

[59] Stolarski T.A. (2000)., Tribology in machine design” Book, [ISBN: 0-8311-1102-X](#)

[60] Kıyak, M., Çakır O., and Altan E., (2003). “Application of CVD and PVD coating methods on cutting tools”, 2nd Machine Design and Manufacturing Technologies Congress, pp:115-124. Konya, Turkey. [ISBN: 978-0-8247-5888-2](#)

[61] Budynas, N. (1976). “Shigly’s Mechanical Engineering Design”, Book. [ISBN:1260569993](#)

- [62] Albert J. Shih, Steven Liang, (2016), “Analysis of Machining and Machine Tools”, 1st Edition. ISBN 978-1-4899-7645-1
- [63] David A. Stephenson, John S. Agapiou, (2016), “Metal Cutting Theory and Practice”, 3rd Edition. ISBN 9780367868192
- [64] Yalçınkaya S, Özbek Y, (2019), “Havacılık ve Uzay Sektöründe Kullanılan 7075 – T651 Alüminyum Alaşımının Delinmesi İçin Kullanılan Farklı Matkap Uçlarının Performans Analizinin Deneysel İncelenmesi”, 5. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi Kitabı, pp: 408-442, İstanbul. E-ISBN: 978-605-7594-12-9.

Tezler:

- [65] Gök, M. S., (2017). “Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Yüzeyine Tıg Kaynak Metoduyla Kaplanan Ostenitik Paslanmaz Çelik Tozunun Aşınma Direncine Karbür İçeriğinin Etkisinin Araştırılması”, Doktora Tezi, T.C Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elâzığ, 125 s. [Hdl.handle.net/11772/420](http://hdl.handle.net/11772/420)
- [66] Flodin, A., (2000). “Wear of Spur and Helical Gears”, (Doctoral Thesis). Royal Institute of Technology S-10044 Stockholm, Sweden. ISSN 1400-117
- [67] Alamdarı İlkhachi, A., (2019). “ASTM F75 Co-Cr-Mo Alaşım Çeliğinin Abrasiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, (Yüksek Lisan Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye. [Bilim Kodu: 91421](http://bilim.kodu:91421)
- [68] Alkan, S. (2019). “Nitrür Esaslı Seramik İnce Film Kaplamaların Deniz Suyu Ortamındaki Tribokorozyon Davranışlarının İncelenmesi”, (Doktora Tezi). Bartın Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim, Bartın, Türkiye. [Hdl.handle.net/11772/2025](http://hdl.handle.net/11772/2025)

İnternet:

- URL-1: [69] <https://www.kaizen40.com/disli-cark-nedir-ve-cesitleri-nelerdir/#:~:text=Di%C5%9Fl%C3%A7arklar%2C%20binlerce%20y%C4%B1l%20%C3%B6nce,hareket%20aktar%C4%B1m%C4%B1%20gereken%20yerlerde%20kullan%C4%B1lmaktadır>. Son erişim tarihi: 23.07.2021, 15:30

URL-2: [70] <http://www.antikythera-mechanism.gr/faq/general-questions/why-is-it-so-important> Son erişim tarihi: 10.07.2021; 21:30

URL-3: [71] <https://teknikbilgisitesi.blogspot.com/2015/01/duz-disli-carklar.html> Son erişim tarihi : 26.07.2021, 9:15

URL-4: [72] <https://www.makinaegitimi.com/disli-cark-terimleri-disli-cark-elemanlari/> Son erişim tarihi: 22.06.2021, 23:45

URL-5: [73] <https://prokap.com.tr/> Son erişim tarihi: 26.07.2021, 15:30

URL-6: [74] <http://www.yeksamakina.com/Uygulamaornekleri.htm> Son erişim tarihi: 2.08.2021, 20:15

URL-7: [75] <https://www.sirvanli.com/tr/> Son erişim tarihi: 2.07.2021, 20:00

[76]. Shaib A.G. Yalçinkaya S., (18-19 Eylül- 2021)., “Investigation of the Effect of WC/C Surface Coated on Abrasion and Fatigue Wear on Spur Gear Which is Prepared From AISI 316 Stainless Steel “ 2. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi,Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: 41/2021 İstanbul/Türkiye. E-ISBN: 978-605-7594-64-9

[77]. Yalçinkaya S., Shaib A.G. (18-19 Eylül- 2021)., “Investigation of the Effect of MoS₂ Surface Coated on Abrasion and Fatigue Wear on Spur Gear Which is Prepared From AISI 316 Stainless Steel “ 2. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi,Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: 41/2021 İstanbul/Türkiye. E-ISBN: 978-605-7594-64-9

6. EKLER

Ek-1. Flanş İmalatında Kullanılan Alüminyum Malzeme Tablosu.

Alüminyum Alaşımlarının Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Mekanik Özellikler ve Karşılaştırmalı Alaşım Tablosu



Alaşım EN	Alaşım DIN	Etial	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Akma Mukavemeti (%)	Uzama (Min-%)	Sertlik (HB)	Yoğunluk (g/cm3)
1050	Al 99,5	Etial-5	105-145	85	4	34	2,71
3003	AlMnCu	Etial-0	145-185	115	5	45	2,71
3105	AlMn0,5Mg0,5	Etial-1	150-200	120	5	47	2,71
5005	AlMg1	Etial-30	125-165	80	5	47	2,71
5052	AlMg2,5	Etial-35	210-260	130	7	61	2,71
5754	AlMg3	Etial-50	210	80	17	52	2,72
5083	AlMg4,5Mn	Etial-52	275	125	15	75	2,73
6061	AlMgSiCu	Etial-53	343	318	11	95	2,70
6082	AlMgSi1	Etial-60	358	310	10	95	2,70
7075	AlZnMgCu1,5	Etial-65	533	462	8,5	150	2,80
8011	AlFeSi	Etial-62	105-145	90	6	35	2,71

Ek-2. Deney Setin Paçaları Smarc LC360B Universal Torna Makinesinde İmal Edildi



Ek-3. FZG Deney Düzeneg n Par aları Evrensan Freze Tezgahında Frezeledi.



Ek-4. Deney D zeneg nde Kullanılan Par aların Delmesi ve Punt-Laması İ in Tezsan Matkap Tezg h  Kullanıldı.



Ek 5. Dişli Çarkları Açan Azdırma Tezgâhı.

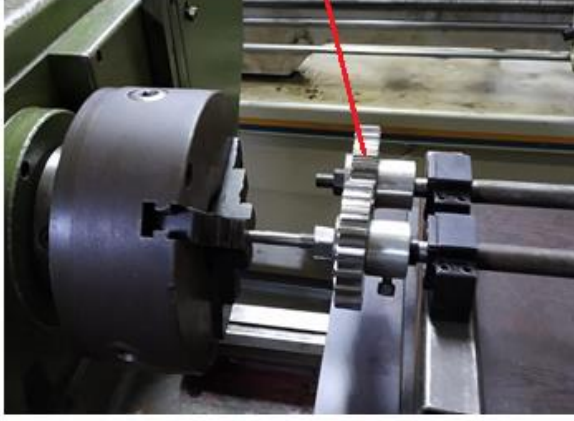


Ek-6. Güç Devre Dolaşımı Deney Seti Smarc LC360B Universal Torna Tezgahında Montaj Yapıldı

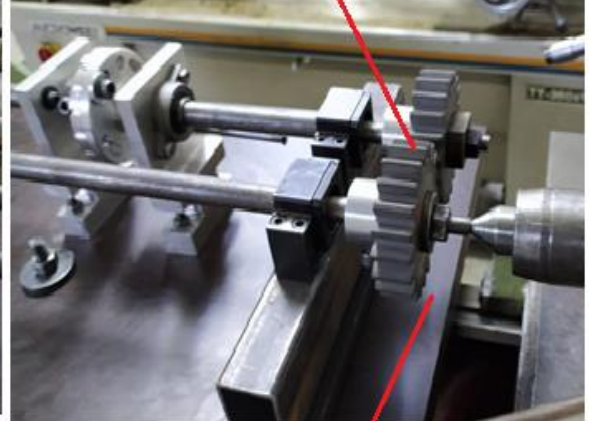


Ek-6. FZG Güç Devre Dolaşımı Deney Setinde Kullanılan Düz Dişlilerin Görev Tanımları

Güç devre dolaşımı sağlayan, aşınma muaynesine girmeyen düz dişli çarklar



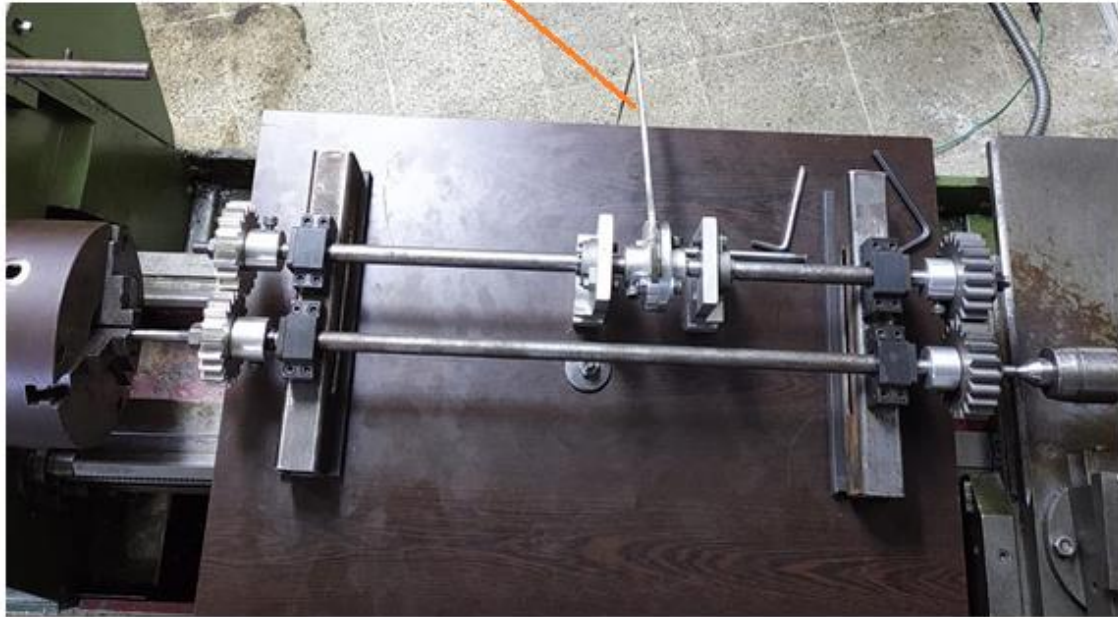
Düz dişli deney numuneleri



Düz dişli çarkın çalıştırma sonucunda oluşan aşınma tozu

Ek-6. FZG Güç Devre Dolaşımı Deney Setine Yük Yükleme İşlemi

FZG deney setine yükleme kolu ile yükleme işlemi



Ek-6. FZG Güç Devre Dolaşımı Deney Setin Ayarlama ve Çalıştırma İşlemi



Ek-5.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri:

Ad – Soyad: Abdull Ghafoor SHAIB

Dil: Farsça, Türkçe ve İngilizce

Eğitim Bilgileri:

Derece	Bölüm	Okul	Başlangıç	Mezuniyet Yılı
Lise	High school	Khatamul-Anbia	1998	2010
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Gazi Üniversitesi	2013	2018
Lisans	Makine Mühendisliği (Çift Anadal)	Gazi Üniversitesi	2015	2018
Lisansüstü	Makine Mühendisliği	Marmara Üniversitesi	2019	Devam

2010 yılında liseyi birincilikle Afganistan Baghlan ilinde bitirdikten sonra üniversite yerleşme sınavına KANKOR'a katıldım 360 toplam puanından 341 puanı ile Afganistan başkentteki Kabil Üniversitesinde inşaat mühendislik bölümü kazandım. Bir yarı yıl dönemi Kabil Üniversitesinde eğitimime devam ettim. O sıralarda Afganistan ve Türkiye ikili anlaşma programına katılarak Afganistan hükümeti destekli Türkiye lisans eğitim borusu kazandım. Türkiye'ye eğitim amacıyla 2012 yılında geldim. Bir sene sürecinde Trabzon'daki Ankara TÖMER şubesinde Türkçe dili C1 seviyesinde dil eğitimi aldım. 2013 yılında Gazi Üniversitesinde Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde kaydımı yaptırdım. İnşaat Mühendisliği Bölümünde eğitimim

yanında 2015 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Çift Anadal olarak kaydımı yaptırdım. 2018 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümü 3.07 puanı ile ve Makine Mühendisliği Bölümü 3.29 puanı ile mezuniyeti hak kazandım. 2019 yılında yüksek lisan için Marmara Üniversitesinde Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde kaydımı yaptırdım. Yüksek lisansın ilk senesinde zorunlu ve seçmeli dersleri Dr. Öğr. Üyesi Senai Yalçinkaya, Prof. Dr. Muhittin ŞİMŞEK, Dr. Öğr. Üyesi Ferhat GÜNGÖR ve diğer akademik alanında değerli hocalardan aldım. Triboloji alanında çalışan Dr. Öğr. Üyesi Senai Yalçinkaya hocamızın danışmanlığı ile “Düz Dişli Çarklarda WS₂, WC/C, MoS₂ Kaplamalarının Yüzey Aşınması ve Yorulmaya Etkisinin Deneysel İncelenmesi” adı altında Yüksek Lisans Tezi çalışmaya başladım. Tez çalışması sürecinde değerli tez danışmanımın yönlendirmesi ile Akademik konferanslara, Mühendislik ve Teknolojide Gelişmeler adı altında Fuarlara, Ulusal ve Uluslararası sempozyumlara sunucu olarak katılma fırsatı buldum. Tez çalışmanın deneysel kısmında yine tez danışmanımın desteği ile kurumsallaşmış firmaları yakından ziyaret etme fırsatı buldum. Tez çalışmam devam etmektedir.

YAPILAN YAYIN ÇALIŞMALARI

KİTAP BÖLÜMÜ ÇALIŞMASI

- “Düz Dişli Çarklarda Kaplamanın Yüzey Aşınması ve Yorulmaya Etkisinin İncelenmesi”
Abdull Ghafoor SHAIB (a) Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA (b)
Mühendislik Alanında Teknolojik Gelişmeler, Kitap, Güven Plus Grup A.Ş.
Yayınları: 45/2020 ARALIK-2020, İstanbul / Türkiye.
[E-ISBN: 978-605-7594-55-6](#)

BİLDİRİLER

- Abdull Ghafoor SHAIB, Senai YALÇINKAYA., “Düz Dişli Çarklarda WS₂, MoS₂ Kaplamalarının Yüzey Aşınması ve Yorulmaya Etkisinin İncelenmesi” 6. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: 39/2020 İstanbul/Türkiye.
[E-ISBN: 978-605-7594-64-8](#)

- Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA (a) Abdull Ghafoor SHAIB (b) “MoS₂, WC/C Yüzey kaplı düz dişli çarkların yüzey aşınmasına yorulma davranışlarının incelenmesi” 6. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: 39/2020 İstanbul/Türkiye.
[E-ISBN: 978-605-7594-64-8](#)
- Shaib A.G. Yalçinkaya S., (18-19 Eylül- 2021)., “Investigation of the Effect of WC/C Surface Coated on Abrasion and Fatigue Wear on Spur Gear Which is Prepared From AISI 316 Stainless Steel “ 2. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi,Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: 41/2021 İstanbul/Türkiye. [E-ISBN: 978-625-7367-18-9](#)
- Yalçinkaya S., Shaib A.G. (18-19 Eylül- 2021)., “Investigation of the Effect of MoS₂ Surface Coated on Abrasion and Fatigue Wear on Spur Gear Which is Prepared From AISI 316 Stainless Steel “ 2. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi,Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: 41/2021 İstanbul/Türkiye. [E-ISBN: 978-625-7367-18-9](#)