



**POLİMER ESASLI DİŞLİ ÇARKLARIN
NANOPARTİKÜL KATKILI YAĞLAYICI
ORTAMINDAKİ TRİBOLOJİK
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

Ömer KARTALTEPE

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**POLİMER ESASLI DİŞLİ ÇARKLARIN NANOPARTİKÜL KATKILI
YAĞLAYICI ORTAMINDAKİ TRİBOLOJİK PERFORMANSLARININ
İNCELENMESİ**

Ömer KARTALTEPE

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**KARABÜK
Temmuz 2021**

Ömer KARTALTEPE tarafından hazırlanan “POLİMER ESASLI DİŞLİ ÇARKLARIN NANOPARTİKÜL KATKILI YAĞLAYICI ORTAMINDAKİ TRİBOLOJİK PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalını

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 30/06/2021

| <u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u> | <u>İmzası</u> |
|--|---------------|
| Başkan : Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU (SÜ) | |
| Üye : Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN (KTÜN) | |
| Üye : Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR (KBÜ) | |

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Ömer KARTALTEPE

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

POLİMER ESASLI DİŞLİ ÇARKLARIN NANOPARTİKÜL KATKILI YAĞLAYICI ORTAMINDAKİ TRIBOLOJİK PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Ömer KARTALTEPE

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN

Temmuz 2021, 109 Sayfa

Bu çalışmada, nanopartikül katkılı yağlayıcıların kestamid (PA 6G) ve polilaktik asit (PLA) termoplastik dişlilerin tribolojik performansına etkisi incelenmiştir. Yağ katkısı olarak, nano gümüş (AgNP) ve nano grafen partikülleri kullanılmış ve koloidal süspansiyonlar hazırlanmıştır. Nano gümüş baz yağ ile, nano grafen ise saf su ile karıştırılmıştır. Kestamid dişliler sabit yük ve devirde, kuru, gres, baz yağ, %96 baz yağ + %4 AgNP ve %92 baz yağ + %8 AgNP olmak üzere 5 farklı yağlayıcı koşulunda çelik dişli ile eş çalıştırılmıştır. PLA dişliler ise; farklı yük ve devirlerde kuru, saf su, %90 Saf su + %10 grafen ortamında 9 farklı koşulda (Taguchi L₉) çelik dişliye karşı çalıştırılmıştır. Ayrıca PLA dişlilerin tribolojik performansına nano grafen konsantrasyonunun etkisini belirlemek için 3 farklı oranda saf su ve nano grafen karışımı yağlayıcı ortamında konsantrasyon deneyleri yapılmıştır. Dişlilerin aşınma deneyleri güç aktarım aşınma cihazında (FZG) yapılmıştır. Dişliler arduino ve motor

sürücü tarafından kontrol edilen yağlayıcı sistemi vasıtasıyla deney süresince yağlanmıştır. Deney esnasında dişlilerin temas noktalarına 0,027 ml/s debide yağlayıcı damlatılmıştır. Devir kontrolü motor sürücüsü ve redüktör sistemi ile sağlanmıştır. Dişlilere tork uygulamak için hidrolik ünite kullanılmıştır. Deney esnasında dişlilere tatbik edilen yağlayıcının ve katkılarının karakterizasyonunu belirlemek için zeta potansiyel ölçümü, partikül boyut analizi, yüzey gerilimi, ıslatabilirlik ve Uv-absorbans değerleri ölçülmüştür. Dişlilerin farklı koşullar altında aşınma performansını inceleyebilmek için aşınmaya etki eden sıcaklık faktörü deney süresince ölçülmüştür. Aşınma miktarı ağırlık farkı metodu ile tespit edilmiştir. Diş yüzeylerinde meydana gelen aşınma türleri optik mikroskop, 3D topoğrafya, SEM ve EDX ile incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde baz yağ içerisinde nano gümüş ve saf su içerisinde nano grafen katkılı yağlayıcı ortamlarında aşınma miktarının ve sıcaklığın azaldığı tespit edilmiştir. Kestamid dişlilerin performans deneylerinde minimum sıcaklık artışı, 25 °C değeri ile %92 baz yağ + %8 AgNP koşulunda elde edilmiştir. Minimum ağırlık kaybı ise gres ortamında (0,0288 g) meydana gelmiştir. Yüzey pürüzlülüğü gres ortamında ($R_t=18,129$) minimum olmuştur. PLA dişliler sıcaklık açısından en iyi performansı %90 saf su + %10 grafen ortamında, 100 d/dk hızda ve 0.235 Nm tork parametresinde göstermiştir. Devir ve yük arttıkça sıcaklık artmıştır. Kütle kaybı açısından en iyi performans %90 saf su + %10 grafen ortamında, 200 d/dk hızda ve 0,441 Nm tork parametresinde elde edilmiştir. Devir sayısı arttıkça kütle kaybı azalmış, yük arttıkça kütle kaybı artmıştır. Konsantrasyon deneylerinde PLA dişlilerin sıcaklık ve kütle kaybı en az %85 saf su + %15 nano grafen ortamında olmuştur. Saf su içerisinde grafen konsantrasyonu arttıkça sıcaklık ve kütle kaybı azalmıştır.

Anahtar Sözcükler : Nano gümüş, nano grafen, plastik dişli çark, kestamid (PA 6G), polilaktik asit (PLA), triboloji.

Bilim Kodu : 91419

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE TRIBOLOGICAL PERFORMANCE OF POLYMER BASED GEAR WHEELS IN NANOPARTICLE ADDITIVE LUBRICANT ENVIRONMENT

Ömer KARTALTEPE

Karabuk University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN

July 2021, 109 pages

In this study, the effect of nanoparticle added lubricants on the tribological performance of cestamide (PA 6G) and polylactic acid (PLA) thermoplastic gears was investigated. Nano silver (AgNP) and nano graphene particles were used as oil additives and colloidal suspensions were prepared. Nano silver was mixed with base oil and nano graphene was mixed with pure water. The kestamide gears were co-operated with the steel gears in 5 different lubricating conditions: dry, grease, base oil, 96% base oil + 4% AgNP and 92% base oil + 8% AgNP at constant load and speed. PLA gears; It was run against the steel gear in 9 different conditions (Taguchi L9) in dry, pure water, 90% Pure water + 10% graphene environment at different loads and speeds. In addition, to determine the effect of nano graphene concentration on the tribological performance of PLA gears, concentration experiments were carried out in a lubricant medium mixed with 3 different ratios of pure water and

nano graphene. The wear tests of the gears were carried out on the power transmission wear device (FZG). Gears were lubricated during the experiment by means of the lubricating system controlled by the arduino and the motor driver. During the experiment, lubricant was added to the contact points of the gears at a flow rate of 0.027 ml/s. Speed control is provided by motor driver and reducer system. A hydraulic unit is used to apply torque to the gears. Zeta potential measurement, particle size analysis, surface tension, wettability and Uv-absorbance values were measured to determine the characterization of the lubricant applied to the gears and its additives during the experiment. In order to examine the wear performance of gears under different conditions, the temperature factor affecting wear was measured during the experiment. The amount of wear was determined by the weight difference method. Wear types on tooth surfaces were examined by optical microscope, 3D topography, SEM and EDX. When the results were examined, it was determined that the amount of wear and temperature decreased in the lubricant environments with nano silver in the base oil and nano graphene in pure water. In the performance tests of kestamide gears, the minimum temperature increase was obtained at 25 °C and at 92% base oil + 8% AgNP condition. The minimum weight loss occurred in the grease medium (0.0288 g). Surface roughness was minimal in the grease environment (Rt=18.129). PLA gears showed the best performance in terms of temperature in 90% pure water + 10% graphene environment, 100 rpm speed and 0.235 Nm torque parameter. As the speed and load increased, the temperature increased. In terms of mass loss, the best performance was obtained in 90% pure water + 10% graphene medium, at 200 rpm speed and 0.441 Nm torque parameter. As the number of revolutions increased, the mass loss decreased and as the load increased, the mass loss increased. In the concentration experiments, the temperature and mass loss of PLA gears was at least 85% pure water + 15% nano graphene environment. As the graphene concentration in pure water increased, the temperature and mass loss decreased.

Keywords : Nano silver, nano graphene, plastic gear wheel, cast polyamide(PA 6G), polylactic acid(PLA), tribology.

Science Code : 91419

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum bu tez çalışmasında bilgi ve tecrübelerini paylaşarak bana yol gösteren, her türlü desteği esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN'e anlayış ve katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince bilgi, deneyim ve yardımlarını esirgemeyen, deneysel çalışmalarımda gerekli olan cihaz ve ekipmanları temin ederek laboratuvar imkanlarını sunan Sayın Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU hocama teşekkürü borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her zaman destek olan değerli hocalarıma ve tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Kestamid dişlilerin temini ve işlenmesinde yardımcı olan EHM EKSEN MAKİNA LTD. ŞTİ. Kurucu ortağı Musa FİSTİKCI'ya teşekkür ederim.

Çalışmam süresince ihtiyacım olan büyük bir sabır ve anlayışla destek olan sevgili eşime, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| KABUL..... | ii |
| ÖZET..... | iv |
| ABSTRACT..... | vi |
| TEŞEKKÜR..... | viii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xiii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xvi |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | xvii |
| | |
| BÖLÜM 1 | 1 |
| GİRİŞ | 1 |
| | |
| BÖLÜM 2 | 5 |
| LİTERATÜR TARAMASI..... | 5 |
| | |
| BÖLÜM 3 | 12 |
| DİŞLİ ÇARKLAR | 12 |
| 3. 1. PLASTİK DİŞLİ ÇARKLAR | 12 |
| 3.2. PLASTİK DİŞLİ ÇARKLARDA KULLANILAN MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI | 13 |
| 3.2.1. Termoplastik Dişli Çark Malzemeleri | 14 |
| 3.2.1.1. Polilaktik Asit (PLA) | 15 |
| 3.2.1.2. Kestamid (PA 6G)..... | 15 |
| 3.2.2. Termoset Dişli Çark Malzemeleri | 16 |
| 3.3. PLASTİK DİŞLİLERE EKLENEN KATKI MADDELERİ..... | 17 |
| 3.3.1. Dolgu Maddeleri | 17 |
| 3.3.2. Takviyeler | 17 |
| 3.3.3. Yağlayıcılar | 18 |
| 3.3.4. Darbe Modifiye Ediciler | 18 |
| 3.4. METALLER İLE PLASTİKLERİN KARŞILAŞTIRILMASI | 19 |
| 3.5. PLASTİK DİŞLİLERİN AVANTAJLARI..... | 20 |

| | |
|---|-----------|
| 3.6. PLASTİK DİŞLİLERİN DEZAVANTAJLARI | 21 |
| BÖLÜM 4 | 22 |
| PLASTİK DİŞLİLERDE MEYDANA GELEN HASAR TÜRLERİ VE AŞINMA | 22 |
| 4.1. ERİME..... | 22 |
| 4.2. KATMAN AYRILMASI | 23 |
| 4.3. DİŞ KÖKÜ KIRILMASI | 23 |
| 4.4. DEFORMASYON..... | 24 |
| 4.5. DİŞ AŞINMASI | 25 |
| 4.5.1. Plastik Dişlilerde Görülen Aşınma Türleri | 26 |
| 4.5.1.1. Abrazif (Aşındırıcı) Aşınma | 26 |
| 4.5.1.2. Adhesif Aşınma | 27 |
| 4.5.1.3. Çukurlaşma (Pitting)..... | 29 |
| BÖLÜM 5 | 31 |
| MATERYAL VE METOD | 31 |
| 5.1. DİŞLİ ÇARK TASARIMI | 31 |
| 5.1.1. Profili Kaydırılmış Dişli Çarklar | 32 |
| 5.1.2. Pozitif Profil Kaydırma Yapılmış Dişli Çarkların Hesaplamaları | 33 |
| 5.2. PLA DİŞLİ ÜRETİMİ..... | 34 |
| 5.3. KONTROL EDİLEBİLİR YAĞLAYICI SİSTEMİ | 35 |
| 5.3.1. Kontrol Edilebilir Yağlayıcı Sistemindeki Elemanlar | 36 |
| 5.3.1.1. Arduino | 36 |
| 5.3.1.2. Motor Sürücü | 37 |
| 5.3.1.3. DC Motor | 37 |
| 5.3.2. Kontrol Edilebilir Yağlayıcı Sisteminin Şematik Devre Çizimi | 38 |
| 5.4. DİŞLİ AŞINMA SİSTEMİ | 39 |
| 5.4.1. FZG Aşınma Deney Test Cihazı..... | 39 |
| 5.4.2. Tork Kontrol Sistemi | 41 |
| 5.4.2.1. Hidrolik dişli pompa | 42 |
| 5.5. ÖLÇÜM METODOLOJİSİ..... | 43 |
| 5.5.1. Yağ Karakterizasyonu | 43 |
| 5.5.1.1. Zeta Potansiyel..... | 43 |

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| 5.5.1.2. Partikül Boyut Analizi | 45 |
| 5.5.1.3. Yüzey gerilimi | 46 |
| 5.5.1.4. Islatabilirlik | 47 |
| 5.5.1.5. UV Absorbans | 51 |
| 5.5.2. Aşınma Ölçümleri..... | 52 |
| 5.5.2.1. SEM | 52 |
| 5.5.2.2. TEM | 53 |
| 5.5.2.3. 3D Topoğrafya | 53 |
| 5.5.2.4. Ağırlık Ölçümü | 53 |
| 5.5.2.5. Sıcaklık Ölçümü..... | 54 |
| | |
| BÖLÜM 6 | 56 |
| DENEY TASARIMI..... | 56 |
| 6.1. KESTAMİD DİŞLİLERİN DENEY TASARIMI | 56 |
| 6.2. TAGUCHİ DENEY TASARIMI | 57 |
| 6.3. PERFORMANS DENEYLERİ..... | 58 |
| 6.4. VARYANS ANALİZİ (ANOVA) | 58 |
| | |
| BÖLÜM 7 | 60 |
| DENEYSSEL BULGULAR VE TARTIŞMA..... | 60 |
| 7.1. NANOPARTİKÜL KATKILI BAZ YAĞ ORTAMINDA KESTAMİD DİŞLİNİN TRİBOLOJİK PERFORMANSI | 60 |
| 7.1.1. Ağırlık Kaybı Analizi | 60 |
| 7.1.1.1. Kuru Ortam | 61 |
| 7.1.1.2. Gres Ortamı..... | 62 |
| 7.1.1.3. Baz Yağ Ortamı | 63 |
| 7.1.1.4. %96 Baz Yağ + %4 AgNP Ortamı | 64 |
| 7.1.1.5. %92 Baz Yağ + %8 AgNP Ortamı | 65 |
| 7.1.2. Sıcaklık Değişim Analizi..... | 66 |
| 7.1.2.1. Kuru Ortam | 68 |
| 7.1.2.2. Gres Ortamı..... | 69 |
| 7.1.2.3. Baz Yağ Ortamı | 71 |
| 7.1.2.4. %96 Baz Yağ + %4 AgNP Ortamı | 72 |
| 7.1.2.5. %92 Baz Yağ + %8 AgNP Ortamı | 74 |

| | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| 7.1.3. Optik mikroskop görüntüleri | 75 |
| 7.1.3.1. Kuru Ortam | 76 |
| 7.1.3.2. Gres Ortamı..... | 76 |
| 7.1.3.3. Baz Yağ Ortam | 77 |
| 7.1.3.4. Baz Yağ + %4 AgNp Ortam | 78 |
| 7.1.3.5. Baz Yağ + %8 AgNP Ortam..... | 79 |
| 7.1.4. SEM, EDX ve Mapping analizi | 80 |
| 7.1.4.1 SEM Analizi..... | 80 |
| 7.1.4.2. EDX Analizleri | 86 |
| 7.1.4.2. Mapping Analizleri | 89 |
| 7.1.5. 3D Topoğrafya analizi | 91 |
| 7.2. NANO GRAFEN SÜSPANSİYON ORTAMINDA PLA DİŞLİLERİN TRİBOLOJİK PERFORMANSI..... | 93 |
| 7.2.1. S/N Oranı ve ANOVA ile Sıcaklık Analizi..... | 93 |
| 7.2.2. S/N Oranı ve ANOVA ile Ağırlık Kaybı Analizi..... | 95 |
| 7.2.3. Yağlayıcı Türü, Devir ve Yük Etkileşiminin Analizi..... | 96 |
| 7.2.4. Konsantrasyon Oranının Değişiminin Analizi..... | 98 |
| | |
| BÖLÜM 8 | 101 |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 101 |
| 8.1. KESTAMİD DİŞLİLERİN SONUÇLARI | 101 |
| 8.2. PLA DİŞLİLERİN SONUÇLARI..... | 102 |
| 8.3. ÖNERİLER | 103 |
| | |
| KAYNAKLAR | 105 |
| | |
| ÖZGEÇMİŞ | 109 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Şekil 3.1. Amorf polimer yapısı. | 13 |
| Şekil 3.2. Kristalin polimer yapısı. | 14 |
| Şekil 3.3. Metallerin ve plastiklerin gerilme-uzama grafiği. | 20 |
| Şekil 4.1. Diş kökü kırılması. | 23 |
| Şekil 4.2. Diş deformasyonu. | 24 |
| Şekil 4.3. Diş aşınması. | 26 |
| Şekil 4.4. İki cisimli abrazyon aşınma mekanizması. | 27 |
| Şekil 4.5. Üç cisimli abrazyon aşınma mekanizması. | 27 |
| Şekil 4.6. Adhezyon aşınma mekanizması. | 28 |
| Şekil 4.7. Pitting. | 29 |
| Şekil 4.8. Plastik dişlilerde meydana gelen aşınma türleri. | 30 |
| Şekil 5.1. Solidworks programında tasarımı yapılan dişli çark. | 31 |
| Şekil 5.2. Profil kaydırmanın diş geometrisine etkisi. | 32 |
| Şekil 5.3. 3D yazıcıda üretilecek dişli çarkın baskı görüntüleri. | 35 |
| Şekil 5.4. Kontrol edilebilir yağlayıcı sisteminin blok diyagramı. | 36 |
| Şekil 5.5. Arduino'nun şematik gösterimi. | 36 |
| Şekil 5.6. L298N motor sürücünün şematik çizimi. | 37 |
| Şekil 5.7. DC motor ve yağlayıcı deposu. | 37 |
| Şekil 5.8. Yağlayıcı ünitesinin fritzing programında şematik gösterimi. | 38 |
| Şekil 5.9. Yağlayıcı ünitesinin fritzing programında devre çizimi. | 39 |
| Şekil 5.10 a. Dişli aşınma deneyi test cihazı şematik çizimi. | 40 |
| Şekil 5.10 b. Dişli aşınma deneyi test cihazı. | 41 |
| Şekil 5.11 a. Tork kontrol sisteminin şematik gösterimi. | 42 |
| Şekil 5.11 b. Tork kontrol sistemi. | 42 |
| Şekil 5.12. Nano gümüş zeta potansiyel değeri. | 44 |
| Şekil 5.13. Nano gümüş partikül boyut analiz sonuçları. | 45 |
| Şekil 5.14. Baz yağ damlası yüzey gerilim ölçümü. | 46 |
| Şekil 5.15. Baz yağ yüzey gerilim grafiği. | 47 |

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 5.16. Temas açısı örnekleri..... | 47 |
| Şekil 5.17. Temas açılarının ıslatabilirlik düzeyleri..... | 48 |
| Şekil 5.18. Çelik dişli üzerindeki baz yağ ıslatabilirliği. | 48 |
| Şekil 5.19. Baz yağın temas açısı grafiği. | 49 |
| Şekil 5.20. Çelik dişli üzerindeki baz yağ + %4 AgNP ıslatabilirliği..... | 49 |
| Şekil 5.21. Baz yağ + %4 AgNP temas açısı grafiği..... | 50 |
| Şekil 5.22. Çelik dişli üzerindeki baz yağ + %8 AgNP ıslatabilirliği..... | 50 |
| Şekil 5.23. Baz yağ + %8 AgNP temas açısı grafiği..... | 51 |
| Şekil 5.24. Nano gümüş partiküllerinin Uv grafiği..... | 52 |
| Şekil 5.25. Nano gümüş partiküllerinin TEM görüntüsü..... | 53 |
| Şekil 5.26. Hassas terazi..... | 54 |
| Şekil 5.27. Sıcaklık sensörü | 55 |
| Şekil 7.1. Kestamid dişlilerin deney şartlarının ağırlık kayıplarının grafiği..... | 61 |
| Şekil 7.2. Kuru ortamdaki ağırlık kaybı grafiği. | 61 |
| Şekil 7.3. Gres ortamındaki ağırlık kaybı grafiği..... | 63 |
| Şekil 7.4. Baz yağ ortamındaki ağırlık kaybı grafiği. | 64 |
| Şekil 7.5. Baz yağ + %4 AgNP ortamındaki ağırlık kaybı grafiği..... | 65 |
| Şekil 7.6. Baz yağ + %8 AgNP ortamındaki ağırlık kaybı grafiği..... | 66 |
| Şekil 7.7. Tüm deney şartlarındaki sıcaklık grafiği. | 67 |
| Şekil 7.8. Tüm deney şartlarındaki termal kamera sıcaklık grafiği. | 67 |
| Şekil 7.9. Kuru ortamdaki termal kamera sıcaklık görüntüleri..... | 69 |
| Şekil 7.10. Kuru ortamdaki sıcaklık grafiği..... | 69 |
| Şekil 7.11. Gres ortamındaki termal kamera sıcaklık görüntüleri. | 70 |
| Şekil 7.12. Gres ortamındaki sıcaklık grafiği..... | 71 |
| Şekil 7.13. Baz yağ ortamındaki termal kamera sıcaklık görüntüleri..... | 72 |
| Şekil 7.14. Baz yağ ortamındaki sıcaklık grafiği. | 72 |
| Şekil 7.15. Baz yağ + %4 AgNP ortamındaki termal kamera sıcaklık görüntüleri. .. | 73 |
| Şekil 7.16. Baz yağ + %4 AgNP ortamındaki sıcaklık grafiği. | 74 |
| Şekil 7.17. Baz yağ + %8 AgNP ortamındaki termal kamera sıcaklık görüntüleri. .. | 75 |
| Şekil 7.18. Baz yağ + %8 AgNP ortamındaki sıcaklık grafiği. | 75 |
| Şekil 7.19. Kuru ortamdaki optik mikroskop görüntüleri..... | 76 |
| Şekil 7.20. Gres ortamındaki optik mikroskop görüntüleri..... | 77 |

Sayfa

| | |
|---|-----|
| Şekil 7.21. Baz yağ ortamındaki optik mikroskop görüntüleri. | 78 |
| Şekil 7.22. Baz yağ + %4 AgNP ortamındaki optik mikroskop görüntüleri. | 79 |
| Şekil 7.23. Baz yağ + %8 AgNP ortamındaki optik mikroskop görüntüleri. | 80 |
| Şekil 7.24. Kuru ortamdaki SEM görüntüleri. | 82 |
| Şekil 7.25. Gres ortamındaki SEM görüntüleri..... | 83 |
| Şekil 7.26. Baz yağ ortamındaki SEM görüntüleri. | 84 |
| Şekil 7.27. Baz yağ + %4 AgNP ortamındaki SEM görüntüleri..... | 85 |
| Şekil 7.28. Baz yağ + %8 AgNP ortamındaki SEM görüntüleri..... | 86 |
| Şekil 7.29. Kuru ortamdaki EDX analizi ve spektrumu. | 87 |
| Şekil 7.30. Gres ortamındaki EDX analizi ve spektrumu. | 87 |
| Şekil 7.31. Baz yağ ortamındaki EDX analizi ve spektrumu..... | 88 |
| Şekil 7.32. Baz yağ + %4 AgNP ortamındaki EDX analizi ve spektrumu. | 88 |
| Şekil 7.33. Baz yağ + %8 AgNP ortamındaki EDX analizi ve spektrumu. | 89 |
| Şekil 7.34. Baz yağ + %4 AgNP ortamındaki elemental mapping analizinin görüntüsü. | 90 |
| Şekil 7.35. Baz yağ + % 8 AgNP ortamındaki elemntal mapping analizinin görüntüsü. | 90 |
| Şekil 7.36. Dişli yüzeylerinin topoğrafya görüntüleri..... | 92 |
| Şekil 7.37. Sıcaklık değişiminin S/N analizi..... | 93 |
| Şekil 7.38. Ağırlık kaybının S/N analizi. | 95 |
| Şekil 7.39. Yağlayıcı türü, devir ve yük etkileşiminin kütle kaybına etkisi. | 97 |
| Şekil 7.40. Yağlayıcı türü, devir ve yük etkileşiminin sıcaklık farkına etkisi. | 98 |
| Şekil 7.41. %15 Nanografen konsantrasyonundaki PLA dişlilerin termal kamera sıcaklıkları | 99 |
| Şekil 7.42. Tüm konsantrasyonlardaki PLA dişlilerin sıcaklık grafiği..... | 99 |
| Şekil 7.43. Tüm konsantrasyonlardaki PLA dişlilerin ağırlık kaybı grafiği. | 100 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Çizelge 3.1. Amorf ve kristalin yapıdaki bazı termoplastikler | 13 |
| Çizelge 3.2. PLA özellikleri..... | 15 |
| Çizelge 3.3. PA 6G özellikleri. | 16 |
| Çizelge 3.4. Plastiklere eklenen yağlayıcılar. | 18 |
| Çizelge 5.1. Tasarımı yapılan dişli çarkın çizim programındaki ölçüleri. | 32 |
| Çizelge 5.2. Pozitif profil kaydırma uygulanmış dişli çarkın ölçüleri. | 34 |
| Çizelge 5.3. Elektrik motorunun özellikleri..... | 40 |
| Çizelge 6.1. Kestamid dişlilerin tam faktöriyel deney parametreleri..... | 57 |
| Çizelge 6.2. PLA dişlilerin Taguchi L ₉ ortogonal deney parametreleri..... | 58 |
| Çizelge 7.1. Yüzey pürüzlülük değerleri..... | 91 |
| Çizelge 7.2. Giriş parametrelerinin sıcaklık farkı parametresine etkisinin ANOVA analizi..... | 94 |
| Çizelge 7.3. Giriş parametrelerinin kütle kaybı parametresine etkisinin ANOVA analizi..... | 96 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

| | |
|----------------|----------------------------|
| a | : eksenler arası mesafe |
| d | : taksimat dairesi çapı |
| d _a | : diş üstü çapı |
| d _b | : temel daire çapı |
| d _t | : diş dibi çapı |
| d _y | : yuvarlanma dairesi çapı |
| m | : modül |
| Z | : diş sayısı |
| B | : diş genişliği |
| ε | : profil kavrama oranı |
| X | : profil kaydırma oranı |
| E | : kavrama uzunluğu |
| g _a | : kavrama boyu |
| α | : kavrama açısı |
| α _v | : eş çalışma kavrama açısı |
| W/Mk | : ısı iletkenlik katsayısı |
| °C | : santigrat derece |
| cl | : santilitre |
| cSt | : santistokes |
| d/dk | : dakikadaki devir sayısı |
| g | : gram |
| m | : metre |
| m/s | : metre/saniye |
| ml/s | : mililitre/saniye |
| cm | : santimetre |
| mm | : milimetre |

| | |
|-------------------|--|
| nm | : nanometre |
| μm | : mikrometre |
| N | : newton |
| Nm | : Newtonmetre |
| A | : amper |
| V | : volt |
| Kw | : kilowatt |
| MHz | : megahertz |
| V | : pompanın hacimsel debisi |
| η | : hidromekanik verim |
| Θ | : temas açısı |
| ΔP | : sistem basıncı |
| Γ | : yüzey gerilimi |
| MoS ₂ | : molibden disülfid |
| NaOH | : sodyum hidroksit |
| NaBH ₄ | : sodyum borhidrür |
| AgNO ₃ | : gümüş nitrat |
| Ag | : gümüş |
| Fe | : demir |
| C | : karbon |
| Si | : silisyum |
| S | : kükürt |
| P | : fosfor |
| Mn | : mangan |
| Rt | : maksimum tepe- çukur arasındaki mesafe |
| Rp | : maksimum tepe yüksekliği |
| Rv | : maksimum çukur derinliği |

KISALTMALAR

| | |
|-------|--|
| ABS | : Akrlonitril Bütadien Strien |
| AgNP | : Gümüş Nano Partikül |
| ANOVA | : Analysis of Variance (Varyans Analizi) |

| | |
|------|--|
| E | : Ester |
| EDX | : Energy Dispersive X-Ray (Enerji Dağılımlı X-Işını) |
| PA | : Poliamid |
| PA6G | : Kestamid |
| PAO | : Polyalphaolefin |
| PBT | : Polibütlen Tereftalat |
| PC | : Polikarbonat |
| PE | : Polietilen |
| PEEK | : Polieter Eter Keton |
| PET | : Polietilentereftalat |
| PLA | : Polilaktik Asit |
| POM | : Polioksimetilen |
| PP | : Polipropilen |
| PS | : Polistrien |
| PTFE | : Politetrafloroetilen |
| PG | : Poliglikol |
| S/N | : Signal/ Noise (Sinyal/ Gürültü) |
| SEM | : Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu) |
| TEM | : Transmission Electron Microscopy (Geçirimli Elektron Mikroskobu) |
| UV | : Ultraviolet Visible (Ultraviyole Görünür) |
| VI | : Viskozite indeksi |

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Polimer esaslı mühendislik malzemeleri yüksek spesifik mukavemet, kendinden yağlayıcılık, düşük maliyet, temin edilebilirlik, üretim kolaylığı, sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği açısından endüstriyel uygulamalarda kullanım alanına sahiptir. Tork aktarımı, yataklama, yağlama ve bağlama elemanı olarak mekanik uygulamalarda kullanılan polimer malzemelerin çeşitleri; asetal, poliamid, kestamid, polikarbonatlar, polyesterler, polieter eter keton, polilaktik asitler ve diğerleri olarak sınıflandırılabilir. Biyopolimer sınıfına giren polilaktik asitler sürdürülebilirlik ve eklemeli imalat ile hızlı üretilebilirlik açısından önem taşımaktadır. Bu sebeple mekanik uygulamalarda kullanılabilirliklerinin araştırılması gerekmektedir. Özellikle eklemeli imalatta yoğun olarak kullanılan ve poli (L-laktit) olarak da adlandırılan PLA, ~207 °C erime sıcaklığı ve ~60 °C camsı geçiş sıcaklığı ile dişli çark, kaymalı yatak ve cıvata malzemesi olarak kullanılabilirlik potansiyeline sahiptir. Endüstriyel malzemelerin kirleticiliği de dikkate alındığında PLA'nın biyokütleden elde edilmesi, toksisite seviyesinin düşüklüğü ve hızlı çözünürlüğü, PLA'yı önemli bir alternatif haline getirmektedir. Fakat PLA'nın ısı iletkenliğinin düşük olması, yüksek devir ve yüklerde camsı geçiş sıcaklığının aşılması ile viskoelastik davranış sergilemeye başlaması gibi dezavantajları vardır. Kestamid ise endüstride yüksek oranda tercih edilen bir polimer türüdür. Hamur kesme ve yuvarlama makinaları, dönerli ekmek fırınları olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet, 110 °C'de sürekli çalışma, aşınma direncinin iyi olması, yüksek erime sıcaklığı, diğer polimerlere nispeten daha az su emme özellikleri ile dikkat çekmektedir. Ayrıca kestamid döküm yoluyla üretildiği için üretim esnasında farklı katkı maddesi katılmasına olanak sağlamaktadır.

Kuru çalışma özelliği ile bilinen polimerler bilinenin aksine belirli periyotlarda yağlanarak aşınmaya sebep olan basınç ve sürtünme azaltılabilir. Yağlayıcı kullanımı ile aşınma ara yüzeyinde oluşturulan film tabakasından hem yük taşıma kapasitesini arttırma hem de sürtünme katsayısını azaltma fonksiyonlarını göstermesi beklenir. Azalan sürtünme katsayısı ile sıcaklığın ve kütle kaybının azaltılması aşınma direncinin artması olarak ifade edilir. Film tabakasının mukavemeti yağlayıcının viskozitesi ile bağlantılıdır. Aşırı yüksek viskozite değerlerinde yağlayıcının penetrasyon kabiliyeti ve enerji verimliliği negatif etkileneceği için optimum viskozite değerlerine sahip yağlayıcıların kullanımı yük taşıma kabiliyetinin arttırılması açısından önemlidir. Yağlayıcının tabakalı moleküler yapıya sahip olması ise temas esnasında kayma gerilmesinin minimizasyonunu sağlayarak sürtünme katsayısının azalmasını ve endüstriyel malzemelerin servis ömürlerinin artmasını sağlayacaktır. Yağlayıcının fonksiyonelliği için belirtilen özellikler aşınmaya maruz bütün endüstriyel malzemeler için genellenebilir. Polimerler her ne kadar yağlayıcı özelliğe sahip olsalar da baz yağların sağladığı yüksek tribolojik performansı sergilemeleri güçtür. Polimerlerin kimyasal içeriğindeki karbonun bileşik şeklinde başka bir element ile bağlı olması yağlayıcılık kabiliyetlerini sınırlandırmaktadır. Bu sebeple aşınmaya maruz polimerlerde de mineral, sentetik, yarı sentetik ve bitkisel yağlar yağlayıcı olarak kullanılabilir.

Yağlayıcılara katılan katkı maddeleri de yağların performansını artırarak hem sıcaklığı hem de aşınmayı azaltabilir. Bilinen aksine baz yağların içerisine ısı iletim katsayısı yüksek elementlerin katılması, ısı transferini hızlandırarak malzemede biriken ısıyı azaltır. Isı iletim katsayısı en yüksek olan elementler başta gümüş olmak üzere bakır ve altındır. Bu elementler kimyasal yöntemlerle nano boyutta elde edilerek baz yağların içerisine katılabilir.

Güç ve hareket iletimi için kullanılan dişli çarkların geçmişi çok uzun yıllara dayanmaktadır. Düşük tork ve hareket iletimi istenen yerlerde ise polimer dişli çarklar tercih edilmektedir. Polimer dişli çarkların mukavemet ve termal özellikleri iyileştirilirse çelik dişli çarklara alternatif olabilir. Polimer esaslı dişli çarkların endüstriyel olarak kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle çelik dişlilere karşı

çalıştırılmaktadır. Aşırı yüklenme anında çelik dişli yerine polimer dişli hasar görecektir. Bu durum maliyet açısından fayda sağlayacaktır.

Triboloji aşınma, sürtünme ve yağlamanın bir arada incelendiği bilim dalıdır. Aşınma ve sürtünme bazı makina elemanları için istenmeyen bir durumdur. Çoğu mekanizmalarda aşınmadan kaynaklı hasar meydana gelmekte bu da şirketlerin ve ülkelerin ekonomisini belli oranda olumsuz etkilemektedir. Aşınmadan ve sürtünmeden kaynaklı hasarların azaltılması için çalışmalar devam etmektedir. Dişli çarkların verimliliğini artırılabilmesi için tribolojik performansının iyileştirilmesi gerekmektedir. Aşınmayı ve sürtünmeyi azaltmak için genellikle yağlayıcı kullanılmaktadır.

Bu tez çalışması sekiz bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde genel bilgiler verilmiştir. Literatür taraması bölümünde konu ile ilgili yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Dişli çarklar bölümünde dişli çarkın tanımından ve plastik dişli çarklardan bahsedilmiştir. Plastik dişli çarklarda meydana gelen hasar türleri ve aşınma bölümünde hasarlar ve aşınma mekanizmaları anlatılmıştır. Materyal metod bölümünde ise dişli çark tasarımı, 3D yazıcıda dişli üretimi, kontrol edilebilir yağlayıcı sistemi, dişli aşınma sistemi, tork kontrol sistemi ve yapılan deneylerin ölçüm metodolojisi anlatılmıştır. Deney tasarımı bölümünde yapılan deneylerin hangi parametrelerde ve koşullarda ne kadar süre ile çalıştığına dair bilgilere yer verilmiştir. Deneysel bulgular ve tartışma bölümünde ise deneylerde elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Sonuçlar ve öneriler bölümünde genel sonuçlar çıkarılarak yeni çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

Bu çalışmada polimer malzemeden yapılmış kestamid (PA 6G) ile polilaktik asit (PLA) dişli çarkların çelik dişli çarklar ile eş çalışırken nanopartikül katkılı yağlayıcı ortamında tribolojik performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Literatür tarandığında polimer dişli çarkların kuru ortamda ve farklı yağlayıcı koşullarındaki tribolojik performansı incelenmiştir. Bu tez çalışmasında yağlayıcı içerisine nanopartikül katılarak yağlayıcı elde edilmesi çalışmaya özgünlük katmıştır. Ayrıca diğer çalışmalardan farklı olarak dişli çarklar bir yağ haznesi içerisinde çalıştırılmamıştır. Çünkü yağ haznesi içerisinde sürekli aynı yağlayıcı

bulduğundan dolayı çalışma süresi uzadıkça yağlayıcının sıcaklığı artmaktadır. Sıcaklığın artması yağlayıcının viskozitesini azaltır. Viskozite azaldığında da yağ filmi kopabilmektedir. Bu da yağlayıcının özelliğini yitirmesine dolayısıyla görevini yerine getirememesine sebep olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı yağlayıcının kontrol edilebilir yağlayıcı sistemi ile istenilen zaman aralığında ve debide dişlilerin temas noktalarına yağ damlatılarak yağlama yapılması sağlanmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

Özkasap, yaptığı çalışmada yağlayıcıların aşınmaya etkisini incelemiştir. Farklı hızlarda ve yüklerde muhtelif yağların aşınmaya etkisi FZG dişli aşınma deney test cihazı kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmada CuSn12 dökme bronz dişli çarklar kullanılmıştır. 750 ve 1500 d/dk hızda, 3 farklı yağlayıcı kullanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde; SAE 140, BASE OİL, BASE OİL + MoS₂ yağları kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucu viskozitesi en yüksek olan SAE 140 yağında, dişlilerde en az aşınma meydana gelmiştir. Sonuç olarak, dişlilere uygulanan yük arttıkça aşınma artar. Viskozitesi yüksek olan yağlarda aşınma daha az olmaktadır. Aynı yükte çalışan fakat devir sayıları farklı olan dişlilerde devir sayısının artması aşınmayı artırmıştır [1].

Keskin, yaptığı çalışmada değişik viskoziteye sahip mineral yağların aşınmaya etkisini incelemiştir. Deneyler dişli yorulma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneyde Reductelf SP mineral yağlarının 68, 150, 320, 680 viskozite değerine sahip 4 çeşidi kullanılmıştır. Deneyde kullanılan dişli ise GG25 dökme demirden imal edilmiştir. Sonuç olarak viskozite arttıkça aşınma değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Çıkarılan bir diğer sonuç ise dişli çarkın çalışma sıcaklığı arttıkça yağ viskozitesi azalır. Bu sebeple viskozite sınırlandırılmalıdır [2].

Şahin, yaptığı çalışmada diş sıcaklıklarındaki değişimin aşınmaya etkisini incelemiştir. Dişliler, FZG dişli aşınma deney cihazında tork uygulanarak aşınmaya maruz bırakılmıştır. Dişli çarkların diş sıcaklığı, dişlerin üzerine yerleştirilen termokupul vasıtası ile ölçülmüştür. Deneyde kullanılan dişli malzemesi CuSn12'dir. Deneyler, dişli çarklara uygulanan tork her bir deney için 25 Nm artırılarak 7 farklı yük kademesinde, 750 ve 1500 d/dk olmak üzere 2 kademe devir sayısında gerçekleşmiştir. Dişliler her bir yük kademesinde 1500 d/dk için 15 dk, 750 d/dk için

30 dk çalıştırılmış dişlilerin toplam çevrim sayısı 22 500 devirdir. Deneyde aşınma, yağlayıcı ve çalışma hızına bağlı olarak değişmektedir. Elde edilen sonuçlara göre dişlinin diş profili üzerine gelen yük miktarı arttıkça aşınma artmış viskozitesi yüksek olan yağlarda aşınma miktarı daha az olmuştur. Çalışma hızı arttıkça aşınma miktarı artmıştır. Diş dibi dairesi üzerindeki sıcaklık taksimat dairesi üzerindeki sıcaklıktan daha fazladır. Sebebi ise taksimat dairesinde kayma hareketi değil yuvarlanma hareketinin olmasıdır [3].

Eş, yaptığı çalışmada dişli imalatında çok tercih edilen 16MnCr5 malzemeden yapılmış çelik dişlileri kullanmıştır. Dişlilerin birinin yüzeyi sementasyon işlemi ile sertleştirilmiştir. Diğerine ise hiçbir işlem uygulanmamıştır. Dişliler kuru ve yağlı, kayma-yuvarlanma koşullarında aşınmaları incelenmiştir. Deneyler TE53 aşınma deney cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde iki disk aşınma test özelliği kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan dişliler 60 mm çapında, 8 mm genişliğindedir. Yüzey işlemi uygulanmayan dişli 14 HRC, yüzeyine sementasyon işlemi uygulanan dişli 60 HRC sertliğine sahiptir. Deneyler; 700 d/dk sabit yuvarlanma hızında, 200 000 devire kadar ve 300 N yükte %1,79, %8,70, %13,33, %22,22 kayma-yuvarlanma oranlarında (kayma hızının yuvarlanma hızına oranı) yapılmıştır. Deneylerde Shell Tellus R 37 yağı kullanılmıştır. Deneyler her 20 000 devirde durdurularak dişlilerin üzerinde meydana gelen aşınma 10^{-4} g hassasiyete sahip terazi ile tartılarak ağırlık kaybı yöntemi ile ölçülmüştür. Deneyler sonucunda kayma oranının artması aşınmayı artırmıştır. Yüzeyi sertleştirilmiş dişlilerin aşınma oranı yüzey sertleştirme işlemi yapılmayana göre daha azdır. Sertleştirilmiş dişlilerde yük arttığında aşınma artmıştır. Yağlı kayma-yuvarlanma çalışma şartlarında aşınma, kuru kayma-yuvarlanma çalışma şartlarına göre daha azdır [4].

Yakut, yaptığı çalışmada PA66 GFR 30, ABS/PC ve PA66 GFR 30 + %2 borik asit, içerikli enjeksiyon yöntemi ile imal edilen termoplastik dişli çarkların yük taşıma kapasitesini ve hasar oluşumunu değişik yük ve devir sayılarında deneysel olarak incelemiştir. Ayrıca termoplastik - AISI 8620 ve termoplastik - termoplastik eş dişli çalışma performansları da incelenmiştir. Deneyler, 750, 1000 ve 1500 d/dk olmak üzere 3 farklı devir sayılarında yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda modül düştükçe kütle sıcaklığı düşmüş böylelikle aşınma azalmıştır. Fakat mukavemet

azaldığı için diş kırılmaları erken meydana gelmiştir. PA66 GFR 30 plastik dişli ile AISI 8620 çelik dişli çarkın eş çalışması durumunda çelik dişli çark, temas esnasında oluşan ısıyı, ısı iletim katsayısı daha yüksek olduğu için üzerine almış ve dış ortama dağıtarak ısı dengeye ulaşmıştır. PA66 GFR 30 plastik dişli ile yine aynı PA66 GFR 30 eş çalıştıklarında ise plastik dişli çarklarda çelik dişliye nazaran diş sıcaklığı daha fazla olmuştur. Bu sebeple daha erken termal hasarın oluştuğu gözlemlenmiştir. ABS/PC malzemeden üretilen dişli çarklar düşük devir ve yüklerde ideal olarak çalışmaktadır. Düşük güç iletiminde ABS/PC dişliler tercih edilebilir. PA66 GFR 30 malzemeden üretilen dişliye %2 borik asit katılarak elde edilen dişli de ise diş sıcaklığı katkısız olana göre daha düşük olmuştur. Ancak mukavemet değerleri düşüş göstermiştir [5].

Düzcükoğlu ve arkadaşları, plastik dişlilerin yüksek devir ve yük altında sıcaklıktan kaynaklı diş yüzeyindeki hasarları incelemiştir. Yapılan deneylerde döndürülen dişli olarak poliamid (PA 6 + MoS₂), Döndüren dişli olarak da AISI 8620 malzemeden üretilen dişli kullanılmıştır. Deneyler 1000 d/dk hızda 12,02, 27,2, 37,5 N/mm yük altında, 12 saat çevrim süresinde gerçekleşmiştir. 12,02 N/mm yükte dişli çarkın diş yüzeyinde termal hasar görülmemiş, ancak diş dibinde kısmen aşınma olmuştur. 27,2 ve 37,5 N/mm yüklerde ise ısı miktarı arttığı için dişli malzemesi yumuşamış, dişlinin bölüm dairesi bölgesinde pitting (çukurcuklar) şeklinde dişli aşınma hasarı meydana gelmiştir. Sonuç olarak dişlilere uygulanan yük miktarı arttıkça plastik dişli çarkların ısı iletimi düşük olduğundan bölüm dairesi bölgesinde ısı birikimi de artmış ve dişli çarkın mekanik özellikleri zayıfladığı için termal hasara uğramıştır. Plastik dişli çarkların üzerinde biriken ısıyı azaltmak için ısı iletkenlik özelliği yüksek olan farklı dişlilerle çalıştırılması dişli ömrünün artmasına olumlu katkı sağlayacaktır [6].

Serin, yaptığı çalışmada bor katkılı madeni yağın sürtünme katsayısına ve aşınmaya etkisini incelemiştir. Yağ haznesine, farklı sıcaklıklarda bor katkısı eklenerek borun aşınmaya olan etkisi deneysel olarak belirlenmiştir. Aşınma ve sürtünme kayıpları bilye disk yöntemi ile ölçülmüştür. Yapılan çalışmada SAE 10W 40 madeni yağ kullanılmıştır. Deneylerde, AISI 8620 sementasyon çeliği ile TiN kaplanmış soğuk iş takım çeliğinden oluşan iki farklı disk kullanılmıştır. Deneyler 2,5 ve 3,5 m/s

hızlarda, 60 N yükte, oda sıcaklığı, 50 °C ve 80 °C'de SAE 10W 40 yağ ve %10 bormax katkılı madeni yağ kullanılarak yapılmıştır. Deney süresi 12 000 m olarak belirlenmiştir. Yapılan deney sonucunda bor katkılı madeni yağın 50 °C ve 80 °C'de aşınmayı ve sürtünme katsayısını azalttığı gözlemlenmiştir. Oda sıcaklığında ise aşınma ve sürtünme katsayısı açısından, katkısız madeni yağın daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise bor katkısının sulu bir çözelti olmasından dolayıdır. Optimum değerler ise 50 °C' ve 2,5 m/s hızda elde edilmiştir [7].

Torun, yaptığı çalışmada üç boyutlu yazıcıdan üretilen malzemesi PLA olan düz dişli çarklar ile FZG kapalı devre güç aktarım cihazı ile aşınma deneyi gerçekleştirmiştir. Deneyler 0,5, 1, 1,5 Nm olmak üzere üç farklı yük, 300, 600, 900 d/dk olmak üzere üç farklı devir parametrelerinde yapılmıştır. Aşınma test öncesi, 5×10^4 ve 10×10^4 turun sonunda 10^{-4} g hassasiyete sahip terazi ile ölçülerek tespit edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda devir sayısı arttıkça aşınma azalmış yük ve tur miktarı arttıkça aşınma artmıştır. Yapılan deney sonucunda aynı zamanda dişlilerin yüzey pürüzlülüğü incelenmiş, devir sayısı arttıkça pürüzlülük azalmış, yük ve tur miktarı arttıkça pürüzlülük artmıştır [8].

Şirin, yaptığı çalışmada 3 boyutlu yazıcıda PLA malzemeden üretilen helisel dişli çarklar FZG güç aktarım deney seti vasıtası ile aşınmaya maruz bırakılmıştır. Deney sonrası aşınma miktarları, 10^{-4} g hassasiyetli elektronik terazi ile belirlenmiştir. Yapılan deneylerde helisel dişli çarka 0,5, 1 ve 1,5 Nm tork uygulanmış, deneylerin yapıldığı devir sayıları ise 300, 600 ve 900 d/dk'dır. Deneylerde meydana gelen aşınma miktarları 5×10^4 ve 10×10^4 tur sonunda ölçülmüştür. Yapılan deney sonucunda aynı şartlarda döndürme momenti arttıkça aşınma artmış, devir sayısı arttıkça aşınma azalmış, tur sayısı arttıkça aşınma miktarı artmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri, devir sayısı arttıkça azalmış, yük miktarı ve tur sayısı arttıkça artmıştır [9].

Düzcükoğlu, yaptığı çalışmada Poliamid 66 GFR30 malzemeden yapılmış dişlileri FZG test cihazında 1000 ve 1500 d/dk hızlarda, 8,5 ve 13 Nm yük altında çalıştırmıştır. Diş genişliği değiştirilmemiş ve diş genişliği değiştirilmiş dişlilerin

tribolojik performansı incelenmiştir. Diş genişliği değiştirilerek yüzey basıncı azaltılmış böylelikle aşınma ve termal hasar önlenmeye çalışılmıştır [10].

Yu ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada poliformaldehit dişli çiftlerinin yüklenme kapasitesi ve aşınma performansını incelemek için deney esnasında diş yüzeyi topografyasını, diş profili sapmasını, aşınma miktarını ve çalışma sıcaklığını 1000 d/dk hızda incelemişlerdir. Test sırasında, çalışma sıcaklığı her 10^4 döngüde bir ölçülerek kaydedilmiştir. Diş profili sapması, aşınma miktarı ve mikro topografya dişlide hasar olana kadar her 2×10^5 döngüde veya diş profili sapması 500 μm 'lik eşik değerini aşana kadar veya hizmet ömrü 3×10^6 çevrime kadar ölçülmüştür. Ayrıca, yeterli yağlama için yağ debisi 0,8 l/dk olarak sabitlenmiştir. Kuru ortam testleri 5, 13, 20 ve 27 Nm olmak üzere dört farklı yükte gerçekleştirilmiştir. 5 ve 13 Nm tork altındaki poliformaldehit dişli çiftlerinin hizmet ömürlerinin 3×10^6 çevrimi aştığı ve profil sapmasının 500 μm eşiğini aşmadığı görülmüştür. 20 Nm'lik tork için hizmet ömrü 6×10^5 çevrim olmuştur. Pinyon dişlinin diş profili sapması 500 μm yüzey pürüzlülüğünü aştığı zaman ciddi aşınma gözlemlenmiştir. En büyük tork (27 Nm) değerinde hizmet ömrü $9,5 \times 10^4$ döngü olarak belirlenmiştir. Döngü sayısı arttıkça diş profil sapması ve aşınma artmıştır. Aşınma diş kökü civarında olmuştur.

Poliformaldehit dişli çiftinin yağlanmış koşul altında aşınması, ağırlıklı olarak diş profili boyunca çizik şeklinde gözlenmiştir. 27 ve 34 Nm yük altındaki poliformaldehit dişli çiftlerinin dayanıklılık ömrü, yüzey hasarı olmaksızın 3×10^6 döngüyü aşmıştır. Yağlama, diş yüzeyi aşınması ve dişli yüzeyinin tribolojik davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yağlama yapıldığı için, poliformaldehit dişli çiftinde diş profili boyunca çizikler olarak görülen hafif hasar, dişlerin, uç ve kök bölgesinde başlangıç seviyesinde meydana gelmiştir.

Çalışma sıcaklığı, kuru ve yağlayıcı koşullar altında kaydedilmiştir. Kuru çalışma koşulu altında çalışma sıcaklığı, yağla yağlanan koşuldan daha yüksek olmuştur. Kuru çalışma koşulu altında, 20 ve 27 Nm yükler için maksimum diş sıcaklığı sırasıyla 114,2 °C ve 124,8 °C ölçülmüştür. Poliformaldehit için 110 °C olan maksimum çalışma sıcaklığı kuru çalışma koşulunda aşılmıştır. İki yüklenme seviyesi için poliformaldehit dişli çiftlerinin dayanıklılık ömürleri oldukça kısadır. 20 Nm yük

altında 6×10^5 döngü ve 27 Nm yük altında 9.5×10^4 döngüdür. Yağlayıcı koşullarında, üç yükleme seviyesindeki maksimum diş sıcaklığı $42 \text{ }^\circ\text{C}$ civarında ölçülmüştür. Yağlayıcı koşullarında poliformaldehit dişli çiftlerinin hizmet ömürleri ciddi bir aşınmaya uğramadan 3×10^6 döngü eşiğini aşmıştır. Yağlamanın, polimer dişlilerin yükleme kapasitesi üzerinde olumlu etkisi vardır. Kuru çalışma koşulu altında 27 Nm yük için poliformaldehit dişlilerin hizmet ömrü $9,5 \times 10^4$ döngüdür. Ancak yağlayıcı koşullarda 3×10^6 çevrimi aşmaktadır. Yağlama, yağ filmi oluşumu ve soğutma etkisi yoluyla dişli aşınmasını ve termal hasarı ciddi oranda azaltmıştır [11].

Singh ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada üç farklı polimerik malzeme türü olan ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), POM (Polioksimetilen) ve HDPE (Yüksek yoğunluklu polietilen) polimer dişlileri 600, 800, 1000 ve 1200 d/dk dönme hızlarında ve 0,8, 1,2, 1,6 ve 2 Nm torklarda test etmişlerdir. Yapılan çalışmada bu üç malzemenin ısıl ve aşınma davranışı incelenmiştir. Tork arttıkça sıcaklık artmış en fazla sıcaklık artışı POM'da en düşük sıcaklık artışı ise HDPE'de olmuştur. Tork arttıkça aşınma artmış en fazla aşınma ABS'de en az aşınma ise POM'da olmuştur. Öte yandan, yüksek hızlarda temas süresi azaldığı için dişlilerin dönme hızının artması ile birlikte dişlilerin aşınma oranı azalmaktadır [12].

Hasl ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada enjeksiyonla kalıplanmış asetale dişlileri, yağlama yaparak testlere tabi tutmuşlardır. Deneysel, hesaplama yöntemlerini doğrulamak için, eksenler arası mesafe ve iletim oranı korunarak değişken sayıda diş sayısına sahip dişli çarklar kullanılmıştır. Değişken torklar ve hızlarda sabit bir diş sıcaklığı seviyesinde test yapılmasını sağlamak için, diş sıcaklıkları ölçülmüştür. Test sonuçları, daha yüksek sayıda dişe sahip diş geometrilerinin eğilme mukavemetinin, yüksek diş kökü gerilmelerine dayandığını göstermektedir. En yüksek diş sayısına sahip dişli, öngörülen torkun iki katından fazlasını aktarabilmektedir [13].

Bormuth ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada poliamid (PA66) sonsuz vida dişlileri, değişik gres türleri ile yağlanarak greslerin; NLGI sınıfı, baz yağ viskozitesi, baz yağ türü ve kıvam artırıcı tipinin verimliliğe ve sıcaklığa etkisini incelemiştir. İki farklı Polyalphaolefin (PAO) bazlı gres için düşük torklarda; verimlilik

karşılaştırıldığında, düşük viskoziteye sahip PAO (18/40) baz yağ gresi, NLGI sınıfı 00-3 arası gresler ile yoğunlaştırılarak sertliği artırılmıştır. Sertliği artırılan gres yüksek verimlilik değerleri sergilemiştir. Yüksek torklarda yüksek viskoziteye sahip PAO (400/40) baz yağ gresler NLGI sınıfı 00-3 arası gresler ile yoğunlaştırıldığında ise gresin sertliği azaldıkça daha iyi verimlilik göstermiştir. Çünkü PAO (400/40) yüksek viskoziteye sahiptir. Düşük torklarda sıcaklık değeri, yüksek viskoziteye sahip baz yağ gresleri, düşük viskoziteye sahip baz yağa sahip olanlardan daha fazla artış göstermiştir. Yüksek torklarda ise; yüksek viskoziteye sahip baz yağ gresleri daha düşük sıcaklıklar sergilemiştir. NLGI 2 içeren Lityum sabunla koyulaştırılmış PAO bazlı gresler düşük torklar için, baz yağın viskozitesi arttıkça verimi azalmıştır. Bunun sebebi yağlama filmi içindeki artan iç sürtünmedir. Yüksek torkta ise viskozite arttıkça verim artmıştır. Baz yağ olarak kullanılmak üzere çok çeşitli moleküller mevcuttur. Kimyasal olarak bunların çoğu polialfaolefinler (PAO), polialkilen glikoller (PAG), mineral yağlar ve esterler olarak gruplanabilir. Baz yağ kimyasının dişli performansına etkisini araştırmak için NLGI 2 Li-sabunlu gres kullanılmıştır. Düşük viskoziteye sahip PAO (18/40) ile düşük viskoziteye sahip PAG (30/40) karşılaştırıldığında, düşük yükler için ikisi de benzer performans sergilemiştir. Yüksek yükler için, PAG yağlama kabiliyetini korumuş fakat PAO'nun yağlama kabiliyeti düşmüştür. Ayrıca, iki farklı PAG (30/40) ve PAG (360/40) ile ilgili olarak, yüksek yükler için iki gres yağı da aynı verimlilik değerlerini sergilerken düşük torklar için PAG (30/40) üstün performans göstermiştir. Son olarak, ester (73/40) tüm tork spektrumunda yüksek verimlilik göstermiştir.

Kıvam arttırıcıların amacı, yağlama yağının akışkanlığını düşürerek uygulandığı yerde kalma özelliği kazandırmaktır. Kıvam arttırıcı türünün etkisini incelemek için bir Li-sabun ve PTFE ile NLGI 2 kıvamlılık derecesine kalınlaştırılmış PAO baz yağları incelenmiştir. Genel olarak PTFE gresleri daha yüksek verimlilik sergilemiştir. Bu nedenle Li-sabunlu greslerden daha düşük sıcaklıklar gösterir. PTFE ile güçlendirilmiş PAO (18/40) daha yüksek yükler için daha iyi sonuç vermiştir. Yoğunlaştırıcının en büyük etkisi, PAO için ortaya çıkmaktadır. Diğer yağ türleri için etkiler, ihmal edilebilir düzeydedir. PTFE ile kalınlaştırılmış düşük viskoziteye sahip PAO, şimdiye kadarki üstün ester bazlı greslere göre tüm yüklenme koşullarında yüksek verimlilik göstermiştir [14].

BÖLÜM 3

DİŞLİ ÇARKLAR

Eksenleri birbirine paralel, aykırı ve birbirini kesen miller arasında hareket ve güç aktaran, üzerinde eşit aralıklı, özel profiller bulunan konik veya silindirik yüzeye sahip makine elemanlarına dişli çark denir. Dişli çarklar iki dişli olarak kullanılır. Bunlara dişli çifti denir. Dişli çarklar; iki mil arasında kuvvet ve hareket ileten elemanlardır. Dişli çarklar birbirine şekil bağıyla bağlıdır. Yani kuvvet iletimini dişlinin şekli ve geometrisi sağlar. Hareketin ve gücün verildiği dişliye döndüren, diğerine ise döndürülen dişli adı verilir. En az iki dişli çarkın eş çalışarak oluşturduğu sisteme dişli çark mekanizması denir. İki dişli çarktan oluşan mekanizmada diş sayısı az olan küçük dişli pinyon, diş sayısı çok olan büyük dişli de çark olarak isimlendirilir [15].

3. 1. PLASTİK DİŞLİ ÇARKLAR

Plastik dişliler, otomotiv parçalarından ofis otomasyon ekipmanlarına kadar çeşitli uygulamalarda metal dişlilerin yerini almaya devam etmektedir. Geçmişte, plastik dişlilerin güç aktarabileceği düşünülüyordu. Yüksek çalışma hızlarında kullanımı sınırlıydı ve hareketi yüksek doğrulukla iletemeyeceği düşünülüyordu. Fakat, daha yüksek yük kapasitelerine sahip iyileştirilmiş malzemeler, kalıp tasarımı, kalıplama teknolojisindeki ilerlemeler ve güvenilir mühendislik verilerinin geliştirilmesi, hem hareket iletim dişlileri hem de güç aktarım dişlileri için plastiklerin başarılı şekilde kullanılmasının önünü açmıştır [16].

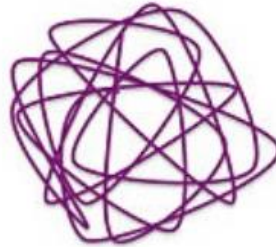
3.2. PLASTİK DİŞLİ ÇARKLARDA KULLANILAN MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Gelecekte dişliler için çok daha fazla plastik çeşidinin kullanılması beklenmektedir. Bu malzemeler, içeriği değiştirilmemiş durumda kullanılabilir veya çeşitli katkı maddeleriyle takviye edilerek içeriği değiştirilebilir. Bir malzemenin seçimi yalnızca özelliklerine değil, aynı zamanda üretim yöntemlerine, parça şekline ve boyutuna, kalıplama veya işleme özelliklerine, nem emilimine de bağlıdır.

Plastikler, molekül yapılarına göre kristalin ve amorf olmak üzere sınıflandırılabilirler. Polimer zincirini oluşturan moleküllerin rastgele ve düzensiz dizilimi amorf yapıyı (Şekil 3.1), moleküllerin düzenli ve birbirlerine sıkı bağlanmaları kristalin yapıyı (Şekil 3.2) oluşturur. Amorf ve kristalin yapıdaki termoplastikler Çizelge 3.1’de verilmiştir [17].

Çizelge 3.1. Amorf ve kristalin yapıdaki bazı termoplastikler.

| Bazı Amorf ve Kristalin yapıdaki Termoplastik Örnekleri | |
|---|------------------------------|
| Amorf | Kristal |
| Polistrien (PS) | Polietilen (PE) |
| Polikarbonat (PC) | Polipropilen (PP) |
| Akrilonitril Bütadien Strien (ABS) | Poliamid (PA) |
| | Polioksimetilen (POM) |
| | Polyesterler |
| | Polietilentereftalat (PET) |
| | Polibütülen Tereftalat (PBT) |
| | Polilaktik Asit (PLA) |



Şekil 3.1. Amorf polimer yapısı.



Şekil 3.2. Kristalin polimer yapısı.

Plastikler için diğ er bir sınıflandırma da ısı karş ısında gösterdikleri tepkilere göre yapılabilir. Bu tepkiler plastikleri termoplastikler ve termosetler olarak sınıflandırılmasını sağlar.

3.2.1. Termoplastik Dişli Çark Malzemeleri

Termoplastikler ısıya ve basınca maruz kaldıklarında plastik özelliklerini kaybetmezler ve birçok kez şekillendirilebilirler. Termoplastikler ısıtıldığında tekrar tekrar yumuşar veya erir. Soğutulduğunda ise sertleşen veya donan malzemelerdir [18]. Isıtma, iç içe geçmiş molekül zincirlerinin kaymasına izin verir. Daha yüksek bir sıcaklıkta, molekül zincirlerinin kayması malzemelerin bir sıvı gibi davranmasını sağlar. Bu yumuşamanın meydana geldiği sıcaklık, plastiğ in türüne ve derecesine göre değişir. Soğutma ise, moleküller arası bağları eski haline getirir ve malzeme bir katı gibi davranır. Bununla birlikte, bu katı malzemeler, değişen sıcaklıklarda, viskoelastik davranış biçimi göstererek sıvı durumundaki (viskoz) bazı özelliklerini korur. Termoplastikler, ısıyla sertleşen plastiklere göre daha fazla tokluğa veya darbe yüklerine karşı dirence sahiptir. Termoplastiklerin üst sıcaklık sınırları yaklaşık 120 °C' dir. Bu sıcaklığın üzerinde termoplastikler, oda sıcaklığındaki dayanımlarının yaklaşık % 50' sini kaybeder [18,19].

Termoplastik dişliler, farklı mekanizmalarda uzun süredir kullanılmaktadır. Kullanılan yerlerin bazıları şunlardır; cam silecekleri, otomobil cam asansörleri, otomobil koltuğu kontrol mekanizmaları, hız ölçerler, döner pompalar, elektrikli garaj kapısı açıcılar, küçük elektrikli aletler, saatler, fotokopi makineleri, lazer yazıcılar vd.

Dişli uygulamalarında kullanılan plastiklerin çoğu termoplastiktir. En yaygın kullanılan termoplastikler; Poliamid (PA), Kestamid (PA 6G) Polioksimetilen (POM), Polipropilen (PP), Polibütlen Tereftalat (PBT), Polietilen Tereftalat (PET), Polikarbonat (PC), Polietilen (PE), Akrlonitril Bütadien Stiren (ABS), Polistrien (PS), Polieter Eter Keton (PEEK), Polilaktik Asit (PLA) ve diğer termoplastiklerdir.

3.2.1.1. Polilaktik Asit (PLA)

PLA, yoğunluğu 1200-1400 kg/m³ aralığında olan sert, yarı kristal bir termoplastiktir. PLA, mısır nişastası veya şeker kamışı gibi doğal, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen bir biyokütledir. Bu nedenle malzeme, çevre dostu, nötr karbon ve sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen malzeme olarak tanımlanmaktadır. PLA, kolaylıkla kalıplanabilir ve daha düşük erime noktası olması dışında PET'e benzer özelliklere sahiptir. Biyolojik olarak parçalanabilir plastiklerin en önemlisidir. Çoğu plastiğin aksine petrol olmayan bir polimerdir. Şu anda önemli ticari plastiklerin yerini almaya adaydır. PLA; tek kullanımlık gıda paketlemelerinde kullanılır, ancak 3 boyutlu yazıcıların gelişimi ile yazıcıların baskı malzemesi olarak en çok tercih edilen malzemedir [17]. PLA plastikten üretilen 3D baskılı düz dişliler, ABS plastikten üretilenlere göre daha iyi operasyonel özellikler sergilemiştir [20]. PLA'nın özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. PLA özellikleri.

| Polimer Malzeme | Yoğunluk (Kg/m ³) | Çekme Dayanımı (Mpa) | Kopma Uzaması (%) | Eğilme Modülü (Gpa) | Sürtünme Katsayısı Statik-Dinamik | Bağlı Aşınma Oranı | Termal İletkenlik (W/mK) | Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C) | Erime Sıcaklığı (°C) |
|-----------------|-------------------------------|----------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------|
| Polilaktik Asit | 1250 | 50 | 6 | 4 | - | - | 0.13 | 55 | 175 |

3.2.1.2. Kestamid (PA 6G)

Kestamid, döküm poliamid veya döküm naylon olarak isimlendirilir. Kestamid üstün mekanik, fiziksel, kimyasal ve elektriksel özelliklere sahiptir. Kestamid yüksek molekül ağırlığına sahiptir. Kristal yapısı ve çapraz bağlara sahip olduğu için sert ve

aşınmaya dayanıklıdır. Kestamid, Poliamid 6'ya göre daha az su emer. Kimyasal maddelere karşı dayanımı çok iyidir. Solventlerden, yağlardan, hidrokarbon, ester ve ketonlardan etkilenmez. Mühendislik plastiklerinden biri olan bu ürün pirinç, alüminyum, bakır ve diğer metallerin kullanıldığı birçok alanlarda bu metallerin yerine yüksek avantajlar sağlayarak kullanılabilir. Birçok metalden daha ucuz, daha hafif, daha dayanıklı ve daha uzun ömürlüdür.

Kestamid'in standart rengi sarıdır. Kestamidin üretimine özgü tekniklerden ve metallerin mekanik dayanımlarından yararlanarak, göbeği çelik burçlu dişli, makara, karıştırıcı pervanesi yapmak veya çelik milli silindir üretmek de mümkündür. Kestamidin özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir [21].

Çizelge 3.3. PA 6G özellikleri.

| Polimer Malzeme | Yoğunluk (Kg/m ³) | Çekme Dayanımı (Mpa) | Kopma Uzaması (%) | Elastisite Modülü (Gpa) | Sürtünme Katsayısı Statik-Dinamik | Bağlı Aşınma Oranı | Termal İletkenlik (W/mK) | Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C) | Erime Sıcaklığı (°C) |
|-----------------|-------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------|
| Kestamid | 1130 | 80 | 15 | 4 | 0.25 | 0.44 | 0.38 | 40 | 220 |

3.2.2. Termoset Dişli Çark Malzemeleri

Termosetler, işlem sırasında kalıcı olarak kaynaşabilir hale gelmek için kimyasal değişime uğrayan plastiklerdir [18]. Kimyasal değişim gerçekleşikten sonra bir termoset malzemeye aşırı ısı uygulanırsa, plastik erimek yerine bozulur. Şekillendirme esnasında kalıcı olarak sertleşir ve ısıtıldıklarında yumuşamazlar. Termoset plastiğin moleküler yapısı termoplastik malzemeninkine benzerdir. Isıtma, moleküllerin kaymasına izin verir. Malzeme bir sıvının özelliklerini alır ve kalıplanabilir. Bununla birlikte, bir pişirme işleminde kalıp içinde hala ısıya maruz kaldıkları halde, iç içe geçmiş moleküller, daha fazla kaymayı önleyen geri çevrilemez bir ağ oluşturarak çapraz bağlanma meydana gelir. Ortaya çıkan katı plastik, daha çok metallere benzer elastik bir malzeme gibi davranır. Termosetler, çözünen ve eriyen bir yapıdan çözünmeyen ve erimeyen bir yapıya geçerler. Termosetlerin viskoelastik davranışı, termoplastikten çok daha azdır. Aynı zamanda termoset malzemeler darbeli yüklemeye karşı daha az dirençlidir. Orta dereceli

darbeli uygulamalarda bile sadece bazı takviyeler ile kullanılabilir. Öte yandan termosetler, çoğu termoplastikten çok daha dayanıklı, boyutsal kararlılığa sahip ve yüksek sıcaklıklarda mukavemet özelliklerini korurlar. 230 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda mekanik özelliklerinde çok fazla bozulma meydana gelmez [16,19].

Dişliler için çok az sayıda termoset plastik kullanılır. Termoplastiklerin özellikleri, dişli malzemesi olarak kullanılmaya daha uygundur. Bazı termosetler için gerekli olan farklı işleme türleri de kullanımlarını sınırlar. Epoksi, fenolikler ve termoset polyesterler en sık kullanılan termoset dişli malzemeleridir.

3.3. PLASTİK DİŞLİLERE EKLENEN KATKI MADDELERİ

Çok çeşitli organik ve inorganik malzemeler maliyetleri düşürmek ya da özelliği iyileştirmek için plastıklere eklenebilir.

3.3.1. Dolgu Maddeleri

Maliyetleri düşürmek, kalıplama işlemi sırasında boyutsal kararlılığı iyileştirmek, iletkenliği artırmak ve ısı direncini iyileştirmek için dolgu maddeleri eklenir. Mineral dolgu maddeleri arasında yaygın olarak mika, talk, karbon tozu ve cam boncuklar bulunur. Eklenen dolgu miktarı %5 ila %40 arasında değişebilir. Dolgu maddelerini eklemenin bazı dezavantajları vardır. Dolgu maddeleri eklemek, darbe direncini azaltır ve takım aşınmasını artırır [16].

3.3.2. Takviyeler

Takviyelerin amacı, temel malzemenin bir veya daha fazla mekanik özelliğini değiştirmektir. Cam elyaflar, %5 ila %40 aralığında plastik dişlilere eklenebilir. Cam elyaflar genellikle temel malzeme reçinesinin hem uzun hem de kısa vadeli mekanik özelliklerini değiştirmek için kullanılır. Cam elyaflar, malzemenin ısı ve aşınma direncini iyileştirir. Cam elyafı eklemenin kısıtlamaları, kalıplama sırasında artan distorsiyon, eş çalışan dişli malzemesinin ve takım aşınmasının artmasıdır [16].

Karbon fiber; ısı direncini, elektriksel özellikleri ve aşınma direncini artırmak için %10 ila %40 aralığında eklenebilir. Karbon fiber eklemenin sınırlamaları arasında daha yüksek maliyetler, kalıplama sırasında artan distorsiyon ve artan takım aşınması bulunmaktadır.

Kevlar (aramid) elyafları ısı direncini, mukavemeti ve aşınma direncini artırmak ve sürtünmeyi azaltmak için %5 ila %20 aralığında eklenebilir. Kevlar liflerinin eklenmesinin sınırlaması ek maliyettir. Kalıplama sırasında da bir miktar bozulma meydana gelebilir [16].

3.3.3. Yağlayıcılar

Sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmak amacıyla plastiklere Çizelge 3.4'te belirtilen yağlayıcılar eklenebilir.

Çizelge 3.4. Plastiklere eklenen yağlayıcılar.

| Yağlayıcılar | Eklenebilir Aralık (%) |
|---|------------------------|
| Politetrafloroetilen(PTFE ya da Teflon) | 1- 20 |
| Silikon | 1 - 4 |
| Grafit | 5 - 10 |
| Molibden Disulfid (MoS ₂) | 2 - 5 |

PTFE eklemenin sınırlaması ek maliyettir. Grafit ilaveleri gücü ve darbe direncini azaltabilir. MoS₂' nin eklenmesi için sınırlayıcı bir faktör yoktur [16].

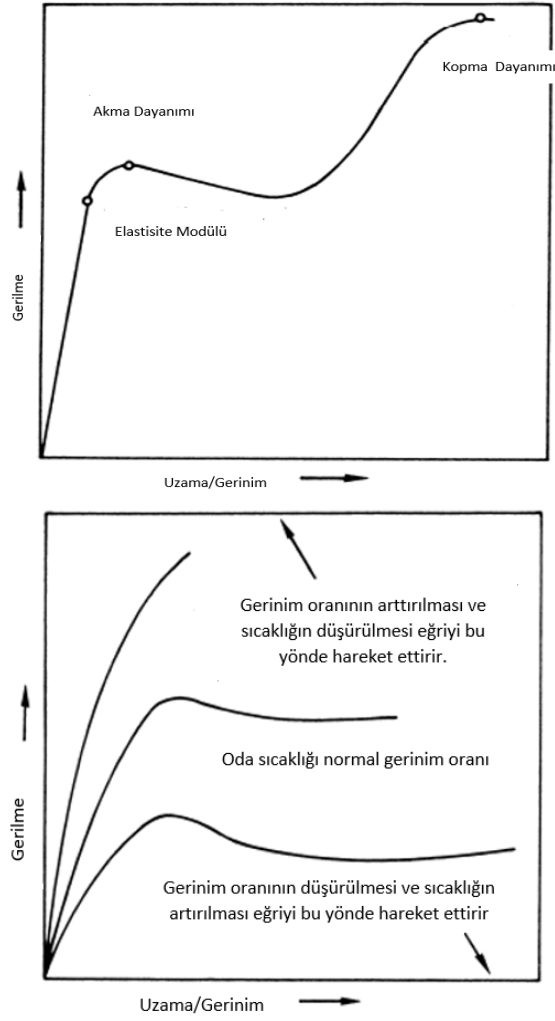
3.3.4. Darbe Modifiye Ediciler

Diğer özelliklerde minimum bozulma ile plastiklerin darbe dayanımını veya tokluğunu artıran katkı maddeleridir. O kadar büyük yüzdelerde (> %50) eklenebilirler ki bir katkı maddesi yerine malzemede bir bileşen haline gelirler. Etkili olması için, eklenen fazın daha fazla darbeye dayanıklı olması ve ana fazdan daha düşük bir sertliğe sahip olması gerekir. Yaygın olarak kullanılan darbe modifiye ediciler arasında, Akrilonitril-butadien-stiren (ABS), metakrilat-butadien-stiren

(MBS), akrilikler, klorlu polietilen (CPE) ve etilen vinil asetat (EVA) bulunur. Eklenen maddeler ile güç, sertlik, darbe dayanıklılığı, aşınma direnci, termal iletkenlik, ısınmayı geciktirme, boyut kontrolü, renk, ısı stabilitesi, gürültü azaltma, oksidatif stabilite, ultraviyole kararlılığı, kayganlık, işlenebilirlik özellikleri iyileştirilir [18].

3.4. METALLER İLE PLASTİKLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Plastiklerle tasarım yapmak, genellikle metallere tasarım yapmaktan daha karmaşıktır. Viskoelastik olan mühendislik plastikleri, elastik tarzda mekanik gerilime yanıt vermez. Birçok uygulamada mühendislik plastikleri, metallere daha karmaşık bir özellik karışımı sergiler. Mühendislik plastikleri, mühendislik metallere göre yeni kullanılmaya başladığı için veri tabanları henüz tam olarak tamamlanmamıştır. Ayrıca plastiklerin hızlı şekil değiştirmeleri malzeme seçim sürecini daha zor hale getirir. Bir metal ve plastiğin gerilme-uzama eğrisi Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Metal davranışının göze çarpan özellikleri, gerilme-uzama eğrisinin eğimi orantı sınırına kadar sabittir. Bu elastisite modülü olarak tanımlanır. Elastisite modülü çok çeşitli gerilim oranları ve sıcaklıklarda sabit kalır. Metallerin mekanik davranışını plastiklerle karşılaştırırken, plastiğin metalden farklı olarak gerçek bir elastisite modülünün olmadığı ve gerilme-uzama eğrisinin doğrusal olmadığı Şekil 3.3'te görülmektedir. Ayrıca, plastik gerilme-uzama eğrisinin şekli, gerilimin uygulandığı hızdan ve gerilim-uzama davranışı, sıcaklıktan önemli ölçüde etkilenir. Plastik, elastik-katı ve yüksek viskoziteye sahip sıvı davranışlarını birleştiriyor gibi görüldüğü için viskoelastiktir [16].



Şekil 3.3. Metallerin ve plastiklerin gerilme-uzama grafiği [16].

3.5. PLASTİK DİŞLİLERİN AVANTAJLARI

Plastik dişlilerin avantajları şunlardır; nispeten düşük maliyet, üretim kolaylığı ve hızı, çok çeşitli konfigürasyonlar ve karmaşık şekiller mümkün, işleme ve son işlemlerinin ortadan kaldırılması, metal uçlar ve entegre tasarımlar ile imalat kabiliyeti, daha düşük yoğunluk (hafif ve düşük atalet), orta dereceli darbeyi sönümleme yeteneği, minimum yağlama ile veya hiç yağlama olmadan çalışma yeteneği, düşük sürtünme katsayısı, sessiz çalışma, korozyona karşı direnç [22].

3.6. PLASTİK DİŞLİLERİN DEZAVANTAJLARI

Metal dişlilere göre plastik dişlilerin dezavantajları ise şunlardır; metal dişlilerden daha düşük yük taşıma kapasitesi, yüksek sıcaklıkta çalışma kabiliyetinin az olması, çalışma genellikle 120 °C'nin altında olması, ayrıca düşük sıcaklık uygulamalarında kullanımının sınırlı olması, diş temas yüzeyindeki sıcaklık ve ortam sıcaklığı sınırlandırılmalı, yüksek hassasiyetli işlenmiş veya taşlanmış metal dişlilerle aynı hassasiyette kalıplanamaması, daha yüksek termal genleşme katsayıları ve nem emilimi nedeniyle daha büyük boyutsal dengesizlikler, doğru diş formu ve boyutlarının geliştirilmesinde yüksek kalıp maliyetleri, bazı kimyasallardan ve yağlayıcılardan olumsuz etkilenebilme özelliği, maliyeti metallere kıyasla daha dalgalı olması, uygun olmayan kalıplama aletleri ve işlemi diş köklerinde artık iç gerilmeler oluşturarak yaşlanma ile aşırı gerilmeye ve çarpılmaya sebep olması [22].

BÖLÜM 4

PLASTİK DİŞLİLERDE MEYDANA GELEN HASAR TÜRLERİ VE AŞINMA

Polimer dişlilerin hasarlarının sebepleri sıcaklık, düşük erime noktası, düşük ısı iletkenlik, uygulanan tork, hız ve diş üzerinde oluşan gerilmelerdir. Tüm bu parametrelerin optimum değeri, dişlinin ömrünü uzatmak için çok önemlidir [23]. Dişlilerin hasar görmesi tüm mekanizmanın kilitlenmesine neden olabilir. Bu nedenle, belirli yükleme koşulları altında hasarlara karşı yük kapasitesinin doğru tahmini, dişliler boyutlandırılırken önemlidir. Bu bağlamda, polimer dişlilerin hasar tiplerinden aşağıda bahsedilmiştir [24].

4.1. ERİME

Dişli sıcaklığı, polimer dişli dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. 10 ila 15 °C'lik bir fark, polimer malzemelerin mukavemeti için önemlidir. Dişliler için, ortam sıcaklığı düşürülmeli ve ısı dağılımı iyileştirilmelidir. Isı ve sürtünme etkisi altında tüm diş yumuşar. Malzeme mekanik özelliklerini kaybeder. Aşırı ısınma sonucu diş profilinin bölgesel olarak yumuşaması, malzemenin erimesine, malzeme yırtılmasına ve profilin bozulmasına neden olur. Dişli sıcaklığı; sürtünme katsayısını, torku veya çalışma hızını düşürerek dişliler üzerinden iletilen gücün düşürülmesi ile azaltılabilir. Gres veya sıvı yağ kullanılması ısı oluşumunu önemli ölçüde azaltabilir. Bir polimer dişlinin boyutunun büyümesi ısı dağılımını iyileştirir ve dişli sıcaklığını düşürür. Çeşitli uygulamalarda, dişli boyutu ve sıcaklıklar hasar türünü belirler. Dişli erimesi, dişlilere aşırı sıcaklık yüklenmesinden dolayı olur. Çalışma esnasında sıcaklığın artmasıyla dişlilere dağıtılardan daha fazla ısı eklenir. Malzemenin dişlerdeki erime sıcaklığı aşılar, böylelikle diş ısı sürekli yükselir. Plastik dişlerdeki sıcaklık artışından dolayı mekanik dayanım, kuvvet aktarımı çok düşük olana kadar sürekli olarak azalır. Dişler çok kısa sürede yumuşar veya erir. Dişliler arasındaki

merkez mesafesi ve dolayısıyla diş sayısı arttığında dişli sıcaklığı azalır. Daha büyük dişliler, daha geniş yüzeyleri nedeniyle daha düşük sıcaklıklarda sürtünmeden kaynaklanan ısının yayılmasını sağlar. Daha büyük dişliler ayrıca diş kökü gerilimini de azaltır [25].

4.2. KATMAN AYRILMASI

Üretim sürecinde oluşturulan katmanlar, aşırı teğetsel kuvvet nedeniyle ayrılır. Ek olarak, dişin yüzeyindeki sıcaklık, dişlinin erime sıcaklığını açabilir. Bu da delaminasyona neden olabilir.

4.3. DIş KÖKÜ KIRILMASI

Diş kökünde eğilme gerilmesi çok yüksektir. Plastik dişin eğilme mukavemeti düşükse, aşınmanın dışında eğilme kırılması meydana gelir (şekil 4.1) [26]. Diş kökü gerilimi yüksek olduğunda, modül veya diş genişliğindeki artış doğrusal olarak kök gerilimini azaltır. Diş kökü gerilimi, pozitif profil kaydırma yapılarak diş şekli değiştirilerek de azaltılabilir. Diş kökü kırılması, eğilme yorulması veya aşırı diş dibi gerilmesinin bir sonucudur. Merkezler arası mesafe sabitse, modül küçüldükçe (diş sayısı arttığı) diş kökü gerilimi önemli ölçüde artar. Fakat modül küçüldükçe dişli sıcaklığı azalır [27].



şekil 4.1. Diş kökü kırılması [30].

4.4. DEFORMASYON

Deformasyon hem statik hem de dinamik yük durumlarında meydana gelir. Statik deformasyon, malzemenin akmasına sebep olur. Uzun süreli statik bir yük uygulandığında elastisite modülü aşılr. Kısa süreli dinamik yükte yine elastisite modülü aşılr. Her iki durumda diş başı boşluğu azalır ve dişli mekanizmasının kasmaına yol açabilir. Kısa süreli aşırı yük, özellikle yüksek dönme hızlarında, diş deformasyonuna ve hatta polimer dişlinin erimesine neden olan yüksek sıcaklık üretir. Deformasyonun sebebi aşırı gerilmedir [29]. Temas alanındaki aşırı yüzey gerilmeleri evolvent profilini kalıcı olarak bozar (Şekil 4.2). Polimer dişlilerin deformasyonu, metal dişlilerinkinden önemli ölçüde büyüktür. Gürültü seviyesinin azaltılması gerekiyorsa veya iletim hatası toleransı küçükse özellikle diş deformasyonu kontrol edilmelidir.



Şekil 4.2. Diş deformasyonu [29].

Aynı veya benzer malzemelerden yapılmış dişliler tasarlamak, artan temas oranıyla mekanizma hatasını azaltır. Farklı malzemeler kullanıldığında, iletim hatasını azaltmanın bir yöntemi, pinyon ve tahrik edilen dişli arasındaki diş sertliğini dengelemektir. Diğer tasarım kriterleri karşılanırsa, diş deformasyonu çok önemli değildir. Teğetsel kuvvet deformasyonu artırırken, dişlinin diş genişliği ve elastik modülünün artması diş deformasyonunu azaltır.

4.5. DIŞ AŞINMASI

AŞınma, uygulanan kuvvet ve kayma hızının kombinasyonu ile diş yüzeyindeki materyalin kopması olarak tanımlanabilir (Şekil 4.3). Yüzey tabakasındaki bu değişiklikler; mekanik gerilmeler, sıcaklık ve kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır. Polimerler, spesifik yapıları ve mekanik davranışları nedeniyle bu faktörlere karşı daha hassastır. Sıcaklık, polimerlerin aşınmasına etki eder. Temas halindeki yüzeylerin sertliği arasındaki fark nedeniyle bir çift metal pinyon ve polimer dişli için aşınma artar. AŞınmanın artması durumunda, diş profilinin geometrisi zarar görür. Bir polimer bir metalle temas ettiğinde genel olarak, en yaygın aşınma türlerinin abrasif aşınma, adhezif aşınma ve yorulma aşınması olduğu kabul edilmektedir. Çelik dişlilerin yüzey pürüzlülüğü daha düşük ise aşınmayı azaltması beklenir. Bir yüzey çok pürüzlü olduğunda, sert bir metalin pürüzlü yüzeyi polimer aşınmasını hızlandırır. Polimer aşınması; metal yüzeyin pürüzlerinin ne kadar derine nüfuz ettiğine, kayma açısına ve kayma mesafesine bağlıdır. Pinyon, yüksek yük seviyelerinde, tahrik edilen dişlilere göre önemli ölçüde daha yüksek bir aşınma oranına sahiptir. Metal pinyonlar genel olarak polimer dişlilerdeki aşınma oranını arttırır. Bununla birlikte, 10^6 yük çevriminin üzerinde, özellikle kuru çalışmadaki metal - polimer malzeme kombinasyonları için, aşınma ilerlemesi, eğilme yorulmasından daha kritiktir. AŞınma kuru çalışma ortamında kısa sürede, gresle yağlama durumunda ise biraz daha uzun sürede görülür. Yukarıda listelenen mekanizmalar, aşınma sürecinin temelidir. Yine de, mekanizmaların büyük çeŐitlilięi ve birbirleriyle olan iliŐkileri, aşınma süreçlerinin tam olarak sınıflandırmasını imkansız kılmaktadır [27].

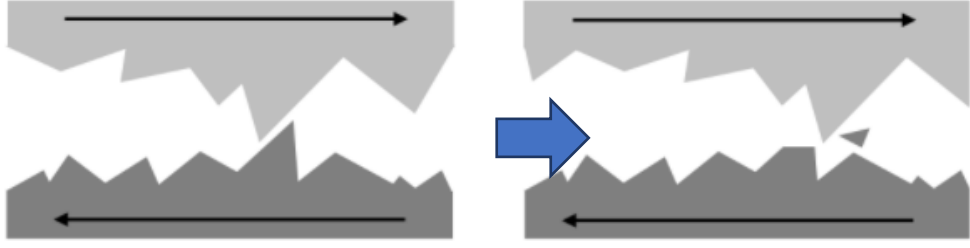


Şekil 4.3. Diş aşınması [28,30].

4.5.1. Plastik Dişlilerde Görülen Aşınma Türleri

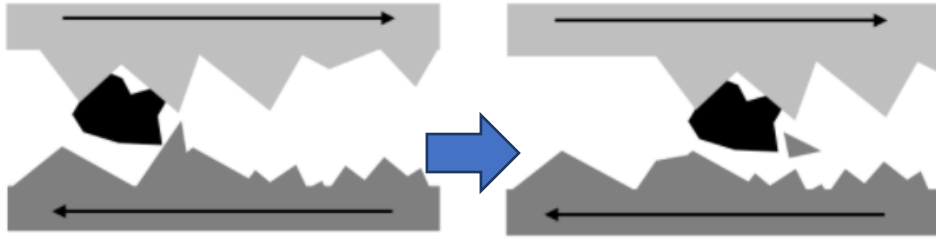
4.5.1.1. Abrazif (Aşındırıcı) Aşınma

Abrazif aşınma, birbirine göre izafi hareket yapan iki cisim temas yüzeyleri arasında ortaya çıkan, bir aşınma türüdür. Abrazif aşınma, sert ve pürüzlü bir yüzey, daha yumuşak bir yüzey boyunca kaydığıında meydana gelir. Abrazif aşınma genellikle temas türüne ve temas ortamına göre sınıflandırılır. Temas tipi abrazif aşınma türünü belirler. Abrazif aşınma iki gruba ayrılabilir. Bunlar, iki cisimli ve üç cisimli abrazif aşınmadır. İki cisimli abrazif aşınma, bir yüzey (genellikle diğerinden daha sert) malzemeyi diğer yüzeyden ayırdığıında meydana gelir (Şekil 4.4). Ayrılan bu parçacık karşı yüzeye gömülebilir veya çok sık olarak üç cisimli aşınmaya dönüşür çünkü aşınan parçacıklar daha sonra iki yüzey arasında bir aşındırıcı olarak hareket eder.



Şekil 4.4. İki cisimli abrazif aşınma mekanizması.

Üç cisimli aşındırmada, işlem sırasında oluşan veya sistem dışından gelen parçacıklar abrazif aşınmaya neden olur (Şekil 4.5).



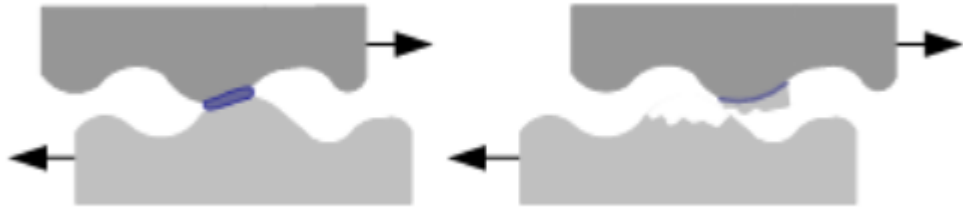
Şekil 4.5. Üç cisimli abrazif aşınma mekanizması.

Abrazif aşınmanın üç farklı deformasyon biçimi vardır. Bunlar: mikro kesme, kama oluşturma ve kazımadır. Kazıma biçiminde, sığ bir oluk oluşturulur ve bir aşınma partikülü oluşturmak için tekrarlanan yükleme gereklidir. Kama oluşturmada kama tipi aşınma kalıntısı oluşur. Mikro kesme biçimi makineyle işlemeye benzer ve partikül tarafından yer değiştiren tüm malzeme talaş olarak çıkarılır. Uzun, kıvrılmış şerit benzeri parçacıklar oluşturulur. Abrazif aşınma genellikle talaş kaldırma işlemine benzer. Bu nedenle aşınma oranı; aşındırıcı partikülün şekline (parçacıkların uçlarının şekline ve tepe açlarına), sertlik, yük ve temas ara yüzündeki kesme kuvvetine bağlıdır [31].

4.5.1.2. Adhezif Aşınma

Adhezif aşınmanın diğer adı yapışma aşınmasıdır. Birbiriyle temasta olan iki cismin gerçek temas yüzeyleri, yüzey pürüzlüğü sebebiyle aslında küçük olduğu için, gerçek temas yüzeyine normal kuvvet sebebiyle etkiyen basınç oldukça büyüktür. Bu

noktalardaki gerilmeler akma gerilmesi sınırına ulaşarak plastik deformasyona uğrarlar. Plastik deformasyona uğrayan bu yüzeyler üzerinden cisimler, birbirine mikro kaynaklar ile bağlanırlar. Bu sırada iki cisim arasında devam eden izafi hareket sebebiyle kaynak bağı kopar. Bu kopma sonucu diğer malzemeye göre yumuşak olan malzemenin yüzeyinde boşluklar oluşur. Böylelikle malzeme kaybı meydana gelir. Diğer yüzeyde çıkıntılar meydana gelir (Şekil 4.6.) ve iki yüzey arasına adhezif parçacıklar dökülür.



Şekil 4.6. Adhezif aşınma mekanizması.

Adhezif aşınma, benzer ve kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmekte ve tüm temas noktalarında meydana gelmemekte, yalnızca bir kısmında oluşmaktadır. Adhezif aşınma yüzey pürüzlüğünü bozduğu ve adhezif parçacıklara sebep olduğu için abrazif aşınmasına da zemin hazırlar. Adhezif aşınma ile abrazif aşınma aynı anda görülmez. İki yüzey arasına çevre etkisiyle sert partiküller girdiğinde veya adhezif parçacıklar oluştuğunda yani abrazif aşınma için gerekli koşullar sağlandığında artık adhezif aşınma oluşmaz. Benzer kristal yapıya sahip malzemeler (temas halindeki iki özdeş saf metal), temas yüzeyinin hızlı aşınmasına ve erken tahrip olmasına yol açabilen güçlü adhezif bağlantılar oluşturabilirler. Bu nedenle, bu tür durumlardan kaçınılmalıdır ve farklı yapılara sahip malzeme çiftlerinin seçilmesi önerilir. Örneğin, dökme demir - çelik, bronz - çelik, plastik - çelik vb. metalin yapışma eğilimi, alaşımlama veya uygulanan ısı işlemler ile önemli ölçüde azaltılabilir.

Sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmanın en etkili yolu, temas eden yüzeyleri yağlamaktır. Yağlamanın amacı, temas eden yüzeylerin sürtünmesini ve aşınmasını azaltmak, bu yüzeylerin erken tahrip olmasını önlemek, izin verilen yükü, hizmet ömürlerini ve güvenilirliğini arttırmaktır. Oksit tabakası, emilen gaz ve temas yüzeyindeki

sertleşmiş tabaka adhezif aşınma eğiliminin azalmasına neden olur. Adhezyon, dişli çalışırken yağlama ile engellenebilir veya azaltılabilir. Polar moleküller içeren yağlayıcılar metal yüzeyde emilir. Sürtünme ve aşınma azalır. Ağır yük durumunda, yapay katmanlar (sülfidler, fosfitler, kloritler) oluşturularak aşırı aşınma önlenir. Yapay olarak oluşturulan bu katmanlar genellikle oksit katmanlardan daha etkilidir. Ancak aşınma sürecini tamamen önleyemezler ancak aşınmanın yapışma bileşenini büyük ölçüde azaltırlar [32].

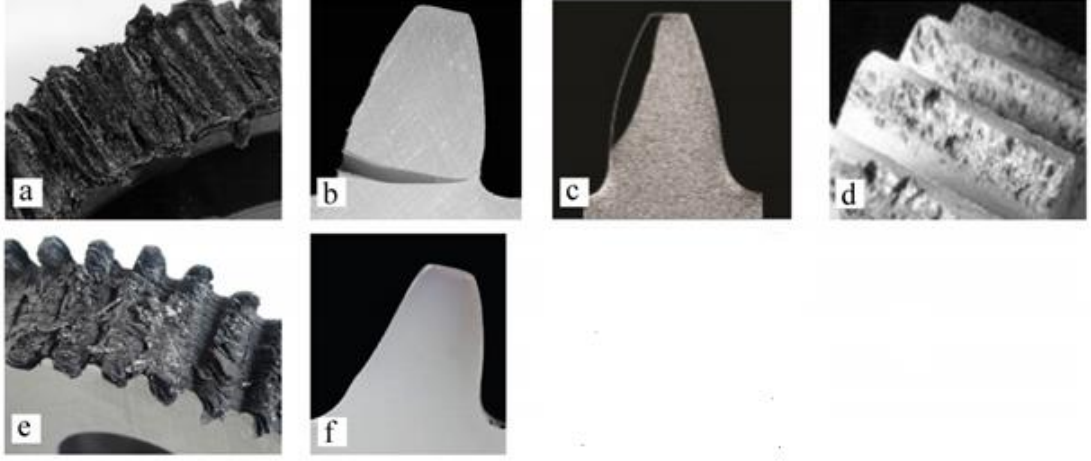
4.5.1.3. Çukurlaşma (Pitting)

Yorulma aşınması olarak da bilinir. Çukurlaşmanın nedeni aşırı Hertz basıncından kaynaklanmaktadır. Hertz basıncı, üst üste binen kayma geriliminden dolayı çok yüksektir. Hertz basıncı ve aşınma bölgesindeki kayma gerilmeleri nedeniyle çatlak oluşur. Eğilme gerilmesi nedeniyle de oluşan çatlak bir kırılmaya dönüşür. Çukurlaşma, yüzeye yakın alanda malzeme yorgunluğunun bir sonucudur (Şekil 4.7). Çukurlaşma aynı zamanda kayma gerilmelerine bağlı ısıl gerilmelerden kaynaklanır. Polimerlerin yorulma aşınması, çukurlaşma, çatlak oluşumu ve delaminasyon ile sonuçlanır. Polimer yüzeyinde kayma yönüne dik olan küçük çatlakların büyümesi ve kesişmesi sonucu aşınma döküntüleri oluşur. Yorulma aşınması, karşı yüzey pürüzsüz olduğunda adhesif aşınma olmadığında uzun süreli sürtünmeden sonra meydana gelir. Yağlanmış polimer dişliler, genellikle çukurlaşma ve diş kökü kırılmalarına maruz kalır. Diş genişliğini ve dişli çapını artırmak, yüzey basıncını azaltacağı için yorulma aşınmasını azaltır [26,31].



Şekil 4.7. Pitting.

Polimer dişlilerde meydana gelen erime (şekil 4.8.a), diş kökü kırılması (şekil 4.8.b), aşınma (şekil 4.8.c), pitting (şekil 4.8.d), katman ayrılması (şekil 4.8.e), deformasyon (şekil 4.8.f) hasar türlerinin örnekleri şekil 4.8’de verilmiştir.



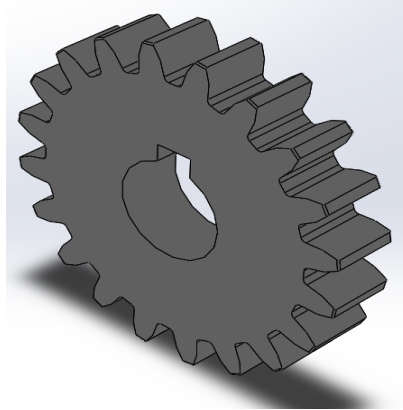
şekil 4.8. Plastik dişlilerde meydana gelen aşınma türleri.

BÖLÜM 5

MATERYAL VE METOD

5.1. DİŞLİ ÇARK TASARIMI

Dişli çark tasarımı üç boyutlu çizim programında yapılmıştır. FZG (Forschungstelle für Zahnader und Getriebau) aşınma deney test cihazının eksenler arası mesafesi 91.5 mm olduğu için dişli çark tasarımları bu mesafe dikkate alınarak yapılmıştır. Bu mesafeyi gerçekleştirmek için dişlilere pozitif profil kaydırma işlemi (Şekil 5.1) uygulanmıştır.



Şekil 5.1. Solidworks programında tasarımı yapılan dişli çark.

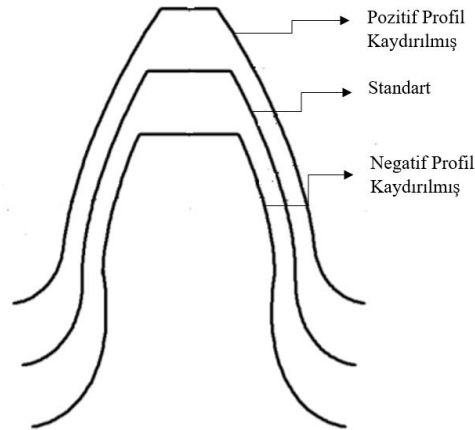
Dişli tasarım parametreleri doğrudan veya dolaylı olarak modüle ve diş sayısına bağlı olduğu için profil kaydırma ölçülerinin gerçekleştirilmesi için profil kaydırma formülleri değişken olarak üç boyutlu çizim programına tanımlanmıştır (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Tasarımı yapılan dişli çarkın çizim programındaki ölçüleri.

| Semboller | Denklemler | Boyutlar | Parametre isimleri |
|--------------------------------|------------------------------|----------|----------------------|
| Global Değişkenler | | | |
| "m" | = 4.5mm | 4.5mm | Modül |
| "z" | = 20 | 20 | Diş Sayısı |
| <i>Global değişken ekle</i> | | | |
| Uruslar | | | |
| <i>Urus pasifleştirme ekle</i> | | | |
| Denklemler | | | |
| "D1@Çizim1" | = "m" * ("z") | 90mm | TaksimatDairesi Çapı |
| "D2@Çizim1" | = "m" * ("z" + 2 + 0.333) | 100.5mm | Diş Üstü Çapı |
| "D3@Çizim1" | = "m" * ("z" - 2.4 + 0.333) | 80.7mm | Diş Dibi Çapı |

5.1.1. Profili Kaydırılmış Dişli Çarklar

Evolvent bir dişli profilinde profil kaydırması yapmak, aynı modül ve diş sayısı ile dişliyi normal diş üstü çapından daha büyük (pozitif) veya daha küçük (negatif) bir çapa sahip yapar. Bu da kavrama açısını ($\alpha = 20^\circ$) teorik olarak büyütme veya küçültme demektir. Kavrama açısı 20° olan evolvent dişlilerde profil kaydırma yapılmadan imal edilebilecek minimum diş sayısı 14' tür. Bu diş sayısından küçük diş sayılarında diş dibi kesilmesi olayının meydana gelmesi pozitif profil kaydırma ile önlenir. Profil kaydırma işlemi, pozitif profil kaydırma ile diş dibi kesilmesini önlemek, istenilen eksenler arası mesafede dişlilerin çalışmasını sağlamak ve daha az diş sayısına ($Z=8$) sahip dişli üretmek için yapılır [15].



Şekil 5.2. Profil kaydırmanın diş geometrisine etkisi.

Pozitif profil kaydırma, dişli mukavemetini artırır. Kavrama oranını azaltır. Kavrama oranının azalması dişlinin gürültülü çalışmasına sebebiyet verir. Negatif profil kaydırma ise dişli mukavemetini azaltır. Kavrama oranını büyütür. Bu da dişli çiftinin sessiz çalışmasını sağlar. Profil kaydırılmış dişlilerde boyutlar diğerlerinden farklıdır. Modül değeri standart olduğu için her zaman verilen diş sayılarında mekanizma istenilen eksenler arası mesafeye yerleşmeyebilir. İstenilen eksenler arası mesafeye yerleştirmek için mekanizma profil kaydırılarak genişletilir veya daraltılır. Bu tip mekanizmalar V-mekanizma olarak adlandırılır. Profil kaydırıldığı için taksimat daireleri ile yuvarlanma daireleri aynı olmaz. Profil kaydırma oranı X ile gösterilir. Profil kaydırma oranı 0'dan büyükse pozitif profil kaydırma, 0'dan küçükse negatif profil kaydırma olduğu anlaşılır. Pozitif profil kaydırmada diş geometrisi diş üstüne doğru incelerken, negatif profil kaydırmada diş dibi inceler (Şekil 5.2). Profil kaydırma yapılsın veya yapılmıyorsa taksimat dairesi daima sabit kalır. Taksimat dairesinin yeri ve büyüklüğü değişmez [33].

5.1.2. Pozitif Profil Kaydırma Yapılmış Dişli Çarkların Hesaplamaları

Pozitif profil kaydırma yapılmış dişli çarkların boyut hesapları yapılırken diş üstü çapı, diş dibi çapı ve yuvarlanma dairesinin çapı profil kaydırma miktarına bağlı olarak büyür.

$$\text{Taksimat Dairesi (Bölüm Dairesi) Çapı: } d = m \times z \quad (5.1)$$

$$\text{Diş başı yüksekliği: } h_a = m \quad (5.2)$$

Diş üstü çapı:

$$d_a = d + 2 \times h_a = z \times m + 2 \times m + 2 \times m \times x = m(z + 2 + 2 \times x) \quad (5.3)$$

$$\text{Diş dibi yüksekliği: } h_t \approx 1,2 \times m \quad (5.4)$$

Diş dibi çapı:

$$d_t = d - 2 \times h_t = m \times z - 2,4 \times m + 2 \times m \times x = m(z - 2,4 + 2 \times x) \quad (5.5)$$

$$\text{Temel Daire Çapı: } d_b = d \times \cos \alpha \quad (5.6)$$

Yuvarlanma Dairesi Çapı:

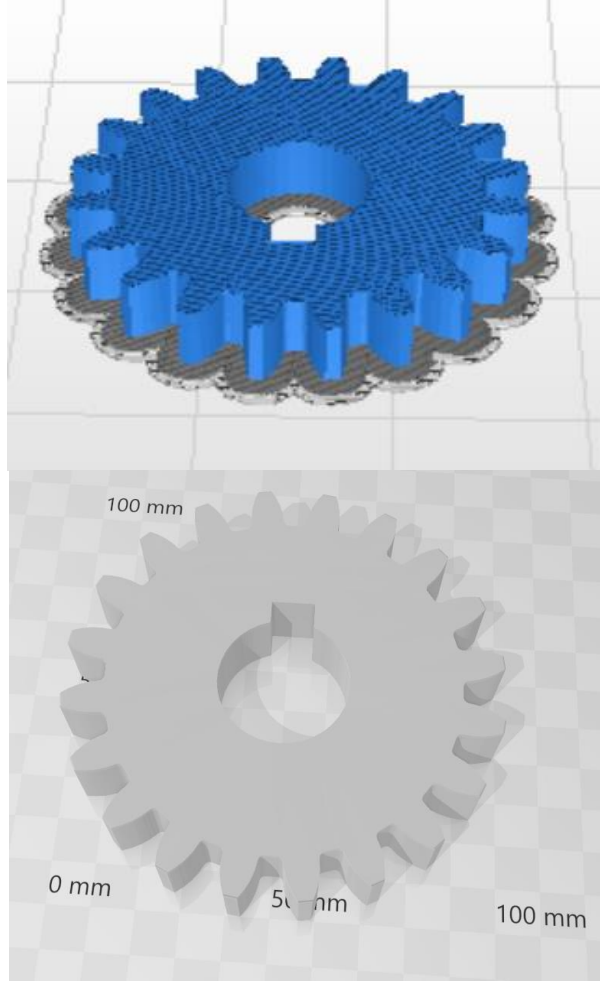
$$d_y = d + 2 \times m \times x \text{ veya } d_y = d \times \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_v} \quad (5.7)$$

Çizelge 5.2. Pozitif profil kaydırma uygulanmış dişli çarkın ölçüleri.

| Dişli Çark Boyut Parametreleri | Sembol | Dişli Çark Ölçüleri |
|----------------------------------|----------------|---------------------|
| Modül (mm) | m | 4,5 |
| Diş Sayısı | Z | 20 |
| Diş Genişliği (mm) | b | 18 |
| Eksenler Arası Mesafe (mm) | a | 91,5 |
| Profil Kaydırma Oranı (Pozitif) | X ⁺ | 0,166 |
| Temel Daire Çapı (mm) | d _b | 84,57 |
| Taksimat/Bölüm Dairesi Çapı (mm) | d _o | 90 |
| Yuvarlanma Dairesi Çapı (mm) | d _y | 91,494 |
| Diş Dibi Çapı (mm) | d _t | 80,7 |
| Diş Üstü Çapı (mm) | d _a | 100,5 |
| Kavrama Boyu (mm) | g _a | 23,53 |
| Kavrama Uzunluğu (mm) | e | 25,04 |
| Profil Kavrama Oranı | ε | 1,80 |
| Kavrama Açısı | α | 20° |
| Eş Çalışma Kavrama Açısı | α _v | 22,42° |

5.2. PLA DİŞLİ ÜRETİMİ

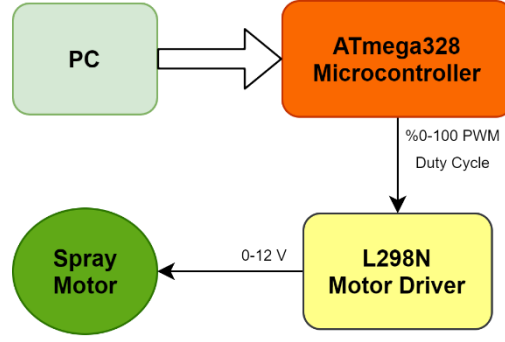
PLA dişliler Zortrax M200 marka 3D yazıcı ile üretilmiştir. Üç boyutlu çizim programında tasarımı yapılan dişli çark .STL uzantılı olarak kaydedilip G-kodları Z-Suite programına aktarılmıştır. Baskı malzemesi olarak Esun marka 1,75 mm çapında PLA filament kullanılmıştır.



Şekil 5.3. 3D yazıcıda üretilecek dişli çarkın baskı görüntüleri.

5.3. KONTROL EDİLEBİLİR YAĞLAYICI SİSTEMİ

Deney düzeneğinin belirli periyotlarla yağlanmasını sağlayan elektronik donanımlar; mikrodenetleyici, doğru akım motor sürücüsü ve yağlayıcı püskürtme motorundan oluşmaktadır. Yağlanma işleminin periyodik olarak ayarlanması 20 MHz işlemci hızına sahip arduino ATmega328 mikrodenetleyicisi tarafından gerçekleştirilmektedir. Püskürtme motorunun sürülmesi için, 2A akım verme kapasitesine sahip L298N motor sürücü entegresi kullanılmıştır. Yağlayıcı püskürtme işlemi ise araçlarda kullanılan cam yıkama pompa motoru ile gerçekleştirilmektedir. Yağlama işlemini gerçekleştiren elektronik donanımların blok şeması Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

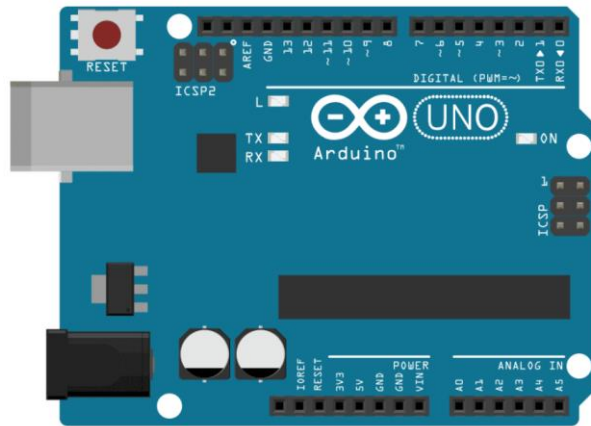


Şekil 5.4. Kontrol edilebilir yağlayıcı sisteminin blok diyagramı.

5.3.1. Kontrol Edilebilir Yağlayıcı Sistemindeki Elemanlar

5.3.1.1. Arduino

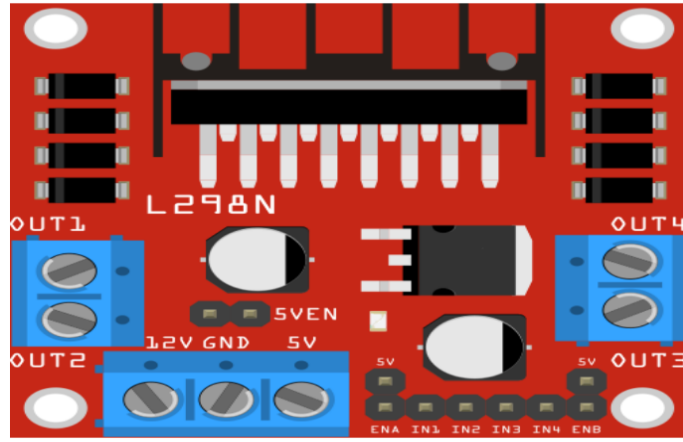
Kontrol edilebilir yağlayıcı sistemi arduino ile programlanmıştır. Arduino, donanım ve yazılıma dayalı açık kaynaklı bir elektronik platformudur. Arduino kartları, giriş sinyallerini okuyabilir. Bir motoru çalıştırabilir. Kart üzerindeki mikrodenetleyici sistemini kontrol edebilmek için arduino yazılımı (IDE) kullanılır. Kontrol edilebilir yağlayıcı sisteminde Arduino Uno R3 SMD CH340 Chip kullanılmıştır. Arduinoda kullanılan mikrodenetleyici ATmega328P'dir. Arduino çalışma voltajı 5 V'tur. Giriş voltajı için önerilen 7 – 12 V aralığında olup, limit değerleri 6 – 20 V aralığındadır [34].



Şekil 5.5. Arduino'nun şematik gösterimi.

5.3.1.2. Motor Sürücü

Motor sürücü olarak L298N DC motor sürücü kullanılmıştır. L298N motor sürücü 24 V'a kadar olan motorları sürebilir. Bu motor sürücü kartı, iki kanallı olup, kanal başına 2 A akım vermektedir. Arduniolar 50 mA den fazla akım veremediklerinden dolayı ve motorlar için yüksek güç gerektiği için motor sürücü entegreleri kullanılmaktadır. L298N motor sürücü birbirinden bağımsız olarak iki ayrı motoru kontrol edebilir. Üzerinde dahili regülatörü vardır [35].



Şekil 5.6. L298N motor sürücünün şematik çizimi.

5.3.1.3. DC Motor

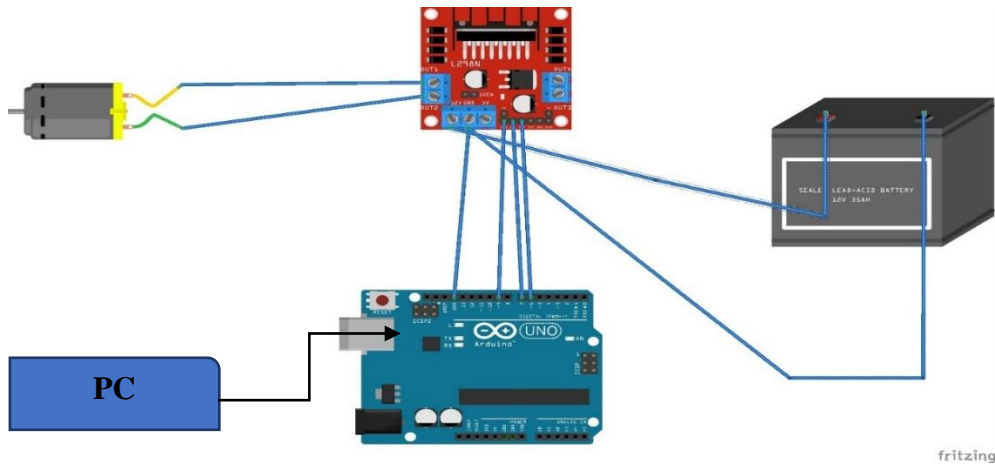
DC motor olarak araçlarda silecek pompa motoru olarak da kullanılan EMA marka WP 500 12 V DC motor kullanılmıştır. Yağlayıcı deposu olarak da silecek pompa motoruna uygun plastik yağ tankı kullanılmıştır (Şekil 5.7).



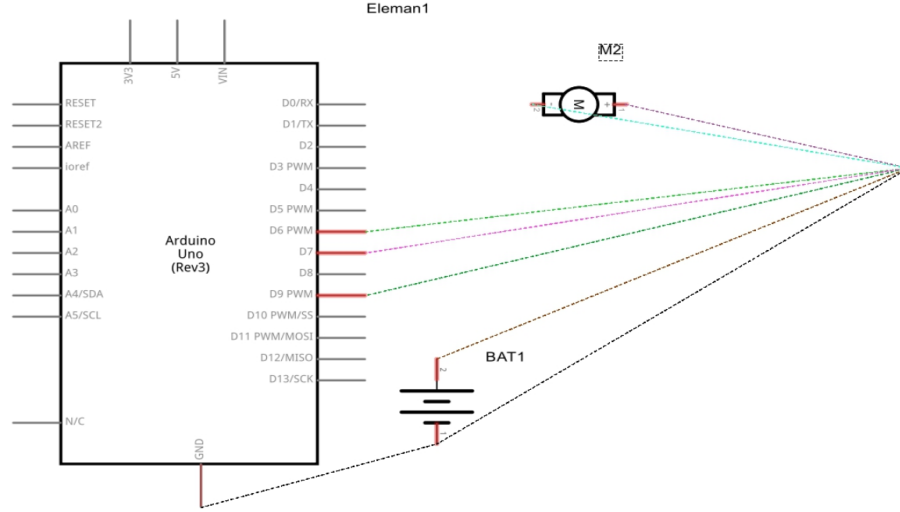
Şekil 5.7. DC motor ve yağlayıcı deposu.

5.3.2. Kontrol Edilebilir Yağlayıcı Sisteminin Şematik Devre Çizimi

Kontrol edilebilir yağlayıcı sisteminin şematik devre çizimi fritzing programı ile yapılmıştır. Gerilim, 30 V' a kadar ayarlanabilen güç kaynağı ile sağlanmıştır. Ayrıca güç kaynağı vasıtası ile sistemin çalışma esnasında ne kadar akım çektiği tespit edilmiştir. Sistem 12 V gerilim değerinde çalıştırılmış, devre 1.8 A akım çekmiştir. Güç kaynağının artı ve eksi ucu sırası ile motor sürücü üzerinde bulunan 12 V ve GND (Ground) portuna bağlanmıştır. DC motor, motor sürücü üzerinde bulunan OUT1 ve OUT2 portuna bağlanmıştır. Arduino üzerindeki GND pini Motor sürücü üzerindeki GND portuna bağlanmıştır. Arduinonun D7 pini ile Motor sürücünün İN 1 pini, D6 pini ile Motor sürücünün İN 2 birbirine bağlanmıştır. Arduinonun D9 PWM pini ile Motor sürücünün ENA pini birbirine bağlanmıştır. ENA pini OUT1 ve OUT 2 portlarını etkinleştirir. ENA pinine PWM sinyali uygulanarak motorun kontrolü sağlanmıştır (Şekil 5.8). PWM (Pulse Width Modulation) Türkçe adıyla Darbe Genişliği Modülasyonu, aslında dijital bir sinyal olup, anahtarlama ile analog sinyal oluşturur. PWM sinyalde darbelerin bir periyotta ne kadar 5 V'ta kaldığına ve ne kadar 0 V kaldığına bakılır. PWM sinyalde bir darbenin 5 V seviyesinde kalma süresi darbe genişliği, bu darbe genişliğinin bir periyotta olan yüzdesine Duty Cycle (görev döngüsü) denir. Sinyal çıkışı bir periyotta kesintisiz olarak 5 V ise Duty Cycle %100'dür, darbe genişliği bir periyotta kesintisiz olarak 0 V ise Duty Cycle %0'dır.



Şekil 5.8. Yağlayıcı ünitesinin fritzing programında şematik gösterimi.



Şekil 5.9. Yağlayıcı ünitesinin fritzing programında devre çizimi.

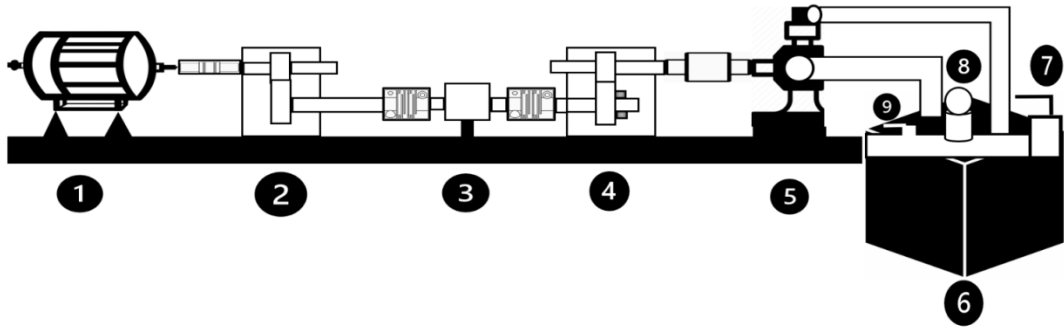
5.4. DIŞLİ AŞINMA SİSTEMİ

5.4.1. FZG Aşınma Deney Test Cihazı

Dişlilerin aşınma deneyi FZG(Forschungstelle für zahnader und Getriebau) güç aktarım aşınma cihazında yapılmıştır. FZG dişli aşınma test cihazı iki dişli kutusuna sahiptir. Bu dişli kutuları miller vasıtasıyla birbirine bağlıdır. Dişlilerin dönme hızı, elektrik motorunun frekansı kontrol edilerek ayarlanmıştır. FZG dişli aşınma test cihazı, güç dolaşımli bir test makinesidir. Şekil 5.10 a'da şematik resmi verilmiştir. 2 numaralı dişli kutusu 5.5 kW'lık elektrik motoru ile tahrik edilmektedir. 4 numaralı dişli kutusunda test edilen dişliler vardır. Dişlilerden biri çelik, diğeri polimerdir. Çelik olan dişliye 5 numaralı hidrolik pompa ile yük uygulanarak moment oluşturulmuştur. Uygulanan tork, motor miline bağlı dişli kutusunun çıkış miline monte edilen 3 numaralı tork sensörü ile ölçülmüştür. Dişlilerin dış sıcaklıkları temassız kızılötesi sıcaklık sensörü ve termal kamera ile ölçülmüştür. Test dişlilerinin yüzey sıcaklığı ve tork, bilgisayar tabanlı bir veri toplama sistemi kullanılarak sürekli kaydedilmiştir. Dişliler deneyler için belirlenen süreye ulaşana kadar çalıştırılmıştır. Dişliler kuru ortamda, katı ve sıvı yağlayıcı ile yağlanarak ayrı ayrı çalıştırılmıştır [36,37].

Çizelge 5.3. Elektrik motorunun özellikleri.

| Marka | Gamak |
|--|-------------|
| Tip | AGM 132 S 4 |
| Çalışma Türü | S1 |
| Koruma Sınıfı | IP 55 |
| Yalıtım Sınıfı | F 55(°C) |
| Isı Artışı | Class B |
| Yapı Biçimi | B3 |
| Anma Hızı (d/dk) | 1430 |
| Çıkış Gücü(Kw) | 5,5 |
| Anma Akımı(A) | 11,8 |
| Anma Momenti(Nm) | 35,9 |
| Güç Faktörü (cos φ) | 0,82 |
| Verim (%) | 87,7 |
| Frekans (Hz) | 50 |
| Eylemsizlik Momenti (kgm²) | 0.026 |



1: Elektrik motoru, 2: Tahrik Dişli kutusu, 3: Tork sensörü, 4: Test dişli kutusu 5: Hidrolik dişli pompa 6: Yağ haznesi, 7: Basınç kontrol valfi 8: Basınç göstergesi, 9: Yağ vanası

Şekil 5.10 a. Dişli aşınma deneyi test cihazı şematik çizimi



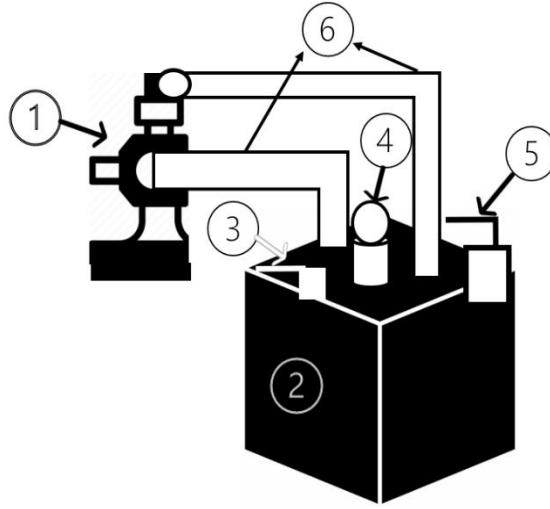
Şekil 5.10 b. Dişli aşınma deneyi test cihazı.

5.4.2. Tork Kontrol Sistemi

Dişliye tork uygulamak için bir hidrolik ünite kullanılmıştır. Hidrolik ünite, hidrolik dişli pompa, hidrolik yağ haznesi, basınç kontrol valfi, basınç göstergesi, hidrolik yağ soğutma fanı ve hidrolik hortumlardan oluşmaktadır. Basınç kontrol valfi, pompa çıkış basıncını ayarlamak ve tahrik edilen dişli üzerinde gerekli torku uygulamak için pompa çıkışına takılmıştır. Sistem basıncının dişli üzerinde oluşturulan torkla arasındaki bağıntı denklem 5.8’de verilmiştir.

$$M = \frac{1,59 \times V \times \Delta P}{100 \times \eta} \quad (5.8)$$

Burada; M: (Nm) tork, V: pompanın hacimsel debisi, ΔP : (bar) sistem basıncı ve η : hidromekanik verimliliğidir. Pompa karakteristik eğrisine göre, verim η ortalama 0,9’ a eşittir [38].



1: Hidrolik Dişli Pompa 2: Hidrolik yağ haznesi 3: Yağ vanası 4: Dijital manometre (Yağ basınç göstergesi) 5: Basınç Kontrol Valfi 6: Hidrolik hortumlar

Şekil 5.11 a. Tork kontrol sisteminin şematik gösterimi.



Şekil 5.11 b. Tork kontrol sistemi.

5.4.2.1. Hidrolik dişli pompa

Hidrolik pompalar, mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye dönüştürür. Sistemde bulunan hidrolik pompa, yağ deposunda bulunan yağı elektrik motorundan dolaylı olarak

aldığı dönme hareketi ile istenen basınçta sisteme göndererek çelik dişliye moment uygulamıştır. Hidrolik dişli pompa Hema markadır. Hidrolik dişli pompanın debisi 1000 d/dk hızda 33,3 cm³/d'dir. Pompa debisi, pompa milinin hızı ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

5.5. ÖLÇÜM METODOLOJİSİ

5.5.1. Yağ Karakterizasyonu

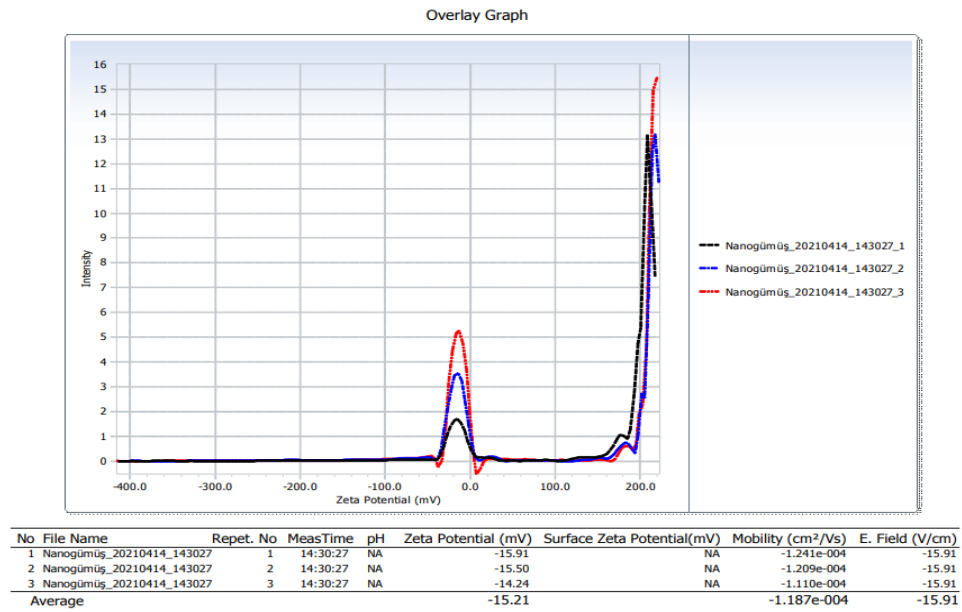
Yağlayıcı olarak Kadoil marka kinematik viskozitesi 5 cSt (100 °C) (en az 5 en çok 5,7), alevlenme noktası 200 °C, viskozite indeksi 99 olan baz yağ kullanılmıştır. Katı yağlayıcı olarak, Shell Gadus S2 V100 3 marka lityum sabunlu mineral esaslı gres yağı kullanılmıştır. Gres yağı; kinematik viskozitesi 11 cSt (100 °C), kıvamlılık (NLGI) derecesi 3, orta sert, penetrasyon aralığı 220- 250 değerlerine sahiptir.

Nanopartikül katkısı olarak da baz yağın içerisine belirli oranlarda gümüş nanopartikülleri (AgNP) katılmıştır. Çalışma esnasında dişliler ısıya maruz kalmaktadır. Gümüş, ısıl iletkenlik katsayısı (429 W/mK) en yüksek element olduğu için baz yağın içerisine katılan nano gümüşün partikülleri oluşan ısıyı transfer ederek aşınmayı azaltması beklenmektedir. Diğer bir nano partikül katkısı olarak nano grafen kullanılmıştır. Nano grafen belirli oranda (%10) saf su içerisine katılmıştır. Grafen, ısıyı çok iyi ileten bir malzemedir. Nano grafen tabakasının oda sıcaklığındaki ısıl iletkenliği 5000 W/ mK' dir [39]. PLA dişliler, deney esnasında saf su ve (%90) saf su +(%)10 nano grafen olmak üzere 2 farklı yağlayıcı ortamında deneye tabi tutulmuştur.

5.5.1.1. Zeta Potansiyel

Nano akışkanların kararlılığına zeta potansiyeline bakılarak karar verilmektedir. Zeta potansiyeli, içerisinde katı partiküller veya sıvı damlacıklar bulunan bir süspansiyonun, bu damlacık veya partiküllerin elektrostatik olarak birbirlerini itme-çekme kuvvetlerinin bir ölçüsü şeklinde tanımlanır. Van der Walls bağ kuvvetiyle birbirleriyle çarpışmakta olan partikül veya damlacıklar, çarpışma sonucunda birleşip

topaklaşma mı olacağına veya elektrostatik kuvvetle birbirlerini iterek ayrılıp tekil partiküller halinde mi kalacağına, zeta potansiyel analizi ile karar verilmektedir. Zeta potansiyeli ölçümü, elektriksel alan altında, partikül veya damlacıkların yönelme hareketleri izlenerek ölçülür. Elektriksel alan altında daha hızlı yönelme hareketine sahip parçacık veya damlacıklardan oluşan numunelerin zeta potansiyel değerleri daha yüksektir. Zeta potansiyel değeri eksi veya artı yönde yüksek olan numunelerde elektrostatik itme kuvveti de etkin olacağından, bu numuneler topaklanmaya karşı daha dayanıklı olurlar. Zeta potansiyel değeri sıfır değerine en yakın numuneler ise Van der Waals bağının kuvvetli olduğu numuneler olup, en hızlı topaklanmaya uğrarlar [40]. Zeta potansiyel ölçümü Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Nanoplus 3 marka cihazla ölçülmüştür. Nano gümüşün zeta potansiyel değeri Şekil 5.12'de verilmiştir.

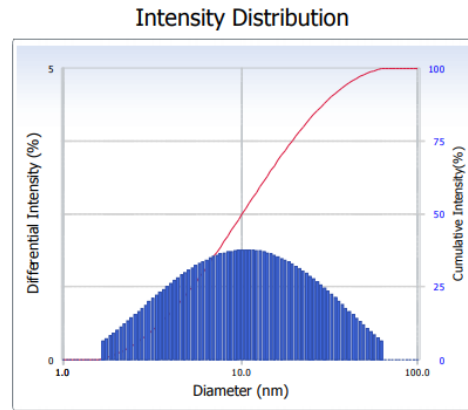


Şekil 5.12. Nano gümüş zeta potansiyel değeri.

AgNP'lerin yük bakımından negatif dağılım göstermeleri önemlidir. Elde edilen AgNP'lerin sadece negatif yüke sahip olmaları kümelenmenin ve topaklanmanın olmadığını ve kararlı olduklarını gösterir [41]. Elde edilen AgNP'lerin yüzey yüklerini belirlemek için yapılan zeta potansiyeli analizi sonucu - 15.21 mV olarak bulunmuştur.

5.5.1.2. Partikül Boyut Analizi

Malzemelerdeki sağlamlık, kimyasal reaktiflik, opaklık, akışkanlık gibi özellikler ve malzeme mukavemeti, malzemelerin içindeki tane boyu karakteristiklerine bağlıdır. Küçük tanelerin boyutlarını ölçmek için Mie teorisi kullanılır. Mie teorisi ışığın ortam içerisinde tane boyu etrafındaki hem kırılmasını hem de geçirgenliğini dikkate alır. Mie modelini kullanabilmek için hem numunenin hem de ortamın kırılma indislerinin bilinmesi gerekmektedir [42]. Partikül boyut analizi lazer kırınım yöntemi ile yapılmıştır. Numune üzerine kırmızı ve mavi lazer ışığı gönderilir. Numuneden yansıyan ve kırılan lazer ışığı dedektörler ile incelenir. Saçılan ışığın açısı ve şiddeti numunenin parçacık boyut dağılımını belirler. Parçacık içerisinde geçen lazer ışığının saçılma açısı parçacık boyutuna bağlıdır. Parçacık boyutu düştükçe saçılma açısı logaritmik olarak artar. Büyük parçacıkların saçılma açıları düşük, saçılan lazer ışığının şiddeti yüksektir. Küçük parçacıklarda ise saçılma açısı yüksek, saçılan lazer ışığının şiddeti düşüktür [43]. Partikül boyut analizi ölçümü Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Cilas – 1190 marka partikül boyut analiz cihazı ile ölçülmüştür. Nano gümüşün partikül boyut değeri Şekil 5.13'te verilmiştir. Kullanılan nano partiküller ortalama 14,7 nm boyutundadır.



Distribution Results (Contin)

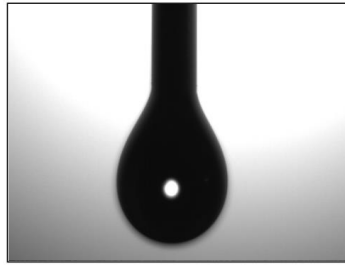
| Peak | Diameter (nm) | Std. Dev. |
|------------|---------------|-----------|
| Average | 14.7 | 12.5 |
| Residual : | 1.321e-002 | (O.K) |

Şekil 5.13. Nano gümüş partikül boyut analiz sonuçları.

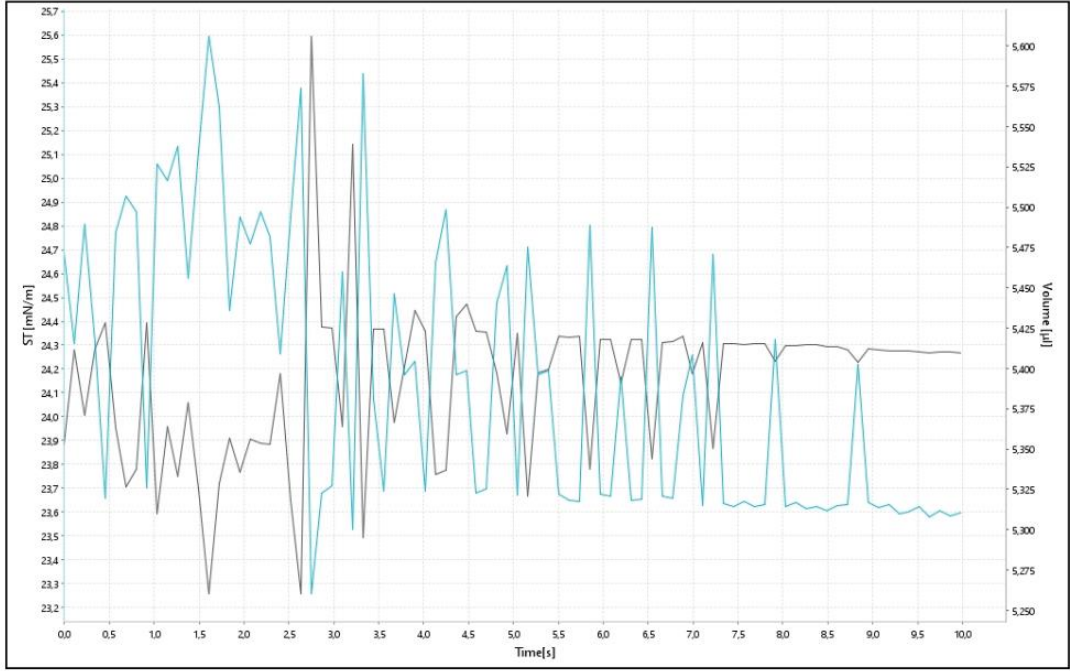
5.5.1.3. Yüzey gerilimi

Yüzey gerilimi, yüzeyin 1 cm² artırılması için birim uzunluğa uygulanan kuvvet olarak tanımlanmaktadır. Yüzey gerilimi γ sembolü ile gösterilir. Yüzey geriliminin birimi mN/m (miliNewtonmetre⁻¹)'dir [44]. Su damlasının küre biçiminde kalmasını yüzey gerilimi sağlar. Bunu sağlayan enerji de suyun damladığı katı yüzeydeki yüzey enerjisidir. Sıcaklık, sıvının türü ve sıvının içerisine katılan katkıları yüzey gerilimini etkileyen faktörlerdir.

Yüzey gerilimi, asılı (pendant) damla yöntemiyle belirlenmiştir. Pipetin ucunda sıvıyı tutan kuvvet sıvının pipete temas ettiği daire boyunca olan sıvının yüzey gerilimi ile orantılıdır. (Şekil 5.14) Dik konumda duran pipetin ucundan sıvı damlasının kopması sağlanarak hacmi belirlenir. Yüzey gerilimi bilinen bir sıvının damla hacmi ile ölçümü yapılan sıvının damla hacmi karşılaştırılarak yüzey gerilim grafiği çizilir. Damla pipetin ucundan koptuğu andaki hacmi yüzey gerilimine eşittir (Şekil 5.14). Yüzey gerilimi Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Biolin Scientific Attension – Theta Lite yüzey gerilim ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Baz yağın yüzey gerilimi 24,15 mN/m olarak ölçülmüştür (Şekil 5.15)



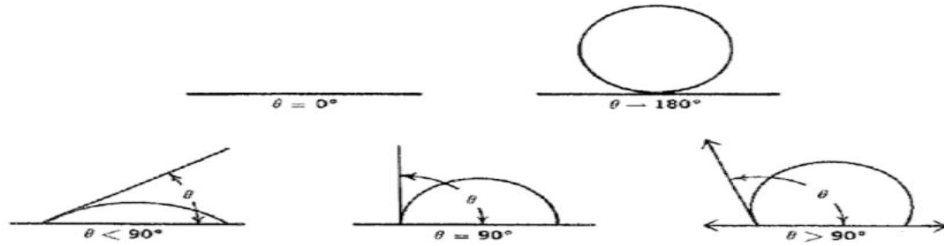
Şekil 5.14. Baz yağ damlası yüzey gerilim ölçümü.



Şekil 5. 15. Baz yağ yüzey gerilim grafiği.

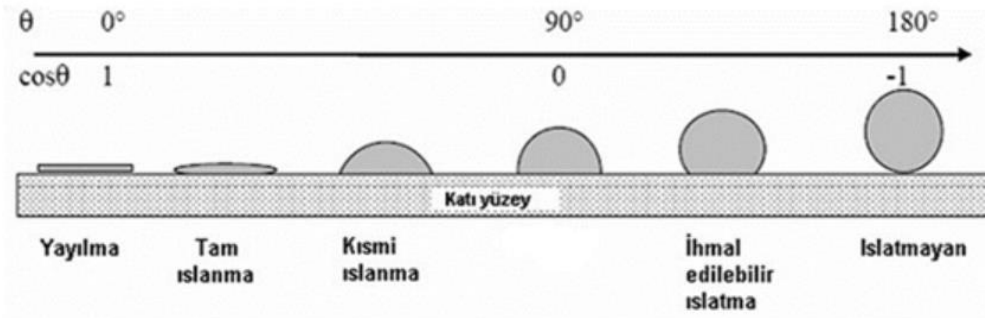
5.5.1.4. Islatabilirlik

Sıvının katı bir yüzeyde kolayca yayılmasına ıslatma denir. Bir sıvının katı yüzeye temas ettiğinde oluşan açıya ise temas açısı denir. Temas açısı yüzey gerilimi, ara yüzey gerilimi ve serbest yüzey enerjisi, ıslatabilirlik, sıvı emilimi, sıvıyı yüzeyde tutma, sıvı yayılması, yüzey temizliği, kararlılığı gibi malzeme özellikleri hakkında bilgi sağlar. Temas açısı θ ile gösterilmektedir.



Şekil 5.16. Temas açısı örnekleri.

Islatabilirlik derecesi temas açısına bağlıdır. Temas açısı 0 ila 180 derece arasında olabilir (Şekil 5.16). Temas açısı küçüldükçe ıslatabilirlik artar. Temas açısı $\theta = 0$ ise ıslatabilirlik çok iyidir. Eğer $\theta > 90^\circ$ ise sıvı, katıyı ıslatmaz. Eğer $90^\circ < \theta$ ise sıvı, katıyı ıslatır (Şekil 5.17) [45].

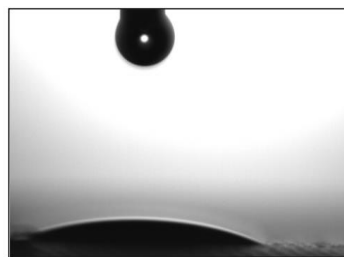


Şekil 5.17. Temas açılarının ıslatabilirlik düzeyleri.

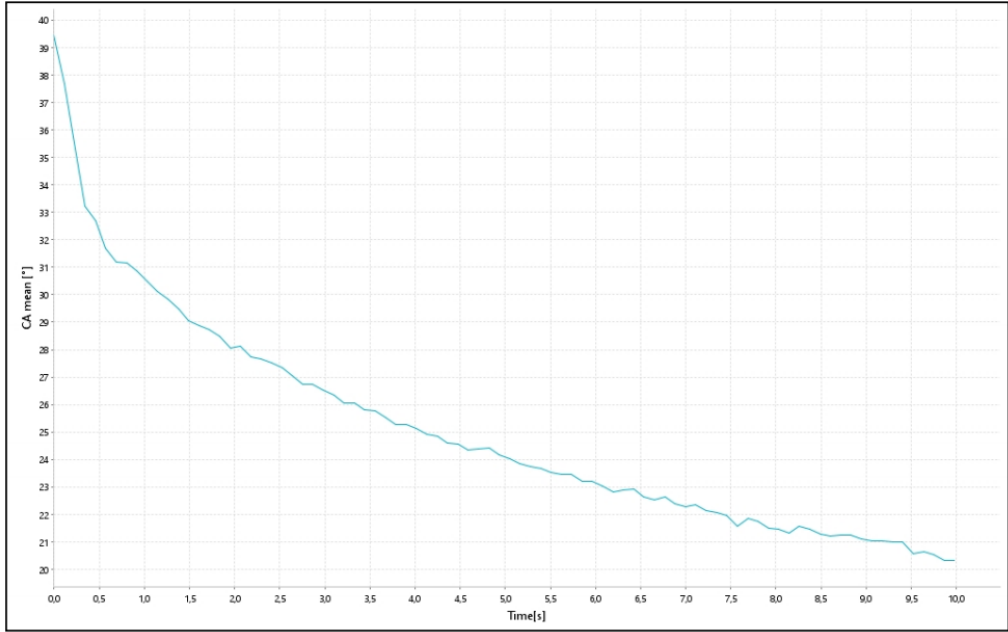
Temas açısı ölçüm cihazı, damla görüntülerini kaydederek zamana bağlı damla şeklini otomatik olarak analiz eder. Damla şekli, sıvının yüzey geriliminin, sıvı ile sıvıyı çevreleyen ortam arasındaki yoğunluk farkının bir fonksiyonudur. Katı yüzeylerde, damla şekli ve temas açısı katının serbest yüzey enerjisine bağlıdır [46]. Temas açısı, durağan (Sessile) damla yöntemiyle belirlenmiştir. Temas açısı Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Biolin Scientific Attension – Theta Lite temas açısı ölçüm cihazı ile yapılmıştır.

Baz Yağ Temas Açısı

Çelik dişli (katı) yüzey üzerine baz yağ (sıvı) damlatılarak temas açısı ölçülmüştür (Şekil 5.18). Temas açısı 27.05° olarak kaydedilmiştir (Şekil 5.19).



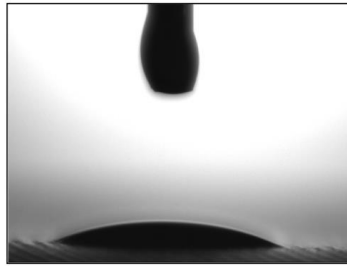
Şekil 5.18. Çelik dişli üzerindeki baz yağ ıslatabilirliği.



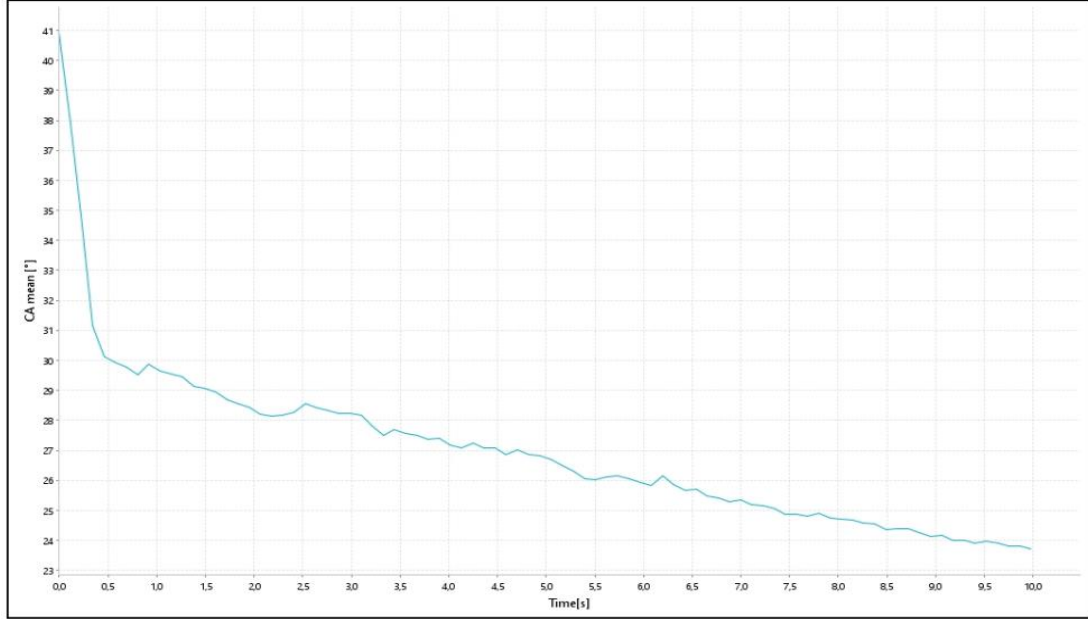
Şekil 5.19. Baz yağın temas açısı grafiği.

Baz Yağ + %4 AgNP Temas Açısı

Çelik dişli (katı) yüzey üzerine baz yağ + %4 AgNP (sıvı) damlatılarak temas açısı ölçülmüştür (Şekil 5.20). Temas açısı 26.31° olarak kaydedilmiştir (Şekil 5.21).



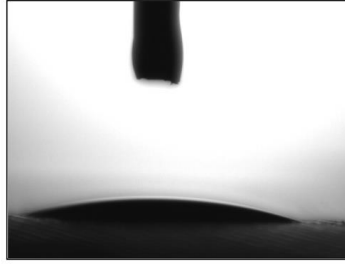
Şekil 5.20. Çelik dişli üzerindeki baz yağ + %4 AgNP ıslatabilirliği.



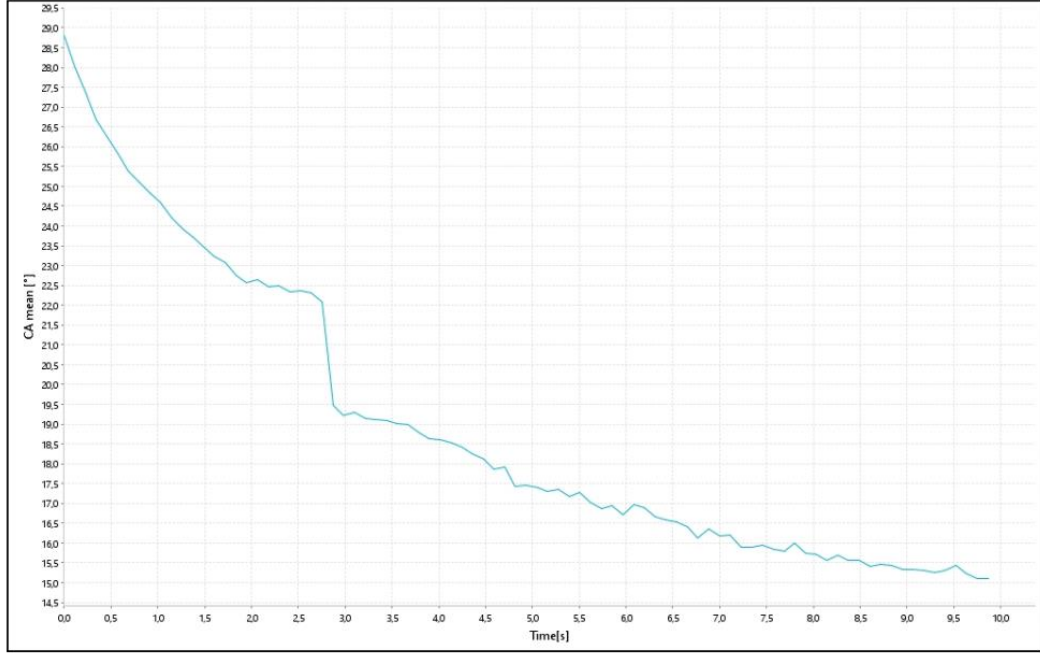
Şekil 5.21. Baz yağ + %4 AgNP temas açısı grafiği.

Baz Yağ + %8 AgNP Temas Açısı

Çelik (katı) yüzey üzerine baz yağ + %8 AgNP (sıvı) damlatılarak temas açısı ölçülmüştür (Şekil 5.22). Temas açısı 21.79° olarak kaydedilmiştir (Şekil 5.23).



Şekil 5.22. Çelik dişli üzerindeki baz yağ + %8 AgNP ıslatabilirliği.



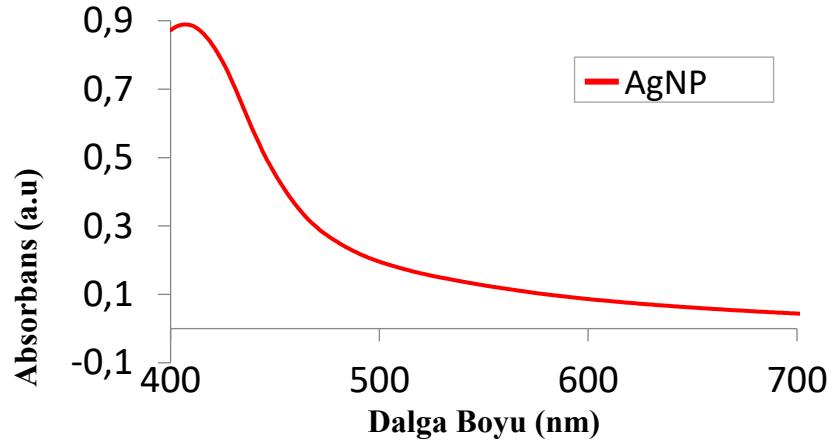
Şekil 5.23. Baz yağ + %8 AgNP temas açısı grafiği.

Baz yağ, baz yağ + %4 AgNP ve baz yağ + %8 AgNP yağlayıcılarının temas açısı incelendiğinde en yüksek temas açısına baz yağ, en düşük temas açısına ise baz yağ + %8 AgNP yağlayıcı ulaşmıştır. Yağlayıcı içerisindeki nano gümüş oranı arttıkça temas açısı küçülmüş, ıslatabilirlik artmıştır.

5.5.1.5. UV Absorbans

Yağlayıcı katkısı olarak kullanılmak üzere baz yağın içerisine katılan nano gümüş partikülleri Tollens yöntemi ile üretilmiştir. 2 cl gümüş nitrat (AgNO_3 , 99.0%, Sigma-Aldrich; 2.5×10^{-3} M), 2 cl amonyak (NH_3 , 25-30%, Sigma-Aldrich; 1.25×10^{-2} M) ve 1 cl sodyum hidroksit (NaOH , Merck; 5×10^{-2} M) çözeltileri oda sıcaklığında bir manyetik karıştırıcı ile 500 d/dk hızda 20 dakika karıştırılmıştır. Karıştırma esnasında çözeltilere 1,25 gr jelatin (Sigma-Aldrich) eklenmiştir. İlave edilen jelatin, nano gümüş partiküllerinin yüzeyini kaplayarak hazırlanacak karışımın kararlılığını sağlamaktadır. Karıştırma işleminin ardından 0,5 cl sodyum borhidrür çözeltisi, (NaBH_4 , 98.0%, Sigma-Aldrich; 0.1 M) hazırlanan karışıma damla damla eklenmiştir. Kimyasal reaksiyon oda sıcaklığında 500 d/dk hızda 1 saat manyetik karıştırıcı ile karıştırılarak devam etmiştir. Kimyasal reaksiyon tamamlandıktan sonra

elde edilen nano gümüş partikülleri oda sıcaklığında karanlık bir ortamda tutulmuştur [47]. Hazırlanan nano gümüş partiküllerinin optik özellikleri UV-vis (Ultraviolet-visible Spectrophotometry) ile analiz edilmiştir. Nanogümüş yaklaşık 420 nm dalga boylarında maksimum absorbands değerine (0,9) ulaşmıştır (Şekil 5.24).



Şekil 5.24. Nano gümüş partiküllerinin Uv grafiği.

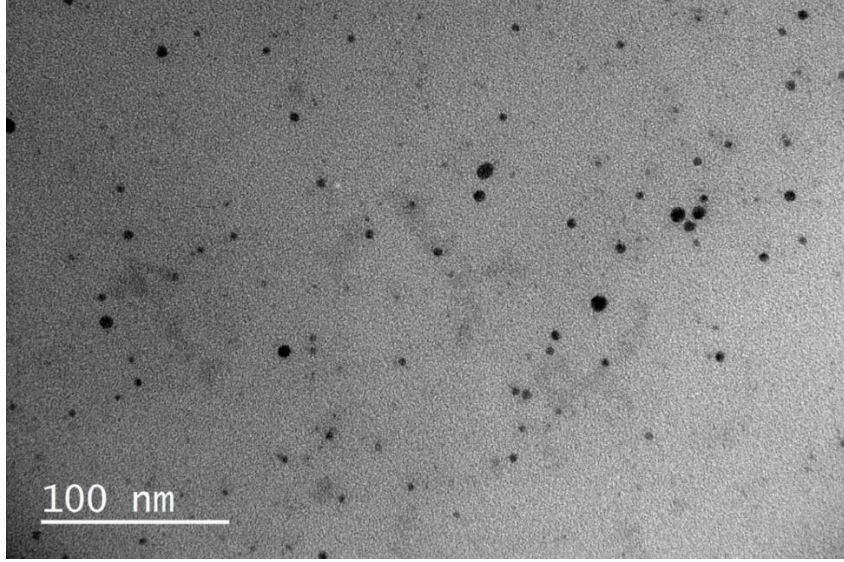
5.5.2. Aşınma Ölçümleri

5.5.2.1. SEM

Kestamid dişlilerin, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü'nde bulunan Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem ile Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) mikro yapı analizleri yapılmıştır. Kestamid yalıtkan özelliğe sahip olduğu için SEM görüntüsü alınmadan önce Platin (Pt) ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi Q150r Rotary-Pumped Sputter Coater/Carbon Coater marka kaplama cihazı ile yapılmıştır. Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) ile yüzeylerin elemental analizi yapılmıştır. Ayrıca %4 AgNP ve % 8AgNP ortamında çalışan diş yüzeylerinin EDX dedektörü ile yüzeylerinin elemental haritası çıkarılmıştır.

5.5.2.2. TEM

Nano gümüş partiküllerin boyutları geçirimli elektron mikroskobu (TEM - Jeol 2100F RTEM 200 kV) analizi ile tespit edilmiştir. Partikül boyutları yaklaşık 10 nm olarak belirlenmiştir (Şekil 5.25).



Şekil 5.25. Nano gümüş partiküllerinin TEM görüntüsü.

5.5.2.3. 3D Topoğrafya

Dişlilerin yüzey pürüzlülüğünün 3D topoğrafya görüntüleri Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Phase View marka Optik profilometre cihazı ile analiz edilmiştir. Optik profilometre cihazı katı malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için 3 boyutlu yüzey profili çıkaran bir cihazdır.

5.5.2.4. Ağırlık Ölçümü

Kütle kaybı ölçüm yöntemleri arasında en ekonomik yöntemdir. Ağırlık farkı metodu, hassas sonuçlar elde edilmesi sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir [48]. Kütle kaybı 10^{-4} g hassasiyete sahip terazi ile tartılarak tespit edilmiştir. Bu

yöntemde aşınma sonucu meydana gelen ağırlık kaybı aşınma miktarı gram olarak ifade edilmiştir. Dişliler deneyden önce ve sonra 3 kez tartılarak ağırlık kaybı tespit edilmiştir. Dişlilerin ağırlığı, RADWAG AS 220/C/2 marka 220 gram ağırlık ölçme kapasiteli hassas terazi (Şekil 5.26) ile ölçülmüştür.



Şekil 5.26. Hassas terazi.

5.5.2.5. Sıcaklık Ölçümü

Sıcaklık ölçümü Keyence marka kızılötesi sıcaklık sensörü ile her salise de bir ölçülerek veri kayıt sistemi ile bilgisayara kaydedilmiştir. Sıcaklık sensörü dişlilere yaklaşık 8 cm mesafeden ölçüm yapmıştır (Şekil 5.27). Ayrıca sıcaklıklar Unit marka termal kamera ile dişlilere yaklaşık 25 cm mesafeden orta noktalarındaki sıcaklık değerleri görüntülenerek kayıt altına alınmıştır. Termal kameranın emisivite ayarı 0,84 olarak ayarlanmıştır. Deneyler, 22 – 27 °C oda sıcaklığında ve %37,1 - %39,1 bağıl nem ortamında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.27. Sıcaklık sensörü.

BÖLÜM 6

DENEY TASARIMI

Deneyleerde kestamid ve PLA dişliler kullanılmıştır. Kestamid dişliler için sabit yük ve devirde yağlayıcı performans deneyleri yapılmış, PLA dişliler için kesirli faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. PLA dişlilerde optimizasyon ve varyans analiz uygulaması yapılarak sonuçlar istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Her iki deney setinde de kütle kaybı ve sıcaklık parametreleri analiz edilmiştir. Ayrıca kestamid dişli için SEM, EDX ve 3D topografya analizleri yapılmıştır.

6.1. KESTAMİD DİŞLİLERİN DENEY TASARIMI

Kestamid dişlilerin deneylerinde tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Bu deney tasarımı bir koşulun seviyesinin sabit tutulup diğer koşul değişken olduğunda, bu değişkenliğin dişlilerin tribolojik performansına etkilerini analiz etmeye imkan tanımaktadır. Kestamid dişli ile çelik dişliler çalışırken yük, devir ve süre sabit tutulmuş, değişken olan koşul ise dişlilerin çalışma ortamlarıdır. Deneyleerde dişliler 1000 d/dk hızda, 17,65 Nm torkta, 5 saat boyunca kuru, gres, baz yağ, baz yağ (%96) + AgNP (%4) ve baz yağ (%92) + AgNP (%8) ortamlarında çalıştırılmıştır (Çizelge 6.1). Deney parametreleri verilmiştir.

Çizelge 6.1. Kestamid dişlilerin tam faktöriyel deney parametreleri.

| Deney Parametreleri | Döndüren / Döndürülen |
|----------------------|--|
| Dişli malzemesi | Kestamid(PA6G) / AISI 8620 |
| Devir sayısı(d/dk) | 1000 |
| Tork(Nm) | 17,65 |
| Çalışma süresi(dk) | 300 |
| Ortam sıcaklığı (°C) | 24,1-26,7 |
| Ortam nemi(%RH) | 37,1-39,1 |
| Tur Sayısı | 3.10 ⁵ |
| Ortam | 1. Kuru 2. Gres 3. Baz yağ 4. %96 Baz yağ + %4 AgNP 5. %92 Baz yağ + %8 AgNP |

6.2. TAGUCHİ DENEY TASARIMI

PLA dişlilere taguchi L₉ deney tasarımı uygulanarak 9 farklı koşulda deneyler gerçekleştirilmiştir. Normal şartlarda üç seviyeli üç faktörün etkilerini belirleyebilmek için $3^3 = 27$ deney yapmak gerekmektedir. Taguchi'nin deney tasarımında ortogonal dizinler kullanması üç seviyeli üç faktörün etkilerinin 9 deney ile belirlenmesini sağlamaktadır. Deney tasarım matrislerinde ortogonal dizinlerin kullanılması hem zaman hem de maliyet açısından büyük avantaj sağlamaktadır [49]. Çizelge 6.2'de PLA dişlilerin Taguchi L₉ ortogonal deney tasarım matrisi verilmiştir. İlgili tasarım matrisi ve diğer istatistiksel analizler için Minitab 18 programı kullanılmıştır. Deneylerde giriş parametresi olarak yağlayıcı ortamı, devir ve hız parametreleri, çıkış parametresi olarak da sıcaklık ve kütle kaybı ölçülmüştür. Yağlayıcı ortam parametresi için kategorik faktör tanımlaması yapılmıştır. Taguchi'nin S/N (sinyal/gürültü) analizine göre optimizasyon yapılmıştır. Kütle kaybı ve sıcaklık parametreleri için “en küçük en iyidir - minimizasyon” yaklaşımına göre çözüm yapılmıştır. Taguchi yaklaşımının minimizasyon için geliştirdiği bağıntı Denklem 6.1'de verilmiştir.

$$\frac{S}{N} = -10 \times \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (6.1)$$

Çizelge 6.2. PLA dişlilerin Taguchi L₉ ortogonal deney parametreleri.

| Deney sayısı | Ortam | Devir (d/dk) | Tork (Nm) |
|--------------|-------------|--------------|-----------|
| 1 | Kuru | 100 | 0,235 |
| 2 | Kuru | 150 | 0,441 |
| 3 | Kuru | 200 | 0,706 |
| 4 | Saf su | 100 | 0,441 |
| 5 | Saf su | 150 | 0,706 |
| 6 | Saf su | 200 | 0,235 |
| 7 | Nano grafen | 100 | 0,706 |
| 8 | Nano grafen | 150 | 0,235 |
| 9 | Nano grafen | 200 | 0,441 |

6.3. PERFORMANS DENEYLERİ

Performans deneyleri nano grafenin optimum konsantrasyonunu belirlemek için 3 farklı yağlayıcı ortamında gerçekleştirilmiştir. Taguchi deney tasarımına göre belirlenen optimum noktalar referans alınarak performans deney parametreleri belirlenmiştir. Deneyler 100 d/dk hızda, 0,235 Nm torkta, 1 saat boyunca; %95 saf su + %5 nano grafen, %90 saf su + %10 nano grafen ve %85 saf su + %15 nano grafen olmak üzere 3 farklı nano grafen konsantrasyon yağlayıcı ortamında gerçekleştirilmiştir.

6.4. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

Varyans analizinin amacı deney şartlarını kontrol ederek performansı etkileyen parametreleri bulmaktır. Giriş parametrelerinin çıkış parametrelerine etkisi varyans (ANOVA) metodu ile incelenmiştir. ANOVA bir çıkış parametresi üzerinde hangi giriş parametrelerinin en etkili olduğunu, deney tasarımının ve sonuçlarının anlamlı olup olmadığını göstermektedir. Analizler %95 güven aralığında yapılmıştır. Varyans analizi tablolarında kareler toplamı “SS” ifadesi giriş parametrelerin çıkış parametresini etkileme oranını vermektedir. Ayrıca “p” değerinin 0,05 değerinden

küçük olması, ilgili giriş parametresinin incelenen çıkış parametresi üzerinde istatistiki ve fiziki öneme sahip olduğunu göstermektedir.

BÖLÜM 7

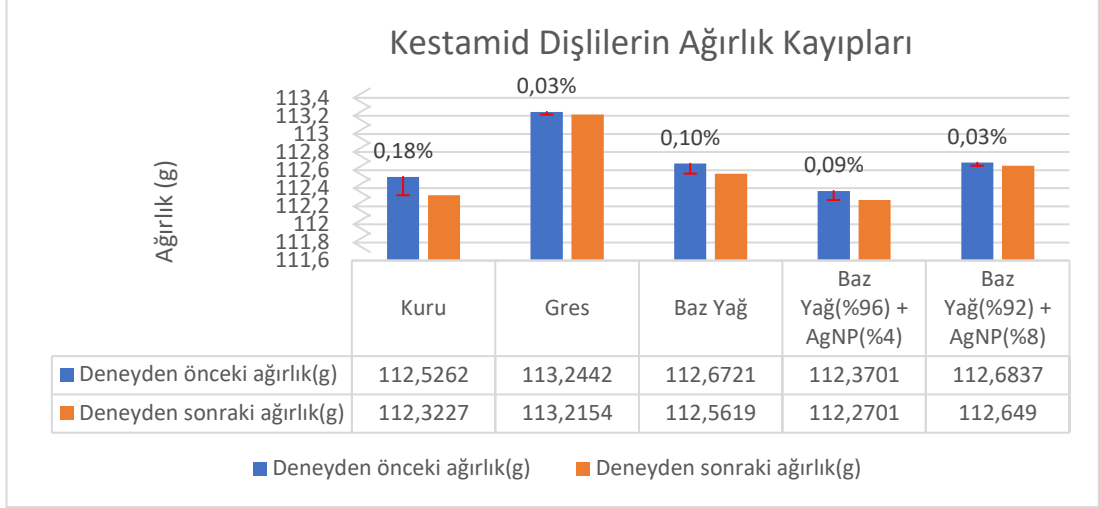
DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. NANOPARTİKÜL KATKILI BAZ YAĞ ORTAMINDA KESTAMİD DİŞLİNİN TRIBOLOJİK PERFORMANSI

Polimer malzemeler molekül yapılarında bulunan karbon (C) elementi sayesinde kendiliğinden yağlama özelliğine sahiptir. Fakat dişli aşınmasını geciktirmek, sistemin servis ömrünü uzatmak, sessiz çalışma ortamı sağlamak, dişlilerin profil yapısını korumak için yüksek yük ve hıza maruz sistemlerde yağlama kaçınılmazdır. Bu çalışmada nano partikül katkılı yağlamanın kestamid dişlilerin tribolojik performansı üzerine etkisini belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Dişlilerin tribolojik performansını değerlendirmek için; ağırlık kaybı ve sıcaklık parametreleri analiz edilmiştir. Dişlilerin yüzeylerinde meydana gelen aşınmaları görsel olarak belirlemek için optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve 3D optik profilometre görüntüleri analiz edilmiştir. Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) ile yüzeylerin elementel analizi elde edilmiş, %4 AgNP ve %8 AgNP katkılı yağlayıcı ile yağlanan diş yüzeylerinin EDX dedektörü ile elemental haritası çıkartılmıştır.

7.1.1. Ağırlık Kaybı Analizi

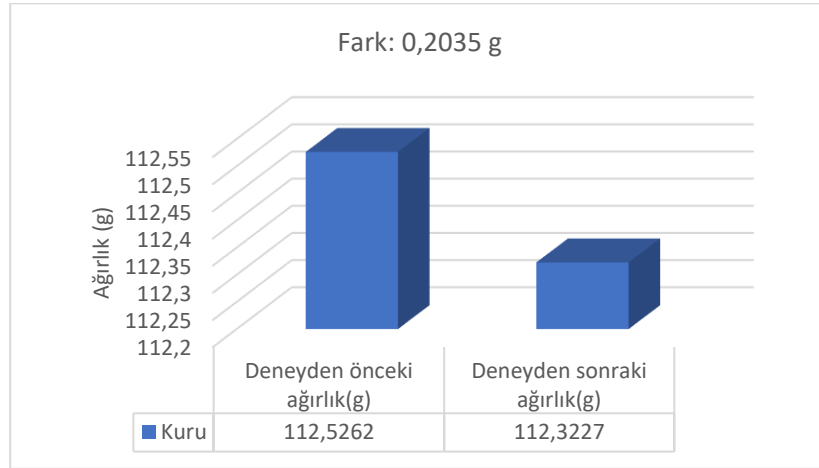
Dişlilerde meydana gelen aşınmanın tespit edilebilmesi için kullanılan yöntemlerden biri de ağırlık kaybı metodudur. Dişlilerin deneyden önceki ve sonraki ağırlıklarının farkı aşınma miktarının kütle (g) olarak belirlenmesini sağlamaktadır. Kestamid dişlilerin, sabit yük ve devirde farklı yağlayıcı ortamlarında aşınma miktarları farklılık göstermiştir (Şekil 7.1). 5 farklı ortamda gerçekleştirilen deneylerde aşınmadan dolayı meydana gelen ağırlık farkları detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 7.1. Kestamid dişlilerin deney şartlarının ağırlık kayıplarının grafiği.

7.1.1.1. Kuru Ortam

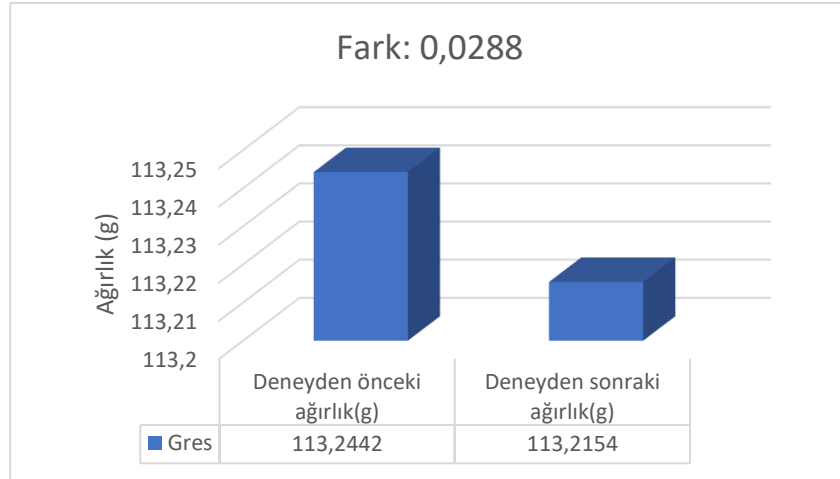
Aşınma, yüksek yük ve hızlarda sıcaklığın yükselmesi ve dişli yüzeyinde ısının artmasıyla diş yüzeyinin gevşeyerek parçacık kopması ile oluşur. Kuru ortamda dişli yüzeyinde oluşan ısı fazla olduğu için aşınma en çok kuru ortamda olmuştur. Dişliler deney başlamadan önce ve deney bittikten sonra 10^{-4} g hassasiyete sahip terazi ile tartılmıştır. Birinci deneyde kestamid dişli kuru ortamda yağlama yapılmadan çelik dişli ile 1000 d/dk hızda 17,65 Nm torkta 300 dk boyunca eş çalıştırılmıştır. Deney sonrasında dişliler toplam $3 \cdot 10^5$ tur yapmıştır. Kuru ortamda dişli %0,18 oranında ağırlık kaybetmiştir.



Şekil 7.2. Kuru ortamdaki ağırlık kaybı grafiği.

7.1.1.2. Gres Ortamı

Dişliler deney başlamadan önce ve deney bittikten sonra 10^{-4} g hassasiyete sahip terazi ile tartılmıştır. Dişliler 1000 d/dk hızda 17,65 Nm torkta 300 dk boyunca çalıştırılmıştır. Deney sonucunda dişliler toplam $3 \cdot 10^5$ tur yapmıştır. Kestamid dişli deneye başlamadan önce bir kereye mahsus 20 g gres kullanılarak diş boşlukları gresle doldurularak yağlanmıştır. Deney sonrasında dişli üzerinde kalan gres asetonla temizlenerek tekrar tartılmıştır. Gresli ortamda çalışan dişli %0,03 oranında ağırlık kaybetmiştir. Kuru koşullara nazaran 6 kat daha düşük bir değerde kütle kaybı gerçekleşmiştir. Yağlayıcının oluşturduğu film tabakası sayesinde dişli yüzeyi aşınmaya karşı korunmuştur. Gresin yüksek viskozitesi (11 cSt) sınır tabakada güçlü bir tutunma sağlayarak sürtünmenin azalmasını sağlamıştır. Mineral esaslı yağlayıcının lityumla kalınlaştırılarak elde edilen lityum sabunlu gres hem matris hem kalınlaştırıcı açısından tribolojik performans için önem taşımaktadır. Çalışmada kullanılan lityum sabunlu gres içerisinde bulunan Li, 84,8 W/mK ısı iletim katsayısına sahip düşük yoğunluklu bir metaldir. Isı iletim katsayısı itibariyle metalik malzemeler içerisinde yüksek ısıl iletkenliğe (çelik için ~ 20 W/mK) sahip olarak değerlendirilebilir. Bu özelliği ile gresin, dişlilerin sıcaklığa bağlı yumuşamasını önleyerek aşınmayı minimize ettiği söylenebilir. Ayrıca Li en düşük yoğunluklu metaldir (3 kg/dm^3). Çelik malzemelere nazaran yaklaşık 2,5 kat hafif olması sebebiyle aşınma bölgesine penetre olabilme kabiliyetinin yüksek olması beklenmektedir. Deneylerden elde edilen sonuçlarda bu öngörüğü doğrulamaktadır. Lityum sabunlu greslerin dezavantajı ise sıcaklık ve kullanım süresine bağlı olarak lityumun oksitlenmesi ve gresin kimyasal yapısının bozulmasıdır.

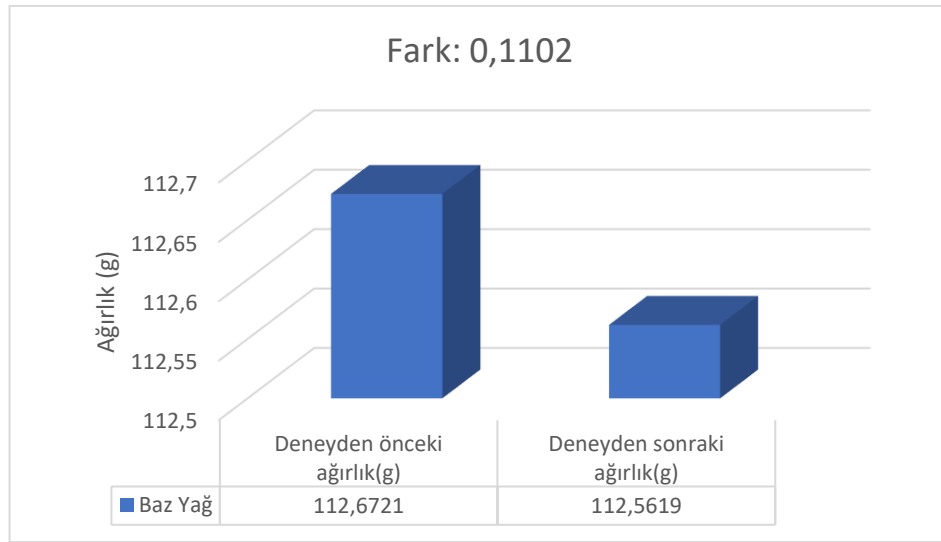


Şekil 7.3. Gres ortamındaki ağırlık kaybı grafiği.

7.1.1.3. Baz Yağ Ortamı

Dişliler deney başlamadan önce ve deney bittikten sonra 10^{-4} g hassasiyete sahip terazi ile tartılmıştır. Deneyde dişliler 1000 d/dk' hızda 17,65 Nm torkta 300 dk boyunca çalıştırılmıştır. Deney sonucunda dişliler toplam 3.10^5 tur yapmıştır.

Dişlilere, deney süresi boyunca kontrol edilebilir yağlayıcı sistemi ile 0,027 ml/s debide baz yağ damlatılmıştır. Yağlama dişlilerin temas noktasına tatbik edilmiştir. Deney sonrasında dişli asetonla temizlenerek tekrar tartılmıştır. Baz yağlı ortamda çalışan dişli %0,10 oranında ağırlık kaybetmiştir (Şekil 7.4). Baz yağ ortamında, kuru ortama kıyasla %85,06 (0,0933 g) oranında daha az ağırlık kaybı oluşmuştur. Baz yağ ortamında gres ortamına kıyasla %284,86 (0,0814 g) oranında kütle kaybı artmıştır. Baz yağ, yağlama ve soğutma fonksiyonları sayesinde kuru ortama nazaran önemli derecede aşınmayı azaltmıştır. Fakat baz yağın, grese nazaran düşük viskozite (5 cSt) ve yüzeye yapışma özelliği sebebiyle gres koşulundan daha yüksek ağırlık kaybı değeri oluşmuştur.

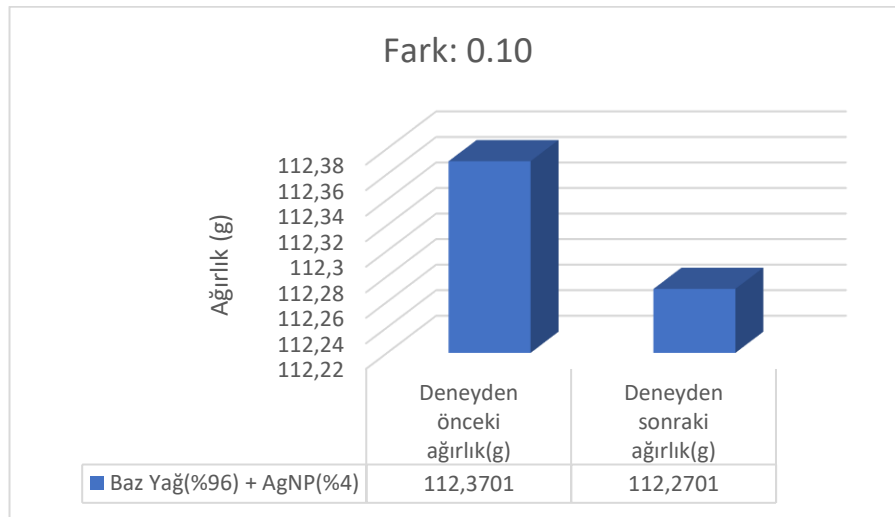


Şekil 7.4. Baz yağ ortamındaki ağırlık kaybı grafiği.

7.1.1.4. %96 Baz Yağ + %4 AgNP Ortamı

Dişliler deney başlamadan önce ve deney bittikten sonra 10^{-4} g hassasiyete sahip terazi ile tartılmıştır. Deneyde dişliler 1000 d/dk hızda 17,65 Nm torkta 300 dk boyunca çalıştırılmıştır. Deney sonucunda dişliler toplam $3 \cdot 10^5$ tur yapmıştır. Dişlilere, deney süresi boyunca kontrol edilebilir yağlayıcı sistemi ile dişlilerin temas noktasına 0,027 ml/s debide %96 baz yağ %4 AgNP karışımı yağlayıcı damlatılmıştır. Deney sonrasında dişli asetonla temizlenerek tekrar tartılmıştır. %96 baz yağ %4 AgNP karışımı yağlayıcı ortamında çalışan dişli %0,09 ağırlık kaybetmiştir. Elde edilen sonuç baz yağ ile edilen sonuca yakındır. Baz yağ ortamına

kıyasla %9,91 (0.0102 g) oranında kütle kaybı azalmıştır. Gümüş elementi yağlayıcılık özelliğine sahiptir ve ısı iletim katsayısı en yüksek metaldir (429 W/mK). Bu sebeple dişlilerin temas bölgesinde oluşan ısıyı hızlı bir şekilde yağlayıcıya transfer etmesi ve dişlilerin profil yüzeylerinde yağlama etkisi ile çukurlaşmayı (pitting) minimize etmesi beklenmektedir. %4 nano gümüş konsantrasyonunda elde edilen sonuç baz yağ ortamına kıyasla daha iyi olsa da yüksek derecede bir farklılaşma görülmemiştir. Elde edilen sonuç literatürle uyumludur. Çetin ve Korkmaz yaptıkları çalışmada AgNP konsantrasyonunun etkisini ileri-geri aşınma mekanizması ile incelemişler. %4 konsantrasyon ortamı ile baz sıvı, yakın tribolojik performans vermiştir [50]. Mevcut çalışmada da %4 konsantrasyonda nano partikül miktarının tribolojik performans açısından ölçülebilir seviyede farklılık oluşturmaya yeterli olmadığı belirlenmiştir.

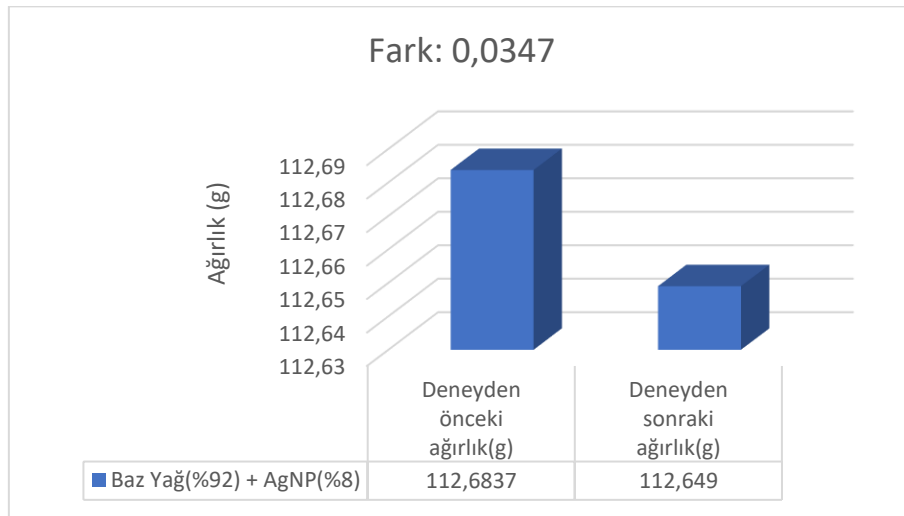


Şekil 7.5. Baz yağ + %4 AgNP ortamındaki ağırlık kaybı grafiği.

7.1.1.5. %92 Baz Yağ + %8 AgNP Ortamı

Dişliler deney başlamadan önce ve deney bittikten sonra 10^{-4} g hassasiyete sahip terazi ile tartılmıştır. Deneyde dişli 1000 d/dk hızda 17,65 Nm torkta 300 dk boyunca çalıştırılmıştır. Deney sonucunda dişliler toplam $3 \cdot 10^5$ tur yapmıştır. Dişlilere, deney süresi boyunca kontrol edilebilir yağlayıcı sistemi ile dişlilerin temas noktasına 0,027 ml/s debide %92 baz yağ %8 AgNP karışımı yağlayıcı damlatılmıştır. Deney sonrasında dişli asetonla temizlenerek tekrar tartılmıştır. %92 baz yağ %8 AgNP

karışımı yağlayıcı ortamda çalışan dişli %0,03 ağırlık kaybetmiştir. %8 AgNP ortamı kuru ortama kıyasla ağırlık kaybını %488,16 (0,1688 g) oranında azaltmış, %4 AgNP ortamına kıyasla %189,16 (0,0653 g) oranında azaltmış, gres yağı ortamı ile de benzer sonuç elde edilmiştir. Yüksek konsantrasyonda (%8) uygulanan AgNP'nin gres benzeri tribolojik performans vermesi dikkat çekicidir. Artan konsantrasyona bağlı olarak aşınma bölgesine yeteri miktarda nanopartikül nüfuz edebilmiştir. Nanopartiküllerin mekanik etki altında topaklanması ve nano özelliklerini kaybetmesi kaçınılmaz bir durumdur. Özellikle basınca (çekme gerilmesi) ve sürtünmeye (kayma gerilmesi) bağlı olarak jelatin esaslı ligand tabakasının işlevini kaybetmesi nanopartiküllerin işlevinin azalmasına sebep olmaktadır. Belirtilen etkiler göz önüne alındığında nanopartiküllerin aşınma bölgesine nüfuz ederek anlamlı bir etki oluşturmaları için minimum %8 konsantrasyonda çalışılması gerektiği görülmektedir. Nanopartiküllerin aşınma bölgesine temasıyla, dişli yüzeylerinde oluşan sıcaklıklar azaltılabilmiş ve azalan temas açısına (ıslatabilme kabiliyeti) bağlı olarak yüzeyin aşınma direnci artmıştır.

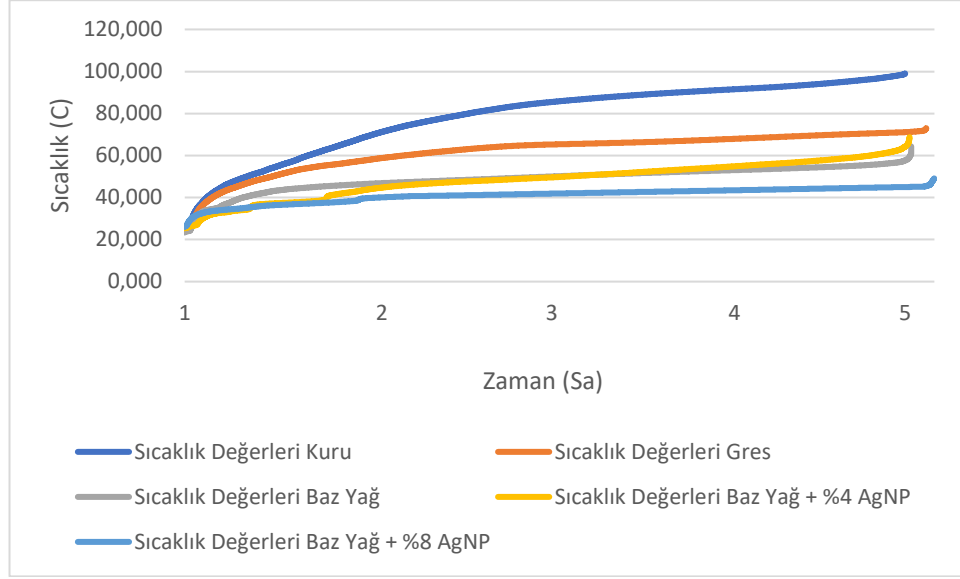


Şekil 7.6. Baz yağ + %8 AgNP ortamındaki ağırlık kaybı grafiği.

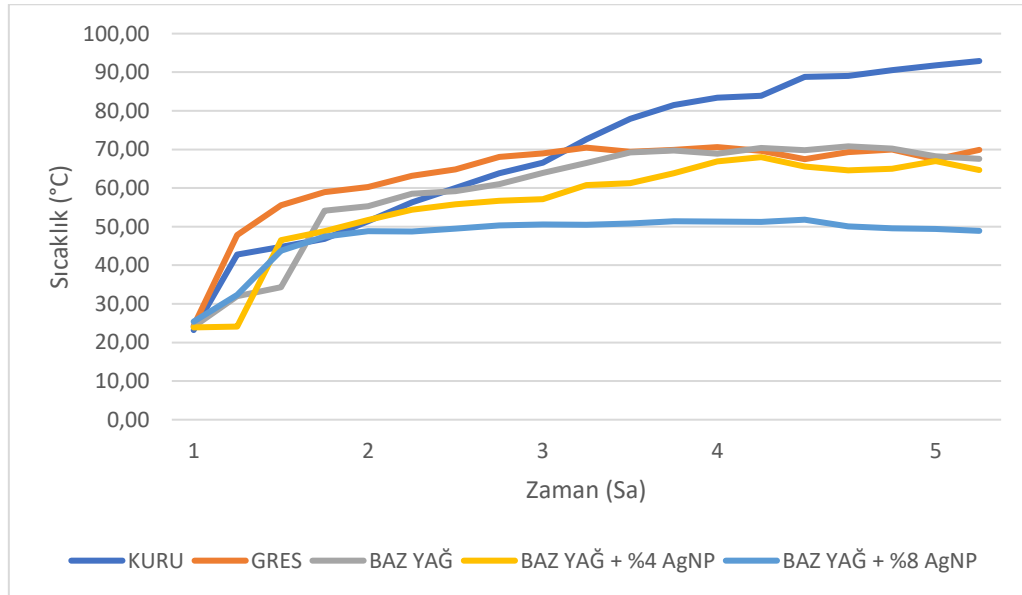
7.1.2. Sıcaklık Değişim Analizi

Polimer dişlilerin performansı, yük, hız ve yağlayıcı koşulları altında aşınma ve termal davranışları ile anlaşılabilir [12]. Kestamid (PA6G) dişli 1000 d/dk hızda ve 17,65 Nm yükte; kuru, gres, baz yağ, baz yağ +%4 AgNP ve baz yağ + %8 AgNP

ortamında çelik dişli ile eş olarak çalıştırılmıştır. Çalışma esnasında sıcaklık değişimleri analiz edilmiştir. Şekil 7.7’ de tüm deney koşullarındaki kızılötesi sensör ile ölçülen sıcaklık verilerinin grafiği verilmiştir. Şekil 7.8’ de ise 25 cm mesafeden termal kamera ile 20 dakikada bir ölçülen sıcaklık verilerinin grafiği verilmiştir. İki ölçüm yöntemine göre elde edilen sonuçlar birbiriyle uyumludur.



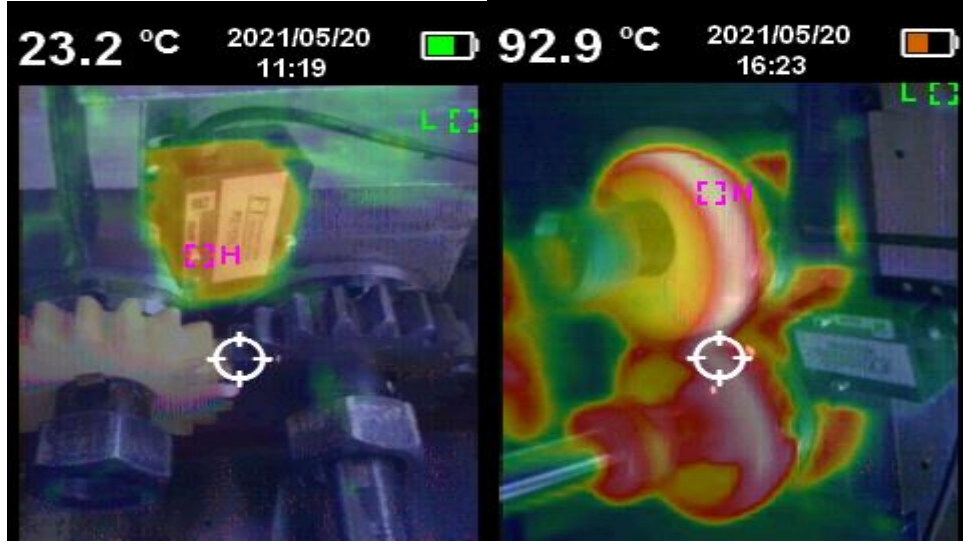
Şekil 7.7. Tüm deney şartlarındaki sıcaklık grafiği.



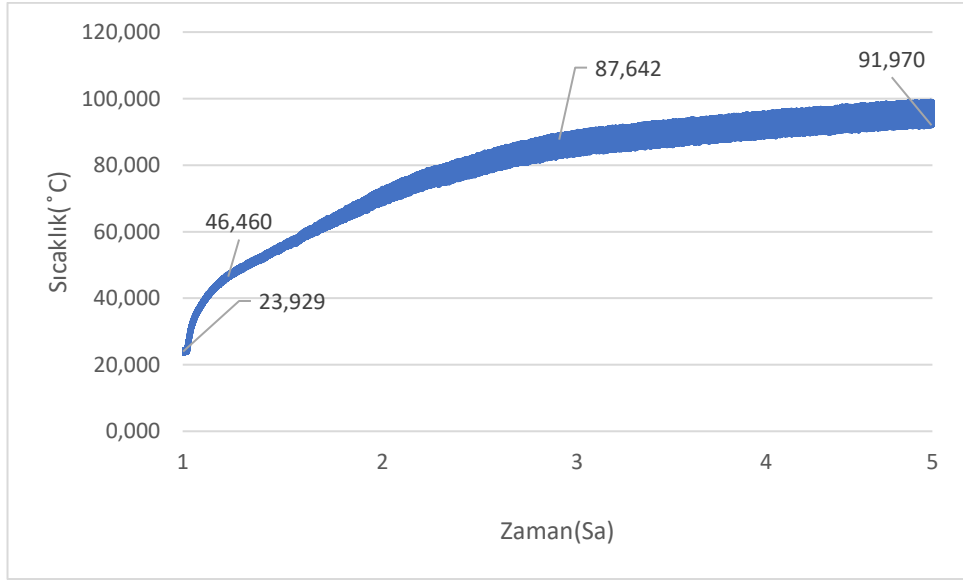
Şekil 7.8. Tüm deney şartlarındaki termal kamera sıcaklık grafiği.

7.1.2.1. Kuru Ortam

Kestamid dişlinin, 1000 d/dk hızda 17,65 Nm tork seviyelerinde kuru ortamda dişli çarkın çalışmadan önceki sıcaklığı 23,2 °C olarak kaydedilmiştir (Şekil 7.9). Sürtünmeden dolayı yüzey sıcaklığında başlangıçta ~46 °C değerine kadar hızlı bir artış olmuştur (Şekil 7.10). Bu artış dişlilerin rodaj davranışı ile açıklanabilir. Yüzey pürüzlülüğü, profil kusurları, aksenal sapmalar, hesaplanamayan dinamik kuvvetler ve tolerans kaynaklı hatalar sebebiyle ani sıcaklık yükselişinin olduğu iddia edilebilir. Bu yükseliş trendi dişlilerin sürtünmesine bağlı olarak 3. saate kadar lineer olarak artmış (~87 °C), sonrasında ise 5. saate kadar çok az bir sıcaklık artışı gerçekleşmiştir (~91 °C). 91 °C değeri dişliler için denge sıcaklığıdır ve sürekli çalışma sıcaklığının altında sıcaklık dengelenmiştir. Bu durum deney sisteminin stabilitesi açısından önemlidir. Seçilen parametrelerin anlamlılığını göstermektedir. Sıcaklığın 91 °C’de sabit kalması durumu profillerin uyumu ile açıklanabilir. 3. saatten sonra dişli yüzeyleri birbirine alışmış ve sadece diş yüzeylerinin sürtünmesi sebebiyle ısı oluşumu gerçekleşmiştir. Çok küçük bir alanda gerçekleşen sürtünme (kayma) hareketi sebebiyle sıcaklık iki saat süresince yavaş bir artış göstermiştir (~5 °C). Ayrıca belirli bir zaman geçtikten sonra metal dişli ısıyı reddetmeye başlamakta ve dişli yüzeyinde üretilen ısının neredeyse tamamı aynı anda çevreye atılmaktadır. Böylece üretilen ısı ile atılan ısı arasında bir denge oluşmakta ve belirli sayıda çevrim tamamlandıktan sonra sıcaklık stabil hale gelmektedir [12].



Şekil 7.9. Kuru ortamdaki termal kamera sıcaklık görüntüleri.

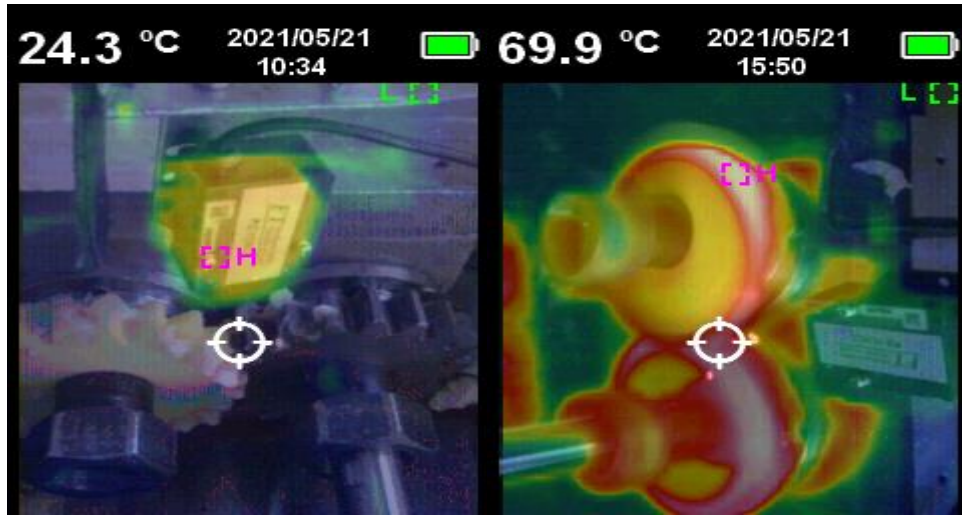


Şekil 7.10. Kuru ortamdaki sıcaklık grafiği.

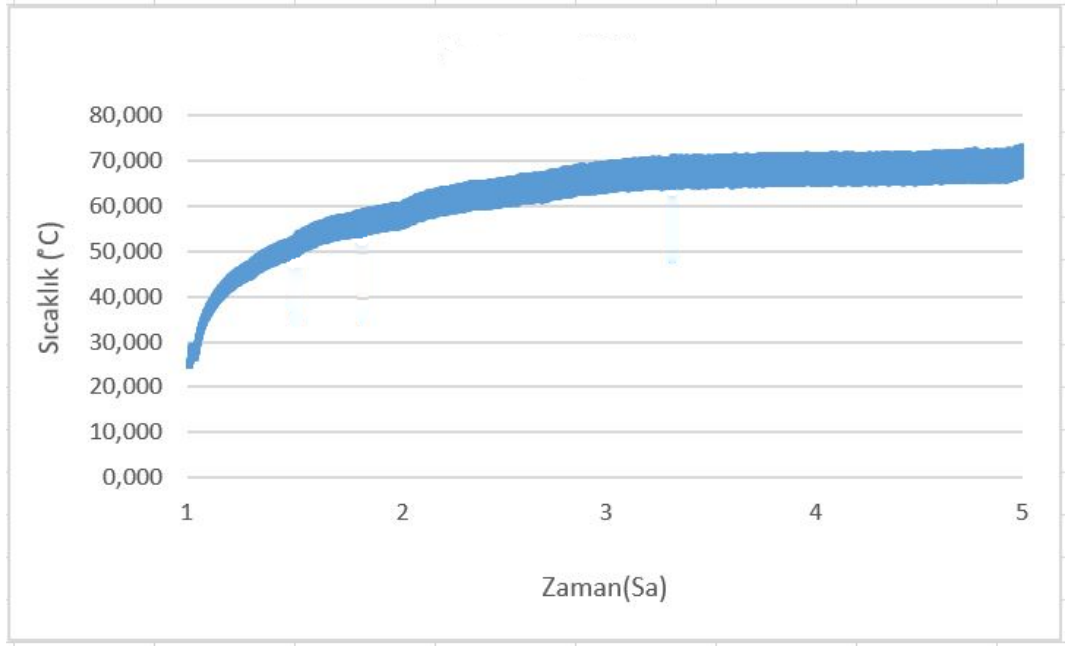
7.1.2.2. Gres Ortamı

Kestamid dişli, 1000 d/dk hızda 17,65 Nm torkta gres ile yağlandıktan sonra deneye tabi tutulmuştur. Dişli çark çalışmadan önce sıcaklığı ölçülmüş ve 24,3 °C olarak kaydedilmiştir (Şekil 7.11). Deney öncesi 20 gram gres yağ ile her bir diş boşluğu doldurulmuştur. Gresin her bir diş üzerinde yağ filmi oluşturması ile sürtünme azalmıştır. Sürtünmenin azalması sıcaklığı da önemli ölçüde azaltmıştır. Sıcaklık

kuru ortamda çalışmaya göre yaklaşık 22 °C azalmıştır. Şekil 7.12’de görüldüğü üzere sıcaklık zamanla logaritmik olarak artmış belli bir süre geçtikten sonra dengeli hale gelmiştir. Sıcaklık yaklaşık olarak 70 °C’ de dengelenmiştir. Sıcaklık artış trendi kuru şartlar ile benzerdir. Ağırlık kaybı ile sıcaklık ilişkisi kıyaslandığında, gresin sıcaklığı düşürme açısından ağırlık kaybını azaltma kabiliyeti kadar yüksek etki oluşturmadığı belirlenmiştir. Ağırlık kaybı açısından gres en yüksek performansı vermesine rağmen, sıcaklık açısından kuru işlem sonrası en kötü performansı vermiştir. Bu durum gresin newtonsal olmayan yapısı ile açıklanabilir. Yüzeye yapışması ve sürekli akış göstermemesi nedeniyle sıcaklığı baz yağlara nazaran daha düşük oranda azaltmıştır. Fakat bu değer baz yağa yakın orandadır. Gres, her ne kadar non-newtoniyen özellik gösterse de lityum sabunlu kimyasal yapısına bağlı olarak sıcaklığı neredeyse baz yağ seviyesine kadar düşürmüştür. Sıcaklığın düşmesi gresin uzun ömürlü olarak işlev görmesi açısından da önemlidir.



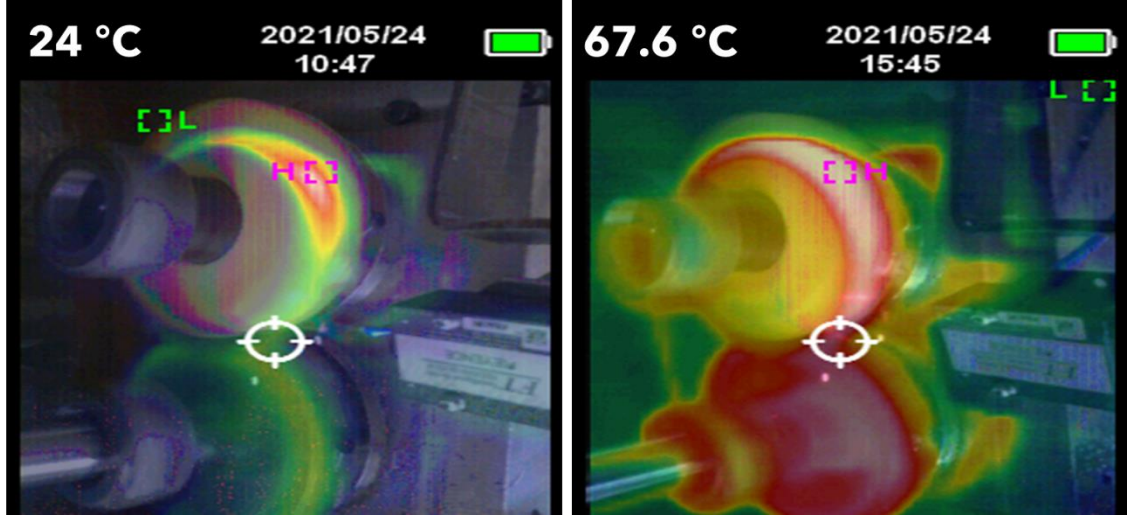
Şekil 7.11. Gres ortamındaki termal kamera sıcaklık görüntüleri.



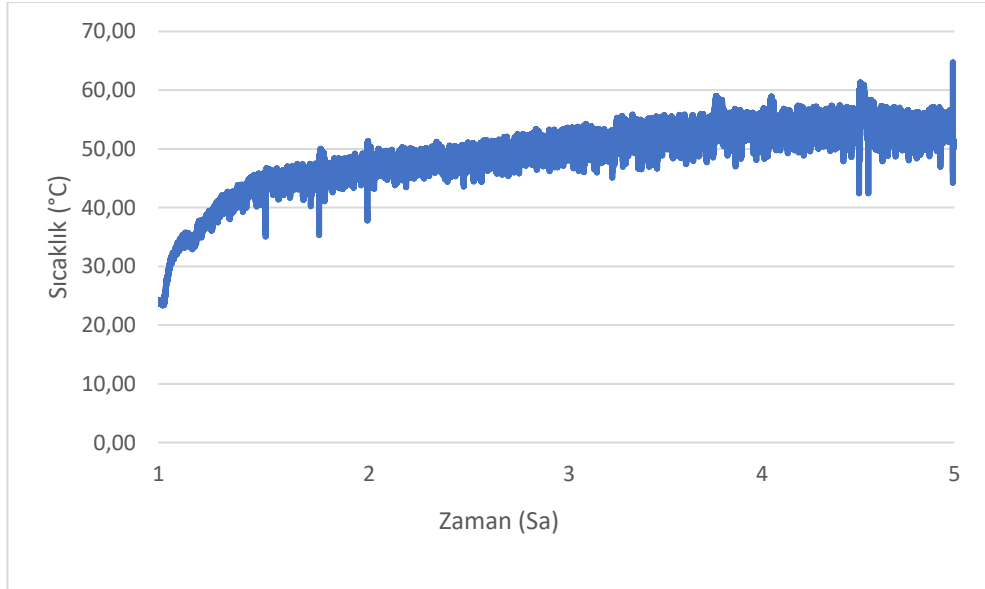
Şekil 7.12. Gres ortamındaki sıcaklık grafiği.

7.1.2.3. Baz Yağ Ortamı

Deneyde dişli 1000 d/dk' hızda 17,65 Nm torkta 300 dk boyunca çalıştırılmıştır. Deney sonucunda dişliler toplam $3 \cdot 10^5$ tur yapmıştır. Deneyden önceki sıcaklık 24 °C olarak kaydedilmiştir (Şekil 7.13). Deney süresi boyunca kontrol edilebilir yağlayıcı sistemi ile dişlilerin temas noktasına 0,027 ml/s debide baz yağ damlatılmıştır. Dişliler çalışırken sürekli olarak baz yağ damlatılması dişlileri hem soğutmuş hem de yağlama yaparak sürtünmeyi azaltmıştır. Sıcaklık gres ortamına göre %3,4 oranında azalmıştır. Şekil 7.14'te görüldüğü üzere sıcaklık zamanla logaritmik olarak artmış belli bir süre geçtikten sonra dengeli hale gelmiştir. Sıcaklık yaklaşık olarak 67 °C 'de dengelenmiştir.



Şekil 7.13. Baz yağ ortamındaki termal kamera sıcaklık görüntüleri.

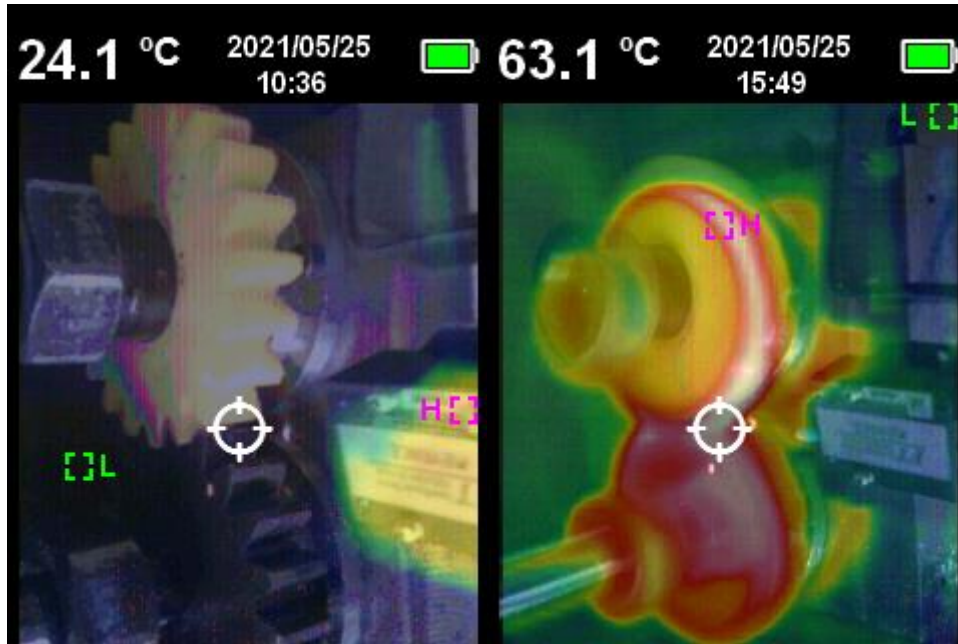


Şekil 7.14. Baz yağ ortamındaki sıcaklık grafiği.

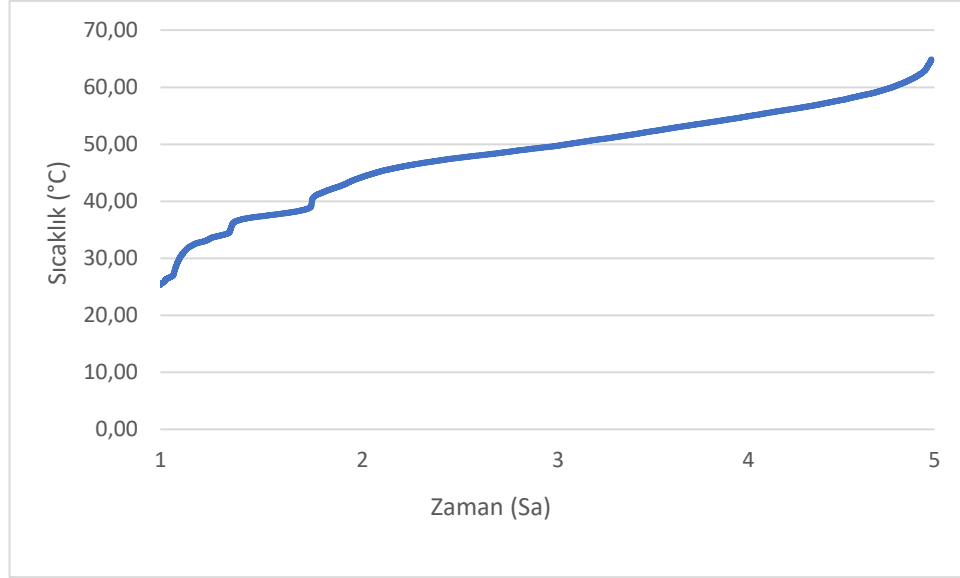
7.1.2.4. %96 Baz Yağ + %4 AgNP Ortamı

Kestamid dişli 1000 d/dk hızda 17,65 Nm torkta $3 \cdot 10^5$ tur boyunca çalıştırılmıştır. Dişli çarkın deneye başlamadan önce sıcaklığı ölçülmüştür. Deneyden önceki sıcaklığı 24,1 °C olarak kaydedilmiştir (Şekil 7.15). Deney süresi boyunca kontrol edilebilir yağlayıcı sistemi ile dişlilerin temas noktasına 0,027 ml/s debide %96 baz yağ + %4 AgNP yağlayıcı karışımı damlatılmıştır. Şekil 7.16’da görüldüğü üzere sıcaklık zamanla logaritmik olarak artmış belli bir süre geçtikten sonra dengeli hale

gelmiştir. Sıcaklık yaklaşık olarak 63 °C 'de dengelenmiştir. Baz yağın içerisinde bulunan nano gümüş partikülleri yüksek ısıl iletkenlikleri sayesinde diş yüzeylerinde oluşan ısıyı aşınma bölgesinden uzaklaştırabilmiştir. Bu durum dişlilerin yüzey sıcaklığını azaltmıştır. Sıcaklık baz yağ ortamındaki çalışmaya göre %7,13 oranında azalmıştır. Benzer sonuçlar kütle kaybı parametresinde de elde edilmiştir. Bu durum nano gümüşün tribolojik olarak sisteme etki ettiğini ama düşük konsantrasyonlarda (<%4) bu etkinin ölçülebilirliğinin ve anlamlılığının düşük olduğunu göstermektedir. Nano gümüş katışkısı ile sonuçlar aşınma dayanımı açısından pozitif olarak farklılaşmakta fakat sonuç grafikleri kararlı bir davranış oluşturamamaktadır. Bu durum sebebiyle düşük konsantrasyonlarda nano gümüş varlığı diğer etkenlerin deney sonuçlarının etkileyebileceğini düşündürmektedir. Fakat konsantrasyon arttıkça çıkış parametreleri anlamlı bir şekilde farklılaşmaktadır. Bu sebeple nano gümüşün düşük konsantrasyonlarda az da olsa etkili olduğu anlaşılmaktadır.



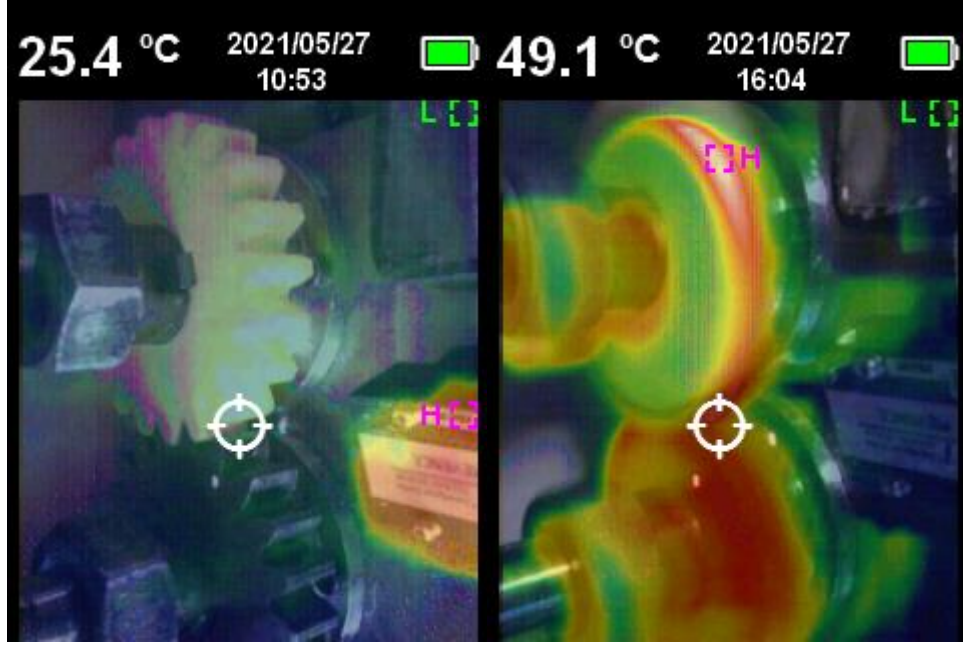
Şekil 7.15. Baz yağ + %4 AgNP ortamındaki termal kamera sıcaklık görüntüleri.



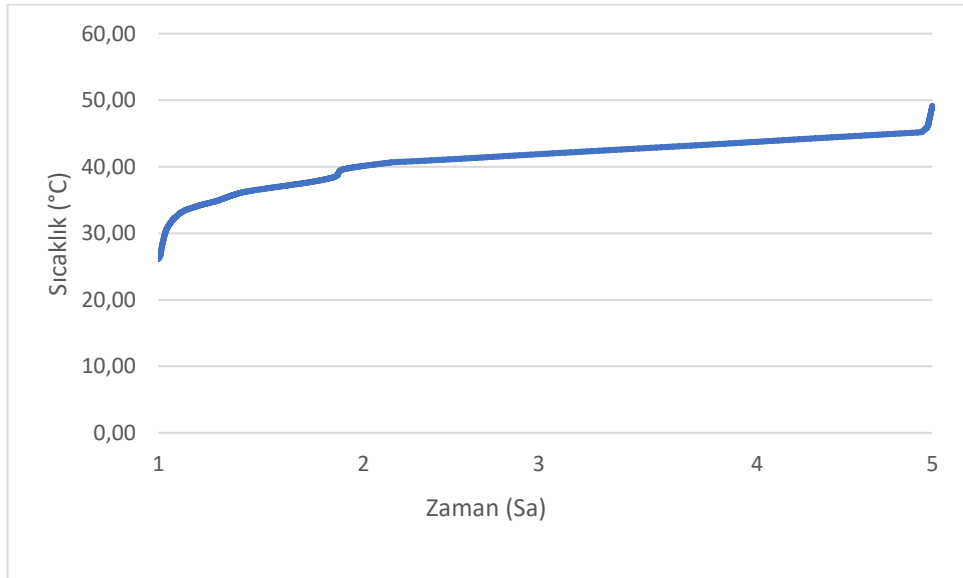
Şekil 7.16. Baz yağ + %4 AgNP ortamındaki sıcaklık grafiği.

7.1.2.5. %92 Baz Yağ + %8 AgNP Ortamı

Deneyde dişli çarklar 1000 d/dk' da 17,65 Nm torkta $3 \cdot 10^5$ tur boyunca çalıştırılmıştır. Dişli çarkın deneye başlamadan önce sıcaklığı ölçülmüştür. Deneyden önceki sıcaklığı 25,4 °C olarak kaydedilmiştir (7.17). Deney süresi boyunca kontrol edilebilir yağlayıcı sistemi ile dişlilerin temas noktasına 0,027 ml/s debide %96 baz yağ + %8 AgNP yağlayıcı karışımı damlatılmıştır. Gümüş elementinin ısı iletkenlik katsayısının yüksek olması sebebi ile dişlilerde oluşan ısı gümüş nano partiküllerine iletilerek diş yüzeylerinden uzaklaştırılmıştır. Böylelikle sıcaklık azalmıştır. Sıcaklık baz yağ + %4 AgNP ortamındaki çalışmaya göre %28,51 oranında azalmıştır. Baz yağ içerisindeki nanogümüş konsantrasyonu arttıkça yağ içerisindeki gümüş partikül sayısı fazla olduğu için ısı transferi daha fazla olmuştur. Şekil 7.18'de görüldüğü üzere sıcaklık zamanla logaritmik olarak artmış belli bir süre geçtikten sonra dengeli hale gelmiştir. Sıcaklık yaklaşık olarak 49 °C 'de dengelenmiştir.



Şekil 7.17. Baz yağ + %8 AgNP ortamındaki termal kamera sıcaklık görüntüleri.



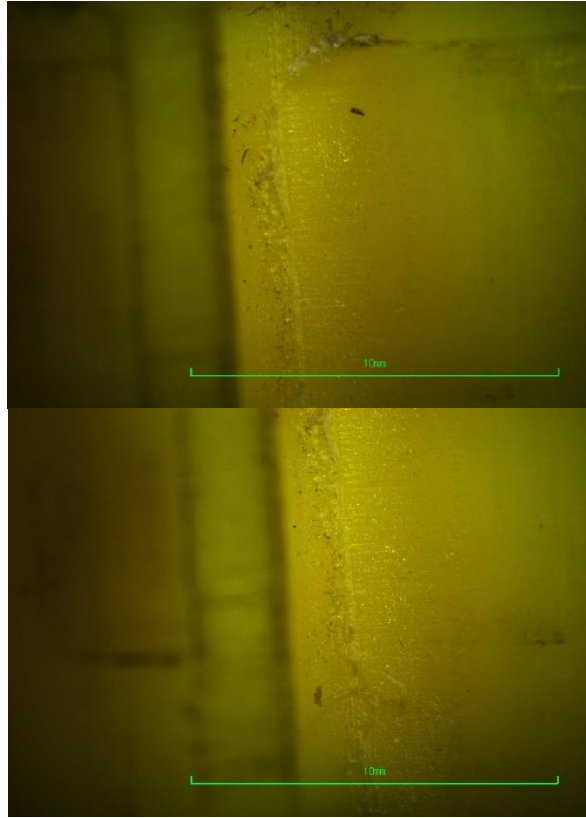
Şekil 7.18. Baz yağ + %8 AgNP ortamındaki sıcaklık grafiği.

7.1.3. Optik mikroskop görüntüleri

Dişlilerin aşınan yüzey görüntülerini görsel olarak analiz etmek için Karabük Üniversitesi Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi'nde bulunan Nikon Shuttlepix marka optik mikroskop cihazı ile gerekli büyütme yapılarak diş profilleri incelenmiştir.

7.1.3.1. Kuru Ortam

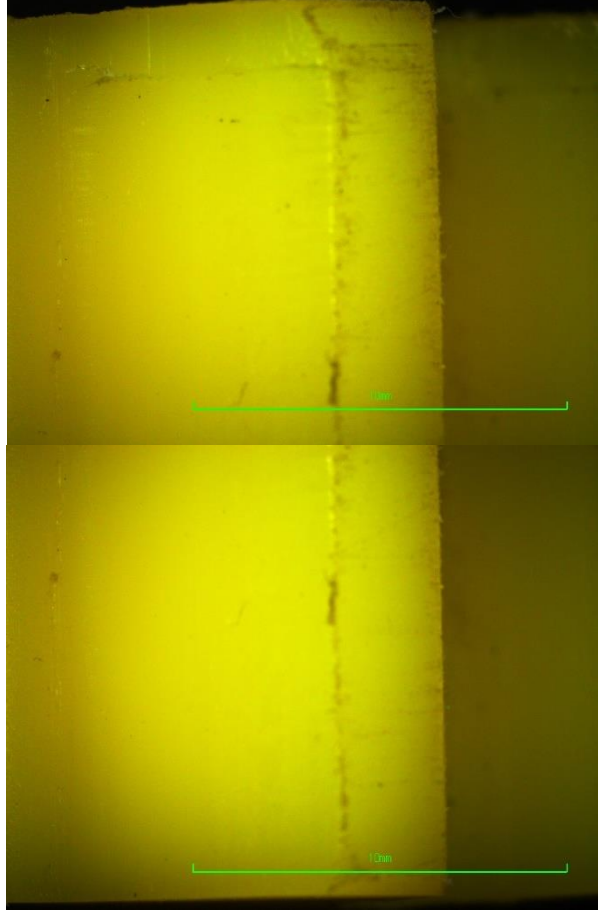
Aşınma, en çok 1000 d/dk devirde ve 17,65 Nm torkta kuru ortamda çalışan dişlide meydana gelmiştir. Kuru ortamda çalışan dişlilerde kuvvetin etkisi ile yüzey deformasyonları meydana gelmiştir (Şekil 7.19). Optik mikroskopta görünen aşınma durumları, ağırlık kaybı analizini doğrular niteliktedir.



Şekil 7.19. Kuru ortamdaki optik mikroskop görüntüleri.

7.1.3.2. Gres Ortamı

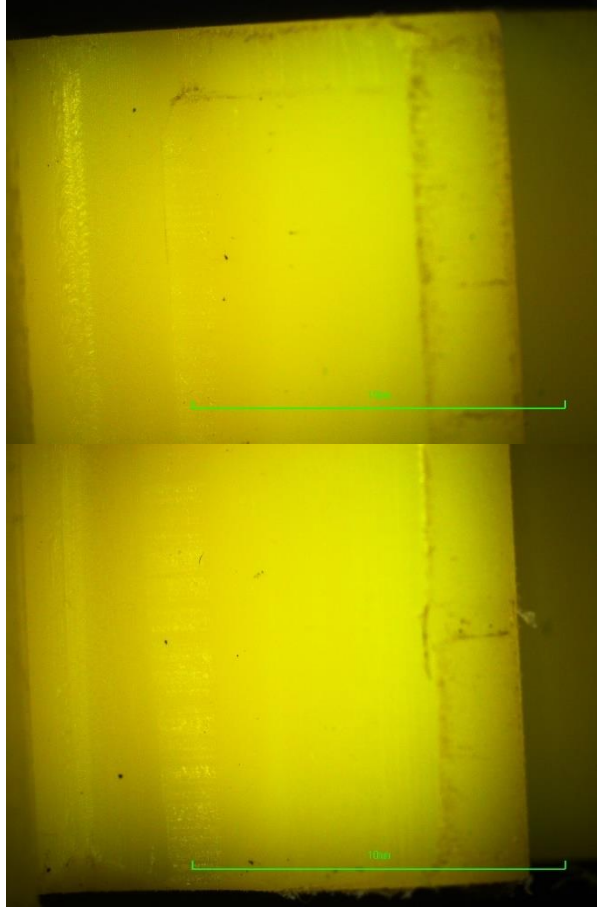
1000 d/dk devirde ve 17,65 Nm torkta gres ortamında gerçekleşen deneyde dişlilerin diş yüzeylerine bir kereye mahsus Li-sabunlu gres tatbik edildiği için diş yüzeyi üzerinde bir yağ filmi tabakası oluşarak yüzeyleri birbirinden ayrılmaktadır. Burada sürtünme, birbiri üzerinde kayan yağ katmanlarında olduğundan dolayı dişlilerin sıvı sürtünme yaptığı sonucuna varılabilir. Sıvı sürtünme olan yüzeylerde aşınma bir çizgi boyunca gerçekleşmiştir (Şekil 7.20).



Şekil 7.20. Gres ortamındaki optik mikroskop görüntüleri.

7.1.3.3. Baz Yağ Ortam

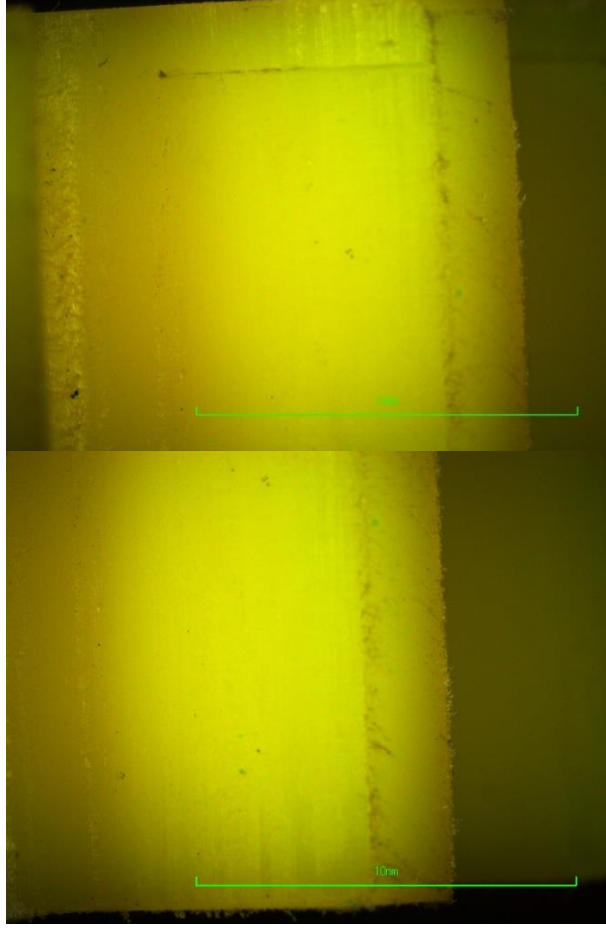
Kuru ortamdan sonra en çok aşınma 1000 d/dk devirde ve 17,65 Nm torkta baz yağ ortamında meydana gelmiştir. Optik mikroskop görüntüleri ağırlık kaybı sonuçlarını doğrular niteliktedir. Kuru ortama göre aşınmanın azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 7.21). Yağlamanın etkisi ile sürtünme kuvvetinin azaltılması aşınmayı azaltmıştır. Yağlama kontrol edilebilir yağlayıcı sistem tarafından damlatılarak yapıldığı için dişli yüzeyleri arasında sınır sürtünme meydana getirmiştir denilebilir. Yağlayıcının damlatılarak yapılması hem sıcaklığı düşürmüş hem de dişli yüzeylerinin direk temasını kısmen önleyerek aşınmayı azaltmıştır.



Şekil 7.21. Baz yağ ortamındaki optik mikroskop görüntüleri.

7.1.3.4. Baz Yağ + %4 AgNp Ortam

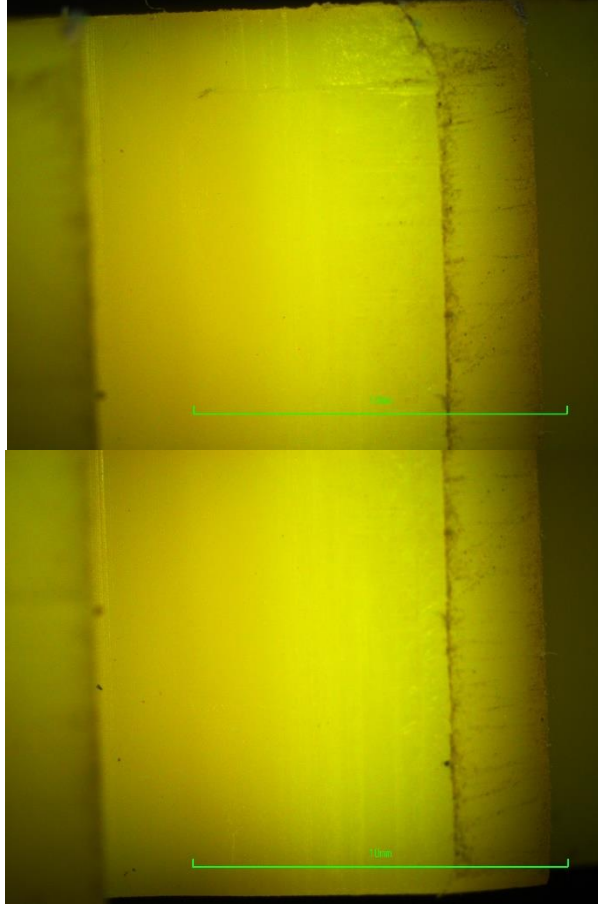
1000 d/dk devir ve 17,65 Nm torkta baz yağ + %4 AgNP ortamında gerçekleşen deneyde nanogümüş partikülleri sürtünme kuvvetinin oluşturduğu sıcaklığı ısı transferi ile azaltmıştır. Sıcaklığın azalması sonucunda %4 AgNp katkılı yağlayıcı ortamında baz yağ ortamına göre aşınma kısmen az olmuştur (Şekil 7.22).



Şekil 7.22. Baz yağ + %4 AgNP ortamındaki optik mikroskop görüntüleri.

7.1.3.5. Baz Yağ + %8 AgNP Ortam

1000 d/dk devir ve 17,65 Nm torkta baz yağ + %8 AgNP ortamında gerçekleşen deneyde, baz yağ içerisindeki nano gümüş konsantrasyonunun artması diş yüzeylerinin hem yağlanması hem de gümüş partiküllerinin mükemmel ısı iletkenlik özelliğinden dolayı sıcaklığa bağlı olarak sürtünme kuvvetinin azalması aşınmayı önemli ölçüde azaltmıştır (Şekil 7.23). Yağlama kontrol edilebilir yağlayıcı sistemi tarafından damlatılarak gerçekleştirildiği için dişli yüzeyleri arasında sınır sürtünme meydana geldiği varsayılabilir. Baz yağın + %8 AgNP katkılı yağlayıcı ortamı, gres ortamı ile benzer sonuçları vermiştir.



Şekil 7.23. Baz yağ + %8 AgNP ortamındaki optik mikroskop görüntüleri.

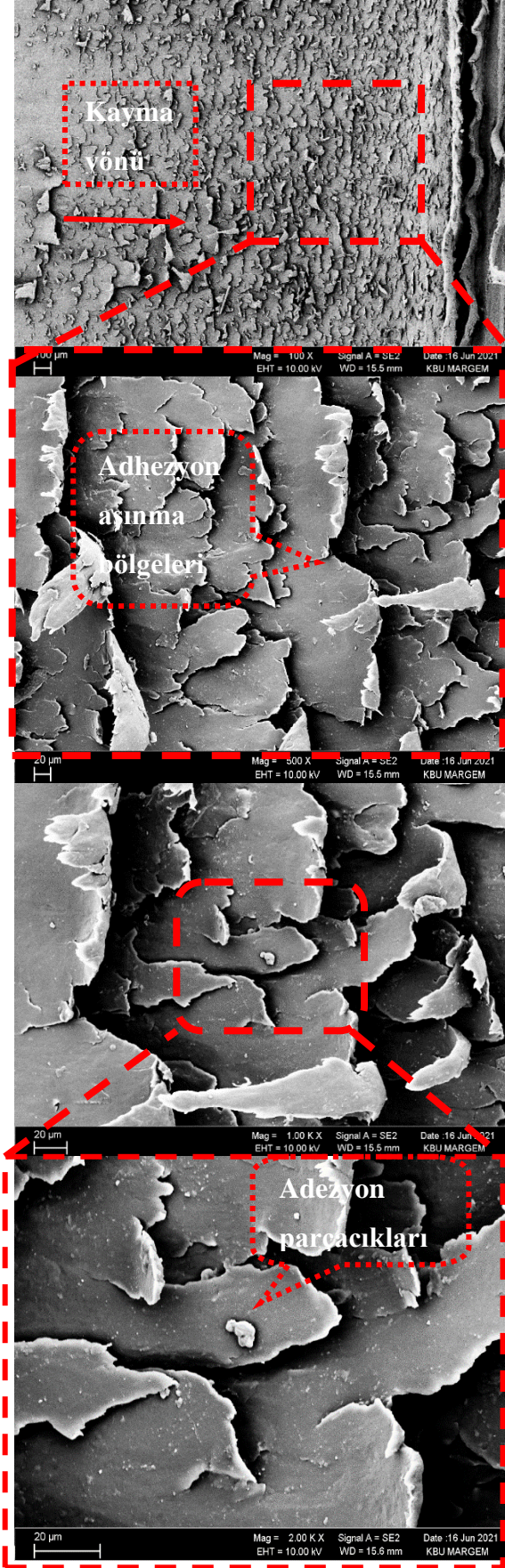
7.1.4. SEM, EDX ve Mapping analizi

7.1.4.1 SEM Analizi

Dişliler birbirine temas ettikleri anda kavrama olayı başlamış olur. Kavrama başladığı anda temas eden dişlere kavrama doğrusu boyunca normal kuvvet etki eder, normal kuvvete aynı zamanda dişli kuvveti de denir. Normal kuvvetin radyal ve teğetsel bileşeni vardır. Normal kuvvetinin teğetsel doğrultudaki bileşeni, diş dibini eğilmeye ve kaymaya zorlar. Radyal doğrultudaki bileşeni de basmaya zorlar. Bu kuvvetlerden dolayı oluşan gerilmeler dişlilerin ya diş dibinden hasar görmesine ya da aşınmasına sebep olur [15].

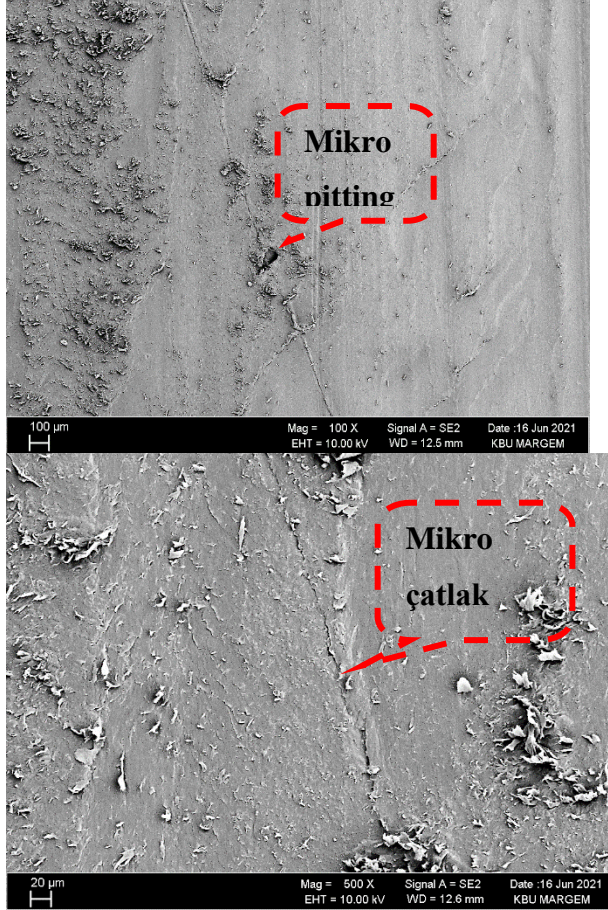
Dişliler kuru ortamda 1000 d/dk devirde ve 17,65 Nm torkta $3 \cdot 10^5$ tur çalışmıştır. Deney sonucunda dişli çarklarda meydana gelen aşınma türlerini tespit etmek için

SEM (Scanning Electron Microscopes – Taramalı Elektron Mikroskop) görüntüleri incelenmiştir. Dişli çarklar birbirleri ile eş çalışırken yuvarlanma hareketinin yanında kayma hareketi de yaparlar. Birbirine temas eden dişlerin yan yüzeylerinin teğetsel hızları farklıdır. Teğetsel hızların farkı kayma hızını ifade eder. Kayma hareketi sürtünme kuvvetini oluşturur. Sürtünme kuvveti malzemenin sürtünme katsayısına ve dişli kuvvetine bağlıdır. Dişli çarklarda sürtünme türü kayma-yuvarlanma şeklindedir. Yuvarlanma noktasında sadece yuvarlanma hareketi olduğu için kayma hızı sıfırdır. Yuvarlanma noktasının üst ve alt kısmında kayma hareketi olur. Kayma hareketinin oluşturduğu sürtünme kuvvetinin yönü, dişliler sürekli döndüğü için yuvarlanma noktasında değişir [15]. Sürtünme kuvvetinin etkisi ile kuru ortamda adhezyon aşınması meydana gelmiştir. Çelik dişli ile eş çalışan polimer dişlilerde adhezyon aşınması, polimer ve çeliğin molekül yapısı aynı veya benzer olmadığı ve polimer dişliden kopan parçacıklar çelik dişliye yapışmadığı için kaynak bağları teorisi ile oluşmaz. Kuru ortamda adhezyon aşınması sıyırma-kaldırma (galling) şeklinde görülmüştür (Şekil 7.24). Diş temas yüzeyinin tamamında aşınma meydana gelmiştir.



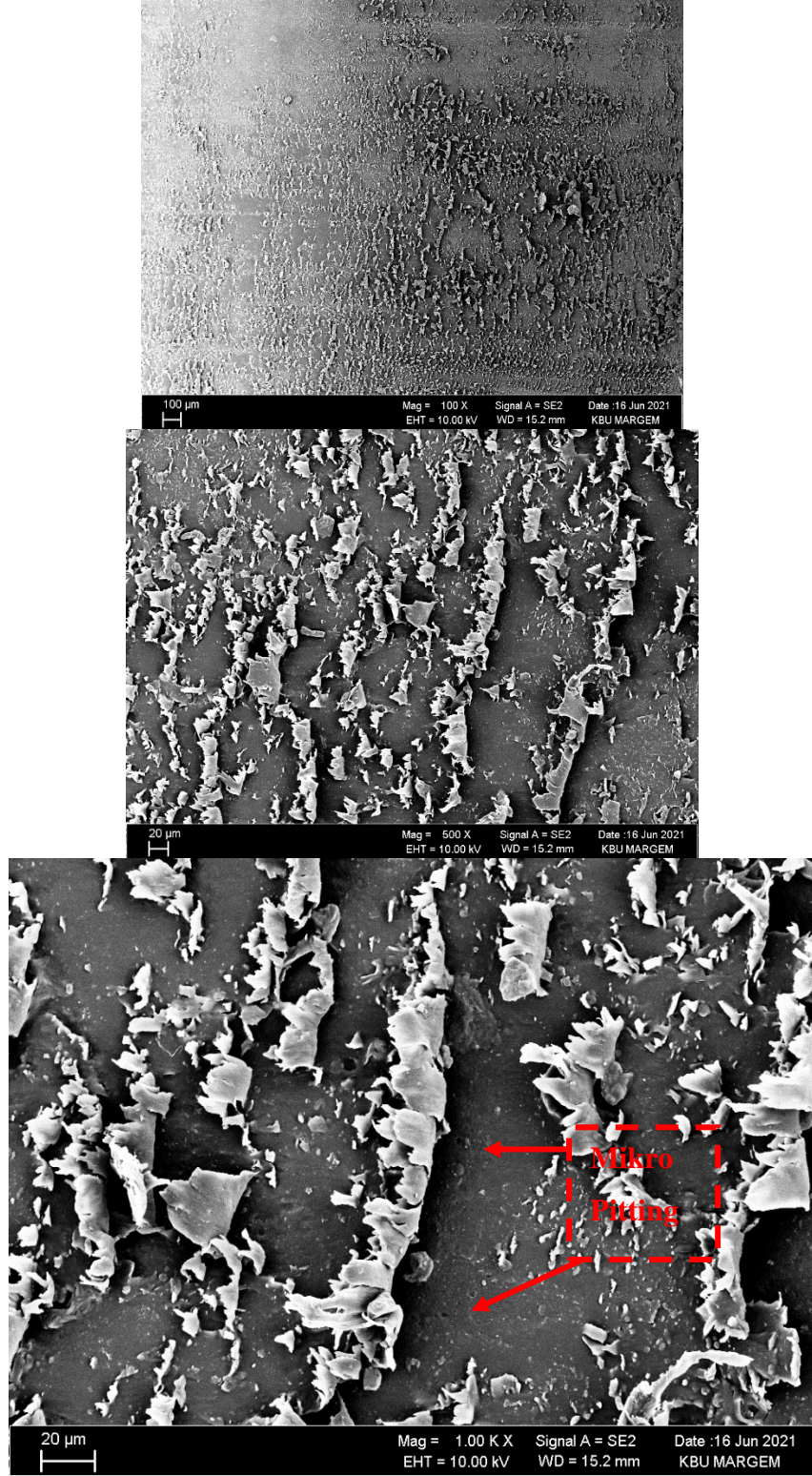
Şekil 7.24. Kuru ortamdaki SEM görüntüleri.

Gres ortamında dişliler deneye başlamadan önce dişlilere sürülen gres yağı, aşınmayı azaltmasına rağmen yüzey basıncı etkisiyle oluşan mikro pitting bölgelerine girerek hidrolik basınç oluşturmuştur. Gres yağının etkisi ile oluşan hidrolik basınç mikro çatlak oluşumuna sebep olmuştur.



Şekil 7.25. Gres ortamındaki SEM görüntüleri.

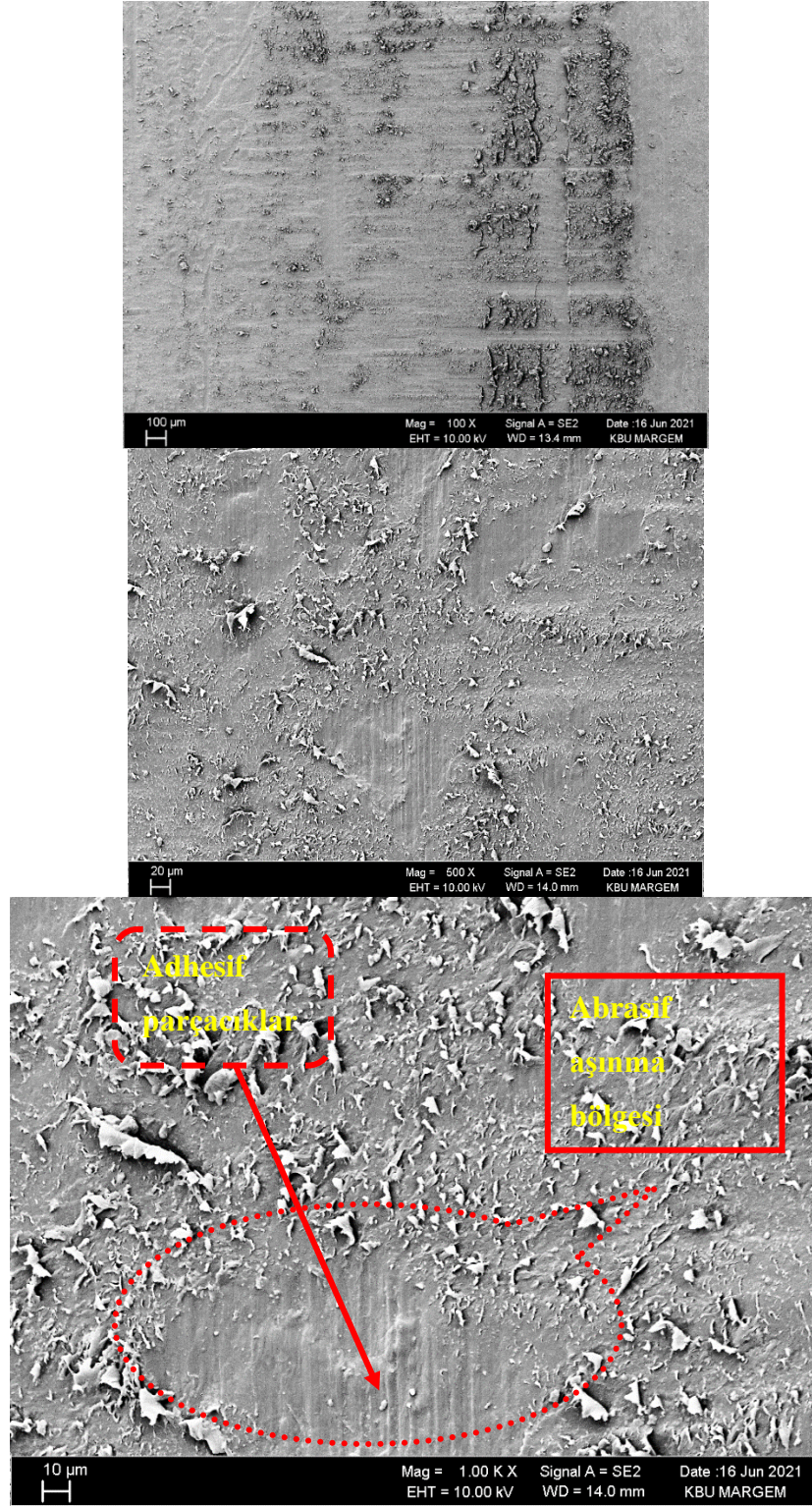
Baz yağ ortamında sıyırma-kaldırma şeklinde görünen aşınma kuru ortama göre daha az oluşmuştur. Diş temas yüzeyleri pürüzlülükten dolayı küçük olduğu için kuvvet etkisi altında temas yüzeylerinde meydana gelen yüzey gerilmeleri hertz basıncını oluşturur. Baz yağ ortamında hertz basıncının oluşturduğu aşınma temas yüzeylerinde mikro boyutta pitting (yorulma aşınması) oluşumu meydana getirmiştir (Şekil 7.26).



Şekil 7.26. Baz yağ ortamındaki SEM görüntüleri.

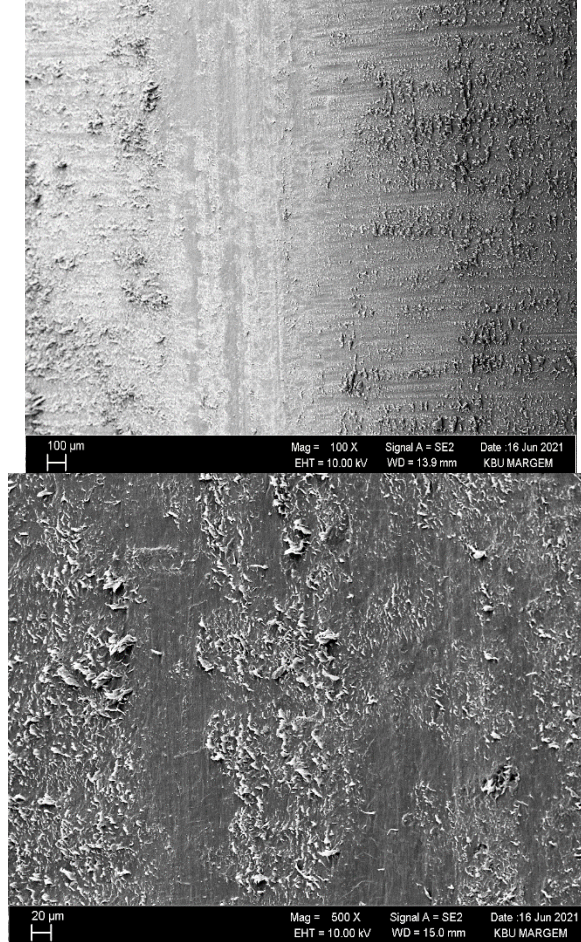
Dişliler %4 oranında nano gümüş partiküllerinin baz yağ içerisine katılması ile oluşturulan yağlayıcı ortamında adhesif aşınmadan dolayı kopan adhesif parçacıklar

bir aşındırıcı gibi davranarak diş yan yüzeyinin bir bölgesinde abrasif aşınma oluşturmuştur (şekil 7.27). Baz yağ ortamına göre Baz yağ + %4 AgNP ortamında adhesif aşınma ise kısmen az olmuştur.



şekil 7.27. Baz yağ + %4 AgNP ortamındaki SEM görüntüleri.

Baz yağ + %8 AgNP ortamında dişlilerde nano gümüş konsantrasyonunun artması ile dişli yüzeyine temas eden gümüş partiküllerinin sayısı da artmıştır. Bu sebepten dolayı diş temas yüzeyinde sıcaklıktaki azalmanın etkisiyle çok az miktarda aşınma meydana gelmiştir (Şekil 7.28).

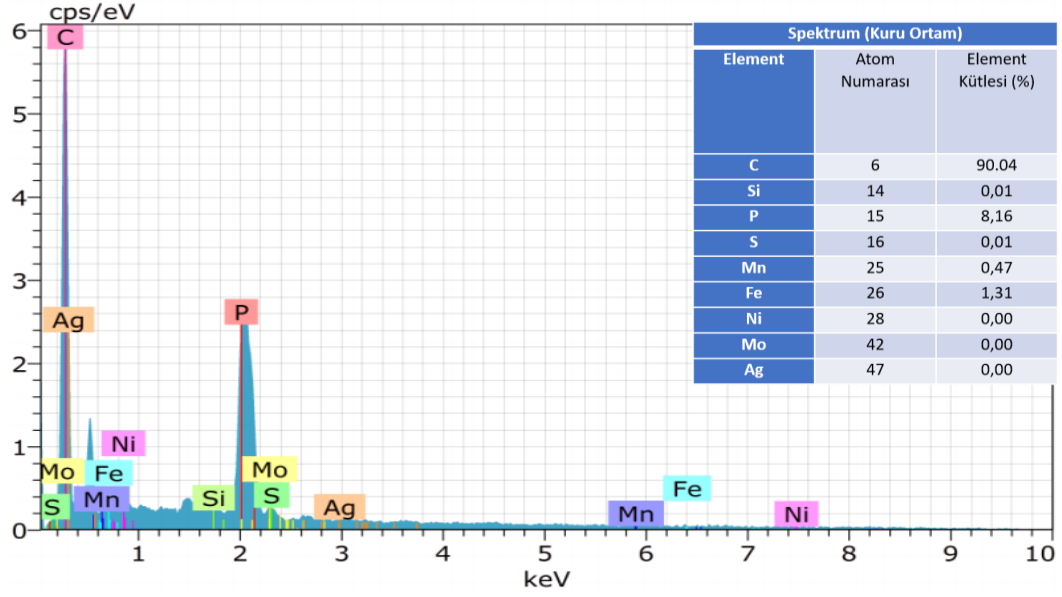


Şekil 7.28. Baz yağ + %8 AgNP ortamındaki SEM görüntüleri.

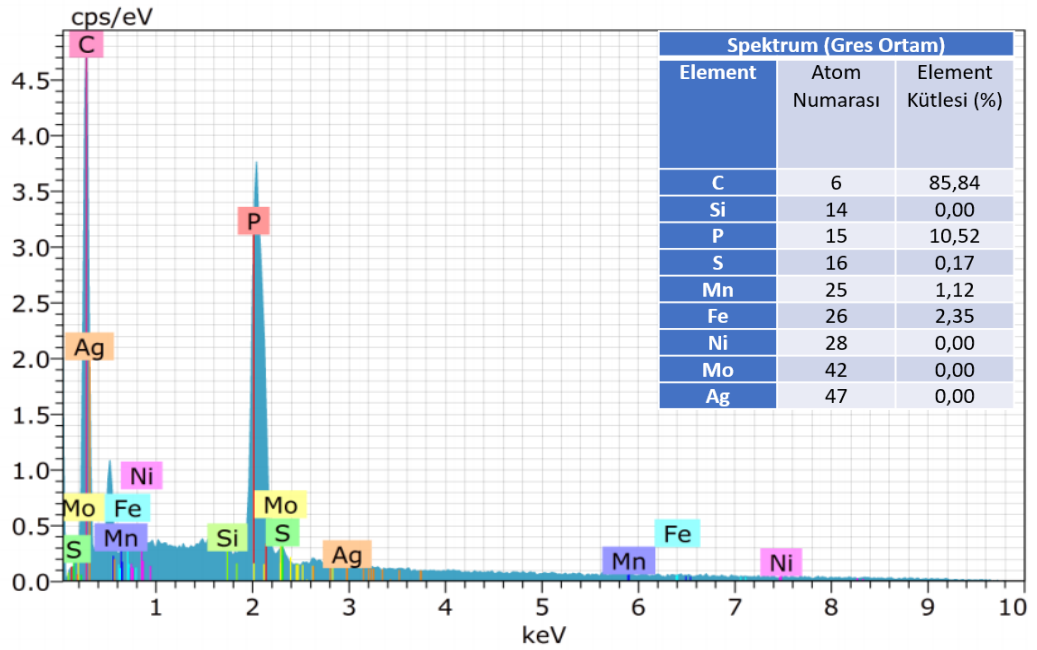
7.1.4.2. EDX Analizleri

Dişli yüzeylerine gümüş partiküllerinin absorbe edildiğini ve çelik dişliden polimer dişliye bir partikül geçimi olup olmadığını görmek için EDX analizi yapılmıştır. Baz yağ + %4 AgNP ve baz yağ + %8 AgNP ortamlarında yapılan deneylerde kullanılan dişlilerin diş yüzeylerinin EDX analizinde çok az miktarda gümüş (Ag) elementine rastlanmıştır. Bunun sebebi 500 ml yağlayıcının içerisinde çok az miktarda %4

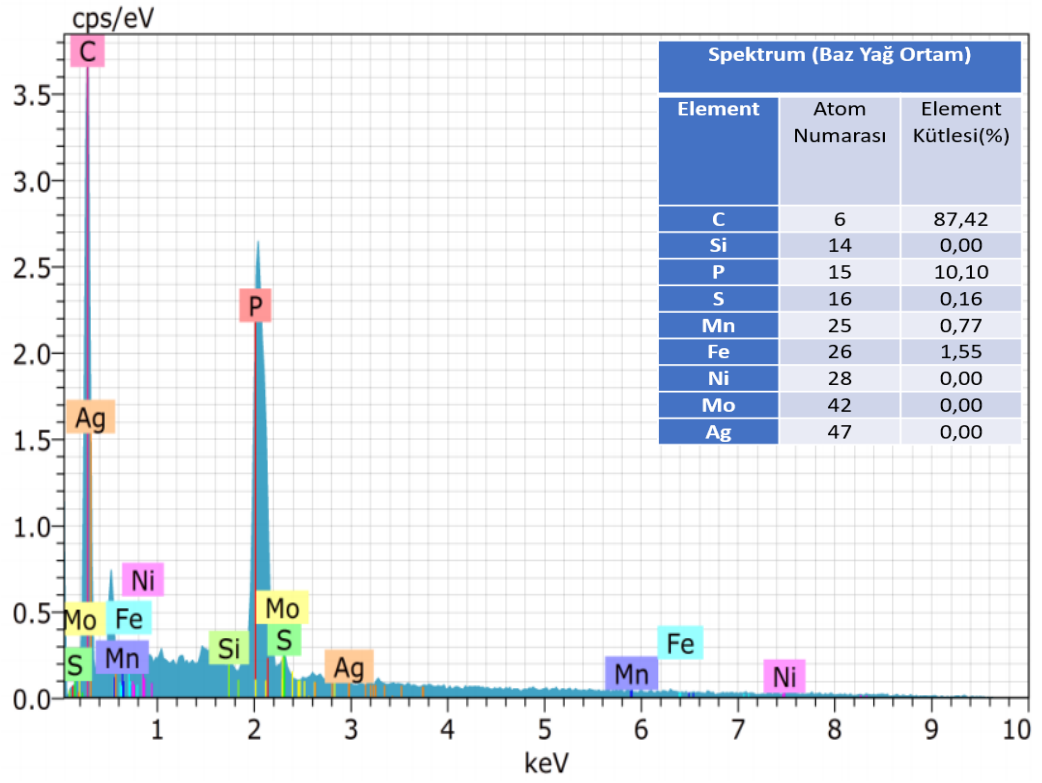
oranında (20 ml) %8 oranında (40 ml) nanogümüş konsantrasyonunun olmasından kaynaklanmaktadır.



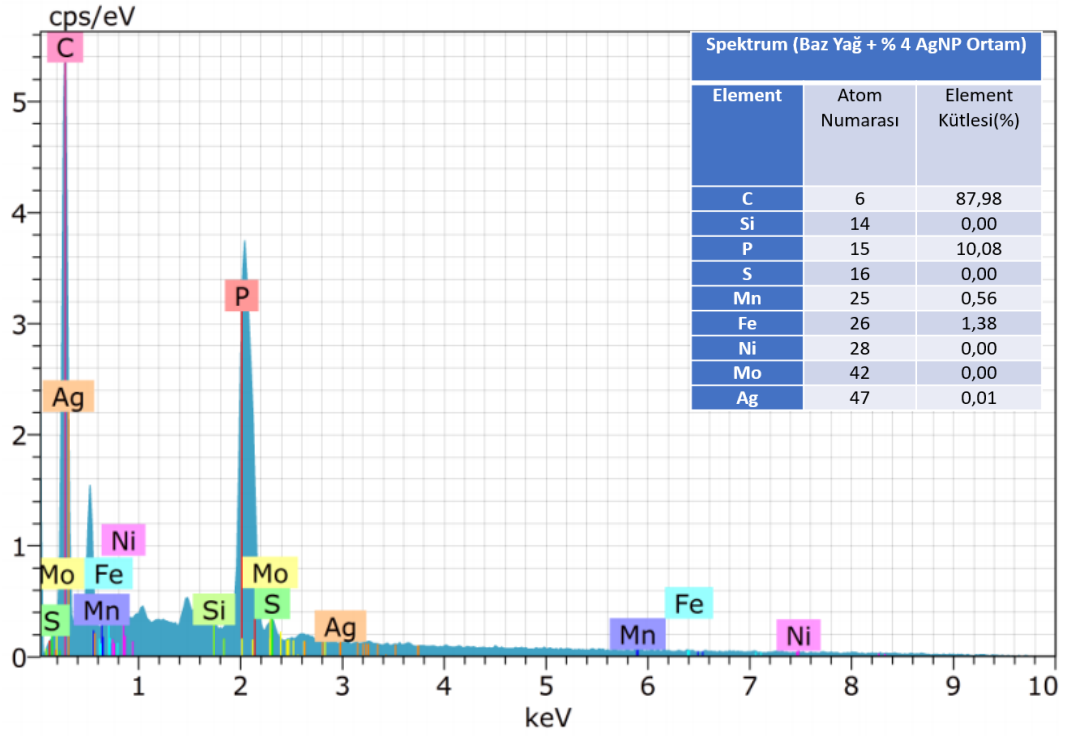
Şekil 7.29. Kuru ortamdaki EDX analizi ve spektrumu.



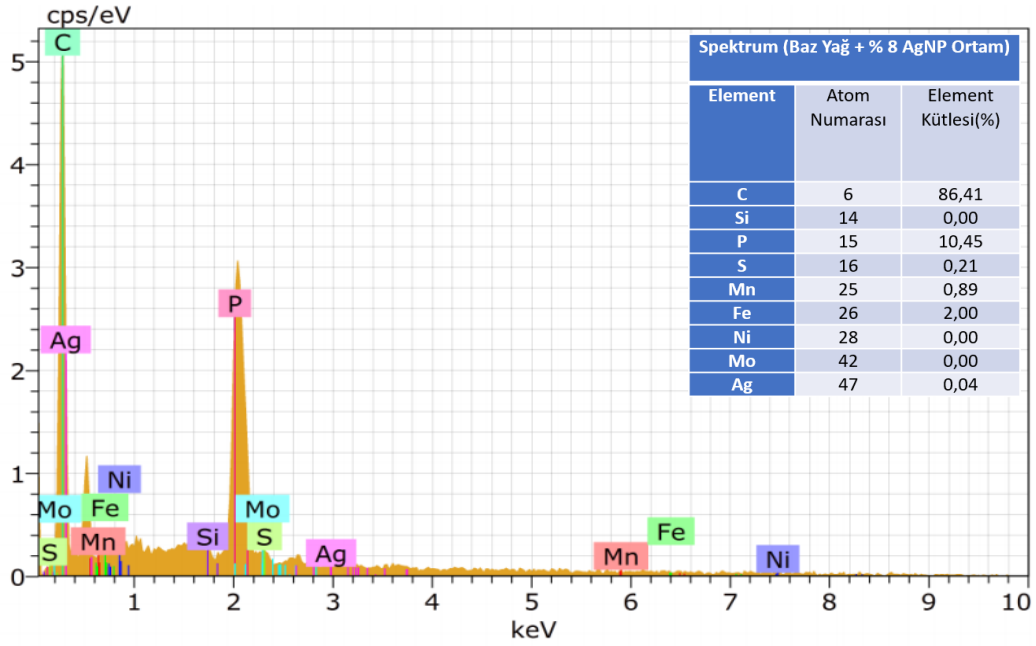
Şekil 7.30. Gres ortamındaki EDX analizi ve spektrumu.



Şekil 7.31. Baz yağ ortamındaki EDX analizi ve spektrumu.



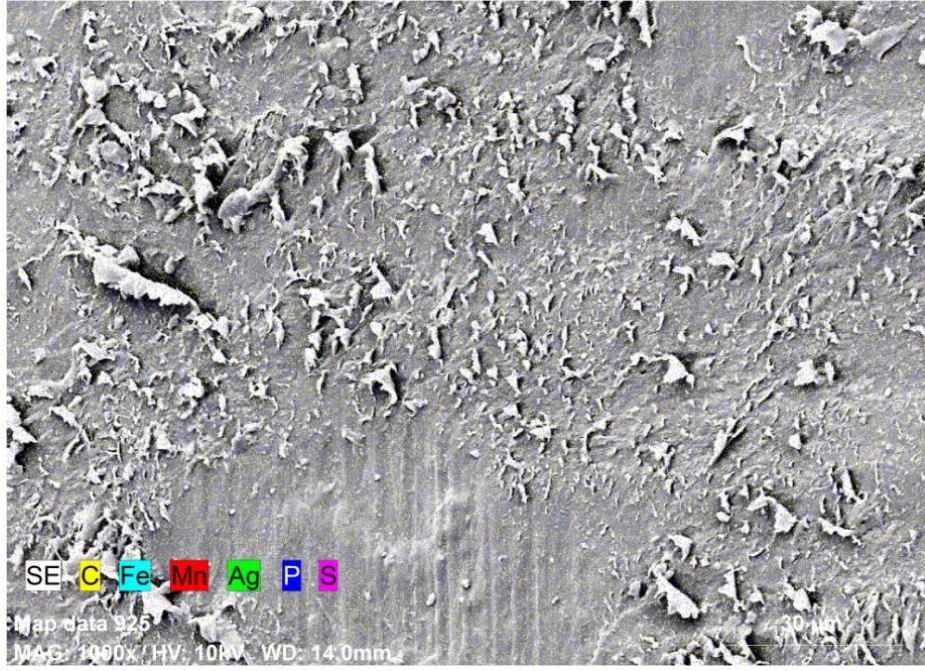
Şekil 7.32. Baz yağ + %4 AgNP ortamındaki EDX analizi ve spektrumu.



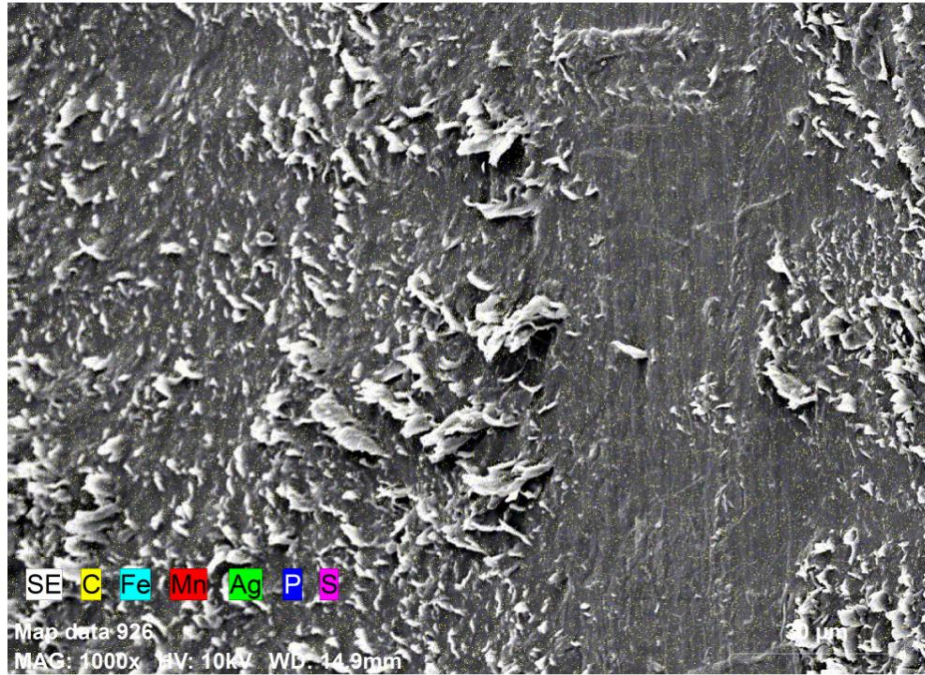
Şekil 7.33. Baz yağ + %8 AgNP ortamındaki EDX analizi ve spektrumu.

7.1.4.2. Mapping Analizleri

Baz yağ içerisinde %4 ve %8 oranında nano gümüş bulunan yağlayıcının etkisini incelemek amacıyla dişli yüzeylerinde özellikle gümüş elementinin dağılımını görmek için elemental dağılımını gösteren haritalar incelenmiştir. Polimer dişli yüzeylerinde karbon (C), Demir (Fe) Mangan (Mn), Gümüş (Ag), Fosfor (P), Kükürt (S) elementlerinin yoğunluğu şekil 8.34'te (%4 AgNP) ve şekil 8.35'te (%8 AgNP) gösterilmektedir. Dişli yüzeylerinde gümüş elementine rastlanmıştır. Polimerlerin molekül yapısında karbon elementi fazla olduğu için diş yüzeylerinde en çok karbon elementi bulunmaktadır.



Şekil 7.34. Baz yağ + %4 AgNP ortamındaki elemental mapping analizinin görüntüsü.



Şekil 7.35. Baz yağ + %8 AgNP ortamındaki elemental mapping analizinin görüntüsü.

7.1.5. 3D Topoğrafya analizi

Yüzeyde bulunan pürüzler sürtünme esnasında yüzeyden koparak küçük parçacıklar oluşturur. Sürtünme durumunda yüzey pürüzlerine gelen teğetsel gerilme, akma sınırını aştığı için aşınma meydana gelir. Yüzeyde bulunan pürüzler koparak aşınmayı hızlandırır. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça temas noktaları azalır. Çünkü gerçekte yüzeyler birbirlerine yüzey alanı boyunca temas etmezler, yüzey de bulunan pürüzler birbirine temas eder böylelikle yükü taşıyacak alan azaldığı için basınç artar dolayısı ile aşınma artar. Polimer çelik dişli eş çalışmasındaki adhesif aşınma, yüzey pürüzlülüğü açısından, yüzeydeki pürüzlerin kırılması olarak değerlendirilebilir. Polimer ve çelik dişli aynı sertliğe sahip olmadığı için aşınma polimer dişli de meydana gelir. 3D topoğrafya görüntüleri incelendiğinde en büyük tepe yüksekliği (R_p) ile en büyük çukur derinliği (R_v) arasındaki fark aşınma yüzeyindeki en büyük mesafeyi verir. Bu mesafe en büyük pürüz yüksekliği (R_t) olarak ifade edilir (Çizelge 7.1). Yüzeylere optik profilometre ile bakıldığında tepeler, çukurlar ve vadilerden oluşan bir görüntü elde edilmektedir. Şelik 7.36'da deneye tabi tutulan kestamid dişlilerin yüzey topoğrafyaları görünmektedir. Aşınma azaldıkça R_t değeri azalmıştır. R_t değeri en az (18,129) gres ortamında olmuştur.

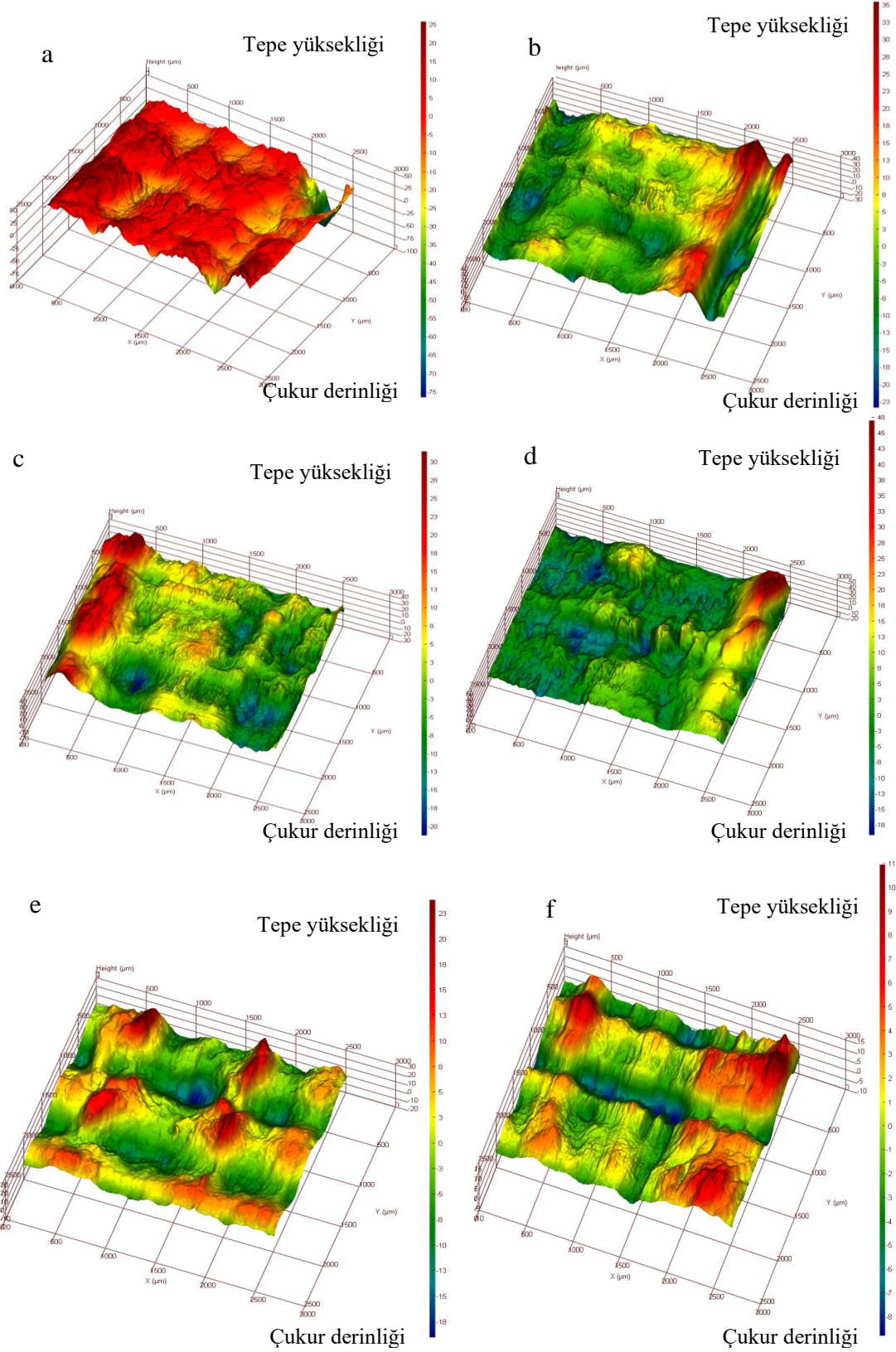
Çizelge 7.1. Yüzey pürüzlülük değerleri.

| Deney şartları | R_p (μm) | R_v (μm) | R_t (μm) |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Kuru | 17,334 | -15,4 | 32,739 |
| Baz Yağ | 15,833 | -13,83 | 29,662 |
| Baz Yağ+ %4 AgNP | 12,618 | -14,27 | 26,883 |
| Gres | 8,779 | -9,35 | 18,129 |
| Baz Yağ+ %8 AgNP | 10,406 | -13,16 | 23,564 |
| Deneyden önce | 6,299 | -6,816 | 13,114 |

R_p : En büyük tepe yüksekliği

R_v : En büyük çukur derinliği

R_t : En büyük tepe ve en büyük çukur arasındaki mesafe



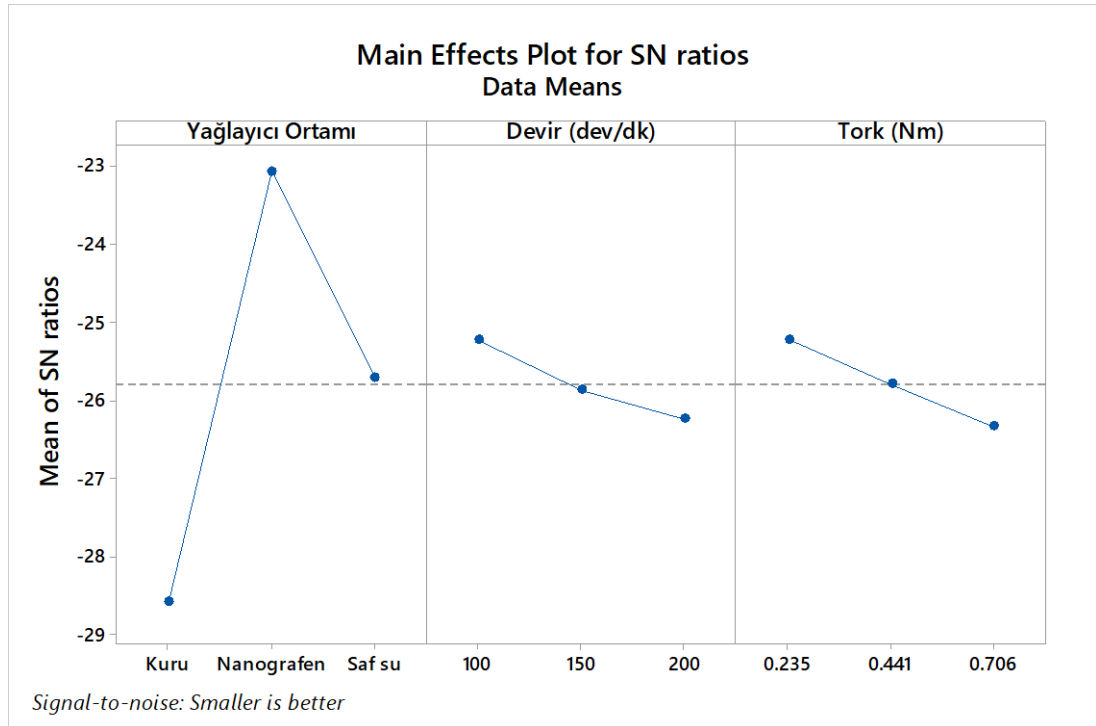
a. Kuru ortam b. Baz Yağ ortamı c. Baz Yağ + %4 AgNP ortamı d. Gres ortamı e. Baz Yağ + %8 AgNP ortamı f. Deneyden önce.

Şekil 7.36. Dişli yüzeylerinin topoğrafya görüntüleri.

7.2. NANO GRAFEN SÜSPANSİYON ORTAMINDA PLA DIŞLİLERİN TRİBOLOJİK PERFORMANSI

7.2.1. S/N Oranı ve ANOVA ile Sıcaklık Analizi

Aşınmayı etkileyen en önemli parametre sürtünme sebebiyle meydana gelen ısı oluşumudur. Aşınma bölgesinde oluşan sıcaklık değişiminin analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple sıcaklık değişiminin minimizasyonu için optimum parametreler S/N analizi ile belirlenmiş ve sonuçlar Şekil 7.37’de verilmiştir. Şekil 7.37’ye göre nano grafen yağlayıcı ortamı, 100 d/dk hızda ve 0.235 Nm tork değeri optimum parametreler olarak belirlenmiştir. Nano grafen yağlayıcı, ısıl iletkenlik etkisi sayesinde aşınma bölgesinde oluşan ısıyı transfer etmekte ve aşınma bölgesinden uzaklaştırmaktadır. Bu sayede aşınma bölgesindeki sıcaklık değişimi minimize edilebilmektedir. Devir ve tork arttıkça sıcaklık değişiminin arttığı görülmektedir. Devir ve torkun artışıyla dişlerin birbirine daha hızlı temas etmesi sonucunda sürtünme bölgesindeki sıcaklığı arttırmaktadır.



Şekil 7.37. Sıcaklık değişiminin S/N analizi.

Giriş parametrelerinin sıcaklık farkı parametresine etkisi ANOVA yöntemi ile belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 7.2’de verilmiştir. Çizelge 7.2’ye göre sıcaklık farkına yağlayıcı ortamının %90,87, devrin %3,93, torkun %3,70 oranlarında etki ettiği belirlenmiştir. Nano grafenin aşınma bölgesinde baskın rol oynaması sebebiyle devir ve tork parametrelerinin etkisini azaltmaktadır.

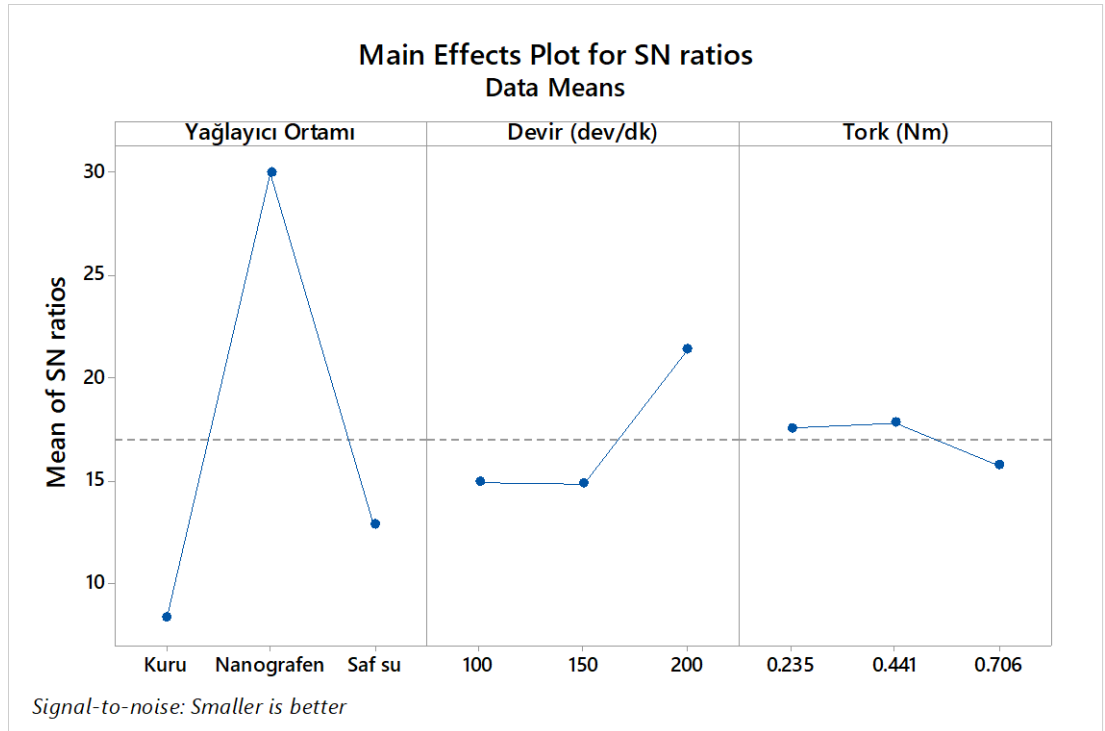
Analiz sonucunda elde edilen p değerleri de bu durumu destekler niteliktedir. P değerinin 0,05 değerinden küçük olması giriş parametrelerinin çıkış parametresi üzerinde anlamlı etki ettiğini göstermektedir. Çizelge 7.2’ye göre devir ($p=0,277>0,05$) ve tork ($p=0,289>0,05$) parametrelerinin p değerlerinin, 0,05 değerinden büyük olması istatistiksel olarak da anlamlılık göstermediğini ifade etmektedir. Etki oranları ve p değerleri arasındaki ilişki uyumluluk göstermektedir. İlâveten, giriş parametreleri ve belirlenen seviyelerin çıkış parametresini açıklama yeteneğini belirlemek için R-Sq (adj) değeri elde edilmiştir. R-Sq (adj) değerinin %70’ten büyük olması açıklamak için yeterli olduğunu göstermektedir. Çizelge 7.2’de R-Sq (adj) değeri %93,99 olarak elde edilmiştir. Bu durum deney tasarımının çıkış parametresini açıklama yeteneğinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Çizelge 7.2. Giriş parametrelerinin sıcaklık farkı parametresine etkisinin ANOVA analizi.

| | Serbestlik Derecesi (DF) | Kareler Toplamı (SS) | Kareler Ortalaması (MS) | F Oranı ($\alpha = \%5$) | P Değeri | Etki Oranı (%) |
|------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|----------|----------------|
| Yağlayıcı ortamı | 2 | 242,010 | 121,005 | 60,52 | 0,016 | 90,87 |
| Devir (dev/dk) | 2 | 10,462 | 5,231 | 2,62 | 0,277 | 3,93 |
| Tork (Nm) | 2 | 9,858 | 4,929 | 2,47 | 0,289 | 3,70 |
| Hata | 2 | 3,999 | 1,999 | | | 1,50 |
| Toplam | 8 | 266,328 | | | | 100 |
| Anlamlılık | R-Sq = %98,50 | | | R-Sq (adj) = %93,99 | | |

7.2.2. S/N Oranı ve ANOVA ile Ağırlık Kaybı Analizi

Aşınmaya bağlı olarak malzemede meydana gelen kütle kaybının minimizasyonu için optimum parametreler S/N analizi ile elde edilmiş ve sonuçlar Şekil 7.38’de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre nano grafen yağlayıcı ortamı, 200 d/dk devir ve 0,441 Nm tork değerinde optimum parametreler olarak belirlenmiştir. Nano grafenin yağlayıcı etkisi dişlilerin hareketini kolaylaştırmakta ve bu sayede aşınmayı minimize ederek kütle kaybını azaltmaktadır. Şekil 7.38’e göre devir arttıkça kütle kaybı azalırken, tork arttıkça kütle kaybı artmaktadır. Bu durum devir ve tork arasındaki ters orantı ile açıklanabilir. Devir arttıkça tork azalmakta olup bu ters orantılı ilişki kütle kaybını benzer şekilde etkilemektedir.



Şekil 7.38. Ağırlık kaybının S/N analizi.

Giriş parametrelerinin kütle kaybı parametresine etkisi ANOVA yöntemi ile belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 7.3’te verilmiştir. Çizelge 7.3’e göre kütle kaybı için en etkili parametrenin yağlayıcı ortamı (%85,10) olduğu, devir (%6,53), torkun (%5,13) etkisinin yağlayıcıya kıyasla anlamlı olmadığı belirlenmiştir. Elde edilen

sonuçlar sıcaklık farkı sonuçları ile uyumluluk göstermektedir. Nano grafenin yağlayıcı etkisi sayesinde ısı oluşumu azalmakta ve sürtünme sebebiyle oluşan minimum seviyedeki ısı da yağlayıcının ısı transferi kabiliyeti sayesinde azaltılabilmektedir. Bu sayede aşınma minimize edilerek kütle kaybı azaltılabilmektedir. Devir ve torkun etkisine bağlı olarak oluşan aşınmanın kaynağı olan ısının yağlayıcı ile azaltılabilmesi sebebiyle devir ve tork parametreleri kütle kaybı açısından anlamlı bir etki gösterememektedir. Devir ($p= 0,332>0,05$) ve tork ($p= 0,387>0,05$) parametrelerinin p değerlerinin 0,05'ten büyük olması da bu durumu desteklemektedir. Ek olarak, R-Sq (adj) değerinin %87,03 olarak elde edilmesi deney tasarımının sıcaklık farkını açıklama yeteneğinin yeterli olduğunu göstermektedir.

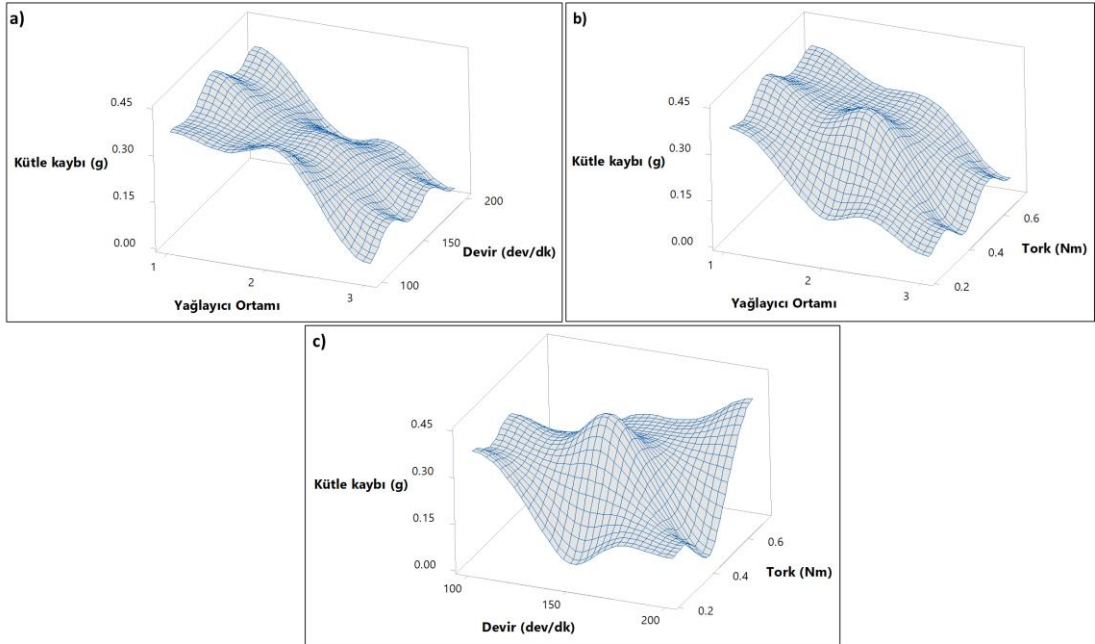
Çizelge 7.3. Giriş parametrelerinin kütle kaybı parametresine etkisinin ANOVA analizi.

| | Serbestlik Derecesi (DF) | Kareler Toplamı (SS) | Kareler Ortalaması (MS) | F Oranı ($\alpha = \%5$) | P Değeri | Etki Oranı (%) |
|------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|----------|----------------|
| Yağlayıcı ortamı | 2 | 0,186557 | 0,093278 | 26,25 | 0,037 | 85,10 |
| Devir (dev/dk) | 2 | 0,014308 | 0,007154 | 2,01 | 0,332 | 6,53 |
| Tork (Nm) | 2 | 0,011250 | 0,005625 | 1,58 | 0,387 | 5,13 |
| Hata | 2 | 0,007106 | 0,003553 | | | 3,24 |
| Toplam | 8 | 0,219221 | | | | 100 |
| Anlamlılık | R-Sq = %96,76 | | | R-Sq (adj) = %87,03 | | |

7.2.3. Yağlayıcı Türü, Devir ve Yük Etkileşiminin Analizi

Giriş parametrelerinin ikili etkileşimlerinin çıkış parametrelerine etkisinin incelenmesi için 3D yüzey görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen görüntülerde yağlayıcı ortamları nümerik olarak isimlendirilmiş ve 1 kuru ortamı, 2 saf su ortamını, 3 nano grafen yağlayıcı ortamını ifade etmektedir. Giriş parametreleri arasındaki etkileşimlerin kütle kaybına etkisi Şekil 7.39'da verilmiştir. Şekil

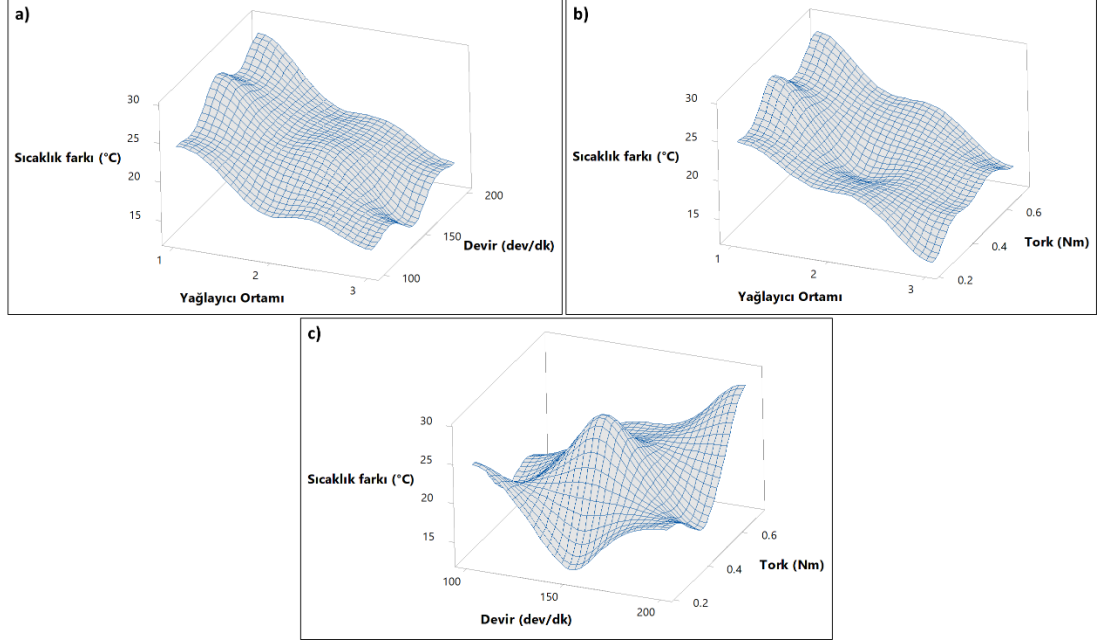
7.39.a'ya göre nano grafen yağlayıcı ortamının kütle kaybını azalttığı ve devir sayısı artışının kütle kaybını azalttığı görülmektedir. Yağlayıcı ortamı ve devir sayısının ayrı ayrı kütle kaybını etkilediği fakat devir sayısının yağlayıcıyla birlikte kütle kaybına etki edemediği belirlenmiştir. Yağlayıcı ortamı ve tork arasındaki etkileşimin etkisi analiz edildiğinde nano grafen yağlayıcı ortamında tork azaldıkça kütle kaybının azaldığı sonucu elde edilmiştir (Şekil 7.39.b). Devir ve torkun yağlayıcı ile etkileşimi benzerlik göstermektedir. Her ikisi de yağlayıcıyla birlikte kütle kaybına etki gösterememektedir. Devir ve tork arasında anlamlı bir etkileşim olmadığı sonucuna varılmıştır (Şekil 7.39.c). Devir ve tork arasındaki etkileşim S/N analizi sonuçları ile uyumluluk göstermektedir.



Şekil 7.39. Yağlayıcı türü, devir ve yük etkileşiminin kütle kaybına etkisi.

Giriş parametreleri arasındaki etkileşimin aşınma bölgesinde meydana gelen sıcaklık farkına etkisinin analiz edildiği üç boyut yüzey görüntüleri Şekil 7.40'ta verilmiştir. Yağlayıcı ortamının devir ve tork ile etkileşimin sıcaklık farkına etkisi benzerlik göstermektedir. Şekil 7.40'a göre aşınma bölgesine yağlayıcı (nano grafen) etkisi arttıkça ve devir azaldıkça sıcaklık farkının azaldığı belirlenmiştir (Şekil 7.40.a). Benzer şekilde nano grafen yağlayıcı ortamında ve tork azaldıkça sıcaklık farkının azaldığı görülmektedir (Şekil 7.40.b). Sıcaklık farkında, devir ve torkun yağlayıcı ile etkileşiminin kütle kaybına etkisi ile aynı durum söz konusudur. Devir ve tork

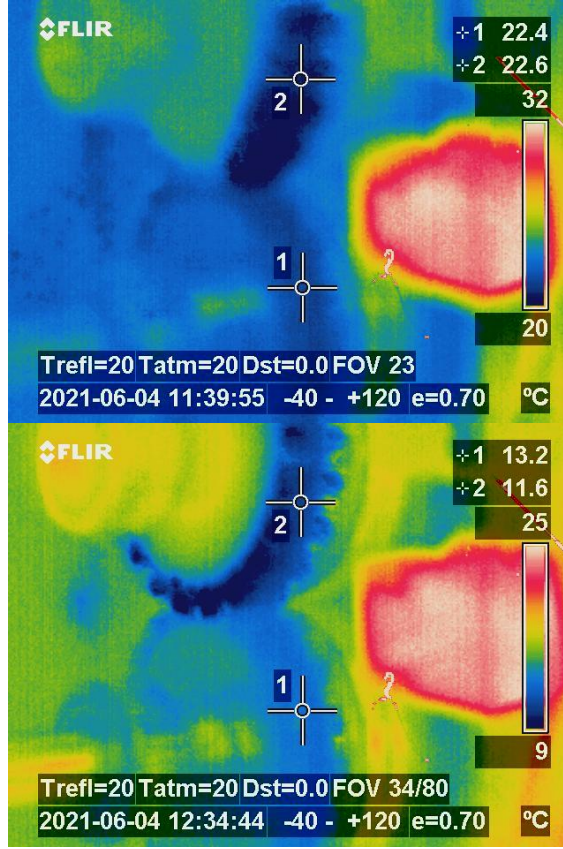
etkileşiminin sıcaklık farkına etkisi analiz edildiğinde tork ve devir sayısının anlamlı bir etkileşim oluşturmadığı sonucu elde edilmiştir (Şekil 7.40.c).



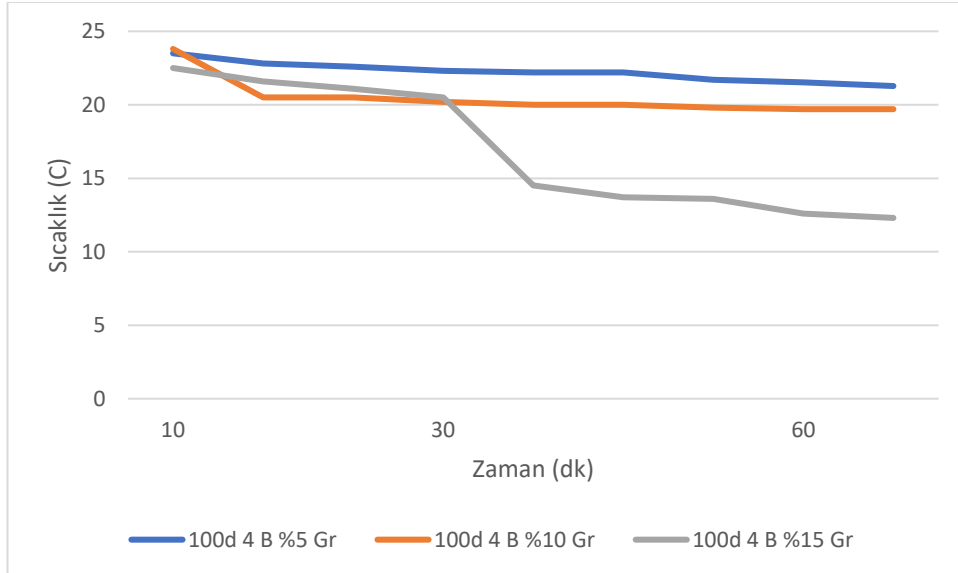
Şekil 7.40. Yağlayıcı türü, devir ve yük etkileşiminin sıcaklık farkına etkisi.

7.2.4. Konsantrasyon Oranının Değişiminin Analizi

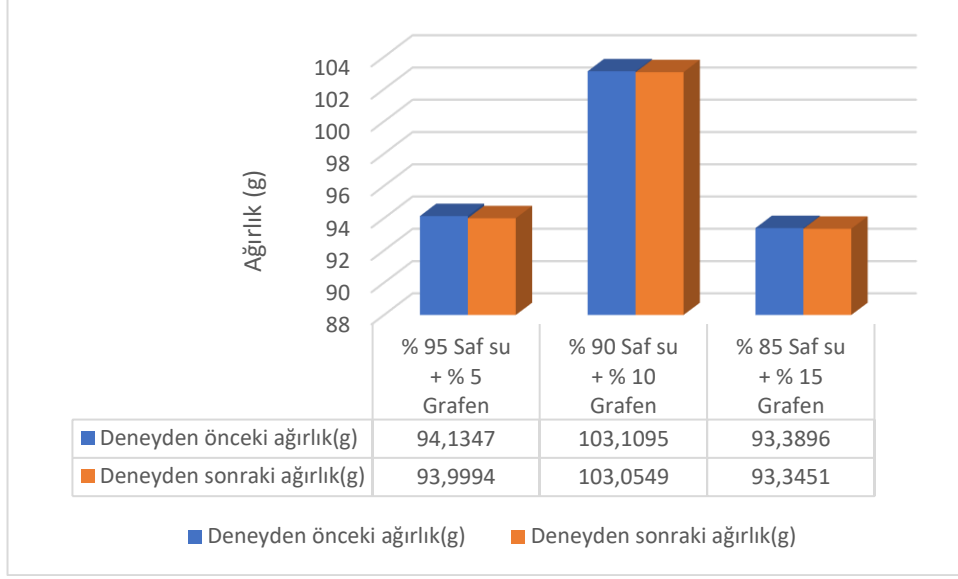
Nanografenin konsantrasyon oranının etkisini belirlemek için PLA dişlilerde S/N analizi ile optimum parametre olan 100 d/dk hızda ve 0,235 Nm torkta %5, %10 ve %15 nano grafen katkılı saf su ortamında deneye tabi tutulmuştur. PLA dişliler deneyden önce ve sonra 10^{-4} g hassasiyete sahip terazi ile tartılarak ağırlık kayıpları bulunmuştur (Şekil 7.43). Deneyde konsantrasyon oranlarının çıkış parametresi olan sıcaklık ve kütle kaybına etkisi incelenmiştir. Grafen konsantrasyonu arttıkça sıcaklık ve kütle kaybı azalmıştır. %5 konsantrasyonda 0,1353 g, %10 konsantrasyonda 0,0546 g, %15 konsantrasyonda 0,0461 g kütle kaybı olmuştur. %15 nano grafen konsantrasyonunda sıcaklık 22,5 °C'den yaklaşık 12,3 °C'ye düşmüştür. Nano grafenin ısıl iletkenlik katsayısının çok yüksek (~5000 W/mK) olmasından dolayı düşük devirlerde çalışan dişlilerdeki sıcaklığı önemli ölçüde (~10 °C) düşürmüştür (Şekil 7.41).



Şekil 7.41. %15 Nanografen konsantrasyonundaki PLA dişlilerin termal kamera sıcaklıkları.



Şekil 7.42. Tüm konsantrasyonlardaki PLA dişlilerin sıcaklık grafiği.



Şekil 7.43. Tüm konsantrasyonlardaki PLA dişlilerin ağırlık kaybı grafiği.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kestamid ve PLA dişlilerin nano partikül katkılı yağlayıcı koşullarında tribolojik performansı incelenmiştir. Kestamid dişlilerin deneyleri tam faktöriyel deney tasarımına göre yapılarak sabit yük, devir ve sürede çalıştırılmıştır. Çalışma ortamının etkilerinin belirlenmesi için kuru, gres, baz yağ, baz yağ + %4 AgNP ve baz yağ + %8 AgNP olmak üzere 5 farklı ortamda dişliler aşınma test cihazında yüke maruz bırakılmıştır. Deney sonucunda yağlama koşullarının sıcaklığa, kütle kaybına ve yüzey pürüzlülüğüne etkileri belirlenmiştir. PLA dişlilerin deney tasarımı Taguchi L₉ modeline göre, sabit sürede farklı tork, devir ve ortam şartlarında yapılmıştır. PLA dişliler kuru, saf su ve saf su + %10 nano grafen ortamlarında deneye tabi tutulmuştur. PLA dişlilerde giriş parametreleri (tork, devir ve ortam) çıkış parametrelerine (ağırlık kaybı, sıcaklık) etkileri istatistiksel (ANOVA) olarak incelenmiştir. Ayrıca optimum giriş parametresinde nanografen konsantrasyonunun tribolojik performansa etkisinin belirlenmesi için PLA dişliler saf su + %5 nano grafen, saf su + %10 ve saf su + %15 nano grafen olmak üzere 3 farklı yağlayıcı ortamında deneye tabi tutulmuştur. Deney sonucunda sıcaklık değişimi ve ağırlık kaybı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

8.1. KESTAMİD DİŞLİLERİN SONUÇLARI

- Dişlilerde ağırlık kaybı, en çok kuru ortamda (0,2035 g), en az ise gres (0,0288 g) ve baz yağ (%92) + AgNP (%8) yağlayıcı ortamında (0,0347 g) meydana gelmiştir. Maksimum aşınma, kuru ortamda, kayma hızının fazla olduğu taksimat dairesi ile temel daire arasında kalan bölgede ve taksimat dairesi ile diş üstü dairesi arasındaki bölgede meydana gelmiştir.

- Gres ile yağlanmış dişlide daha az ağırlık kaybının olmasının sebebi gres yağının dişlinin dişleri üzerinde güçlü bir yağ film tabakası oluşturması ve lityumun yağlayıcı ortamındaki performansdır.
- %8 AgNP katkılı baz yağlayıcı ortamda dişliler çalışırken gümüş partikülleri diş yüzeylerinde oluşan ısıyı transfer edebilmiş, yağlayıcının ıslatma kabiliyeti artmış ve lityum sabunlu gresle benzer ortam şartları oluşturabilmiştir. Böylelikle ısının etkisiyle malzeme yüzeyinde bir gevşeme meydana gelmediği için aşınma minimum seviyede olmuştur.
- Sıcaklık, sürtünmenin en çok olduğu kuru ortamda (~91 °C), en az ise baz yağ (%92) + AgNP (%8) sıvı yağlayıcı ortamında (~49 °C) gerçekleşmiştir. Gümüş partiküllerinin ısıyı transfer ederek daha iyi sonuç verdiği deney sonuçlarında görülmüştür.
- Sıcaklık arttıkça aşınma doğru orantılı olarak artmaktadır. Fakat gres ortamında sıcaklık, kuru ortamdaki en yüksek sıcaklığa (~70 °C) ulaşmasına rağmen kütle kaybı açısından aşınma miktarı en az olmuştur.
- En yüksek tepe ile en derin çukur arasında kalan mesafe (R_t), kuru ortamda (32,738 μm), gres ortamında (18,129 μm) ve baz yağ + %8 AgNP ortamında (23,564 μm) değerlerindedir. Aşınma arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmıştır.

8.2. PLA DIŞLİLERİN SONUÇLARI

- PLA dişliler için sıcaklık açısından optimum çalışma parametreleri S/N analizi ile belirlenmiştir. Dişlilerin nano grafen ortamı, 100 d/dk hız ve 0,235 Nm tork optimum çalışma koşullarıdır. Devir sayısı ve tork arttıkça sıcaklık artmıştır.
- Ortam, devir ve torkun sıcaklığa etkisi ANOVA analizi ile belirlenmiştir. Sıcaklığa, yağlayıcı ortamının %90,87, devrin %3,93, torkun %3,70 oranlarında etki ettiği belirlenmiştir. Nano grafen ortamı sıcaklığı azaltan en önemli parametredir. Nano grafen sıcaklığı önemli oranda azalttığı için devir ve tork parametrelerinin sıcaklık üzerine etkisi nano grafen ortamına kıyasla daha az olmuştur.
- Ağırlık kaybı açısından dişlilerin optimum çalışma parametreleri S/N analizi ile elde edilmiştir. Dişlilerin nano grafen ortamı, 200 d/dk hızda ve 0,441 Nm

torkta optimum çalışma koşullarıdır. Devir arttıkça kütle kaybı azalmış, tork arttıkça kütle kaybı artmıştır. Devir arttıkça dişli yüzeylerini birbirine temas süresi azaldığı için aşınma azalmıştır. Tork arttıkça dişli yüzeyine uygulanan basınç arttığı için kütle kaybı artmıştır.

- Ortam, devir ve torkun kütle kaybına etkisi ANOVA analizi ile belirlenmiştir. Kütle kaybına en çok, yağlayıcı ortamının (nano grafen) etki ettiği (%85,10), devirin (%6,53), torkun (%5,13) oranlarında etki ettiği belirlenmiştir. Nano grafenin, aşınmayı önemli oranda azaltması devir ve tork parametrelerinin aşınmaya etkisini azaltmıştır. Nano grafen ısıyı transfer ettiği için ısıya bağlı oluşan aşınma azalmaktadır.
- Giriş parametrelerinin kütle kaybına etkileri ikili olarak değerlendirildiğinde, nanografen yağlayıcı ortamının kütle kaybını azalttığı ve devir sayısı artışının kütle kaybını azalttığı görülmektedir. Nanografen yağlayıcı ortamında tork azaldıkça kütle kaybının azaldığı sonucuna varılmıştır.
- Giriş parametrelerinin sıcaklık farkına etkileri ikili olarak değerlendirildiğinde nanografen ortamında devir azaldıkça sıcaklık farkının azaldığı belirlenmiştir. Nanografen yağlayıcı ortamında tork azaldıkça sıcaklık farkının azaldığı görülmektedir.
- Optimum parametre olan 100 d/dk hızda ve 0,235 Nm torkta %15 nano grafen katkılı saf su ortamında sıcaklık ve kütle kaybı, %5 ve %10 konsantrasyon oranlarına kıyasla en az olmuştur. Nano grafenin konsantrasyon oranı arttıkça sıcaklık ve kütle kaybı azalmaktadır.

8.3. ÖNERİLER

- Deney esnasında kontrol edilebilir fan vasıtasıyla dişlilerin hava ile sıcaklığı azaltılabilir. Bu soğutma prosesinin dişlilerin tribolojik performansına etkisi incelenebilir.
- Dişlilere çalışma esnasında yağlayıcıyı damlatmak yerine pnömatik sistemlerle püskürtme yapılmasının dişlilerin tribolojik performansına etkisi incelenebilir. Bu sayede minimum miktarda ve basınçlı yağlama yapılabilir, enerji verimliliği sağlanabilir, çevresel problemler minimize edilebilir.

- Nano bakır, nano çinko ve hidro termal karbon gibi ileri malzemeler sentezlenerek, bu malzemelerin dişli aşınmasındaki tribolojik performansı araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Özkasap A. D., “Düz dişli çarklarda aşınma-yağlama yağı ilişkisinin deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, (2001).
2. Keskin M. S., “Silindirik düz dişli çarklarda yağlayıcı vizkozitesinin aşınmaya olan etkilerinin deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2002).
3. Şahin Ö. S., “Düz dişli çarklarda diş sıcaklık değişimleri ve aşınma etkileşiminin deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, (2002).
4. Eş M., “Dişli çark malzemelerinin aşınma karakteristiklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2004).
5. Yakut R., “Bazı termoplastik dişli çarkların yük taşıma kapasitesi ve hasar oluşumunun deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, (2008).
6. Düzcükoğlu H., Demirci M. T., Yakut R., Ekinci Ş., “Plastik Dişli Çark Diş Yüzeyinde Oluşan Temas Sıcaklığının Diş Hasarı Üzerine Etkisi”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, (2009).
7. Serin F., “Sıvılaştırılmış bor katkılı yağların aşınma karakteristiklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, (2015).
8. Torun T., “Üç boyutlu yazıcı ile üretilen düz dişli çarkların aşınma dayanımlarının deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çorum, (2019).
9. Şirin L., “3 boyutlu yazıcı ile üretilen helisel dişli çarkların aşınma dayanımlarının deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çorum, (2019).
10. [Düzcükoğlu H., “PA 66 spur gear durability improvement with tooth width modification”, *Materials and Design*, 30(4):1060-1067 (2009).
11. G. Yu, H. Liu, K. Mao, C. Zhu, and Z. Lu, “Examination on the wear process of polyformaldehyde gears under dry and lubricated conditions,” *Friction*, 9(3):538-550 (2021)

12. P. K. Singh, Siddhartha, and A. K. Singh, "An investigation on the thermal and wear behavior of polymer based spur gears," *Tribol. Int.*, 118:264-272 (2018).
13. C. Hasl, C. Illenberger, P. Oster, T. Tobie, and K. Stahl, "Potential of oil-lubricated cylindrical plastic gears," *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, 12(1):1-9 (2018).
14. A. Bormuth, J. Zuleeg, C. Schmitz, R. Schmitz, M. Pfadt, and H. Meven, "Lubrication of plastic worm gears," *Pow. Trans. Eng.*, 1473-1482 (2017).
15. Babalık F. C., Ç. Kadir, "Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri 6. Baskı", *Bursa*, 697-832 (2013).
16. Davis. J.R., Gear materials, Properties, and Manufacture, *United States of America*, 77-82 (2005).
17. C. J.Roy and M. J.Peter, *Plastics Engeneering 4th ed. , United Kingdom*, (2020).
18. Materials for Plastic Gears, AGMA 920- A01, *American Gear Manufacturers Assooiation*, (2001).
19. Kaya F., "Ana Hatlarıyla Plastikler ve Katkı Maddeleri 2. Baskı", *İstanbul* (2005).
20. A. Dimić *et al.*, "The influence of material on the operational characteristics of spur gears manufactured by the 3D printing technology", *Stroj. Cas.*, 68(3):261-270 (2018).
21. İnternet: "Kestamid dişli özellikleri" <http://corumbronz.com/kestamid>
22. Adams C. E., "Plastics Gearing: Selection and Application", (1986).
23. M. Thariq and H. Sultan, "Tribo-analysis of Polymer Composite in Spur Gear," *Springer Singapore*, 309–329 (2021).
24. K. Mao, W. Li, C. J. Hooke, and D. Walton, "Polymer gear surface thermal wear and its performance prediction," *Tribol. Int.*, 43(1-2):433-439 (2010).
25. A. Bravo, D. Koffi, L. Toubal, and F. Erchiqui, "Life and damage mode modeling applied to plastic gears," *Eng. Fail. Anal.*, 58: 113-133, (2015).
26. L. Zumofen and A. Kirchheim, "Feasibility Investigation of Gears Manufactured by Fused Filament Fabrication," *Ind. Addit. Manuf.*, 304–320 (2021).
27. J. Tavčar, B. Černe, J. Duhovnik, and D. Zorko, "A multicriteria function for polymer gear design optimization," *J. Comput. Des. Eng.*, 1-19 (2021).

28. Z. Lu, H. Liu, P. Wei, C. Zhu, D. Xin, and Y. Shen, “The effect of injection molding luncker defect on the durability performance of polymer gears,” *Int. J. Mech. Sci.*, 180 (2020).
29. B. Trobentar, S. Kulovec, G. Hlebanja, and S. Glodež, “Experimental failure analysis of S-polymer gears,” *Eng. Fail. Anal.*, 111 (2020).
30. D. Zorko, S. Kulovec, J. Duhovnik, and J. Tavčar, “Durability and design parameters of a Steel/PEEK gear pair,” *Mech. Mach. Theory*, 140:825-846 (2019).
31. N. K. Myshkin, M. I. Petrokovets, and A. V. Kovalev, “Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer,” *Tribol. Int.*, 38(11-12):910-921 (2005).
32. L. Butnar and O. Eberst, “Studies and Research on Adhesive Wear of Gears with Pairs of Gears Made of Plastics and Steel,” 17-25 (2020).
33. Fetvacı M. C., “Dişli Çarklar Ders Notları” *İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü*, İstanbul (2020).
34. İnternet: “Arduino teknik özellikleri” <https://www.direnc.net/arduino-uno-r3-smd>.
35. İnternet: “Motor Sürücü Teknik Özellikleri” <https://www.direnc.net/l298-dc-step-motor-surucu>
36. Düzcükoğlu H., “Study on development of polyamide gears for improvement of load-carrying capacity”, *Tribol. Int.*, 42(8): 1146-1153 (2009).
37. P. Navet, C. Changenet, F. Ville, D. Ghribi, and J. Cavoret, “Thermal Modeling of the FZG Test Rig: Application to Starved Lubrication Conditions”, *Tribol. Trans.*, 63(6): 1135-1146 (2020).
38. B. H. Soudmand and K. Shelesh-Nezhad, “Experimental investigation on the durability and failure modes of polybutylene terephthalate/calcium carbonate nanocomposite gears”, *Eng. Fail. Anal.*, 120:105113 (2021).
39. K. Karabulut, E. Buyruk, and F. Kilinc, “Grafen Oksit Nanoparçacıkları İçeren Nanoakışkanın Taşınım Isı Transferi ve Basınç Düşüşü Artışı Üzerindeki Etkisinin Düz Bir Boruda Deneysel Olarak Araştırılması”, *Mühendis ve Makina*, 59(690): 45-67 (2018).
40. İnternet: “Zeta potansiyel Ölçüm Cihazları” <https://atomikateknik.com/uploads/belgeler/su-aritmada-zeta-potansiyel-analizi-ile-etkin-proses-kontrolu-49712.pdf>.
41. A. BARAN, “Gümüş nano malzemelerin çevre dostu, hızlı sentezi ve biomedikal uygulamaları,” *DÜMF Mühendislik Derg.*, 12(2): 329-336 (2021).

42. İnternet: “ Yağ Karakterizasyon Ölçümleri”
<https://www.erbakan.edu.tr/bitam/sayfa/3294>.
43. İnternet: “ Yağ Karakterizasyon Ölçümleri”
<https://merlab.metu.edu.tr/tr/system/files/Belgeler/TanitimBrosurleri/PZL.pdf>.
44. A. Y. Aydar and N. Bağdatlıoğlu, “Yemeklik Yağların Yüzey Gerilimi ve Temas Açılarının Belirlenmesinde Uygulanan Yöntemler,” *Akad. Gıda*, 12(1): 108-114 (2014).
45. İnternet: “İslatabilirlik ve Temas Açıları”
<https://inovatifkimyadergisi.com/sivilarin-islamta-yetenekleri-ve-temas-acisi>.
46. İnternet: “ Yağ Karakterizasyon Ölçümleri”
<https://www.erbakan.edu.tr/bitam/sayfa/3301>.
47. S. Kılınçarslan Kabave, “Nano Gümüş ve Organik Borat Katkılı Kesme Sıvılarının Frezeleme İşlemindeki Performansının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2019).
48. M. Karabaşoğlu, “Aşınma deney cihazı tasarımı ve imalatı”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya (2008).
49. B. Y. T. Method, “TAGUCHI Metodu İle Plastik Enjeksiyon Parçalarda Çarpılmanın En İndirilmesi,” *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Derg.*, 12(2): 17-29 (2010).
50. M. H. Cetin and S. Korkmaz, “Investigation of the concentration rate and aggregation behaviour of nano-silver added colloidal suspensions on wear behaviour of metallic materials by using ANOVA method,” *Tribol. Int.*, 147: 106273 (2020).

ÖZGEÇMİŞ

Ömer Kartaltepe ilk, orta ve lise öğrenimini Konya’da tamamladı. Daha sonra Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü bitirdi. Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Yüksek lisans tez konusu “Polimer Esaslı Dişli Çarkların Nanopartikül Katkılı Yağlayıcı Ortamındaki Tribolojik Performanslarının İncelenmesi” şeklindedir.