



**AA 6061-T6 ALAŞIMININ DARBELİ AŞINMA
DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ
İLE ANALİZİ**

Muhammed Raşit KARAKOCA

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Emrah ERDOĞDU**

**AA 6061-T6 ALAŞIMININ DARBELİ AŞINMA DAVRANIŞININ SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

Muhammed Raşit KARAKOCA

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

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Emrah ERDOĞDU**

**KARABÜK
Ocak 2022**

Muhammed Raşit KARAKOCA tarafından hazırlanan “AA 6061-T6 ALAŞIMININ DARBELİ AŞINMA DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Emrah ERDOĞDU
Tez Danışmanı, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 24/01/2022

| <u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u> | <u>İmzası</u> |
|--|---------------|
| Başkan : Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN (KTÜN) | |
| Üye : Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ (KBÜ) | |
| Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Emrah ERDOĞDU (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.”

Muhammed Raşit KARAKOCA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AA 6061-T6 ALAŞIMININ DARBELİ AŞINMA DAVRANIŞININ SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Muhammed Raşit KARAKOCA

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Emrah ERDOĞDU

Ocak 2022, 76 sayfa

Mühendislik malzemelerinin kullanım hizmetleri için servis ömürleri son derece önemlidir. Pratikte kullanılan malzemeler üzerine etki eden istenmeyen kuvvetler servis ömürlerini kısaltmakta hatta mekanizmaların çalışmalarını tamamen durdurabilmektedir. Günümüzde aşınmalardan kaynaklanan hasarların ciddi boyutta olduğu bilinmektedir. Makine parçalarının verimlerindeki düşüşü, ömürlerini ve dayanımlarını arttırmak için çalışmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda laboratuvar test cihazları üretilip, üzerinde çeşitli deneyler sonrası malzemelerin eksiklerinin giderilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada sürtünme kuvvetiyle gerçekleşen abrasif aşınmanın etkilerini ölçebilmek için daha önce üretilen test cihazlarına ek olarak aynı sistem içerisinde malzeme üzerine etki eden darbe etkisini ölçebilen bir test cihazı tasarlanmıştır. Bu test cihazı sisteminde darbe etkisini oluşturabilmesi için numune yatağının altına vibrasyon motoru yerleştirilmiş ve ana gövde yayların üzerine yerleştirilmiştir. Sabit aşındırıcı uç altında, hareketli tabla

üzerinde kayma aşınması gerçekleşirken aynı anda vibrasyon motorunun etkisiyle ve yayların salınımlı hareketi sayesinde numune üzerine darbe etkisi oluşturabilecek bir test cihazı tasarlanmıştır. Literatür çalışmalarında yer alan mevcut test cihazlarının 2 boyutta çalıştığı görülürken, tasarlanan bu sistemde test aşamaları 3 boyutta gerçekleşebilmektedir. Vibrasyon motorunun, cihaz ağırlıkları hesap edildikten sonra sisteme 20 N'luk bir kuvvet uyguladığı bulunmuştur. Sistem, 3 boyutlu modellemelerin yapılabildiği SolidWorks programı üzerinde tasarlanmıştır.

Tasarlanan sistemde, AA 6061 T-6 alaşımlı malzemenin üzerine etki eden aşınma davranışlarını test etmek için sonlu elemanlar yöntemiyle ANSYS programında "Explicit Dynamics" modülü ile simülasyon analizleri yapılmıştır. Yapılan analiz sınır şartları 0,25, 0,5 ve 1 m/s hızları ve 10, 20 N'luk kuvvetleri altında gerçekleşmiştir. Yapılan simülasyon analizleri ile aşınma derinlikleri, maksimum kayma elastikiyet gerilmeleri ve maksimum kayma gerilmeleri bulunup, değerlendirilip, yorumlanmıştır.

Anahtar Sözcükler : AA 6061-T6, abrasif aşınma, darbeli aşınma, sonlu elemanlar metodu, ANSYS ve mekanik özellikler.

Bilim Kodu : 91433

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

ANALYSIS OF IMPACT WEAR BEHAVIOR OF AA 6061-T6 ALLOY BY FINITE ELEMENT METHODS

Muhammed Raşit KARAKOCA

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Ahmet Emrah ERDOĞDU

January 2022, 76 pages

Service life of engineering materials is extremely important for use services. Undesirable forces acting on the materials used in practice shorten their service life and even stop the operation of the mechanisms completely. Today, it is known that the damage caused by abrasion is serious. Efforts are being made to decrease the efficiency, service life and durability of machine parts. In this context, laboratory test devices are produced, and studies are carried out to eliminate the deficiencies of the materials after various experiments on them. In this study, to measure the effects of abrasive wear caused by friction force, in addition to the test devices produced before, a test device that can measure the impact effect on the material in the same system was designed. To create the impact effect in this test device system, a vibration motor was placed under the sample bed and the main body was placed on the springs. A test device has been designed that can create an impact effect on the sample under the fixed abrasive tip, while sliding wear occurs on the moving table, simultaneously with the

effect of the vibration motor and the oscillating movement of the springs. While it is seen that the existing test devices in the literature studies work in 2 dimensions, the test stages can be realized in 3 dimensions in this designed system. It was found that the vibration motor applied a force of 20 N to the system after the device weights were calculated. The system is designed on the SolidWorks program, where 3D models can be made.

In the designed system, simulation analyzes were carried out with the "Explicit Dynamics" module in the ANSYS program with the finite element method to test the wear behavior on the AA 6061 T-6 alloy material. The analysis boundary conditions were realized under 0,25, 0,5 and 1 m/s velocities and 10, 20 N forces. Wear depths, maximum shear elastic strains and maximum shear stresses were found evaluated, interpreted by simulation analysis.

Key Word : AA 6061-T6, abrasive wear, impact wear, finite element method, ANSYS and mechanical properties.

Science Code : 91433

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Emrah ERDOĞDU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalıőmalarım sırasında her zaman yardımda bulunan ve desteklerini esirgemeyen kıymetli hocam Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Akademik kariyer hedeflerimde üniversite hayatım boyunca daima yanımda bulunan ve her türlü konuda beni destekleyen kıymetli dostlarım Abdulkadir ORAK'a ve Ahmet Can ÇAKIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca her an yanımda olan, bana güvenip, bana inanan, maddi manevi hiçbir yardımı esirgemedi beni destekleyen başta annem ve babam olmak üzere sevgili aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---------------------------------------|--------------|
| KABUL..... | ii |
| ÖZET..... | iv |
| ABSTRACT..... | vi |
| TEŞEKKÜR..... | viii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xiv |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | xv |
| | |
| BÖLÜM 1 | 1 |
| GİRİŞ | 1 |
| | |
| BÖLÜM 2 | 3 |
| TRİBOLOJİ | 3 |
| 2.1. AŞINMA | 4 |
| 2.1.1. Aşınma Mekanizmaları..... | 6 |
| 2.1.1.1. Abrasif Aşınma | 8 |
| 2.1.1.2 Adhezif Aşınma | 10 |
| 2.1.1.3. Korozyon Aşınması | 12 |
| 2.1.1.4. Yorulma Aşınması | 14 |
| 2.1.1.5. Darbe Aşınması..... | 15 |
| 2.1.2. Aşınma Ölçüm Metotları | 17 |
| 2.1.2.1. Ağırlık Kaybı Metodu..... | 18 |
| 2.1.2.2. Kalınlık Farkı Metodu..... | 20 |
| 2.1.2.3. İz Değişimi Metodu | 20 |
| 2.1.2.4. Radyoizotop Metodu..... | 21 |
| 2.1.2.5. Sonlu Elemanlar Metodu | 21 |
| 2.2. SONLU ELEMANLAR METODU | 21 |

| | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| 2.2.1. Sonlu Elemanlar..... | 21 |
| 2.2.1.1 Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları | 22 |
| 2.2.1.2. Sonlu Elemanlar Motodunun Dezavantajları..... | 22 |
| 2.2.2. Sonlu Elemanlar Metodunun Çözüm Adımları | 22 |
| 2.2.2.1. Başlangıç Kararları | 22 |
| 2.2.2.2. Ön İşlemler..... | 23 |
| 2.2.2.3. Çözüm Yolları..... | 23 |
| 2.2.2.4. Analiz Sonrası Verilerin İncelenmesi | 23 |
| | |
| BÖLÜM 3 | 24 |
| LİTERATÜR ÇALIŞMALARI | 24 |
| 3.1. AŞINMA LİTERATÜR ÇALIŞMALARI..... | 24 |
| 3.2. AŞINMA CİHAZI TASARIMI LİTERATÜR ÇALIŞMALARI..... | 32 |
| 3.3. SONLU ELEMANLAR METODUNUN LİTERATÜR ÇALIŞMALARI.. | 36 |
| 3.4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARININ GENEL DEĞERLENDİRMESİ..... | 37 |
| | |
| BÖLÜM 4 | 39 |
| MATERYAL VE YÖNTEM | 39 |
| 4.1. MATERYAL..... | 39 |
| 4.1.1. Test Cihazının Amacı | 40 |
| 4.1.2. Titreşim Destekli Darbeli Aşınma Cihazının Tasarımı ve Çalışma Prensibi..... | 41 |
| 4.1.3. Servo Motor | 46 |
| 4.1.4. Titreşim Motoru..... | 47 |
| 4.1.5. Aşındırıcı Bilye ve Numune | 49 |
| 4.2. YÖNTEM..... | 49 |
| 4.2.1. Analizi Yapılacak Olan Numune ve Bilyenin Tasarımı | 50 |
| 4.2.2. ANSYS Üzerinde Simülasyon Koşullarını Hazırlamak | 52 |
| 4.2.2.1. Malzemelerin Atanması | 52 |
| 4.2.2.2. Malzemelerin Üzerine Ağ Örgüsünün (mesh) Atanması..... | 53 |
| 4.2.2.3. Simülasyon Süresinin Belirlenmesi | 55 |
| 4.2.2.4. Simülasyon İçin Hız Sınır Şartının Belirlenmesi..... | 56 |

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| 4.2.2.5. Değerlendirilecek Olan Simülasyon Sonuçları..... | 58 |
| 4.2.3. Analizlerde Kullanılacak Olan Sınır Şartları..... | 59 |
| | |
| BÖLÜM 5 | 60 |
| ANALİZ BULGULARI VE SONUÇLARI | 60 |
| 5.1. AŞINMA DERİNLİKLERİ | 60 |
| 5.2. MAKSİMUM KAYMA GERİLMELERİ | 62 |
| 5.3. MAKSİMUM KAYMA GERİNİMLERİ | 63 |
| | |
| BÖLÜM 6 | 66 |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 66 |
| 6.1. SONUÇ | 66 |
| 6.2. ÖNERİLER | 68 |
| | |
| KAYNAKLAR | 69 |
| | |
| ÖZGEÇMİŞ | 76 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1. Tribolojik sistem ve alanları | 4 |
| Şekil 2.2. Aşınma mekanizmasının gösterimi..... | 5 |
| Şekil 2.3. Sürtünme aşınma tanımı için model | 7 |
| Şekil 2.4. 2 gövdeli aşınma | 9 |
| Şekil 2.5. 3 gövdeli aşınma | 9 |
| Şekil 2.6. Abrasif aşınma modeli | 9 |
| Şekil 2.7. Adhezif aşınma sırasında plastik deformasyon modeli | 11 |
| Şekil 2.8. Yorulma aşınması modeli | 14 |
| Şekil 2.9. Darbe aşınma etkisi..... | 16 |
| Şekil 2.10. Doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınma şemaları..... | 18 |
| Şekil 2.11. Hassas elektronik tartı..... | 19 |
| Şekil 4.1. Titreşim destekli darbeli aşınma cihazının tasarımı..... | 42 |
| Şekil 4.2. Titreşim destekli darbeli aşınma cihazının tasarımı ön görünümü. | 42 |
| Şekil 4.3. Kurs boyu ayarlanabilen lineer kaymalı yatak..... | 43 |
| Şekil 4.4. Aşındırıcı ucun bağlandığı ve sabitlemek için yükün bağlandığı gövde. | 43 |
| Şekil 4.5. Aşındırıcı bilye ve aparatı..... | 44 |
| Şekil 4.6. Eksantrik mil ve lineer hareket tablası..... | 44 |
| Şekil 4.7. Titreşim motorunun bağlı olduğu gövde ve yayların konumları. | 45 |
| Şekil 4.8. Titreşim motorunun yatakladığı gövde..... | 45 |
| Şekil 4.9. Servo motor..... | 46 |
| Şekil 4.10. Titreşim motoru | 47 |
| Şekil 4.11. Aşındırıcı tungsten bilye. | 50 |
| Şekil 4.12. Aşınan malzeme AA 6061-T6. | 51 |
| Şekil 4.13. Bilye ve numuneye malzeme atanması..... | 52 |
| Şekil 4.14. Dinamik analizde malzeme üzerine ağ örgüsü ataması. | 53 |
| Şekil 4.15. 0,1 mm'lik ağ örgüsü ataması yapılmış numune ve bilye. | 55 |
| Şekil 4.16. Dinamik analizinde simülasyon süresinin belirlenmesi..... | 55 |
| Şekil 4.17. Dinamik analizinde hız sınır şartının belirlenmesi. | 56 |
| Şekil 4.18. Sisteme etki eden yükler. | 58 |
| Şekil 4.19. Yorumlamak istenen simülasyon sonuçları. | 58 |

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 5.1. Aşınma derinliklerinin analiz görselleri ve sonuçları. | 61 |
| Şekil 5.2. Kesme gerilmelerinin analiz görselleri ve sonuçları..... | 63 |
| Şekil 5.3. Kesme gerinimlerinin analiz görselleri ve sonuçları. | 64 |
| Şekil 5.4. Abrasif aşınma analizinin aşınma derinliği görseli..... | 65 |



ÇİZELGELER DİZİNİ

| | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| Çizelge 2.1. Korozif aşınma çeşitleri | 13 |
| Çizelge 4.1. Mikro seviyesindeki titreşim motorlarının özellikleri | 49 |
| Çizelge 4.2. AA 6061-T6 malzemesinin fiziksel özellikleri..... | 51 |
| Çizelge 4.3. AA 6061-T6 malzemesinin mekanik özellikleri..... | 51 |
| Çizelge 4.4. AA 6061 kimyasal kompozisyonu..... | 52 |
| Çizelge 4.5. Mesh hassasiyet analizi..... | 54 |
| Çizelge 4.6. Yapılacak olan analizlerin sınır şartları. | 59 |
| Çizelge 5. 1. Analiz sonucu aşınma derinlikleri. | 62 |
| Çizelge 5.2. Analiz sonucu maksimum kayma gerilimleri. | 63 |
| Çizelge 5.3. Analiz sonucu maksimum kesme gerinimleri..... | 65 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

| | |
|----------------------------------|--|
| Co | : kobalt |
| Cr | : krom |
| g | : gram |
| C | : karbon |
| 2Cr ₁₃ | : paslanmaz çelik |
| Hz | : hertz |
| FeCr ₂ BC | : demir karbonlu krom alaşımı |
| QP | : çelik |
| 304L | : paslanmaz çelik |
| F _s | : sürtünme kuvveti |
| W | : normal yük |
| F _N | : normal kuvvet |
| V | : hacim |
| x | : oluğun delinliği |
| Mn ₁₃ Cr ₂ | : manganez çeliği |
| PCD | : polikristalin elmas |
| HB | : brinell sertliği |
| Pa | : pascal |
| °C | : santigrat derece |
| AA 6061- T6 | : alüminyum alaşımı |
| W | : tungsten |
| dev/dak | : bir dakikadaki devir sayısı |
| L | : normal yük |
| H | : malzeme sertliği |
| P | : malzemenin üzerindeki penetrasyon sertliği |
| d | : yoğunluk |

| | |
|------------------|----------------------------|
| S | : aşınma yolu |
| λ | : lambda oranı |
| $\tan\theta$ | : koninin kenarının eğimi |
| 2ϕ | : girintinin koni açısı |
| Q_a | : aşınma oranı |
| R_{a1}^2 | : yüzey pürüzlülüğü |
| η | : yağlayıcının viskozitesi |
| ω | : hız |
| ρ | : temas basıncı |
| π | : pi sayısı |
| km | : kilometre |
| mm | : milimetre |
| M | : yükleme ağırlığı |
| G | : ağırlık kaybı |
| h_{min} | : film kalınlığı |
| Hss | : sert metal |
| W1 | : doğrusal aşınma |
| Wd | : düzlemsel aşınma |
| Wv | : hacimsel aşınma |
| En 24 | : çelik alaşım |
| En 31 | : alaşımlı çelik |
| Ti | : titanyum |
| Al | : alüminyum |
| 30CrMnSi | : şaft malzeme alaşımı |
| SiC | : silisyum karbür |
| N | : newton |
| rpm | : dakikadaki devir sayısı |
| Fe45 | : karbon çelik alaşımı |
| SiO ₂ | : silisyum dioksit |
| NB0 | : martensit çeliği |
| NB05 | : martensit çeliği |
| GCr15 | : rulman çeliği |
| Nb | : niyobyum |

| | |
|---------------|------------------------|
| WC | : tungsten karbür |
| FeCr | : demir karbon alaşımı |
| Mo | : molibden |
| Ni | : nikel |
| HV | : vickers sertliği |
| μm | : mikrometre |
| MPa | : megapascal |
| F_M | : merkez kaç kuvveti |
| M | : statik moment |
| A_{pp} | : titreşim genliği |
| e | : eksantriklik |

KISALTMALAR

| | |
|-------|--|
| AISI | : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü) |
| ASTM | : American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu) |
| AWS | : American Welding Society (Amerika Kaynak Topluluğu) |
| DIN | : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları) |
| BS | : British Standard (İngiliz Standartları) |
| EN | : European Norm (Avrupa Normu) |
| IIW | : International Institute of Welding (Uluslararası Kaynak Enstitüsü) |
| ITAB | : Isı Tesiri Altında Kalan Bölge |
| TS | : Türk Standardı |
| SEM | : Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskopu) |
| EDX | : Energy Dispersive X-Ray (Enerji Dağılımlı X-IÇını) |
| TEM | : Transmission Electron Microscope (Geçirimli Elektron Mikroskobu) |
| FEM | : Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Metodu) |
| FEA | : Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi) |
| ANSYS | : Analysis, System (Analiz Sistemi) |
| DSRW | : Dry Stone Retaining Walls (Kuru Taş İstinat Duvarları) |

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Malzemelerin sürtünmeyle birlikte yüzeylerinde mekanik etkiler sonucunda meydana gelen aşınma makina parçalarında çok sık karşılaşılan bir olaydır. Mekanik sistemlerde, hareket halindeki parçaların neredeyse tamamında aşınma kaynaklı hasarlar ile karşılaşılabilir. Aşınma, kritik makine parçalarının erken hasar oluşumu ve servis ömürlerinin azalmasını yanı sıra, malzemelerin üretim sürecini bile etkileyen hasarlar oluşturabilmektedir. Endüstride kullanılan mekanik sistemlerin aşınması, zamanla bu sistemlerin beklenenden daha kısa sürede servis dışı kalmalarına ve aşınmanın devam etmesiyle birlikte malzemelerin kullanıldığı alanlarda hasar oluşumuna sebep olmaktadır. Bu durum ekonomik olarak büyük bir maliyet tablosu ile sonuçlanabilmektedir [1,2].

Aşınma süreci, zamanla meydana gelebildiği gibi bir anda da oluşabilmektedir. Malzemelerin aşınması, ortam şartlarına bağlı olarak farklı şekillerde oluşabilmektedir (adhezif aşınma, abrazif aşınma, korozyon aşınma, kazımalı aşınma, yorulma aşınması, erozyon aşınması, darbe aşınması). Malzemelerin bazı mekanik özelliklerinin (çekme mukavemeti, sertlik vb.) etkisi farklı aşınma türlerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Aşınma sürecini sadece malzemelerin özelliklerine göre değil, aşınmaya sebep olan tüm etkenlere dikkat ederek incelemek gerekmektedir. Aşınmaya etki eden parametreler, ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, uygulanan yük ve sistemde bulunan parçaların hareketi olarak değerlendirilmektedir [1–3].

Abrazif aşınma, sert olan cisimlerin başka cisimler üzerine sürtünmesi sırasında uyguladığı kuvvetin etkisiyle yüzeyde çizik oluşturması ve cisim üzerinden mikro seviyede talaş kaldırılması olarak tanımlanmaktadır. Abrazif aşınma izafi hareketle çalışan malzemelerde sıklıkla karşılaşılan bir aşınma türüdür [4,5].

Abrazif aşınmayı etkileyen en önemli faktörler, sertlik değeri, aşındırıcı malzemenin özellikleri (cinsi, tane şekli, tane boyutu, sahip olduğu yüzey pürüzlülüğünün şekil ve boyutu), uygulanan yük ve hareket hızıdır. Yine aynı şekilde bir malzeme üzerine çeşitli yükler altında darbe etkisi ile aşınmaya maruz kalabilir [4,6].

Günümüzde aşınmalardan kaynaklanan hasarların ciddi boyutta olduğu bilinmektedir. Makine parçalarının verimlerindeki düşüşü, ömürlerini ve dayanımlarını arttırmak için çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan gözlemler sonucu malzemelerdeki aşınmadan kaynaklı hasarları gidermek amacıyla deneysel çalışmalara gidilmiştir. Gelişen teknolojiyle, aşınma ve sürtünme ölçüm aletleri için çeşitli laboratuvar donanımlarına sahip makineler üretilmektedir. Malzemelerin aşınmaları mikron seviyelerde olabileceği için ölçümlerinin de çok hassas olması gerekmektedir. Aşınma olayı karmaşık bir yapıya sahip olduğundan çok çeşitli yapılarda test cihazları üretilmektedir [3,6,7].

Genellikle, sürtünme test aygıtları piyasada sınırlı bir aralık için bulunmaktadır. Sürtünme katsayısı, aşınma oranı veya darbenin etkisiyle oluşan aşınma, tüm parametreler ayrı ayrı değerlendirilerek üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Ayrıca, piyasada bulunan ve şu an literatürde rastlanılan cihazlar, darbe sonrası aşınma ya da sadece darbe şeklinde çalışmaktadır [7–9].

Bu çalışmada daha önce sürtünme kuvveti ile yük, hız parametrelerinin oluşturduğu abrazif aşınmanın yanında aynı sistem içerisinde çalışacak olan hem sürtünme hem de darbe etkisinde kalan malzemeler modellenerek sonlu elemanlar metoduyla analizleri yapılacaktır. Bununla birlikte, titreşim destekli darbeli kayma aşınma test cihazının tasarımı yapılacaktır. Literatürde yer alan mevcut cihazların test aşamasında 2 boyutta çalıştığı görülmektedir, tasarlanacak olan cihaz ise testlerin 3 boyutta gerçekleşmesini sağlayacaktır.

BÖLÜM 2

TRIBOLOJİ

Triboloji, görelî harekette etkileşim yüzeylerinde; sürtünme, aşınma, yağlama çalışması ve yatakların tasarımı üzerindeki çalışmaların malzeme bilimi olarak tanımlanır. Kökeni ise sürtünme anlamına gelen Yunanca ‘tribos’ kelimesine dayanır. İngiliz literatüründe ise ‘göreceli harekette etkileşimli yüzeylerin bilim ve teknolojisi ile ilgili uygulamalar’ tanımıyla 1966 yılında Jost Raporunda (HMSO) tanıtılmıştır. Malzeme bilimi, akışkanlar mekaniği, katı mekaniği, ısı transferi gibi temel mühendislik uygulamalarını kapsar. Yüzeyler üzerinde hem makroskopik yatak geometrisini hem de mikroskobik yüzey topografilerini, bağıl hareketleri, yatak malzemelerini, malzemeler üzerindeki yükleri ayrıca yağlayıcıları içerir. Triboloji esas olarak bağıl hareket halindeki yüzeylerle ilgilendiğinden dolayı yüzey profili, dokusu ve topografyası önemlidir [10].

Triboloji esas olarak sürtünme, aşınma ve yağlama ilkelerinin incelenmesini ve uygulanmasını içerir. Malzemeler temelinde kimya, fizik ve biyoloji ile bağlantılıdır. Metalik veya metalik olmayan malzemeleri incelemek için çeşitli tribolojik test yöntemleri ve aparatlar geliştirilmiştir. Hizmet ömrünü artırmak, güvenilir performans sağlamak, maliyeti ve bakımı azaltmak için üretilip geliştirilen bu testler malzemeler üzerindeki verimliliği artırmak adına çok önemlidir. Yapılan testlerden sonra malzemeler üzerindeki hasarı ve mekanizmaları belirlemek için her zaman belirli bir analiz süreci gerekir. Triboloji uygulamalarının belirli bir doğası yoktur bu sebepten dolayı tek ve evrensel bir test metodu da yoktur. Tribolojik bir sistemde uygulanacak olan doğru test yöntemini seçmek ve kullanmak, aşınma testlerinin genel değerlendirmesini yapabilmek aşınma, sürtünme ve yağlama üçgeni içinde gerçekleştirilip uygulamak son derece önemlidir [11].

2.1. AŞINMA

Aşınma, bağıl hareketlerle birbirine temas eden istenmeyen mekanik etkiler sonucu katı bir yüzeyden malzemenin çıkarılmasıdır. Aşınma malzemeler üzerinde hasara ve belirli ölçüde kütle kaybına neden olur [12].

Malzemelerin sürtünmeyle birlikte yüzeylerinde mekanik etkiler sonucunda meydana gelen aşınma olayı çok sık karşılaşılan kritik makine parçalarının erken hasar oluşumu ve servis ömürlerinin azalmasının yanı sıra, malzemelerin üretim sürecini bile etkileyen bir hasar olmuştur. Mekanik sistemlerde, hareket halindeki parçaların neredeyse tamamında aşınma kaynaklı hasarlar ile karşılaşılabılır. Endüstride kullanılan mekanik sistemlerin aşınması, zamanla bu sistemlerin beklenenden daha kısa sürede servis dışı kalmalarına ve aşınmanın devam etmesiyle birlikte malzemelerin kullanıldığı alanlarda hasar oluşumuna sebep olmaktadır [6–8,13,14].



Şekil 2.1. Tribolojik sistem ve alanları [15].

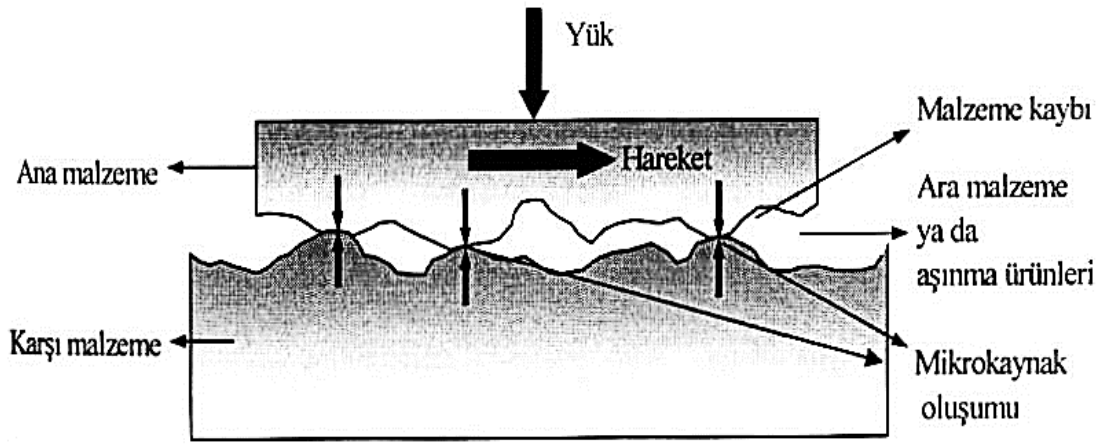
Aşınma konstrüksiyon elemanlarının kullanım dışı kalmalarında ve makineler üzerinde arızalarının meydana gelmesindeki en önemli sebeplerden birisidir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda amaç makineler üzerinde meydana gelen aşınmayı sıfıra

indirmek veya olabildiğince aza indirmek olmuştur. Malzemelerin üzerindeki aşınma miktarı azaldıkça makinaların verimleri ve ömürlerinde artış olmaktadır.

Aşınma mekanizmaları esas olarak uygulanan malzemelere, yükleme koşullarına ve tribosistemde bulunan aşındırıcılara bağlıdır, bu nedenle malzeme seçimi genellikle zor bir iştir ve dikkatli değerlendirme gerektirir. Bunun için, laboratuvar aşınma testleri mevcuttur. Tribolojik çalışmalarla yapılan deneyler sonucu ortaya çıkacak olan aşınma miktarını malzeme veya makine üretimi yapılmadan tespit edip malzemenin gerekli tedbirler doğrultusunda kullanılması amaçlanmaktadır [16].

Malzemeler üzerindeki bağıl hareketler ile meydana gelen kuvvetlerin aşınma sayılabilmesi için isteğimizin dışında bir sürtünme ile yavaş fakat devamlı bir şekilde malzeme üzerinde değişikliklerin meydana gelmesi gerekir.

Bağıl hareketlerle aşınma sonucunda malzeme üzerinde tahribatlar, malzemelerin üzerinde kütle kayıpları, sürtünen yüzeylerin etkisiyle oluşacak olan kuvvetlerle cisimlerin yüzeylerinde ince tabakalar halinde malzeme kaybı meydana gelebilir ve tribolojik özelliklerine göre cisimlerin işlevleri sonlanabilir.



Şekil 2.2. Aşınma mekanizmasının gösterimi [15].

2.1.1. Aşınma Mekanizmaları

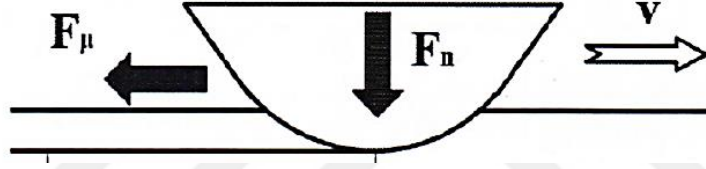
Tüm mekanik bileşenler kullanım sırasında belirli bir süreç içinde aşınmaya bağlı olarak arızalara sebep olur. Aşınmanın sonuçları ve etkileri tamamen ortadan kaldırılamaz ancak kontrol edilebilir ve etkisi azaltılabilir. Malzemeler sürtünme durumunda normal işlevleri dışında davranış gösterebilirler, bu sebeple malzemelerin endüstriyel kullanımı içinde yaşayacağı durumları simüle etmek, çeşitli testler yapmak önemlidir. Endüstride kullanılan malzemelerin ömürlerini, dayanımlarını önceden analiz edip, test etmek ekonomik açıdan hayati önem taşımaktadır. Aynı koşullar altında kullanılan malzemeler birbirinden farklı mekanik özellikleri, kimyasal bileşenleri ve farklı yapısal bileşen sebepleriyle farklı şekillerde aşınabilirler. Bu sebeplerden dolayı mühendislik malzemelerin veya bileşenlerinin ömürlerini hesaplayabilmek için aşınma testleri yapılmalıdır. Yapılan aşınma testleri sayesinde malzemeler üzerinde yorum yapabilme imkanları sağlanmış olur [17].

Aşınma testlerinin yapılmasında birkaç farklı neden vardır. Öncelikle malzemelerin aşınmasında meydana gelen mekanizmalar hakkında temel bilgilere sahip olmak gerekir. Malzeme performansını karakterize etmek ve malzemelerin yapısındaki değişikliklerin aşınma ve sürtünmeyi nasıl etkileyebileceğini belirlenmesi gerekir. Gerçek makine bileşenleri için malzeme seçimine bir kılavuz olarak hizmet içi koşulları simüle etmeyi hedefleyen temel laboratuvar testleri kullanarak malzemelerin aşınma performansını karşılaştırmak gerekir. Tüm bunlar yapılırken gözetilmesi gereken temel kriter ise gerçek yaşam durumlarında performansı belirlemek için saha yollarına başvurmadır [18].

Herhangi bir alan hakkında yeterince bilgi birikimi olmadan ve belirli bir düzen olmadan yapılan çalışmalarda doğru analizlere ulaşmak neredeyse imkansızdır. Bu nedenlerle belirli bilgi seviyesine ulaşıldıktan sonra yapılması gereken en uygun yöntemlerden biri sınıflandırma yapmaktır.

Aşınma gözlemleri ilk olarak MÖ 1. yüzyıla kadar ulaşsa da Leonardo da Vinci'nin 1967 yılında yapmış olduğu çalışmalar kütüphanelerde kaybolmuş ve aşınma çalışmalarının belirli bir düzen içinde sistematik olarak ilerlemesi yakın zamanlarda

başlamıştır. Günümüzde kullanılan modern görüntüleme teknikleriyle pek çok çalışma başarılı bir şekilde yürütülmektedir. Ancak günümüze kadar uzanan bu zaman dilimi içinde pek çok sınıflandırma şemaları geliştirilmiştir. Siebel 1938 yılında kriter kaynağı olarak görelî hareketi seçerek bir sınıflandırma şeması oluşturmuştur. 1956'da ise Archard ve Hirst sınıflandırma kriteri olarak yüzey hasarı ölçөгünü seçmişlerdir. Burwell 1957'de sınıflandırma kriteri olarak aşınma mekanizma mekanizmalarının tipini seçerken, 1976'da Kostetskii yüzey performansının güvenilirliğı ve etkileşim süreçlerinin doğasını kriter olarak seçmiştir. Günümüze kadar geliştirilen aşınma sınıflandırılmalarının sistematik temeli; etkileşimleri belirleyen bağıl harekete, etkileşim sürecinde mekanizmaların yüzeye dair etkileri ve hasar ciddiyeti üzerine kurulmuştur [2].



Şekil 2.3. Sürtünme aşınma tanımı için model [19].

Aşınma etkenlerinin temel mekanizmaları yukarıda belirtilen unsurlar üzerinedir. Fakat, birbirleriyle her ne kadar farklılıklar göstermiş olsalar da aralarındaki ilişkiyi bilmek gerekir. Genel itibariyle aşınmayı meydana getiren tribolojik mekanizmalar şu şekilde sınıflandırılır:

- Abrasif aşınma,
- Adhesif aşınma,
- Korozyon aşınması,
- Erozyon aşınması,
- Yorulma aşınması,
- Darbe aşınması.

Genellikle karmaşık bir yapıya sahip aşınma baskın tek bir sistem üzerinde aşınma mekanizması olabileceğı gibi birden fazla mekanizma içerisinde de yer alabilir. Bu

aşınma mekanizmaları genel ölçüde, %45 oranıyla abrasif aşınma, %20 adhezif aşınma, %7 erozif aşınma, %9 korozyon aşınması ve %19 oranıyla da diğer aşınma türleri endüstride değişen oranlarıyla karşımıza çıkmaktadır [20,21].

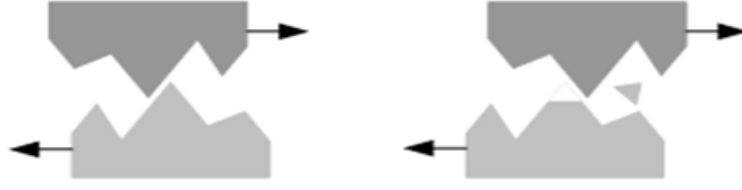
2.1.1.1. Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma, mühendislik malzemeleri için özellikle hareketli sistemlerde kullanılmak üzere üretilen sistemlerde baskın bir arıza türüdür. Malzemenin kademeli arıza ile yüzey deformasyonuna neden olarak hizmet performansını ve ömrünü bozmaktadır. Malzeme üzerinde kayma esnasında ortaya çıkan abrasif aşınma, eşleşen yüzeyden ortaya çıkan çıkıntılar veya tarafından tutulan sert parçacıkların çizilmesinden kaynaklanır ve kayma yönünde paralel çiziklerin varlığı ile karakterize edilip hasarlar oluşur [2,22].

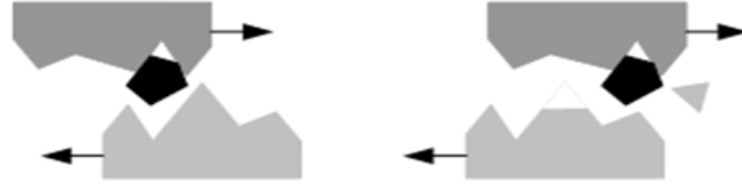
Hasar üzerine daha sert parçacıkların aşınan malzemelere girmesi ve ardından yorulma, kesme ve kırılma gibi olaylarla neticelenen bağıl hareket neden olur. Temel uygulamalarda, aşındırıcının ilerleyen hasarlar esnasında yüksek gerilimli aşınma meydana gelir ve bu eşleşen yüzeylerde meydana gelir. Aşınmaya, temas noktasındaki yoğun gerilimlerin haricinde sünek bileşenlerin yorulması ve sert bileşenlerin çatlamasına neden olur [23].

Abrasif aşınmanın meydana gelmesi için bu parçacıkların veya temas eden yüzeylerden birinin aşındırılan yüzeyden çok daha sert olması gerekir. Abrasif aşınma süreci, kayma yönünde uzanan uzun olukların karakteristik bir yüzey topografisine yol açar. Abrasif aşınma iki genel tür ile sınıflandırılır:

- İki gövdeli aşınma: Aşınma, bir yüzeyin diğer yüzeydeki sert çıkıntılarından kaynaklanır. Kesici takımlar iki cisim arasında bağıl harekete bağlı olarak abrasif aşınmaya neden olur (Şekil 3.5.) [24].
- Üç gövdeli aşınma: İki kayma yüzeyi arasındaki sert parçacıklar aşınmaya neden olur. Bu, diğer aşınma mekanizmaları tarafından üretilen aşınma kalıntılarının neden olduğu aşınma çeşitidir. (Şekil 3.6.) [24].

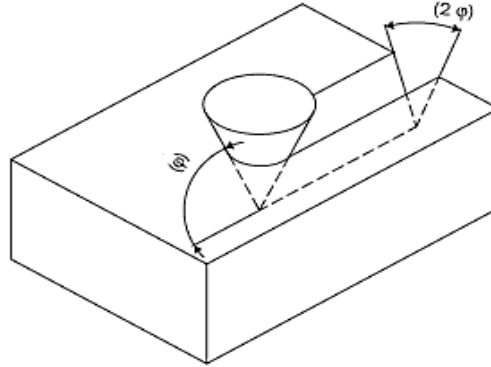


Şekil 2.4. 2 gövdeli aşınma [25].



Şekil 2.5. 3 gövdeli aşınma [25].

Abrasif aşınmanın sınıflandırılmasında hem iki gövdeli aşınma hem de üç gövdeli aşınma işlemlerinde bir tanecik parçacığının köşesini modellemenin basit bir yolu vardır. Daha yumuşak bir malzeme üzerinde sert bir cismin oluk açtığı bir koni düşünülebilir.



Şekil 2.6. Abrasif aşınma modeli [24].

$$V = dx^2 \tan \phi \quad (2.1)$$

- V : Hacim
- x : Oluğun derinliği,
- $\tan \phi$: Koninin kenarının eğimi,
- d : Kayma yer değiştirmesi

2ϕ : girintinin koni açısıdır.

bir $\pi a^2/2$ alanı üzerine bir W yükü uyguladığında,

$$W = 1/2H\pi a^2 = 1/2 H\pi h^2 \cot^2 \theta \quad (2.2)$$

H : Daha yumuşak olan malzemenin sertliğidir.

Abrasif aşınma (Q_a) için aşınma oranı:

$$Q_a = V/d = 2 \tan \theta W / \pi H \quad (2.3)$$

Abrasif aşınma katsayısı $2/\pi (\tan \theta)$ olacaktır [24].

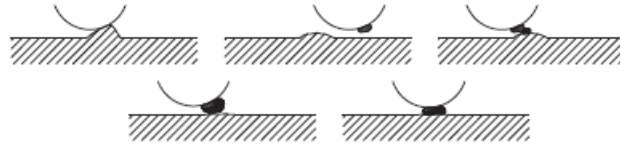
2.1.1.2 Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, birbirine temas eden pürüzlü yüzeylerin aralarında sürtünme ile oluşan yapışma ile daha yumuşak olan pürüzlü yüzeyin uçlarının plastik olarak kesilmesi ardından karşıt yüzeye yapışarak molozlu parçacıklar oluşturmasıdır. Yüksek enerjili yüzeylerde yapışma kuvveti daha fazla olduğu için üzerinde adezif aşınma oranı da yüksek olur. Malzeme yüzeyleri arasındaki parçacık transferleri ve kayıplarının yanı sıra adhezif aşınma genellikle belirli bir süreç içerisinde gerçekleşir:

- Yüzey tabakalarının adsorpsiyonu,
- Yüzey altı plastik deformasyon,
- Mikroyapısal olarak faz dönüşümleri,
- Yüzey tabakası oluşumu.

Yapışma, transfer ve plastik deformasyon süreçlerinden sonra adhezif aşınma tarafından oluşan aşınma partikülleri düz yuvarlak bir morfoloji gösterir. En sık rastlanan aşınma türlerinden biri adhezif aşınma olmasına rağmen malzeme üzerindeki hasarı hızlandırıcı etkide bulunmaz [24,26].

Aşınma gerçekleşirken iki yüzey arasında üçüncü bir cisim meydana gelmektedir. Aşınma esnasında kırılan parçalar yüzeylerin arasında serbest kalabileceği gibi malzemelerin birine bağlı olarak da taşınabilirler. Aşınma süreci ilk olarak oluşum, sonrasında büyüme ve adhezyon noktalarının kırılması ile gerçekleşir. Adhezif aşınmanın diğer aşınmalara göre en temel özelliği malzemenin bir yüzeyinden bir başka yüzeyine malzeme transferi meydana getirmesidir. Transfer işleyişi temas halindeki katı malzemelerin yüzeylerinde oluşan lokal bağlanmalardan kaynaklanmaktadır [20,21,24,26].



Şekil 2.7. Adhezif aşınma sırasında plastik deformasyon modeli [24].

Hasarlı yüzeyler, malzeme transferinin açık belirtilerini gösterir. Temas eden yüzeylerin yapışma eğiliminin, iki malzemenin yüzey atomları arasındaki çekici kuvvetlerden kaynaklandığına dayanarak, bu tip bir aşınma, yüzey bozulmasının ana mekanizması olarak fiziksel etkileşim ile ilişkilendirilmektedir [2].

Adhezif aşınma, nicel bir ifade olarak ilk kez 20 yıldan daha uzun bir zaman önce Archard tarafından bahsedilmiştir. Archard, iki yüzey arasındaki bir bağlantının bir aşınma parçacığının oluşumuna yol açma olasılığını temsil etmek için, boyutsuz bir k sabitini içeren aşınma süreci için bir model kullanmıştır [12].

$$V = \frac{kLx}{3p} \quad (2.4)$$

- L : Normal yük,
- p : Malzemenin yüzeydeki penetrasyon sertliği,
- V : Aşınma hacmi,
- x : Aşınma mesafesi,
- k : Malzeme sabiti.

Adhesif aşınmanın gerçekleştiği durumlarda, onarım, tamir, bakım gibi işlemlerin yapıldığı zamanlarda sökülüp takılması kolay olan parçalar diğerlerine göre daha yumuşak seçilmesi tercih edilir. Örnek olarak, bir dişli sistemde pinyon dişli ana dişliye göre daha yumuşak seçilir. Kam mekanizmalarında, yataklarda, dişlilerde, demiryollarında ray-teker arasındaki sistemlerde adhesif aşınma sıkça görülür. Yüzey üzerindeki yükler ve malzemelerin özelliklerinin yanı sıra içinde bulunduğu ortamlar da aşınma miktarını etkiler. Karbondioksitli ortamlarda meydana gelen aşınmalar azotlu ortamdaki aşınmaya göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Bağlı hıza, normal kuvvete, yüzeylerin sertliğine bağlı olan adhezif aşınma malzemelerin yüzeyindeki oksit ve nem tabakasının etkisindedir. Genel olarak benzer veya kolay alaşım yapılabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir. Bu aşınma türünde yağlanmanın etkisi ciddi anlamda fazladır, sınır bölgeleri içindeki sürtünme yüzeylerinde bulunan yağ tabakaları aşınmayı ciddi derecede önler [20,26].

2.1.1.3. Korozyon Aşınması

Birbirleriyle küçük temas içerisinde bulunan ve bu temas noktaları üzerinde kayma, yuvarlanma gibi etkilerle plastik deformasyonlara neden olan kimyasal etki türlerine korozyon denir. Malzemeler üzerindeki deformasyon etkilerine bağlı olarak kristal kafeslerde bozulmalar meydana gelmektedir. Bozulan bu kristal yapılar sonucu, yüzey ortamda bulunan oksijenle aktifleşerek oksitlenir. Bu oluşan oksitler kimyasal aktifleşmenin devam etmesiyle birlikte oksit tabakalar oluşturur. Malzemelerin harekete devam etmesiyle birlikte oluşan oksit tabakalar kırılmakta ve parçalanmaktadır, bu parçalanmalar sonucu ise aşınma meydana gelmektedir. Sıcaklık artışı, sürtünme nedeniyle malzemelerin üzerinden kalkan koruyucu oksit filmleri oksidasyonu destekleyen parametreler içerisindedir. Korozyon aşınmasının oluşabilmesi için oksitlenme ve sürtünme hareketinin meydana gelmesi gerekir [20,25,27].

Birçok malzeme korozyonu yavaşlatan ve durduran bir yüzey tabakası oluşturur ancak aşınma nedeniyle oluşan tabaka tahribe uğrarsa malzeme korozyona devam eder. Malzemeler üzerinde korozyon aşınmasını engellemek veya azaltabilmek için çeşitli işlemler yapılır. Örneğin polimerik malzeme kimyasallar aşındırıcılara karşı dayanımı

yüksektir bu sebepten dolayı malzemelerin yüzey kaplamalarında sıklıkla kullanılır. Aşınma meydana gelirken sürtünme de artırıcı veya azaltıcı etkilere sahiptir. Ancak aşınma faktörüyle sürtünme arasında doğrusal bir ilişki yoktur. Bazı conta dolgu malzemeleri yüksek sürtünme katsayılarına sahipken aşınma oranları aynı derecede yüksek değildir [28,29].

Belirli koşullar altında, bir tribolojik temasın kimyasal ve mekanik bozunma hızı birbirleriyle bağımsız olarak düşünülemez yani korozyon yokluğunda aşınma direnci veya sürtünme yokluğunda korozyon direnci hakkında tahmin edilemez [30].

Metal ve alaşımlarının korozyonu, mühendislik malzemeleri ve bileşenleri üzerinde günümüzde zamana bağlı olarak en çok arızalanmalara neden olan aşınma türlerinden biridir. Arıza mekanizmaları meydana geldiği zaman mühendislik ve sanayi alanında büyük maliyet tablolarına sebep olabilir. Korozif aşınma literatür kaynakları içerisinde aynı zamanda tribo-korozyon olarak da adlandırılabilir [31].

Korozif aşınma endüstride birden fazla tipte sıklıkla karşılaşılan bir aşınma türüdür.

Çizelge 2.1. Korozif aşınma çeşitleri [31].

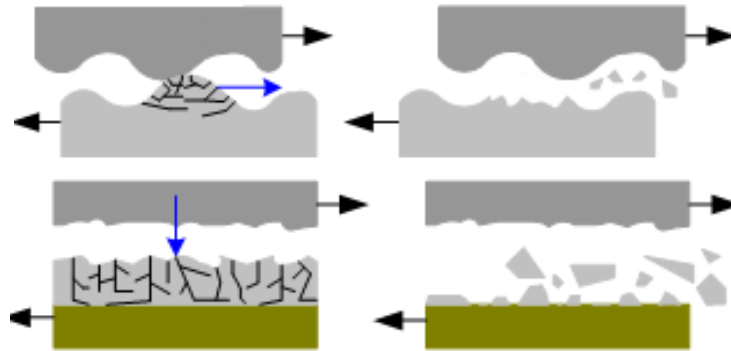
| | |
|----------------------------|--|
| Erozyon-Korozyon | Sıvı bir ortamda katı parçacıkların çarpmasıyla oluşan bir tür aşınmadır. |
| Kavitasyon-Korozyon | Akışkan bir sıvıda, sıvının basıncının buhar basıncının altında olduğu durumlarda oluşan buhar kabarcıklarının yüksek hava basıncı içinde hızla çökmesiyle yüzeye ürettiği şok dalgalarının verdiği zarar. |
| Abrazif-Korozyon | Abrazif aşınmanın olduğu bir ortamda elektrokimyasal reaksiyonların aynı anda gerçekleştiği aşınma tipidir. |
| Yorulma aşınması- Korozyon | Sürtünmeli iki yüzey arasında döngüsel aşınma gerilimi veya küçük salınımın neden olduğu yüzey hasarı. |

Korozyon ve aşınma aynı yüzey arasında meydana geldiğinde, yüzeydeki hasar önemli derecede artabilir. Bu iki süreç karşılıklı olarak bir araya geldiklerinde malzeme kaybı ve korozyonun neden olduğu kayıpların oranları artmaktadır [31].

Bu aşınma formuna ilişkin nicel bilgi kolayca mevcut değildir, çünkü aşınma hızı, korozyon hızı, aşındırıcı ürünün uzaklaştırılma hızı, kayma yüzeylerinin geometrisi gibi pek çok faktör tarafından yönetilir [12].

2.1.1.4. Yorulma Aşınması

Sürtünme esnasında döngüsel yüklenmeler ile malzemelerin üzerinde yorulma aşınması meydana gelmektedir. Metal malzeme üzerine uygulanan yük eğer yorulma direncinden fazla olursa etkisi de bir o kadar fazla olur. Yorulma olayı malzeme yüzeyinden başlayıp alt yüzeylere doğru yayılmaktadır. Bu yayılmalar sırasında malzeme üzerine titreşimli yüklemelere veya sürtünme elemanlarının gerilmelere maruz kalarak belirli bölgelerde mikro çatlaklar ve küçük çukurcuklar oluşturmaktadır. Malzeme parçacıklarının yüzeyinde oluşan küçük tahriplerin deleminasyonlarıyla ve birbirinden ayrılmasıyla çatlaklar oluşur. Malzeme yüzeylerindeki gerilmeler altında oluşan bu çukurcuklar, çatlakların ilerlemesiyle malzeme kaybının sonucunda oluşur. Malzemeler üzerinde oluşan mekanik etkileşimler ile tribolojik zorlamalar konuma, zamana ve büyüklüğe bağlı olarak değişken olduklarından, yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülmektedir. Bu süreçler döngüsel yükler altında gerçekleşir. Bu döngüler sonucu oluşan tekrarlı yük sayısının yüksek veya az oluşuna göre çevrimin yüksek veya düşük bir çevrim içinde gerçekleştiği hakkında yorumlar yapabiliriz [20,25,32].



Şekil 2.8. Yorulma aşınması modeli [25].

Malzeme yüzeylerinin hemen altındaki kayma gerilmeleri, malzemelerin yüzeyinde titreşim sonucu meydana gelen herz basıncının etkisiyle oluşmaktadır. Malzemelerdeki değişken zorlama da yüzeylerde yorulma olayını başlatmaktadır. Önce oluşan küçük boşluklar dislokasyonlarla birlikte ilerleyerek gerilmelerin son noktasında çukurcuklar oluşturmaktadır [25].

Bir çift eleman sürtünme yükü altında temas halindeyken döngüsel gerilme ve bağlı yer değiştirme ile temas yüzeyleri boyunca zorlanmalara maruz kalabilir. Sürtünme sırasında yorulma miktarı üçte biri altında kalabilir. Sürtünme yoğunluğu oluşan çatlakların ve yayılan temas kenarındaki gerilmelerin mukavemetini azaltır [33,34].

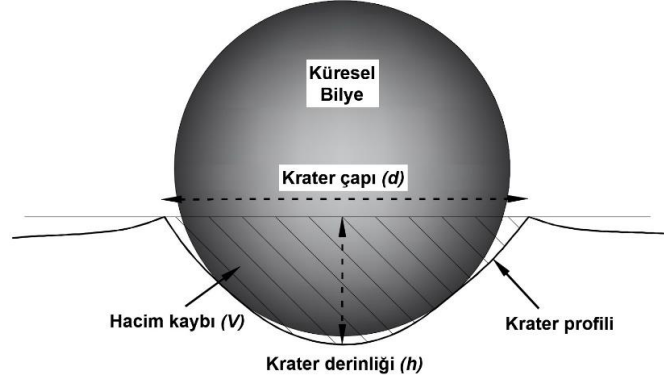
Yorulma, kalıcı hasar oluşana kadar temas bölgesinde döngüsel olarak tekrarlanan gerilimi içerir. Genellikle, sıradan malzemelerin iç yapısı mükemmel olmadığı için, tane sınırlarının ve boşluklarının gerilme konsantrasyon bölgeleri olarak hareket etmekte ve çatlakları başlatmakta tekrarlanan gerilim altında yayılana kadar devam etmektedir. Madde kristalografik olarak neredeyse mükemmel olsa bile, malzeme ilk gerilim altında deforme olduğunda ve deformasyon sonrası gerilim döngülerinde büyüdüğünde dislokasyonlar ortaya çıkmaktadır [33,35].

Plastik deformasyona karşı daha yüksek direnç, ancak zayıf süneklik her zaman yorulma aşınma direncini düşürür. Deleminasyon yoluyla oluşan çatlaklar genel olarak dişli çarklarda, kam mekanizmalarında, rulmanlı yataklarda yani genel olarak yuvarlanma hareketi yapan parçacıklar üzerinde gerçekleşir [25,33,35].

2.1.1.5. Darbe Aşınması

Darbe aşınması, başka bir gövde tarafından tekrarlı temasa maruz bırakılarak, çeşitli şekillerde çekiçleme yöntemi ile yüzey üzerinde oluşturduğu aşınmadır. Malzemenin yüzeyinde tekrarlı darbeler sonucunda gerilmeler oluşmaktadır. Malzemenin özelliğine göre farklı tepkiler gösterebilirler örneğin gevrek malzemeler bu temas bölgelerinde kırılmaya duyarlıdır. Tekrarlanan darbelerin etkileriyle malzemelerin üzerindeki hasarlar mekanik sistemin dayanıklılığının bozulmasına sebebiyet

verebilir. Çarpma etkisi sonucu malzeme üzerinden mikron seviyede parçacık uzaklaştırdığı görülmektedir [36–38].



Şekil 2.9. Darbe aşınma etkisi [37].

Literatür çalışmaları kapsamında 1979 yılında ilk kez Engel darbeli aşınma üzerinde çalışmalar yürütmüştür. Sonraki yıllarda Tabor ise darbeli aşınmayı dört aşamaya ayırmıştır. Temas ettiği yüzeylerde malzemenin darbe etkisiyle elastik deformasyon oluşmaktadır. İkinci aşamada malzemeler arasındaki temas arttıkça elastoplastik deformasyon meydana gelmektedir. Bu aşamaya gelindiğinde üzerine etki eden kuvvetler sonucu darbe elemanının kinetik enerjisi tükenir. Bu da yüzey gerilmelerinin daha da artmasına neden olur. Üçüncü aşamada kinetik enerjinin tükenmesi ve gerilmelerin artmasıyla birlikte elastoplastik deformasyonun plastik deformasyona dönüşümü gerçekleşir. Bu aşamada malzemelerin yüzeylerinde ve yüzey altı parçalarında mikroyapılar değişmektedir. Darbe elemanı ile yüzey arasındaki elastik gerilmelerin serbest kalmasıyla birlikte son aşamada gerçekleşmiş olur [37,39,40].

Darbelerin neden olduğu hasarlar yüzey üzerinde plastik deformasyon ve aşınma bozulması olarak iki türde etkiye sebebiyet verir. Aşınma sonucunda ortaya çıkabilecek maliyetli işlemleri azaltabilmek ve malzemelerin kullanım verimlerini artırabilmek için yüzey koruma tedbirlerinin alınması gerekmektedir. Aşınma direnci makine teçhizatlarının ömürlerini uzatmak için önemlidir [38,41].

Darbe aşınması, tekrarlanan darbe etkileri ile katı yüzeyin yorulması olarak tanımlanabilir ve mekanik bir sistemin dayanıklılık kaybına yol açabilir. Bu aşınma

mekanizması zamanla hasarlara neden olur servis ömrünü kısaltır. Etkili yüzey koruma önlemlerinin uygulanması, parça değişimi, bakım, onarım gibi maliyet gerektiren işlemleri azaltır. Böylece parçaların aşınmaya ve darbeye karşı dirençlerini artırır [42].

Darbeli aşınma, içten yanmalı motorlarda, valf kafaları ve yuvalarında, delme makinelerinin parçalarında, nükleer basınçlı su reaktörlerinin boru bağlantı parçaları gibi tekrarlanan darbe etkilerine maruz kalan makine parçalarında meydana gelebilmektedir [42].

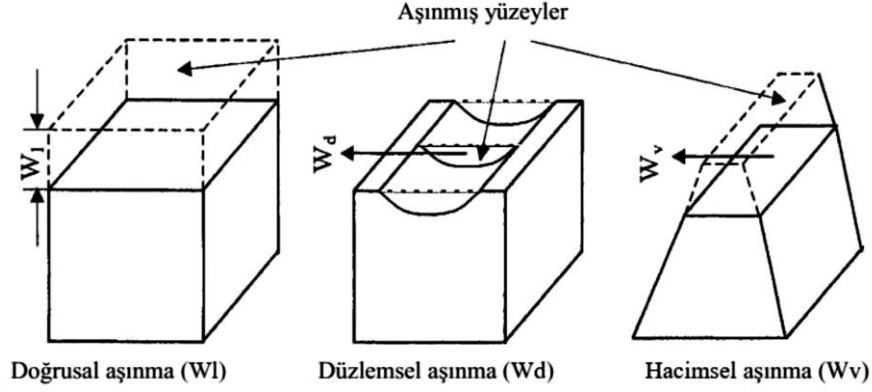
Darbeli aşınma test cihazları ufalama işlemleri için yaygın olarak kullanılan bir türdür. Rotor çubuğu ile darbe kuvvetini oluşturacak olan çekiç arasındaki kuvvet, tasarım için çok önemli bir parametredir. Darbeli aşındırma işlemi çok karmaşık dinamik bir işlemdir, bu nedenle darbe kuvvetinin deneysel olarak araştırılması zordur [43].

2.1.2. Aşınma Ölçüm Metotları

Endüstride kullanılan malzemelerin kullanım taleplerinin biri de servis ömürleridir. Her ne kadar makine parçalarının aşınmaya karşı dayanımları artarsa kullanılan malzemelerin ömürleri de o kadar artar. Ve bakım, onarım gibi bazı durumlarda ciddi maliyet tablolarını önemli ölçüde ortadan kaldırabilir. Bu sebepten dolayı üreticiler malzemelerin özelliklerini seçerken aşınmaya karşı dayanımları yüksek olan ürünleri seçmektedir. Malzemelerin dayanımlarını ve aşınmaya karşı dirençlerini öğrenmek için laboratuvarlarda çeşitli deneysel testler yapılmaktadır. Yapılan testler üretimde kullanılacak olan malzemenin basit geometrik şekilleri üzerinde, fazla mafsala gerek duyulmayan parçalar üzerinde yapılır. Testler sonucu makine üretiminden önce gerekli dirence sahip malzemelerin oluşturulabilmesi için üzerinde dayanım artırıcı çeşitli işlemler yapılmaktadır. Yapılan bu testlerin temelinde hedeflenen kıyas işlemlerini belirli ölçüm metotları içerisinde yapılmaktadır. Bu ölçüm metotlarının en çok kullanılanları ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişimi ve radyoizotop metodudur [44,45].

Esasında aşınmanın tanımı malzeme yüzeyi üzerinde kayıp olarak tanımlandığı için yüzey üzerinde birbirleri üzerindeki kayıpları ya bir parçadan ya da her iki parça

üzerinde hacim, ağırlık kaybı esas alınarak yapılmaktadır. Aşınma sonuçları doğrudan veya dolaylı olarak yapılan ölçümlerle belirlenir [46].



Şekil 2.10. Doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınma şemaları [46].

Aşınma miktarının ölçülmesi esnasında her ölçüm metodunda olduğu gibi yeterli hassasiyet, rahat ve pratik uygulanabilirlik, ekonomik ve standartlaştırılmış ölçümler yapılmak istenir [44,47].

2.1.2.1. Ağırlık Kaybı Metodu

Ölçülen büyüklüğün alet hassasiyetinin uyumlu olması durumunda en çok kullanılan ölçüm yöntemlerinden biri ağırlık kaybı metodudur. Basit bir sistem içerisinde ağırlık kaybı çok hassas, duyarlı bir terazide 10⁻³ / 10⁻⁴ gram aralığı içinde ölçülmektedir. Aşınma miktarı gram veya miligram ile ifade edilmekte olup, sürtünme yoluna karşılık gelen birim ise (mg/km) veya (g/km) cinsinde, eğer birim alanı içerisinde değerlendirilecekse (g/cm²) şeklinde ifade edilir. Malzemelerin yoğunluğuna ve numunelerin üzerine binen yük hesaba katılarak da hacimsel olarak aşınma miktarı belirlenerek hacimsel kaybindan ağırlık kaybı hesaplanabilir [44,45].

$$Q_a = \frac{G}{d.M.x} (\text{mm}^3.N^{-1}.m^{-1}); \quad (2.5)$$

Q_a : Aşınma oranı (mm³.N⁻¹.m⁻¹),

G : Ağırlık kaybı (mg),

M : Yükleme ağırlığı (N),

- x : Aşınma yolu (m),
d : Yoğunluk (gr/cm³).

Ağırlık farkını ölçmek için kullanılan en önemli ölçüm yöntemi tartıdır. Aşınma miktarı malzemelerin tek bir sayı altında tartılması ile elde edilir. Bu tartım işlemi hassas terazilerde yapılmaktadır. Bu ölçüm tekniğinde malzemenin temiz olması ve üzerinde herhangi bir tortunun bulunmaması son derece önemlidir. Yine ağırlık yöntemi içerisinde tartının yanında radyoaktif izleyiciler kullanılarak da ağırlık kaybı ölçülüp değerlendirilebilir. Bu ölçüm yöntemi aşınma gerçekleşmeden önce veya sonra değil direkt aşınmanın gerçekleştiği an yapılması gerekmektedir [48].

Bu teknik genellikle analitik kimyada yaygın olarak kullanılır. Genel itibarı ile, aşınma işlemi yapılmadan önce ve sonra terazi kefesine yerleştirilen bir kap içinde ölçülen sonuçların not edilip arasındaki farkı bularak ağırlık kaybı aşınmasını bulma yöntemidir. Bu yaklaşım, nispeten düşük doğruluk gereksinimleri için iyidir, ancak çok daha zorlu ölçümler için ideal değildir. Çok hassasiyet içeren bir aşınma ölçüm metodu olduğu için özellikle modern elektronik analitik terazilerde zamansal denge kayması gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Bu test işlemlerinin daha doğru ölçüm sonucu verebilmesi için biri test maddesini doldurması için diğeri ise referans görevi amacıyla iki benzer kap içerisinde gerçekleştirilir [48,49].



Şekil 2.11. Hassas elektronik tartı [49].

- a) Referans kabı terazi kefesine yerleştirilir ve sonuç not edilir (ref₁).
- b) Boş kap (test maddesi yüklenecek) teraziye konur ve sonuç not edilir (test₁).
- c) Kap test maddesi ile doldurulur ve terazi sonucu not edilir (test₂).
- d) Referans kabı tekrar tepsiye konur ve sonuç not edilir (ref₂).

$$W = (\text{test}_2 - \text{test}_1) - (\text{ref}_2 - \text{ref}_1) \quad (2.6)$$

Bu formülasyon ile sapma ortadan kalkar ve daha iyi bir tartım sonucu vermektedir [49].

2.1.2.2. Kalınlık Farkı Metodu

Aşınma miktarları, aşınma esnasında oluşabilecek değişikliklerin ölçülmesi ve aşınma gerçekleşmeden önceki değeriyle kıyaslanması sonucu bulunur. Kalınlık farkı yöntemi ise, başlangıçtaki hacimsel değeri ile aşınma gerçekleştikten sonraki hacimsel değeri arasındaki karşılaştırmadır. Çok hassas ölçüm aletlerinin +1 µm duyarlılıkta kalınlık değerleri ölçülür. Bu ölçüm tekniği hacimsel olarak meydana gelen değişimleri net bir şekilde ifade ederken, malzemenin hangi oranda, hangi açıyla aşınmaya uğradığını net bir şekilde ifade edemez [45,49].

2.1.2.3. İz Değişimi Metodu

Malzeme yüzeyinde sürtünmeden kaynaklı plastik deformasyon sonucu oluşan belirli bir iz geometrisi oluşturur. İz değişim metodu, sürtünmeden önce ve sonra yüzey profili değişikliklerinin doğrudan ölçülmesiyle aşınma kaybını belirlemektir. İz bırakıcı uygulamalarında en çok kullanılan aletler genellikle Brinell ve Vickers sertlik ölçme uçlarıdır. İz değişimi sonrası oluşan çizgi değişimleri son olarak çok hassas mikroskoplar vasıtasıyla ölçülüp değerlendirilmektedir [44,48].

2.1.2.4. Radyoizotop Metodu

Malzemenin yüzeyindeki sürtünme bölgelerinin nötron, proton veya yüklü bir α parçacıklarıyla etkileşim içine girmesiyle radyoaktif hale gelmesiyle oluşan bir ölçüm metodudur. Sistemin çalışma koşullarını değiştirmeden ölçüm yapabilmesi ve çok hassas ölçümler yapabilmesi bakımından avantajlı yönleri olduğu gibi ekonomik olarak cazip olmaması nedeniyle yalnızca özel amaçlar için kullanılan bir metottur [46].

2.1.2.5. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu (FEM), bilgisayar destekli çözüm uyarlamaları kullanılarak matris formunda oluşturulan denklemlerin kullanılmasıyla elde edilen bir yöntemdir. Çözüme ulaşılması güç olan problemlerin daha basit formlara indirgeyerek, her bir ayrımın kendi içinde tam bir çözüm sağlandığı bir tekniktir. 1960 yılında Clough tarafından ilk kez ortaya atılan bu terim uçakların yapısal analizlerindeki incelemelere ve geliştirilmesine dayanmaktadır [50].

2.2. SONLU ELEMANLAR METODU

2.2.1. Sonlu Elemanlar

Mühendislik problemlerinde belirli yaklaşımlar üzerine sayısal çözüm arayan yöntemlere sonlu elemanlar metodu (FEM) denir. Çözülmesi istenen mühendislik problemlerinin bölgeleri, birden fazla alt bölgelerle sınıflandırılır ve her alt bölge içinde aranan fonksiyonların ifadeleri polinom olacak şekilde ayarlanıp seçilir. İlk amaç belirlenen işlemler ile her alt bölgede polinom olarak kabul edilen çözümün katsayısını belirlemektir. Genel olarak bu çözüm yönteminde karşılaşılan problemler, başlangıç değer problemleri ve sınır değer problemlerini hesaplayıp belirtmektir [51].

2.2.1.1 Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları

Geometrik şekil bakımından karmaşık olan şekillerin incelenmesinde FEM çözüm yolları üretebilmesi bakımından çok kullanışlıdır. Çözüm bölgeleri kendi içinde alt bölgelere ayrılabilir ve değişik boyutlarda çözüm üretme imkânı sağlayabilir. Hassas olması gereken alt bölgeler için gerekli hassas ölçümler ve hesaplamalar uygulanabilir. Bu yöntemle hem fiziksel olarak hem de matematiksel hesap olarak üzerinde incelemeler yapılabilir. Sonlu elemanlar yöntemiyle sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra basit parametre değişimleri ve sınır koşulları değişimleriyle basit bir şekilde istenen özelliklere indirgenebilir [51,52].

2.2.1.2. Sonlu Elemanlar Motodunun Dezavantajları

Sistem üzerindeki problemlerin çözülmesinde bazı istenen hesaplamaların yapılması zor olabilir. Elde edilen sonuçların doğrulukları sistem hesaplamaları sonucu yazılan denklemlerin doğruluğuyla eş değerdir. Sonuç verilerinin doğrulukları pratik uygulamalar sonucu elde edilen gerçek veriler ile paralel bir bağlantıda olmalıdır. Bu yöntemde elde edilecek verilerin sonuçları önceden tahmin edilip analizler bunun doğrultusu ile yapılmalıdır [51,52].

2.2.2. Sonlu Elemanlar Metodunun Çözüm Adımları

Esas olarak sonlu elemanlar yönteminde analizler dört temel bölümden oluşmaktadır. [52].

2.2.2.1. Başlangıç Kararları

Bu aşamada malzemeler üzerinde veya mühendislik problemlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu belirlenme hazırlandıktan sonra hangi analizler üzerinde yapılacağı ve genel sınır hesaplamaları yapılmaktadır. Bu sınırlar belirlendikten sonra eksen üzerinde hangi ölçekte olması gerektiği belirlenir. Problem çözümü için bu adımlara karar verildikten sonra uygun olan eleman tipleri seçilmelidir [51,52].

2.2.2.2. Ön İşlemler

Mühendislik problemine göre gereken eleman tipleri ve malzemeler tanımlanmalıdır. Seçilen malzemelerin problem üzerinde uygunluğu çok önemlidir ve bu aşamada bu net bir şekilde belirlenir. Ardından model geometrisi bu aşamada oluşturulur veya bir farklı program üzerinde oluşturulan model analiz edilmek üzere aktarılır. Geometrik model oluşturulduktan sonra modelin üzerinde ağ örgüsü (mesh) ataması gerçekleştirilir. Bu aşama son derece önemlidir çünkü yapılacak olan analizin detayları ve hassaslığı bu ağ örgüsünün seçimine bağlıdır [51,52].

2.2.2.3. Çözüm Yolları

Bu aşama analiz sınır koşullarının belirlendiği aşamadır. Hangi ekseninde nasıl koşullar altında yapılacağı sınır değerleri; hız, kuvvet, vektörel yön, yer değiştirme, kayma gibi değerler girilir. Belirlenen tüm sınırlar ve hesaplamalar ile hazırlanan model bilgisayar yardımıyla çözdürülür [51,52].

2.2.2.4. Analiz Sonrası Verilerin İncelenmesi

Analizin sona ermesiyle birlikte bu aşamada çıkan sayısal sonuçlar ve şekil geometrisi yorumlanır. Geometrinin uygun bir şekilde belirlenen kriterler altında incelenip raporlandığı aşamadır [51,52].

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

3.1. AŞINMA LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Yapılan bir çalışmada, bilye dönüş hızının mikro abrasif aşınma testi üzerindeki etkisi hem aşınma katsayısı hem de aşındırıcı parçacıkların davranışı açısından analiz edilmiştir. Testler, AISI 1020 düşük karbonlu çelikten yapılmış numuneler üzerinde sabit bilya konfigürasyonuna sahip bir ekipmanda gerçekleştirilmiştir. Su verilmiş ve temperlenmiş AISI 52100 çelikten yapılmış ve 40, 80 ve 150 rpm dönüş hızları seçilmiştir. 0,2 ve 0,4 N olmak üzere iki normal yük değeri kullanılmıştır. Aşındırıcı parçacıklar silikon karbürden yapılmıştır (SiC), ortalama partikül boyutu 6,6 µm'dir. Deneyler farklı konsantrasyonlarda setler halinde yapılmıştır. Daha düşük bir ortalama parçacık boyutu değeri (2,1 µm) ile ek testler gerçekleştirilmiştir. Aşınma katsayıları, dönme hızının bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Sonuçlar, dönme hızındaki artışla birlikte numune yüzeyinde hapsolmuş aşındırıcı parçacıkların sayısındaki artış ve aşınma katsayısındaki azalma eğilimini göstermektedir [53].

Yaygın olarak kullanılan bilyalı krater konfigürasyonlu mikro aşınma testleri ile yaygın değişkenlik kaynakları incelenmiştir ve test koşulları, silikon karbürü aşındırıcı olarak ifade eden BS EN 1071-6: 2007 standardı ile parametrelendirilmiştir. Bununla birlikte, diğer aşındırıcıların kullanılması mümkün kılınmıştır. Bu çalışmada, bilyeli krater aşınma testleri, üç farklı malzemeden oluşan dört farklı aşındırıcı parçacık kullanılarak gerçekleştirilmiştir: elmas, alüminyum ve silisyum karbür. Testler, bir çelik plaka üzerinde aynı koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Her bir aşındırıcı için, ilk aşınma olgusunun anlaşılmasına olanak sağlayan beş farklı test süresi kullanılmıştır. Aşındırıcı parçacıkların bileşimi ve şekli SEM ve EDS ile incelenmiştir. Her birinin neden olduğu aşınma etkilerini anlamak için aşınma alanları optik ve elektronik mikroskopu ile gözlenmiştir. Aşınma izi geometrisi ve oluklar

analiz edilip karşılaştırmışlardır. Neredeyse her durum için aşınma katsayısı hesaplanmıştır. Elmas parçacıklarının dairesel aşınma izleri ürettiği görülmüştür. Farklı silisyum karbür parçacıkları, farklı parçacık şekli ve boyut dağılımının bir sonucu olarak farklı sonuçlar elde edilmiştir [54].

Çalışmalarında, farklı parametrelerin etkilerini tek başına incelemek için çok basit deneyler kullanan Khruschev ve Babichev böylelikle, saf metaller ve tavllanmış alaşımlar, aşındırıcı kağıtla aşındığında aşınma oranının sertlikleriyle orantılı olduğunu göstermiştir. Bu davranış, aşındırıcı tarafından yapılan her çizimin belirli bir fraksiyonunun (aşınma etkinliği) enkaz olarak kaldırıldığı varsayılarak rasyonelleştirmişler. Bununla birlikte, ısıl işlem görmüş alaşımlar, sertliklerinden beklenenden daha fazla aşınırlar, bu da sertliğin, bu kadar basit koşullar altında bile, abrasif aşınmanın tek belirleyicisi olmadığını göstermiştir. Aşınma direnci, işlenerek sertleştirilmiş yüzeyin sertliğiyle daha iyi ilişkilidir, ancak diğer etkiler de önemlidir. Kırılgan malzemelerin davranışının genel bir abrasif aşınma direnci şemasına entegre edilmesini sağlar. Kırılgan malzemeler, mikro çatlama ve kesme yoluyla aşınabilir, bu da “aşınma etkinliğinin” birliğin üzerine çıkmasına izin verir: aşınma hacmi, çizik hacminden daha büyüktür. Süneklikten kırılma aşınma davranışına geçiş, kırılma tokluğuna ve ayrıca mikro çatlakların yoğunluğuna göre temas noktalarındaki gerilme alanlarının boyutuna bağlıdır [23].

Yaptıkları çalışmada darbeli aşınma testleri sırasında zirkonya ile sertleştirilmiş alüminyum parçacık takviyeli demir kompozit malzemelerin davranışlarına ilişkin araştırma yapmışlardır. Numuneler vakumlu sinterleme ile üretilmiş olup karşılaştırmayı malzeme olarak Fe45 kullanılarak bir MLD-10 Darbeli Aşınma Donanımı üzerinde test etmişlerdir. Sonuçlar, ZTA p / Fe45 kompozitlerinin SiO₂ aşındırıcıların etkisine karşı ZTA parçacıklarının engelleyici rolü nedeniyle Fe45 matris malzemesinden daha yüksek darbe aşınma direncine sahip olduğunu göstermektedir. ZTA p / Fe45 kompozitlerinin aşınma direnci, ZTA'nın partikül boyutunun artmasıyla önce artıp sonra azaldığı görülmüştür, ZTA partiküllerinin ortalama boyutları ile SiO₂ arasındaki oran en iyi performansa ulaşmış ve aşındırıcılar 0,5'e yaklaşmıştır. Fe45 matris malzemesinin aşınma mekanizmaları temel olarak mikro sürme, darbeli plastik deformasyon ve yorgunluğun neden olduğu pullanma

olarak gözlemlenmiştir. ZTA partiküllerinin kırılma süreci ve mekanizması, alüminyum ve zirkonya arasındaki faz sınırları boyunca tercihen çekirdeklenmeyi ve çoğalmayı, çift fazlı karışım bölgesinde mikro soyulmaya ve sonunda alüminyum taneciklerinin delaminasyonuna neden olduğunu analizlemişlerdir [55].

Çeliğin aşınma direncini artırmak için, yeni bir Nb katkılı güçlendirilmiş düşük alaşımlı aşınmaya dayanıklı çelik geliştirmişlerdir ve üç gövdeli darbeli aşındırıcının aşınma davranışı sistematik olarak 0,5J, 2,5J darbe enerjisi altında incelenmiştir. Çeliğin mekanik özelliklerini, mikro yapı gelişimini ve aşınma mekanizmasını karakterize etmek için çekme testi, taramalı elektron mikroskobu (SEM), transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve nano indentasyon kullanmışlardır. Deneysel sonuçlar, daha küçük boyutlu çita martensitli NB05 (ağırlıkça %0.05 -Nb) çeliğinin NB0 (ağırlıkça %0 – Nb) çeliğe göre daha yüksek mukavemet performansına ve daha iyi darbe aşınma direncine sahip olduğunu göstermektedir. Üç gövdeli darbeli abrasif aşınma testleri sırasında, aşınma oranı, her iki çelik için daha yüksek darbe enerjisi altında daha düşük olduğunu gözlemlenmiş ve NB05 çeliği, NB0'dan daha az aşınma oranına sahip olmuştur. Aşınma katmanının ana güçlendirme mekanizmaları, yeni oluşan martensit ikizleri, niyobyum çökeltileri, yüksek yoğunluklu dislokasyonlar ve NB05 çeliği için nano ölçekli tanelerin oluşumudur [56].

Cai yaptıkları çalışmada, yeni bir darbe aşınma test cihazı ile farklı destek arayüzleri altında ince duvarlı boruların darbe aşındırma ile aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Bir tüp / silindirik temas modeli kullanılmış ve çeşitli açılarda V-şekilli armatürler uygulamışlardır. Test malzemeleri olarak çeşitli uzunluklarda 304 paslanmaz çelik borular ve bir GCr15 rulmanlı çelik makara kullanmışlardır. Arayüz deformasyonu, darbe enerjisi absorpsiyonu ve hasar davranışı, destek açısı, boru uzunluğu ve ilk darbe enerjisinin etkisi açısından incelenmiştir. Testin ardından borunun aşınma mekanizmasını incelemişlerdir. Sonuçlar, aynı uzunluk altında, destek açısı arttığında deformasyon yer değiştirmesinin arttığını, ancak temas tepe kuvveti, enerji Emilimi ve yıpranmış izlerin alanının azaldığını göstermiştir. Artan uzunluk, temas kuvvetini, enerji soğurma oranını ve ciddi hasarı arttırdığını, ancak deformasyonu azalttığını göstermiştir. İlk darbenin artan kinetik enerjisi, enerji soğurma oranını düşürdüğünü tespit edip, temas yorgunluğu pullanma ve oksidasyon,

304 paslanmaz çeliğin darbe aşınmasının aşınma mekanizmalarını ortaya çıkarmıştır [40].

Konyashin, yüksek darbe yükleri altında sert metallerin aşınma davranışını incelemek için yeni bir test geliştirmiş ve polikristalin elmas (PCD) ile karşılaştırıldığında farklı sert metal sınıflarının performansının değerlendirilmesi için kullanmıştır. Aynı sert metal sınıflarının ve PCD'nin aşınma davranışı, bir kontrol olarak kullanılan standart ASTM B611 testinde de incelemiştir. Yeni darbe-aşınma testinde bir yandan neredeyse nano ve mikron altı sert metallerin aşınma oranları ile diğer yandan orta-kaba ve ultra-kaba sert metallerin aşınma oranları arasında önemli bir fark olduğu görülmüştür. Darbe-aşınma testinde PCD'nin aşınmasının sifıra yakın olduğu bulunmuştur. Test edilen sert metal numunelerin aşınma yüzeylerinin incelenmesi, farklı sert metal sınıflarının aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesine izin vermiştir. Darbe aşındırma testinde yakın nano ve mikron altı kalitelerin aşınma mekanizması, WC tanelerinin yıpranması ve düzleşmesi, Co'nun bağlayıcı ara tabakalarından ince bir yüzey tabakasında kısmen ayrılması ve ayrılma sonucunda aşınmış yüzeyde sığ deliklerin oluşması olaylarını incelemiştir. Darbe-aşınma testindeki orta-kaba ve ultra-kaba derecelerinin aşınma mekanizması, WC taneleri arasında onları desteksiz bırakarak kalın Co ara tabakalarından bağlayıcı fazın tamamen çıkarılması fenomenini inceleyip bu, WC tanelerinin çatlamasına, hasar görmesine ve kırılmasına ve ayrıca büyük WC-Co parçalarının ayrılmasına yol açarak, neredeyse nano ve mikron altı sınıflara kıyasla orta-kaba ve ultra-kaba sınıflarda önemli ölçüde daha yüksek aşınma oranlarına neden olduğunu bulmuşlardır [57].

Yaptıkları çalışma, "sıfır aşınma" hacminin önceden belirlenemeyen katkısını, yani gerçek malzeme kaybıyla değişime neden olan diğer mekanizmalar tekrarlayan etki sırasında başlatılmadan önce meydana gelen malzeme sıkışmasına bağlı geometri değişikliğini tanımlar. Mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan, her biri farklı bir kütle sertliğine sahip beş metal alaşım ile deneylerini gerçekleştirdiler. Pistonlu çekiç tipi darbe aşınma test cihazı kullanılarak, düz kupon tipi numuneler, yüzeye normal hareket eden bir krom çelik bilyeden tekrar tekrar darbeye maruz bırakılmıştır. Her biri 0,23J'lik bir darbe enerjisine ve 3,5 kN'lik bir çarpma kuvvetine sahip, saniyede 10 darbe nominal hızında 36.000 darbe uygulanmıştır. Seçilen aşınmış

numuneler üzerindeki darbe aşınma krateri, bir 3D temassız profilometre kullanılarak incelenmiştir. Numunelerdeki hasarı daha ayrıntılı incelemek için taramalı elektron mikroskobu teknikleri kullanıldı. Ana hasar mekanizması plastik deformasyon ve dökülmeden kaynaklanan yüzey yorgunluğuydu. Numunelerde mikro çatlaklar ve yapılmış aşınma kalıntıları not edildi, ancak delaminasyon kanıtı yoktu, yüzey altı incelemesinde etkilenen yüzeyin altında olası mikro çatlaklar görülmedi ve yüzey altı incelemesinden yalnızca yüzey çukurları gözlemlendi. Aşınma izlerinin analizi, sıfır aşınma hacminin tüm malzemeler için toplam hacim 'kaybına' ana katkıda bulunduğunu ve belirli malzemeler için plastik akış hacmi ve yığın sertliğinin sıfır aşınma hacmini ve krateri karakterize etmede önemli bir parametre olabileceğini göstermektedir [36].

Li Yi yaptıkları çalışmada, darbeli aşınma direncini üç aşamalı normalleştirme ile iyileştirmek için düşük bir kromlu dökme demir (kütle %2,75 C, kütle olarak %3,23 Cr) seçmişlerdir. Yedi ön normalleştirme işlemine dayalı olarak, $915^{\circ} \text{C} \times 1$ saatte normalleştirme seçmişlerdir. Daha sonra, bu normalleştirme işlemi, farklı soğutma hızları ile eşleştirilen üç aşamaya bölünmüştür. Yaptıkları bu çalışmanın sonuçları olarak, numunelerin normalleştirildikten sonra, aşınma ağırlığı kayıplarının, dökümden (1,1134 g) sırasıyla 0,4400 g ve 0,4305 g'a düştüğü sonucuna varmışlardır. Darbe aşınması altında, numunenin direnç davranışına esas olarak mikro kesme ve belirgin sertleştirme etkisi olmaksızın mikro dökülme mekanizması hâkim olmuştur. Numune, plastik deformasyon, iş sertleşmesinin etkisiyle artan direnç davranışına önemli katkı sağlamıştır [58].

Wang yapmış olduğu bir çalışmada, 2Cr13 çeliğinin küçük gerilimli çoklu darbe koşulları altında darbe aşınma mekanizmasını araştırmıştır. Düz darbe modu ile kendi kendine yapılan darbe ekipmanını, çoklu darbe davranışını elde etmek için kullanmıştır. Yaptığı çalışmalar sonucu, darbeli aşınma sürecini: oyuklanma hasarı aşaması, topak dökülme hasarı aşaması ve katmanlı dökülme hasar aşaması olarak üç aşamaya ayrılabilceğini ortaya koymuştur. Yüzeye yakın aşınmanın transmisyon elektron mikroskobu görüntüleri, dislokasyonların dağılımının doğrusal dislokasyonlardan dolaşık dislokasyonlara, çarpma döngülerindeki artışla birlikte alt tane sınırlarına değiştiğini ve bunun sonucunda kümülatif plastik deformasyon, tane

inceltme ve darbe yüzeyinde gerilme sertleşmesi ile sonuçlandığı bulgularına varmıştır. Çukurlaşma hasarı aşamasında herhangi bir önemli hasar olmaksızın çarpma yüzeyinde birkaç çukur görülmüştür. Bu nedenle, çukurlaşma hasarı aşamasındaki başarısızlık mekanizması, yerel Hertzian gerilmesi neticesinde olmuştur. Dahası hem toprak hem de katmanlı dökülme hasarı aşamaları, çarpma yorgunluğunun dökülmesine karşılık gelen çoklu darbe koşulları altında çatlak başlatma ve yayılma süreçleri yaşatmıştır. Topaklanma ve lamellar dökülme hasarı aşamalarının arıza mekanizması, temel olarak çoklu darbe işlemi sırasında kümülatif plastik deformasyona ve darbe yüzeyinin sertleşmesine bağlı olmuştur [59].

Pokhmurs ve arkadaşları 2015 yılında bir OST-45m akı tabakası altında 100 Hz frekanslı ve 0,07 ve 0,3 mm genlikli numunelerin dikey titreşiminin etkisi altında bir Kh10R4G2S özlü telden yüzeylenen katmanların mikro yapısını incelemişlerdir. Bunlar, FeCr katı çözeltilisinin matrisinde bulunan krom ile alaşımlanmış FeCr2BC demir karboborür kristallerinden oluşmaktadır. Bu incelemeler numunelerin yerleştirildiği darbe aşınma test cihazında eksantrik sistemle çalışan kolun devamında üzerine yüklenen ağırlıklarla darbe aşınması yapıldıktan sonra mikro yapıları incelenmiştir. Titreşim olmadan oluşturulan yüzeyli katmanların mikroyapısı, yaklaşık 5–15 µm boyutlarında katı fazlar içermiştir. Titreşim etkisi altında, katı parçacıklar öğütülür ve katı çözeltili üzerinde homojen bir şekilde dağıtılmıştır. Yaptıkları çalışmalarda 0,3 mm'lik bir titreşim genliği için oluşturulmuş yüzeyli tabakalarda, mikro sertlik 900 HV seviyesinde homojen olarak dağıtmışlardır. Bu katmanların darbe aşınma direncinin 2-2,3 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [60].

Bu çalışmada Saha, aşındırıcı ve darbeli aşındırıcı koşulları içeren madencilik aşınma uygulamaları için çelikleri araştırmışlardır. Çalışma, bir dizi sertlik-tokluk kombinasyonuna sahip dört düşük karbonlu çelikten oluşuyor: ticari sınıf martensitik çelik, düşük bainitle ısıtılmış aynı çelik, ticari bir TRIP çelik (gerilme mukavemeti sınıfı 700 Mpa) ve su verme-bölme (QP) çelik. Çelikler, sırasıyla oldukça yüksek gerilimli aşındırıcı ve darbeli aşındırıcı koşullar sunan disk üzerinde pim (CPOD) ve bulamaç çanağı aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, incelenen her iki aşınma koşulunda da en iyi performansın, daha yüksek başlangıç sertliği nedeniyle martensitik çelik olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, bu çeliğin performans

faydası, bulamaç potasında CPOD testlerine göre daha düşüktür. Diğer yandan, TRIP çeliği, CPOD testlerinde kötü sıralama göstermiştir, ancak bulamaç pot testlerinde QP ve daha düşük bainit çeliklerinden daha iyi performans göstermiştir. Farklı aşınma koşullarında aşınma davranışlarını açıklamak için çeliklerin mikroyapısal bileşenlerinin aşınma tepkilerini incelemek için ayrıntılı yüzey ve yüzey altı aşınma hasarı incelemeleri yapmışlardır [61].

Deng 2013 yılında yaptığı çalışmada, ağırlıkça %0,27 C içeren Ni, Mo içermeyen düşük alaşımlı çift fazlı çeliği, farklı termomekanik kontrol prosesleri ve kritikler arası ısıl işlemle incelemiştir. Farklı termomekanik kontrol prosesleri ile elde edilen ferrit morfolojileri ve miktarının, interkritik ısıl işlem sonrası mikro yapı, mekanik özellikler ve üç cisim darbeleri abrasif aşınma davranışına etkisini araştırmıştır. Deng yaptığı bu çalışmalar sonucunda düşük sıcaklıkta laminer soğutma ile kontrollü haddeleme sırası elde edilen asiküler ferritin, kritikler arası ısıl işlemden sonra kısmen korunduğunu ve poligonal ferrit durumunda olduğundan çok daha iyi mekanik özelliklere ve aşınma direncine yol açtığını bulmuştur. Çift fazlı çelikte çok az tutulan daha ince ferrit, çatlakların yayılmasını saptaması ve darbe tokluğunu abrasif aşınma direncini artırdığını bulmuşlardır [62].

Yin'in yaptığı bu çalışmada ultrasonik yüzey haddeleme işleminin (USRP) Inconel 690 alaşımlı boruların darbeleri kayma aşınma davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Hem çarpma hem de kayma yönlerinde hareket parametrelerini değiştirerek çoklu aşınma modellerini gerçekleştirmek için kendi kendine yapılan iki boyutlu bir bisiklet darbeleri kayma aşınma test cihazı geliştirmiştir. Testler farklı darbe ve kayma hızları altında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, USRP'nin Inconel 690 alaşımının darbe kinetik enerjisi soğurma oranını, sürtünme katsayısını düşürdüğünü ve aşınma direncini artırdığını göstermiştir. Bunlar, 690 alaşımının tane boyutunu azaltan USRP'ye atfedilebilir, bu da mikro sertlik ve sıkıştırma artık gerilmesinin artmasıyla sonuçlanmıştır [63].

Pei'nin yaptığı çalışmada, martensitik çeliğin ve geleneksel Hadfield çeliğinin (Mn13Cr2) mekanik özelliklerini, mikroyapısını ve üç gövdeli darbeleri abrasif aşınma davranışını sistematik olarak araştırmışlardır. Mn13Cr2 ile karşılaştırıldığında

martensitik çelik, 1335 Mpa daha yüksek çekme dayanımı, 1007 Mpa daha yüksek akma dayanımı, 305 HV daha yüksek ilk sertlik ve %34,5-79,0 daha az aşınma kaybı ile daha iyi aşınma direnci göstermiştir. Ayrıca, aşınma davranışını bir ila dört boyuttan açıklamak için bir boyutsal aşınma analizi yöntemi önerilmiştir. Bir boyutlu aşınma (faz geçiş aşınması), bükülme, yüksek yoğunluklu dislokasyonlar, tutulan ostenit faz dönüşümlerinin martensitik çeliğin güçlendirme mekanizması olduğunu, dolaşık dislokasyonların ve istifleme hatalarının Mn13Cr2'nin iş sertleştirme mekanizması olduğunu öne sürmüşlerdir. İki boyutlu aşınma (yüzey aşınması), gerinim yorgunluğunun, çatlakların, bastırarak aşındırıcı maddenin ve ekstrüde birikimin martensitik çeliğin ana aşınma mekanizmaları olduğunu ileri sürmüşlerdir. Mn13Cr2 olanlar presli aşındırıcı, gerilme yorgunluğu, kesme, ekstrüde birikim ve delamine krater iken üç boyutlu aşınma (makro aşınma), martensitik çeliğin, makroskopik ölçekte ince bir film iki boyutlu düzlem yüzeyinde aşındığını görmüşlerdir. Her iki deneysel çeliğin aşınma kaybı, aşınma süresinin artmasıyla artmıştır. Martensitik çelik, daha yüksek darbe enerjisi altında daha yüksek aşınma direnci gösterirken, Mn13Cr2'nin aşınma direnci farklı darbe enerjisi altında statik kalmıştır [8].

Herpen, çalışma ekibiyle paslanmaz çelik kaplamalar (304L) üzerinde oda sıcaklığında darbe/kayma metodolojik aşınma testleri yapmışlardır. Kaplamaların dışındaki akıştan kaynaklanan türbülans, onları aralıklarla kılavuz cihazlarla temas ettiren titreşimli uyarıma neden olmuştur. Bu bileşenler üzerinde yapılan birçok deney, farklı yüklem ve hareket türleri (temas geometrisi, titreşim genliği veya frekansı ve çevresel parametreler) kullanarak bu malzemenin hasarının mekanik yönüne odaklanmışlardır. Temas bölgelerinde ciddi hasar profilometreleri aşınma testlerinden sonra tartılarak değerlendirilmiştir. Malzeme yüzeyinin mikromekanik durumundaki önemli değişiklikler (martensit oluşumu, gerinim sertleşmesi ve artık gerilmeler) ölçülmüştür ancak bunlar doğrudan test süresiyle ilişkilendirilmemiştir. Yaptıkları bu çalışmanın temel amacı, envanterini yeni test serileri ile tamamlamak değil, malzemenin mikro yapı ve mekanik özelliklerinin aşınma davranışındaki rolünü vurgulayan probleme farklı bir yaklaşım benimsemek ve aşınma testi sonuçlarını tribolojide kullanılan parametrelerle ilişkilendirmektir. Aşınmış numuneler üzerinde tartım, taramalı elektron mikroskobu ve 2D profilometri kullanılarak tahribatsız bazı

incelemeler yapılmıştır. Sonuçlar, temas eden iki cismin hassas bir şekilde hasar gördüğünü açıkça göstermiştir. 304L paslanmaz çeliğin ilk mikro yapısının ve mikromekanik durumunun gelişimini takip etmek için X-ışını kırınım ölçümlerini yapmışlardır. Bu tekniklerin kullanılması, aşınma hasarı ilerlemeye devam etse bile test süresinin malzemenin davranışı üzerinde hiçbir etkisinin olmadığını göstermiştir. Dolayısıyla bu veriler, oda sıcaklığında ana aşınma mekanizmasının, yüzey katmanlarının oksidasyonu ve ardından darbe-kayma hareketi nedeniyle bir oksit ayrılma aşaması olduğunu öne çıkarmıştır [64].

3.2. AŞINMA CİHAZI TASARIMI LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Zhang ve proje araştırmacıları bir krank-yassı döner örs sistemine sahip bir yassı-kam ile takipçi-darbe şaftı kullanarak yapılan malzeme çiftlerinin endüstriyel durumları simüle etmek için çeşitli darbeli aşınma koşulları yaratabileceğini düşünmüşlerdir. Bunun üzerine 1994 yılında darbeli aşınma test makinesini üretmişlerdir. Makinenin temel özellikleri, disk üzerinde pim aşınma test cihazındaki disk ile aynı şekilde düz dönerek çalışan örsün uzun çalışma ömrü ve cihaza iletilen darbe enerjisinin doğru kontrolüdür. Tasarım, numuneye verilen darbe enerjisinin doğru kontrolünü, numunenin dönen örs üzerindeki kayma mesafesini ve test sırasında çok az sıcaklık artışı sağlamıştır. Dönen örsün geniş çalışma yüzey alanı, testlerin doğruluğunu artırmıştır. Makine, büyük parçacık boyutlarında aşındırıcılar ve örsün düşük dönme hızı kullanılarak hafriyat, bilyeli frezeleme veya küçük çeneli kırma simülasyon testi için kullanılmıştır. Bu makinenin kazanımları kolay ve hızlı test edebilme kabiliyeti ve ekonomik açıdan düşük maliyete sahip olması olmuştur [65].

Kuru/ıslak koşulları altında aşınma ve sürtünme deneyleri için tribolojik makine üretilmiştir. Disk üzerine Pim (POD), ASTM G99, ASTM G77 veya G137-953, Kuru Kum Lastik Çarkı (DSRW), ASTM G655, ASTM G105 ve ıslak/kuru koşullar altında kum/çelik tekerlek testi (ASTM B611) gibi çeşitli laboratuvar tribo makineleri tasarlanmış ve imal edilmiştir. Aynı test koşulları altında aynı anda çalışan farklı temas mekanizmalarında birden fazla tribo tekniğini aynı malzemeye karşı entegre etme kavramı, Yousif ve takım arkadaşları tarafından tasarlanan makinede tanıtılmıştır. Aynı makinede farklı aşınma modları (adhezif, iki gövdeli aşındırıcı, üç gövdeli

aşındırıcı, kuru, yağlı veya bulamaçlı koşullar altında) gerçekleştirilmiştir. Yeni makine kullanarak farklı kayma hızları (2,8, 7,8 m/s) için 50 N yükte ıslak/kuru temas koşulu altında cam elyaf takviyeli polyester kompozitin adhezif aşınması, sürtünmesi ve arayüz sıcaklığı sonuçlarını bildirmişlerdir. Kompozitin ağırlık kaybı ve sürtünme katsayısı, kayganlaştırıcı olarak su eklenmesinden önemli ölçüde etkilenmiştir. Ek olarak, temas durumu, kompozitin aşınma ve sürtünme performansı üzerinde yüksek etkiye sahip olmuştur [66].

Bir aşınma test makinesi tasarlama ve üretimi ile malzemelerin performansını değerlendirme ve elde edilen veriler ile mevcut olanları karşılaştırma girişimi içinde olmuşlardır. Çeşitli parçalar için istenen özellikte malzemeler ve bulunabilirliğine göre dikkatlice seçmişlerdir. Ana mil, sıkıştırma yayı, kayış, kasnak ve elektrik motoru için tasarım hesapları yapılmıştır. Makinenin performansını değerlendirmek için makine üretim sonrası testler yapıp, sonuç raporlarını hesaplamışlardır. Elde edilen sonuçlar ile mühendislik malzemelerinin bileşen olarak kullanılmadan önce aşınma oranını belirlemek için yerel olarak tasarlanmış ve imal edilmiş bir aşınma test makinesi kullanmanın mümkün olduğunu göstermişlerdir. Bu nedenle, mühendislik cihazlarının arızasını azaltmak için bunun teşvik edilmesi gerektiğini öngörmüşlerdir [67].

Rulmanın yuvaları ve yuvarlanma elemanları arasında var olan küçük salınım hareketleri nedeniyle rulmanlarda sürtünme aşınması tipi arızaların yaşandığını gören bilim insanı Remesh, 2004 yılında bu tip arızaların önüne geçilebilmesi için sürtünme aşınma test makinesi geliştirmiştir. Genel makine veya sistem titreşimi ve hizmetteki beklenmedik yükler nedeniyle temas eden yüzeyler arasındaki küçük salınım hareketleri, temas bölgesinde aşınma kalıntısı birikmesine neden olduğunu ve aşınma sürecini hızlandığını düşünmüştür. Yatak malzemelerinin sürtünme aşınma davranışını anlamak için laboratuvarında bir sürtünme aşınma test cihazı tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Test donanımı, 20 ila 200 µm arasında değişen kayma genliklerinde ve 1 ila 30 Hz arasında değişen test frekanslarında test edilmek için tasarlanmıştır. Sürtünme aşınma özelliklerini anlamak için ön çalışmalar sertleştirilmiş ve temperlenmiş rulman çeliği En31 ve yaygın olarak kullanılan sertleştirilmiş ve tavllanmış yapı çeliği En24 üzerinde çeşitli normal yüklerde yapılmıştır. Sürtünme testleri sırasında sürtünme katsayısı sürtünme testlerinin ilk aşamalarında yüksek olup

kararlı bir duruma ulaşmıştır. Aşınma izi morfolojisi, sürtünme temaslarının sergilediği temasın doğasını ortaya çıkarmıştır. Yapılan ön testler, yayınlanan verilerle karşılaştırılabilir sonuçlar göstermiştir. Sertleştirilmiş yatak çeliğinde (En31) sürtünmenin ilk aşamalarında, sertleştirilmiş yapı çeliği En24 ile aşındırıldığında sürtünme katsayısı yüksek çıkıp kısa sürede sabit bir duruma ulaşmıştır. Temas bölgesinde gevşek oksit kalıntılarının varlığı, geleneksel kayma testlerine kıyasla sürtünme testlerinde yüksek sürtünme katsayısı ile sonuçlanmıştır. Sürtünme izi gözlemi, normal yüklerde test edilen çubuk kayma bölgesi örneklerinin varlığını ortaya çıkarmıştır [68].

Leonard dairesel ve eliptik kontaklar ve düz kontaklar için sürtünme aşınması ve sürtünmeyi ölçmek ve görselleştirmek için yeni bir modüler deneysel aparat tasarlamış ve geliştirmiştir. Deneysel düzeneği için iki sabit numune arasında bir düz, bilya veya silindiri ileri geri hareket ettirmek için manyetostriktif bir aktüatör kullanmıştır. Bir döner tabla üzerine monte edilmiş iki sabit düz veya silindirik numune, sürtünme temasını oluşturmak için ileri geri hareket eden numuneyi üstten ve alttan sıkıştırmaktadır. İki sabit test örneği hareketli numuneye dik olarak döner tabla üzerine monte edilmiş, iyi tanımlanmış dairesel bir temas oluşturan çapraz bir silindir geometrisi oluşturmaktadır. Sabit ve hareketli numuneler arasındaki açı değiştirilerek farklı en-boy oranlarına sahip eliptik bir temas elde edilebilmiştir. Üst sabit numunenin üstüne yerleştirilen ölü ağırlıklar normal yükü sağlamıştır. Sürtünmeyi ölçmek için aktüatör çıkış mili ile numune arasına yerleştirilmiş bir kuvvet sensörü kullanmışlardır. Düz konfigürasyondaki bilyada çelik yassı veya safir pencere pistonlu bilyayla temas halinde kullanılmıştır. Safir pencere kullanıldığında, temasın yerinde görselleştirilmesi ve kaydı için bir mikroskop ve yüksek hızlı kamera kullanmışlardır. Leonard bu çalışmada, sürtünme aşınmasını eleştirel olarak incelemek ve değerlendirmek için farklı konfigürasyonları barındırabilen yeni bir aşındırma test donanımından elde edilen tasarım, geliştirme ve sonuçlarını sunmuştur. Test donanımının ayrıntıları açıklanmış ve her konfigürasyonunda elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bu test donanımının avantajları arasında yüksek sıcaklıklarda testler yapabilmek, teması görselleştirme, çok çeşitli temas geometrilerini analiz etme ve yüksek frekansları kullanarak testi hızlandırma yeteneklerini bulundurmıştır [69].

Mühendislik uygulamalarında sürtünme aşınmasının neden olduğu malzeme hasarı önemli bir endişe kaynağı olmuştur. Huq ve ekip arkadaşları çalışmalarında salınımlı normal kuvvet altında sürtünme aşınmasının laboratuvar araştırması için yeni bir makinenin tasarımını ve performansını açıklamışlardır. Test makinesi için geniş frekans aralığında sabit kuvvet genliğinde temas eden cisimler arasına salınımlı normal kuvvet uygulanabilmesi için elektromanyetik aktüatör kullanmışlardır. Normal kuvvet ve elektriksel temas direnci, aşınma testleri sırasında çevrimiçi olarak ölçülmüştür. Aşınma testi makinesinin performansı, farklı malzeme kombinasyonları için elde edilen verilerle, yani yüksek hız çeliği ve alüminyum bilyalı karşı gövdelere karşı salınan (Ti, Al) N kaplamalar gibi sert malzemeler ve kalay gibi yumuşak malzemelerle gösterilmiştir. Test edilen (Ti, Al) N kaplama ve dökme alüminyum seramiklerinin salınımlı normal kuvvet testi altında yorulma çatlama eğilimli olduğunu göstermiştir. Sert metal (HSS) ve yumuşak kalay kaplamalar kayma bölgesinde aşınmaya duyarlı olmalarına rağmen, en azından seçilen test koşulları altında yorulma çatlama muhtemelen olmadığına sonucuna varmışlardır. Kendinden eşleşmiş kalay kaplamalar üzerindeki elektriksel temas direnci, kayma bölgesinde aşınma meydana gelmesine rağmen, kilitli bir temas bölgesinin mevcut olduğu test koşulları için salınımlı normal kuvvet altındaki elektriksel temas direncinin çok düşük ve sabit kaldığını göstermiştir [70].

Yaptıkları çalışmada yeni kompozit malzeme ile tek düzlemde olan contanın yorulma dayanımını araştırmak için özel test cihazı tasarlayıp üretmişlerdir. Test ekipmanının şaft malzemesi 30CrMnSi'dir. Deneyde kullanılan şaft malzemesi aniden iki parçaya ayrılmıştır. Şaftın dış yükünün neden olduğu stresi çözmek için ANSYS kullanılmıştır ve ardından çekme mukavemeti ile karşılaştırılması yapılmıştır. Sonunda, şaft kırılmasının nedenlerini ve ısıl işleme şaftın tokluğunu ve mukavemetini arttırmışlardır [71].

3.3. SONLU ELEMANLAR METODUNUN LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Ma ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, genelleştirilmiş koordinatlar olarak düğüm koordinat vektörleri ile Lagrange yöntemine dayalı olarak doğrusal olmayan ve doğrusallaştırılmış gerilim dinamiğine bir sonlu eleman analizi yaklaşımı sunmuşlardır. İlk olarak kısıtlamalı ve kısıtlamasız doğrusal olmayan gerilim dinamiği türetmişlerdir. Üç standart formdaki denge denklemleri (düğüm koordinatları, eleman kuvvet yoğunluğu ve eleman kuvvet vektörleri açısından) ve uyumluluk denklemi de verilmiştir. Ardından, doğrusallaştırılmış dinamikleri ve modal analiz denklemlerini kısıtlamalı ve kısıtlamasız olarak sunmuşlardır. Geliştirdikleri yaklaşım, herhangi bir gerilim yapısı için dinamik çalışmaları doğru bir şekilde yürütme yeteneğine sahiptir: simülasyonda çubuklar için nispeten yüksek sertlik ayarlanarak elde edilen, kabul edilebilir hatalarla katı gövde dinamiğinin gerçekleştirilmesi; çubukların ve dizilerin elastik veya plastik deformasyonlara sahip olabileceği durumlarda FEM dinamiklerini doğru bir şekilde simüle etmek; çeşitli sınır koşullarıyla uğraşmak, örneğin herhangi bir yönde herhangi bir düğümde statik/dinamik yükleri sabitlemek veya uygulamak (yani, yerçekimi kuvveti, belirli bazı kuvvetler veya keyfi sismik titreşimler); doğal frekans ve ilgili modlar dahil olmak üzere doğru mod analizi yapmak. Sonuçlarını rijit cisim dinamiği ve FEM yazılımı ANSYS ile karşılaştırmışlardır [72].

Bir çalışmada oldukça yeni bir kavram kullanılarak çatlak yayılmasını araştırmak için kırılma mekaniği birkaç temel ve basit problemleri incelemek için I_p teorisi yapılır. Burada incelenen problemler oldukça basit olduğundan, yöntemin işleyişini ve son aşamada FEM yazılım analizi ile sunulması amaçlanan karmaşık karma mod problemlerine nasıl uygulanabileceğine dair bir fikir sağlarlar. Westergaard'ın yöntemi, karmaşık fonksiyonları elde etmek için kullanılır ve bunlar, çatlağın önündeki gerilme alanını elde etmek için birlikte uygulanır. Mevcut olan gerilim alanını kullanan birinci ve ikinci gerilim değişmezlerinin bir fonksiyonudur. Aynı problem FEM yani ANSYS kullanılarak çözülür ve bulunan sonuçlar analitik yöntemle elde edilenlerle karşılaştırılır [73].

Fischer ve takım arkadaşları yaptıkları çalışmada, elektrostatik olarak saptırılabilen polisilikon burulma mikro aynalarının davranışını açıklamaktadır. Elektrostatik

davranış, FEM programı ANSYS kullanılarak mekanik ve elektrostatik hesaplamaların birleştirilmesiyle hesaplanır. Gerçekleştirilen bir mikro ayna üzerindeki dinamik sapma ölçümleri, simülasyonun sonuçlarını doğrular. Ek olarak, bir polisilikon burulma mikro aynasının dinamik sönümleme davranışını araştırmışlardır. Mikro aynaların çalışmasının basınca bağımlılığı ölçülür ve gaz sönümleme teorisi ile bir karşılaştırma yapılır [74].

Ön aks kirişi bir aracın çok önemli bir bileşenidir, araçtaki toplam yükün yaklaşık yüzde 35-40'ını taşır. Motor titreşimleri, yoldaki tümsekler vb. gibi çeşitli faktörler nedeniyle yorulma yükü yaşar, bu nedenle yorulma ömrü için aksı tasarlamak ve analiz etmek çok önemli hale gelir. Yaptıkları çalışmada, ağır hizmet tipi bir kamyonun (TATA Damper) ön dingil kirişinin 3 boyutlu modellenmesi için Siemens NX kullanılmış ve ardından ANSYS tezgâhı kullanılarak dingil kirişinin yorulma ömrü analizi yapılmıştır. 50 çelik, AISI 1045, AISI 4130, AISI 4140 ve AISI 4150 olmak üzere 5 farklı malzeme için analiz yapılmıştır. Bu malzemeler, dingilin daha iyi yorulma ömrü için istenilen özelliklere sahip olduklarından dingil kirişlerini tasarlamaya uygun olduklarını anlamışlardır [75].

3.4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARININ GENEL DEĞERLENDİRMESİ

Geçmişten günümüze kadar öncelikli hedefi ekonomik maliyet tablosunu en aza indirmek olan çalışmaların tümü mühendislik malzemeleri ve makine imalatı için çok önemlidir. Mühendislikte kullanılan malzemeler ve makineler için, doğal kullanım koşullarına uygun olan test üniteleri tasarlanarak, malzeme ve makinaların çalışma şartlarının modellendiği deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda aşınmaya maruz kalan malzemeler için deneysel yöntemler ve pratik uygulamalar ile ömür tayini gerçekleştirilmiştir. Literatür kaynakları incelendiğinde malzemelerin aşınma dayanımlarının istenilen seviyelere çıkartılması için birtakım işlemler uygulandığı görülmüştür. Ayrıca, bilgisayar destekli programlar kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla çeşitli simülatif analizler yapıp deneysel çalışmalar ile kıyaslanan araştırmalar da mevcuttur.

Yapılan literatür taraması kapsamında yeni tip titreşim destekli kayma aşınma test cihazının tasarımının yapılması, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simülatif analizlerinin gerçekleştirilmesi konularında literatür boşluğu olduğu görülmüştür. Bu kapsamda, çalışmaların devamlılığı ve gelişimi için makine sektörü açısından son derece önemli olan bu tez çalışmasında literatür araştırmasında benzerine rastlanmamış olan titreşim destekli aşınma test cihazının tasarımının yapılması ve simülatif analizlerin gerçekleştirilmesi uygun görülmüştür.



BÖLÜM 4

MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. MATERYAL

Ekonomik açıdan önemli bir yeri olan triboloji, geçmişte çok fazla önemsenmemiştir. Günümüzde aşınmalardan kaynaklanan hasarların ciddi boyutta olduğu fark edilmiştir. Parçalarının verimlerdeki düşüş, çalışma fonksiyonlarını yerine getirememesi, ömür ve dayanımlarının azalması gibi birçok problem aşınma kaynaklı olabilmektedir. Bu tür problemlerin önüne geçilmesi ve makine/parçalara ait ömür tahminleri için çalışmalar yapılmaktadır.

Günümüzde aşınma ve sürtünme ölçüm aletleri için çeşitli laboratuvar donanımlarına sahip makineler üretilmektedir. Malzemelerin aşınmaları mikron seviyelerde olabileceği için ölçümlerinin de çok hassas olması gerekmektedir. Aşınma olayı karmaşık bir yapıya sahip olduğu için, çok çeşitli yapılarda test cihazları üretilmektedir. Bununla birlikte üretimi zor ve doğruluk değeri düşük kompleks mekanizmalar için ise sonlu elemanlar yöntemiyle bilgisayar destekli sayısal analizler yapılmıştır.

Literatür araştırması sonucunda malzemelerdeki aşınmadan kaynaklı hasarların araştırılması amacıyla deneysel çalışmaların gerektiği görülmektedir. Fakat kayma aşınması gerçekleşirken aynı anda titreşimden kaynaklı darbe aşınmasını test edebilecek cihazlar yoktur. Bu nedenle kayma aşınması gerçekleşirken aynı anda darbe aşınmasını test edebilecek bir cihazın ön tasarımları yapılmıştır. Ayrıca tasarlanan cihazda gerçekleştirilebilecek deneylere ait ön simülasyon ve analizlerin gerçekleştirilmesi tercih edilmiştir.

Test cihazının ön tasarımı sırasında ASTM G133-05 standartlarını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

Gerçekleştirilecek deneylere ait analizler etki eden kayma ve titreşimden kaynaklı darbeler ANSYS programı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analizler sırasında numunenin maruz kaldığı yükler bileşke yüklere indirgenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen verilerin doğruluğu literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

4.1.1. Test Cihazının Amacı

Bu çalışma ile daha önce sürtünme kuvveti ile yük, hız parametrelerinin oluşturduğu abrazyon aşınmanın yanında aynı sistem içerisinde çalışacak olan hem sürtünme hem de titreşim motoru sayesinde darbe etkisinde kalan test cihazı tasarlanacaktır. Bununla birlikte, tasarlanacak olan cihazın en önemli özelliklerinden bir tanesini uzay ekseninde hareket etmesi olarak belirtebiliriz. Literatürde yer alan mevcut cihazların test aşamasında 2 boyutta çalıştığı görülmektedir, tasarlanacak olan bu cihaz ise testlerin 3 boyutta gerçekleşmesini sağlayacaktır. Bu sayede gerçek çalışma koşullarına daha uygun sonuçlar elde edilmiş olacaktır.

Gerçekleştirilecek çalışmanın ilk aşamasında, titreşim destekli darbeli kayma aşınma test cihazının tasarımı yapılmıştır. Bu aşamada, deney cihazı 3 boyutlu katı modelleme programı kullanılarak tasarlanmıştır. Deney cihazı, ayarlanabilir yük ve kayma hızında çalışma kabiliyetine sahip titreşim motoru ile darbenin uygulanacağı şekilde simüle edilmiştir. Simüle edilen deney cihazı ile kayma ortamları, kayma hızları, kuvvetler ve titreşim frekanslarının numune üzerindeki etkileri incelenebilecektir.

Tasarlanacak olan aşınma test cihazı 3 fonksiyona sahip olacaktır:

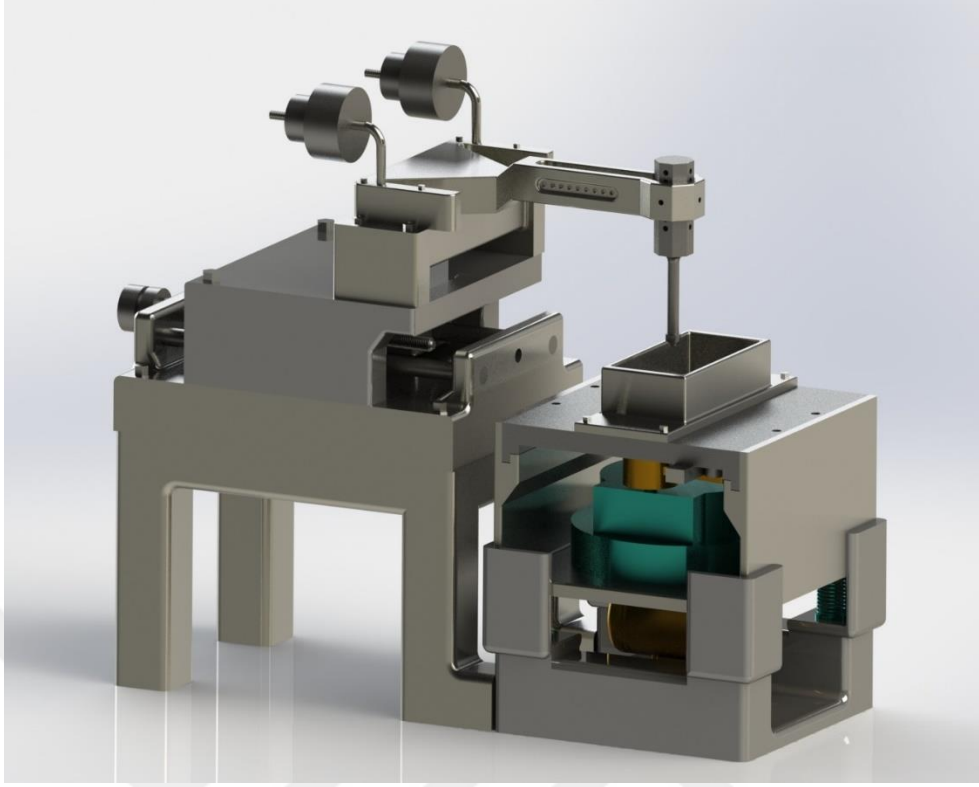
- Abrasif aşınma (a).
- Titreşim destekli darbe aşınması (b).
- Titreşim destekli darbeli abrazyon aşınma (a+b).

4.1.2. Titreşim Destekli Darbeli Aşınma Cihazının Tasarımı ve Çalışma Prensibi

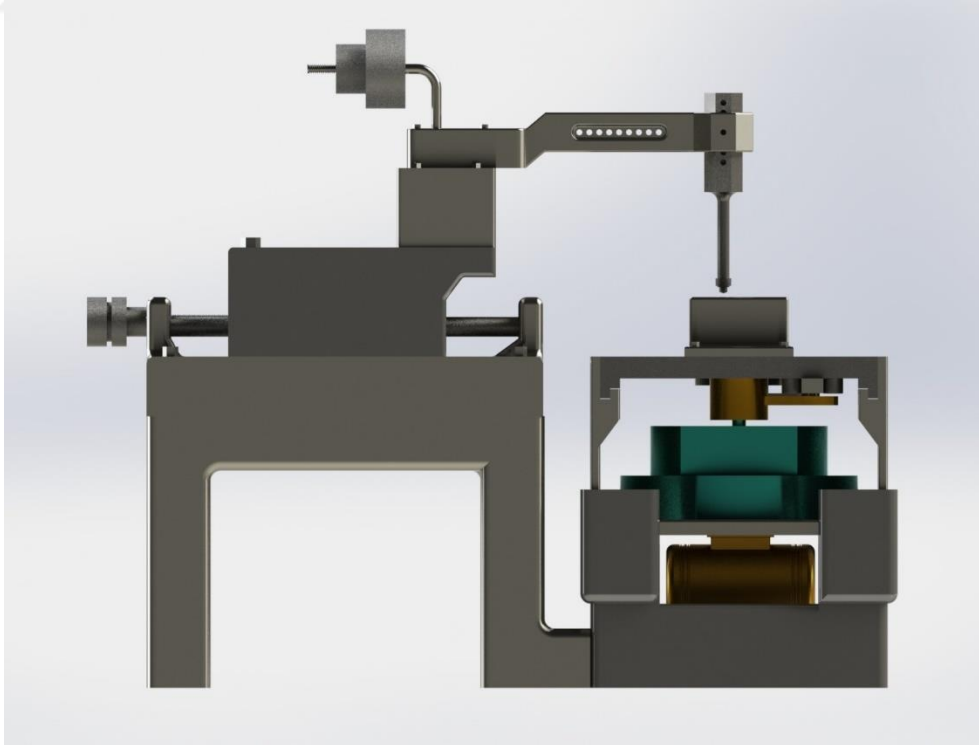
Deney ünitesi birçok parçanın tasarlanıp montajlanmasıyla elde edilmiştir. Aşağıda test cihazının montajında kullanılan parçalar maddeler halinde verilmiştir.

- Aşındırıcı uç bağlama ekipmanı,
- Aşınma ucuna yüklerin iletileceği yük bağlantı kolu,
- Yük ve aşındırıcı uç sabitleme mili,
- Kare vida ucuna hassas hareket kolu,
- Aşındırıcı uç yatağı,
- Aşındırıcı uç, yük bağlantısı ve hareketli kısmın bulunduğu ana gövde,
- Numune tutucu aparat,
- Kurs boyu ayarlanabilen lineer kaymalı yatak,
- Lineer kaymalı yatağın bağlandığı test kısmı gövdesi,
- Titreşim esnasında eksenelliği korumak için gövde etrafı yataklama,
- 4 adet kalıp yayı,
- Elektrikli titreşim motoru,
- Servo motor,

Titreşim destekli darbeli aşınma cihazının 3 boyutlu tasarımı Şekil 4.1’de ön görünümü Şekil 4.2’de verilmiştir.

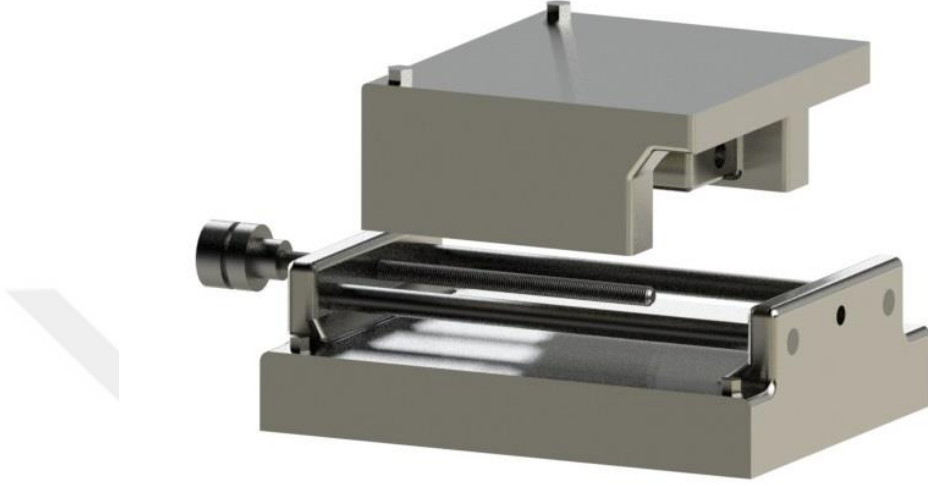


Şekil 4.1. Titreşim destekli darbeli aşınma cihazının tasarımı.



Şekil 4.2. Titreşim destekli darbeli aşınma cihazının tasarımı ön görünümü.

Hareketli numune tutucu tabla hareketi sayesinde sabit bilye altında lineer hareket ile abrasif aşınma gerçekleşirken aynı zamanda titreşim motorunun yaylar doğrultusundaki salınımlı hareketi sayesinde kuvveti gövde altından darbe etkisiyle numuneye ilemesiyle aşınmanın gerçekleşmesi planlanmaktadır.



Şekil 4.3. Kurs boyu ayarlanabilen lineer kaymalı yatak.

Tutucu kol yatak bağlantı plakası üzerinde ileri geri şekilde konumunun ayarlanabilmesi için tasarlanmıştır. Sistem konumu ayarlandıktan sonra mengene sistemi ile sabitlenebilmektedir. Bu mekanizma işleminin amacı sürtünme esnasında oluşabilecek sapmaları engellemek ve sabit tutmaktır (Şekil 4.3).



Şekil 4.4. Aşındırıcı ucun bağlandığı ve sabitlemek için yükün bağlandığı gövde.

Aşındırıcı ucun üzerine yük kuvveti uygulandığında cihazın sistem dengesinin korunabilmesi için ağırlıklar takılarak aşınmanın gerçekleştiği anlarda sıkışması önlenmektedir. Aynı zamanda aşındırıcının sabitlenmesini sağlayan gövde rolünü üstlenir. Aşındırıcı ucun bağlandığı ve sabitlemek için yükün bağlandığı gövdenin 3 boyutlu görünüşü Şekil 4.4'te verilmiştir.



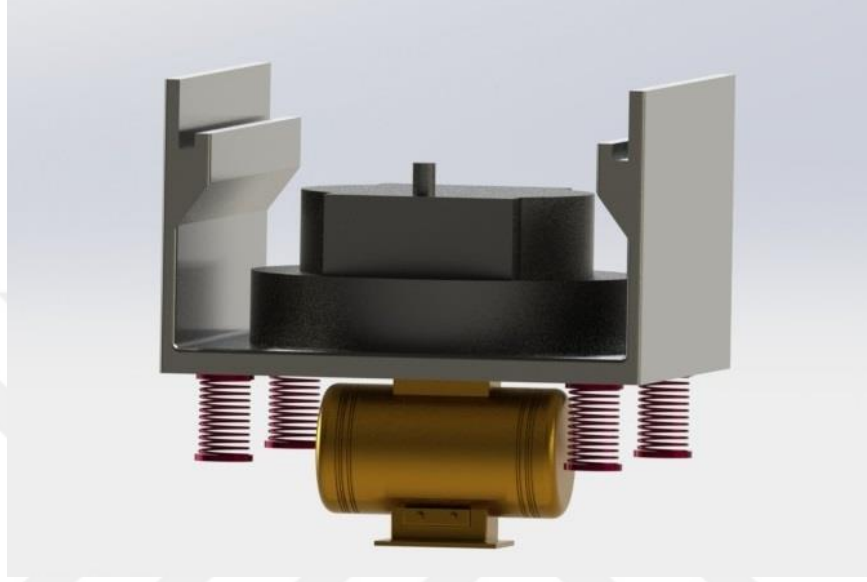
Şekil 4.5. Aşındırıcı bilye ve aparatı.

Malzeme üzerine dik bir açıda sabit tutabilmesi için tasarlanan aşındırıcı aparattır. Aşındırıcı aparatının ucuna yerleştirilen bilye ise aşındırmayı sağlayan parçadır (Şekil 4.5). Bilye deney düzeneği içinde gerekli olan çeşitli malzemelerden seçilir. Genelde aşındırılmak istenen malzemeden daha dayanımı yüksek malzemelerden seçilir.

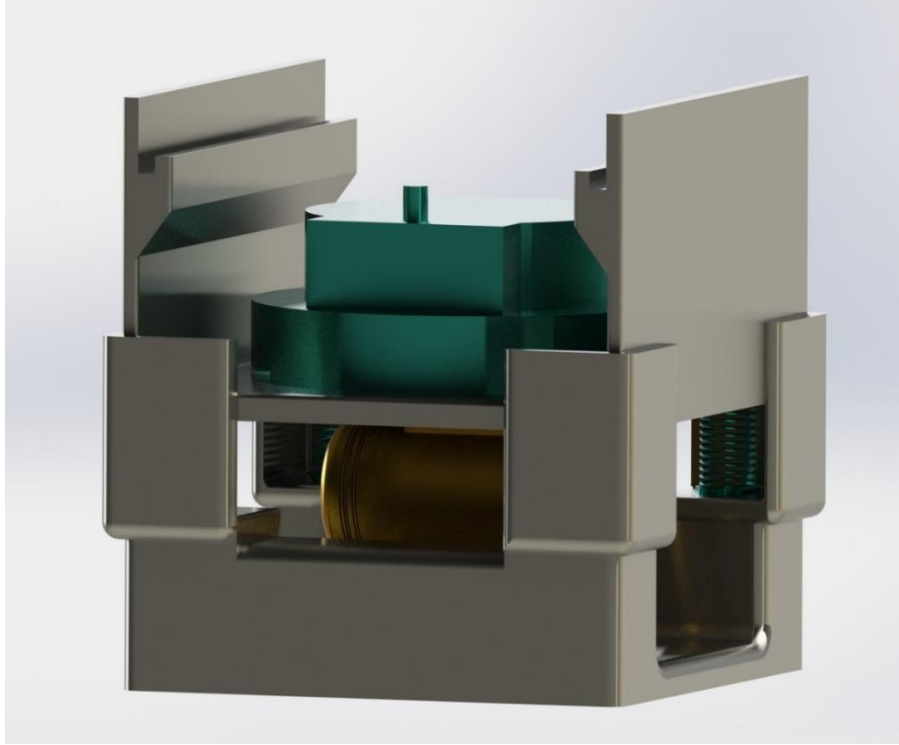


Şekil 4.6. Eksantrik mil ve lineer hareket tablası.

Servo motorun dönme hareket enerjisi, eksantrik mile bağlanarak hareketin yalnızca bir koordinat doğrultusunda hareket etmesini sağlar. Linear hareket tablasının hareketiyle, üzerine bağlanan numune, sabit aşındırıcı altında aşınmaya uğramaktadır (Şekil 4.6).



Şekil 4.7. Titreşim motorunun bağlı olduğu gövde ve yayların konumları.

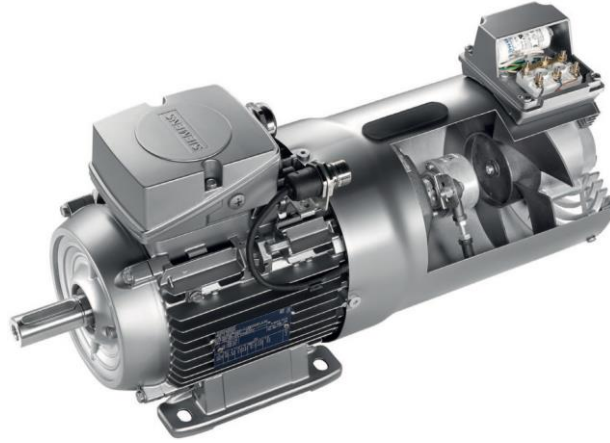


Şekil 4.8. Titreşim motorunun yatakladığı gövde.

Numune, lineer hareket yapan tabla üzerine yerleştirildikten sonra aşındırıcı uç numunenin üzerine sabitlenir ve üzerine deney için istenen seviyede yük uygulanmaktadır. Numunenin bağlı olduğu tablanın hareketini eksantrik mil aracılığıyla servo motor sağlamaktadır. Sistem bu şekilde çalışırken eş zamanlı olarak titreşim motorunun çalışmasıyla yaylar salınım hareketi yapar ve bu hareket sonrası numune ve aşındırıcı uç arasındaki baskı kuvveti bir darbe etkisi oluşturur. Yani sistem numune üzerine lineer kayma hareketi yaparken aynı zamanda darbe kuvveti uygular. Titreşim motorunun bağlı olduğu gövde ve yayların konumları şekil 4.7 ve yataklanmış hali şekil 4.8’de verilmiştir.

4.1.3. Servo Motor

Motorlar genel olarak belirli bir hızda dönmeye göre tasarlanırken, son kontrol elemanı olarak görev yapan servo motorlar, kullanıcının komutlarını yerine getiren, geniş hız komut aralıklarına göre tasarlanmaktadır. Komutlar, mekanizmalarda hız ve pozisyon kontrolü yapmaya yarayan ve çok yüksek seviyede hassasiyete sahip bir motor çeşididir [76].



şekil 4.9. Servo motor [77].

Servo motorların diğer motorlara göre avantajlı yönleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

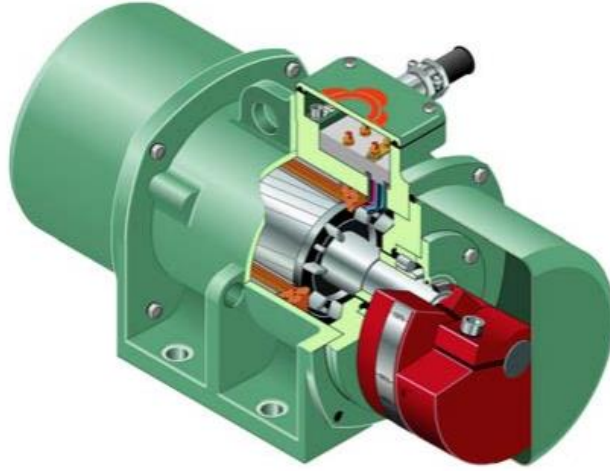
- Hız ve yük değişkenliği sağlayabilir.

- Mekanizmayı pozisyonlama hassasiyeti çok yüksektir.
- Yüksek derecede kararlılık sağlar.
- Periyodik çalışmaya uygundur.

4.1.4. Titreşim Motoru

Mühendislik biliminde mekanizmalar üzerine etki eden titreşimler daima önemli görev almıştır. Bazı durumlarda titreşimler yok edilmeye, azaltılmaya çalışılırken bazı durumlar da ise titreşim belirli oranda kullanılmak istenmiştir. Titreşim motoruna ait şematik Şekil 4.10'da verilmiştir.

Titreşim motorları, içerisindeki balanssızlık yaratan ağırlıklar yardımıyla devirleri titreşime dönüştüren motor türüdür. Titreşim motorları, tamamen kapalı bir sistem içerisinde sürekli yağlama düzeneğine sahiptir. Rulmanlı yataklarda kuvvetli bir biçimde boyutlandırılmış şaft zıvana geçirilmiş rotor ile çalışır [78,79].



Şekil 4. 10. Titreşim motoru [80].

Titreşim motoru seçimi yapılırken satıcı firmanın tavsiyeleri üzerine ürünün kataloglarından yararlanılarak gerekli kuvvet parametrelerini, aşınma gerçekleşirken üzerine etki eden ağırlık ve kayma hızı doğrultusunda basit formülasyonlardan yararlanılmıştır [81].

$$F_M : A_{pp} \times m_t \times (n/1000)^2 \times 0,56 \text{ [N]} \quad (4.1)$$

$$M : e \times m_t \text{ [Nmm]} \quad (4.2)$$

$$e : A_{pp}/2 \text{ [mm]} \quad (4.3)$$

F_M : Merkez kaç kuvveti [N]

M : Statik moment [Nmm]

A_{pp} : Titreşim genliği [mm]

m_t : Vibrasyon motoru dahil toplam sistem ağırlığı [N]

e : Eksantriklik [mm]

Bu çalışmada sabitleme yatağı ile temas halinde olan titreşim motoru genliği 0,1 mm'nin altında olması literatür çalışmaları ile belirlenmiştir [81].

$$M : \frac{A_{pp}}{2} * m_t = \frac{0,1}{2} * 20 = 1 \text{ Nmm}$$

Statik moment 1 Nmm bulunmuştur. Bu moment değerine göre motor kataloğu (Çizelge 4.1) üzerinden XV20 modeli seçilmiştir.

Tasarımı yapılan test cihazının ağırlığına göre basit formülasyonlar sayesinde sisteme titreşim motorunun numune tutucusuna 20 N'luk bir kuvvet uyguladığı bulunmuştur.

Çizelge 4.1. Mikro seviyesindeki titreşim motorlarının özellikleri [81,82].

| | | MEKANİK BİLGİLER | | | | ELEKTRİKSEL BİLGİLER | | | | |
|----------|-------|------------------|------------------|-----|---------------|----------------------|--------------|-----------------|-----------|------------------|
| | RPM | MODEL | Santrifüj Kuvvet | | Statik Moment | Ağırlık | Nominal Akım | Nominal Gerilim | Kapasitör | Maks. Giriş Gücü |
| | 50 Hz | | KG | N | | | | | | |
| trifaze | 3000 | VX 20 | 21 | 206 | 2,1 | 1,60 | 0,11 | 400 | - | 21 |
| | | VY 40 | 39 | 383 | 3,83 | 2,60 | 0,18 | 400 | - | 40 |
| | | VY 60 | 59 | 579 | 5,75 | 2,70 | 0,18 | 400 | - | 40 |
| | 1500 | VY 25 | 25 | 245 | 9,58 | 3,00 | 0,18 | 400 | - | 56 |
| monofaze | 3000 | VX 20 M | 21 | 206 | 2,1 | 1,60 | 0,12 | 230 | 1 | 25 |
| | | VY 40 M | 39 | 383 | 3,83 | 2,70 | 0,24 | 230 | 4 | 50 |
| | | VY 60 M | 59 | 579 | 5,75 | 2,80 | 0,24 | 230 | 4 | 50 |
| | 1500 | VY 25 M | 25 | 245 | 9,58 | 3,10 | 0,28 | 230 | 4 | 58 |

4.1.5. Aşındırıcı Bilye ve Numune

Tasarlanan test cihazı küresel aşındırıcı bilyelere uygundur. Sistem bilyelerin değiştirilmesine izin verip vidalı bir sistem ile kuvvet bağlı olarak bilyeleri sabitlemektedir. Test cihazı için kullanılacak aşındırıcı bilye 6 mm çapındadır. Yapılacak analizlerde bilye malzemesi olarak tungsten seçilmiştir.

Tasarlanan test cihazı dikdörtgen prizma (12x12x20 mm³) şeklindeki numuneleri test edebilir. Yapılacak analizlerde numune malzemesi AA 6061-T6 alaşımı olarak seçilmiştir.

Kullanılacak olan bilye ve numune ait ayrıntılı bilgiler bölüm 4.2.1’de verilmektedir.

4.2. YÖNTEM

Tasarımı yapılmış olan test cihazının bilgisayar destekli sayısal analiz programı sayesinde sonlu elemanlar yöntemiyle sınır şartları belirlenip simülatif analizleri yapılacaktır.

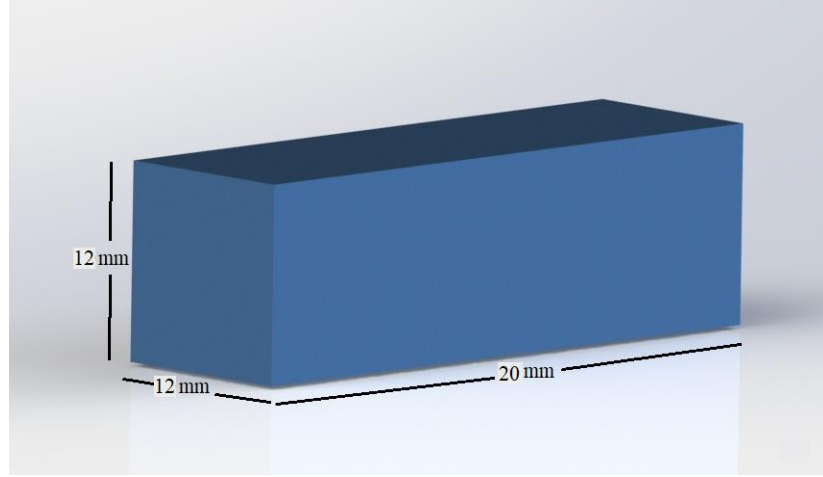
4.2.1. Analizi Yapılacak Olan Numune ve Bilyenin Tasarımı

Bu tezde Solidworks'te çizilen ve aşınmayı yapacak olan aşındırıcı bilye ve aşınacak olan malzeme sonlu elemanlar yöntemi ile titreşim destekli abrasif aşınma test cihazının çalışma referansları göz önüne alınarak gerekli parametrelerde ANSYS Workbench'de analizleri yapılacaktır.

Aşınacak olan malzeme AA 6061-T6 12x12x20 mm³ (Şekil 4.12) ölçüsünde, aşındırıcı olan bilye ise tungsten 6 mm (Şekil 4.11) çapında olan bir küredür. Bu iki malzeme ANSYS Workbench "Explicit Dynamics" analizi modülünde gerçekleştirilecektir. AA 6061-T6 malzemesinin fiziksel özellikleri Çizelge 4.2'de ve mekanik özellikleri de Çizelge 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.11. Aşındırıcı tungsten bilye.



Şekil 4.12. Aşınan malzeme AA 6061-T6.

Çizelge 4.2. AA 6061-T6 malzemesinin fiziksel özellikleri [83].

| Fiziksel Özellikler | Değer |
|------------------------|----------------------------|
| Yoğunluk | 2.63 g/cm ³ |
| Erime Sıcaklığı | 582 °C |
| Isıl Genleşme K. | 23.4 x 10 ⁻⁶ /K |
| Elastisite Modülü | 69 Gpa |
| Isıl Kapasite | 170 |
| Elektriksel İletkenlik | %43 IACS |

Çizelge 4.3. AA 6061-T6 malzemesinin mekanik özellikleri [83].

| Mekanik özellikler | Değer |
|--------------------|---------|
| Akma Dayanımı | 270 MPa |
| Çekme Dayanımı | 310 MPa |
| Kesme Dayanımı | 207 MPa |
| Uzama | %15 |
| Elastisite | 69 GPa |

AA 6061 üzerine ısıl işlem uygulanarak T-6 grubu içinde yer alır. Bu malzeme diğer ısıl işlem alabilen malzemeler arasında aşınma direnci, daha iyi şekil alabilme, üzerinden talaş kaldırma yeteneği bakımından çok daha uygundur. Bu malzemelerin

öne çıkan özellikleri kararlı yapıda olmaları ve çözünme ısıl işleminde çok iyi şekil alabilmeleridir [83]. AA 6061 kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.4’te verilmiştir.

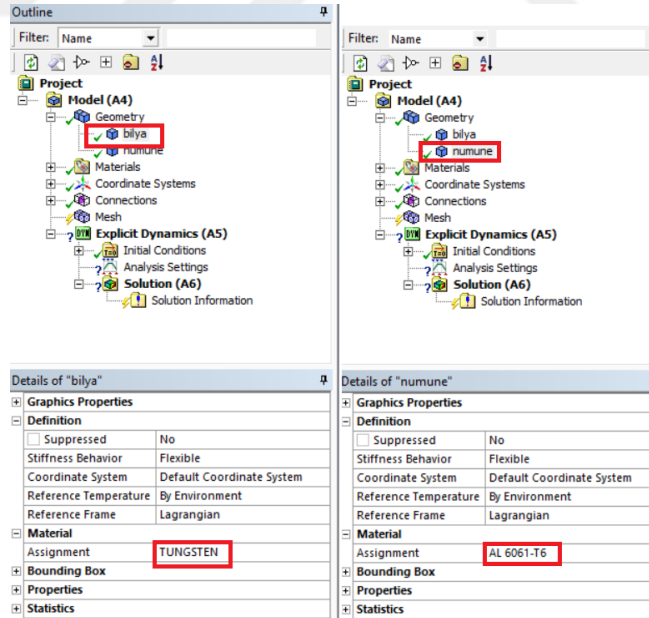
Çizelge 4.4. AA 6061 kimyasal kompozisyonu [83].

| Element | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Al |
|----------------|---------|-----|----------|------|---------|-----------|------|------|-------|
| Alüminyum 6061 | 0,4-0,8 | 0,7 | 0,15-0,4 | 0,15 | 0,8-1,2 | 0,04-0,35 | 0,25 | 0,15 | Kalan |

4.2.2. ANSYS Üzerinde Simülasyon Koşullarını Hazırlamak

ANSYS birçok test metodunu teorik olarak analiz yapabilmemize olanak sağlar. Tasarımı yapılan bu test cihazında lineer yatak üzerinde kayma hareketi, aynı zamanda titreşim motorunun etkisi sonucu oluşan kuvvet dahilinde bir hareket oluşacağından uygun olarak seçilen modül dinamik analizidir.

4.2.2.1. Malzemelerin Atanması



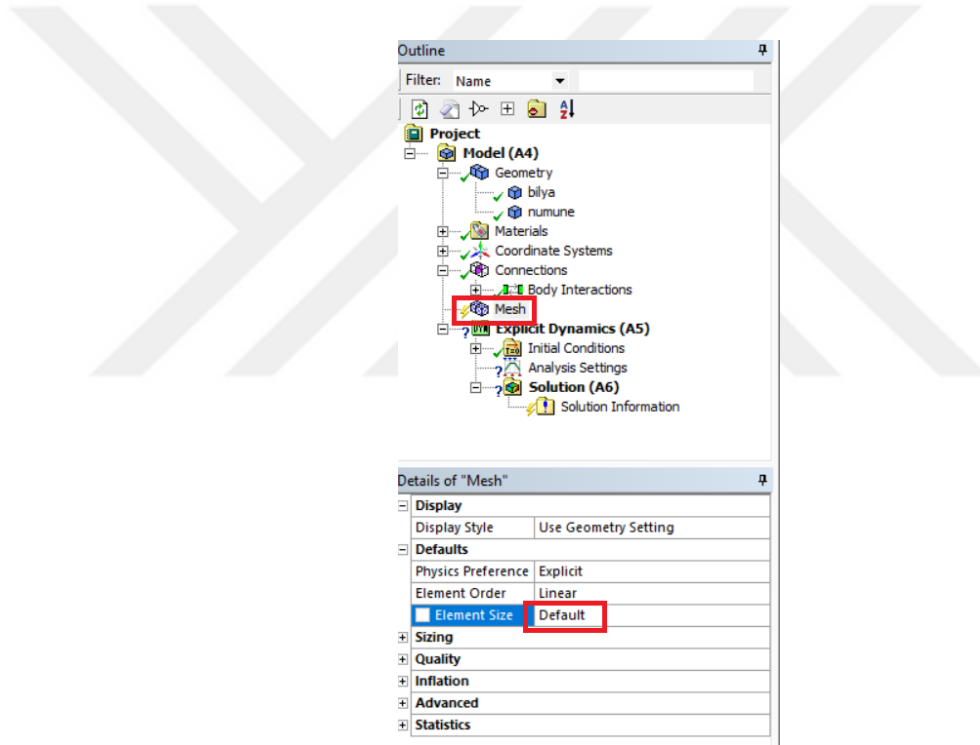
Şekil 4.13. Bilye ve numuneye malzeme atanması.

Model sekmesi altındaki “Geometry” seçeneğinde, eklemiş olduğumuz malzemelerin atanması gerçekleşmektedir. Aşındırıcı bilyeye “Assignment” sekmesinden seçtiğimiz

tungsten atanırken, aşınan malzemeye AA 6061-T6 malzemesi atanmaktadır (Şekil 4.13).

4.2.2.2. Malzemelerin Üzerine Ağ Örgüsünün (mesh) Atanması

Ağ örgüsünün belirlenmesi ve malzemelerin üzerine uygulanmasının amacı, malzemelerin karmaşık geometrilerinin hacimlerini, simülasyonun yürütebileceği kadar küçük hacimlere ayırmaktır. Boyut olarak ne kadar çok bölmeye sahip olursa analizlerin sonuçları da o kadar ayrıntıya sahip olmaktadır. Ancak mesh ayarı yapılırken hacmi bölme işlemi arttıkça analiz süresi de eş değer oranda artmaktadır.



Şekil 4.14. Dinamik analizde malzeme üzerine ağ örgüsü ataması.

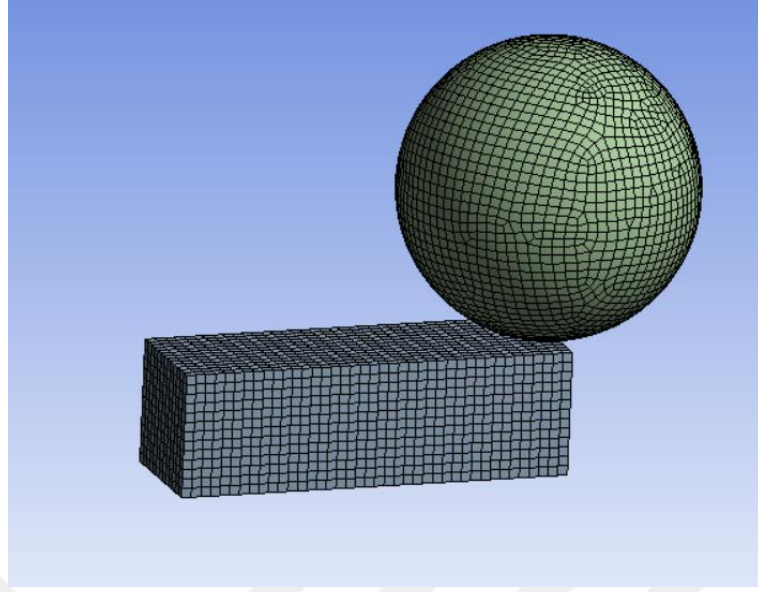
Mesh ataması element size sekmesi üzerinde, atamanın hangi boyutta olacağı belirlenerek yapılmaktadır (Şekil 4.14).

Çizelge 4.5. Mesh hassasiyet analizi

| Simülasyon | Mesh ataması | Aşınma Derinliği | Analiz Süresi |
|------------|---------------|-------------------|------------------|
| 1 | 1 mm | -2,3039 mm | 6,2 dak |
| 2 | 0,5 mm | -3,1757 mm | 37,9 dak |
| 3 | 0,25 mm | -3,5684 mm | 523,2 dak |
| 4 | 0,1 mm | -3,7148 mm | 843,6 dak |
| 5 | 0,05 mm | -3,7365 mm | 1890,7 dak |

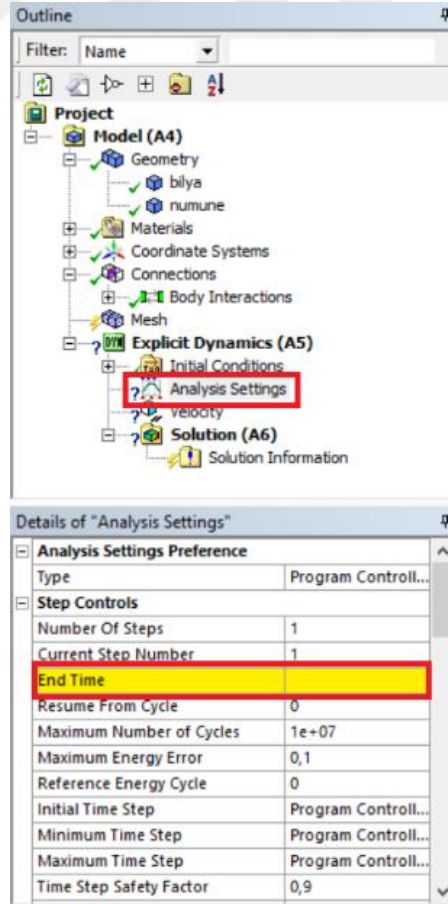
Mesh ayarı yapılırken analiz yapılacak olan bilgisayarın özelliklerine uygun bir değer seçilmelidir. Bu seçimin yapılması için mesh hassasiyet analizleri yapılmıştır. Yapılan hassasiyet analizlerinin farklı mesh büyüklükleri için verdikleri sonuç doğruluğu (aşınma derinliği) ve analiz süresi için deneme analizleri yapılmıştır. Analizler 10 mm'lik aşınma mesafesi için 0,25 m/s hızında ve 20 N'luk kuvvet şartları altında gerçekleştirilmiştir. Mesh hassasiyet analizleri için kullanılan değişken (mesh ataması) ve çıktılar (aşınma derinliği, analiz süresi) Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Yapılan mesh hassasiyet analizleri sonucunda mesh ataması 0,1 mm olarak seçilmiştir. 0,1 mm mesh atamasının seçilmesinin nedeni hem analizler için kullanılacak olan bilgisayarın özelliklerine uygun olması hem de bir sonraki analizde yani 0,05 mm'lik analizle aşınma derinliği arasında çok fark olmamasıdır. Şekil 4.15'te 0,1 mm'lik ağ örgüsü ataması yapılmış numune ve bilyenin görüntüsü verilmektedir.



Şekil 4.15. 0,1 mm'lik ağ örgüsü ataması yapılmış numune ve bilye.

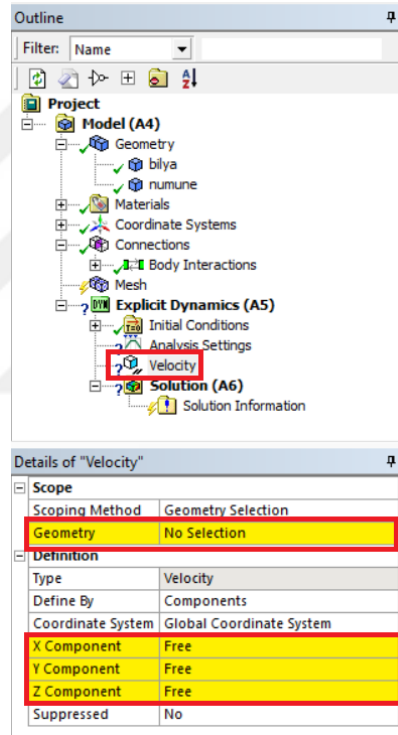
4.2.2.3. Simülasyon Süresinin Belirlenmesi



Şekil 4.16. Dinamik analizinde simülasyon süresinin belirlenmesi.

Simülasyon yapılırken pratik ile kıyas edilebilmesi için süre sınır şartı son derece önemlidir. Bu tezde karşılaştırma yapılabilmesi için sabit tutulan sınır şartı aşınmanın aldığı yoldur. Aşınma analizinin gerçekleşeceği mesafe 10 mm'dir. Bu ölçüde istenen değerler, hız şartı ile değerlendirilecek olursak son süreyi belirlemek her analizde birbirinden farklı olacaktır. Süre bilgisi Şekil 4.16'da gösterilen sekme üzerinden girilmektedir. Sürenin tespiti için gerekli olan bilgiler 4.2.2.4 bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir.

4.2.2.4. Simülasyon İçin Hız Sınır Şartının Belirlenmesi



Şekil 4.17. Dinamik analizinde hız sınır şartının belirlenmesi.

Pratikte uygulanan aşınma sistemini ANSYS programı üzerinde simülasyonunu gerçekleştirebilmek için seçtiğimiz dinamik analiz modülünde hız sınır şartını belirlemek son derece önemlidir. Hız bilgisi Şekil 4.17'de gösterilen sekme üzerinden girilmektedir.

Aşınma testlerinde amaç daima sabit bir parametrede farklı yükler ve hızlar altında birbirleri arasında kıyaslama ile malzemelerin dayanımını ölçmek olduğu için bu

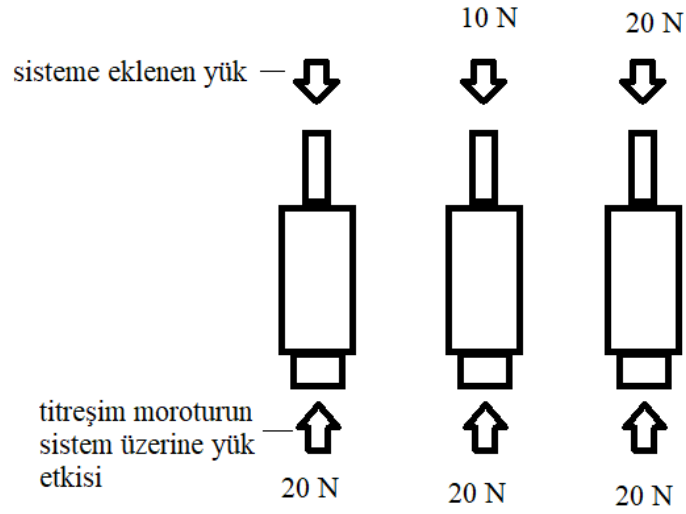
çalışmada sabit parametre aşınmanın gerçekleştiği malzeme ve aşınmanın kat ettiği yol olmuştur. Aşınmanın aldığı yolu 10 mm olarak belirledikten sonra literatür araştırmaları sonucu lineer (X eksen) üzerindeki hızlar belirlenmiştir. Titreşim motorunun yaylar yardımıyla, salınımlı hareketi sonrasında ortaya çıkan ve firmaların önerdiği kataloglar dahilinde, basit formüller ile kuvvet değerlerini hesapladıktan sonra, kuvvet değerleri hıza (Y eksen) çevrilmiştir.

$$X = V_X \times t \quad (4.4)$$

$$F = m \times \frac{dV}{dt} = m \times \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} \quad (4.5)$$

| | | | |
|----------------|--------------------------------|----------------|------------|
| x | : Aşınma mesafesi | V ₁ | : İlk hız |
| V _x | : X koordinatındaki lineer hız | V ₂ | : Son hız |
| t | : Toplam süre | t ₂ | : Son süre |
| F | : Yük kuvveti | t ₁ | : İlk süre |
| m | : Sistemin toplam kilosu | | |

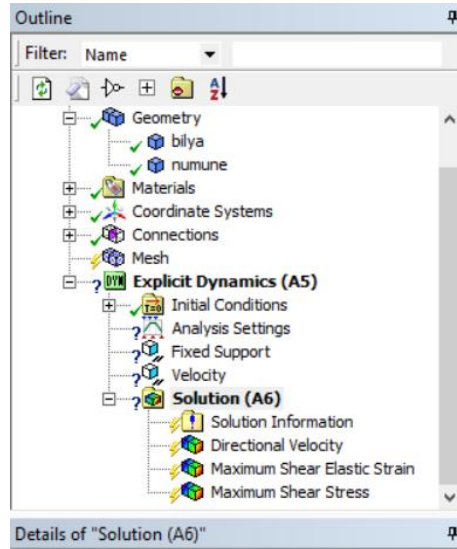
Bu yol ve kuvvet formülleriyle sabit olan aşınma mesafesini (x = 10 mm), literatür çalışmaları referans alınarak 10, 20 N kuvvetleri ve titreşim motorunun sisteme etki ettiği 20 N'luk kuvvetler altındaki değerler ve kayma doğrultusunda (X eksen) 0,25, 0,5 ve 1 m/s hızları seçilerek süreler (t) ve Y ekseninde hızlar bulunmuştur. Sisteme etki eden yükler Şekil 4.18'de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.18. Sisteme etki eden yükler.

Titreşim motorunun sisteme etki ettiği 20 N’luk kuvvet ve literatür çalışmaları referans olarak alınan 10 ve 20 N’luk kuvvetlerin sisteme etki ettiği toplam yükler 20, 30 ve 40 N olarak bulunmuştur.

4.2.2.5. Değerlendirilecek Olan Simülasyon Sonuçları



Şekil 4.19. Yorumlamak istenen simülasyon sonuçları.

Tüm sınır şartlarının değerleri sisteme girildikten sonra analiz sonuçlarının yorumlanması, seçeneklerdeki belirtilen aşınma derinliği, maksimum kayma gerilmesi

ve maksimum kayma gerinmesi üzerine olacaktır. Yorumlamak istenen simülasyon sonuçlarının değerlerine Şekil 4.19'daki sekmeden ulaşılabilmektedir.

4.2.3. Analizlerde Kullanılacak Olan Sınır Şartları

4.2.2 bölümündeki bilgiler ışığında yapılan hesaplamalar sonucunda test kapsamında yapılacak olan analizler için kullanılacak sınır şartları belirlenerek Çizelge 4.6'da verilmiştir. Tüm analizlerde 10 mm aşınma mesafesi kullanılmıştır.

Çizelge 4.6. Yapılacak olan analizlerin sınır şartları.

| Analiz | V _x (m/s) | V _y (m/s) | t (s) | Kuvvet (N) |
|--------|-------------------------|-------------------------|----------|---------------|
| 1 | 0,25 | 0,04 | 0,04 | 20 |
| 2 | 0,25 | 0,06 | 0,04 | 30 |
| 3 | 0,25 | 0,08 | 0,04 | 40 |
| 4 | 0,5 | 0,02 | 0,02 | 20 |
| 5 | 0,5 | 0,03 | 0,02 | 30 |
| 6 | 0,5 | 0,04 | 0,02 | 40 |
| 7 | 1 | 0,01 | 0,01 | 20 |
| 8 | 1 | 0,015 | 0,01 | 30 |
| 9 | 1 | 0,02 | 0,01 | 40 |

BÖLÜM 5

ANALİZ BULGULARI VE SONUÇLARI

Ölçüleri 12x12x20 mm³ olan AA 6061-T6 malzemesi üzerine tungsten karbür aşındırıcı bilye tarafından yapılan analiz sonuçlarını değerlendirirken aşınma mesafesi (10 mm) sabit seçilmiştir. Seçilen aşınma mesafesine göre literatür çalışmaları sonucu belirlenen yük kuvvetleri, hız parametresine çevrilmiştir. “Explicit Dynamics” modülü altında simülasyonlar yapılmış ve yön deformasyonu (Y eksen) ile aşınma derinlikleri, maksimum gerilme ve maksimum gerinme sonuçları değerlendirilmiştir.

5.1. AŞINMA DERİNLİKLERİ

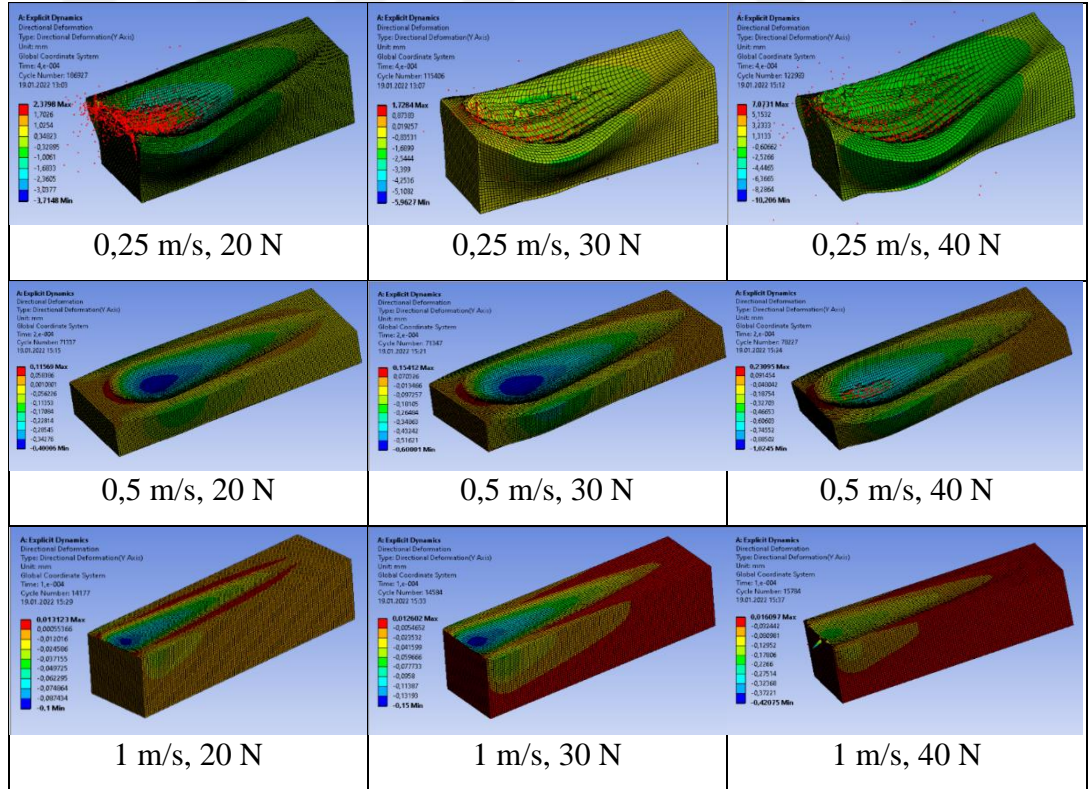
Aşınma mesafesi 10 mm tutulan simülasyon parametreleri için kayma hızları 0,25 m/s sabit olarak alınmış, yükler ise 20 N ve 30 N olarak literatür çalışmaları referans alınarak kabul edilmiştir [84,85]. Yapılan analizlerden elde edilen aşınma derinliklerine ait sonuçlar Şekil 5.1’de verilmiştir. Kuvvetin %50 oranında artmasıyla aşınma derinliğinin %60,50 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Aynı hız üzerinde 30 N’luk kuvvetin %33,33 oranında artmasıyla yapılan analiz sonucu oluşan aşınma derinliğinin ise %71,16 oranında arttığı tespit edilmiştir (Çizelge 5.1).

0,5 m/s hızda 20 N, 30 N ve 40 N kuvvet uygulanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre 30 N kuvvet uygulandığında elde edilen aşınma derinliğinin 20 N kuvvet uygulanan aşınma derinliğine göre %50 ve 40 N kuvvet uygulanan aşınma derinliğinin de 30 N kuvvet uygulanan aşınma derinliğine göre %70,75 arttığı gözlemlenmiştir (Çizelge 5.1).

1 m/s hız parametresi belirlenerek 20 N, 30 N ve 40 N kuvvetleri altında analizler tekrar edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen aşınma derinlikleri karşılaştırıldığında kuvvet değerinin 30 N olduğu işlemde elde edilen aşınma derinliği kuvvetin 20 N

olduğu işlemdeki aşınma derinliğine göre %50 ve kuvvet değerinin 40 N olduğu işlemde elde edilen aşınma derinliği kuvvetin 30 N olduğu işlemdeki aşınma derinliğine göre %71,66 oranında arttığı görülmektedir (Çizelge 5.1). Bu analiz sonuçlarından anlaşılmaktadır ki aşınma miktarı, yük ve aşınma hızı sınır şartlarının değişmesiyle değişmektedir. Düşük hızlarda yüklerin artmasıyla aşınma miktarının artma yüzdesi fazla olurken, hız parametresinin artmasıyla farklı yükler altındaki aşınma miktarı yüzdeleri daha az oranda artmıştır. Aynı yükler altında farklı hızlardaki aşınma miktarlarını değerlendirilecek olursa, düşük hızlardaki aşınma yüzdesi hızlı olan aşınma mekanizmasına göre çok daha fazladır. Bu değişimin sebebi tıpkı Wu ve takım arkadaşlarının yapmış olduğu aynı kuvvet ve %11,11'lik hız artışlarında yaşanan aşınma derinliği etkisinde olduğu gibi hız değerinin artmasıyla sürtünme katsayısının azalmasına atfedilebilir [86].

Aşınma derinliklerinin standart aşınma mekanizmaları ile yapılan analizlerden fazla olmasının sebebi titreşim destekli darbe aşınmasıyla aynı anda gerçekleşiyor olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.1. Aşınma derinliklerinin analiz görselleri ve sonuçları.

Çizelge 5. 1. Analiz sonucu aşınma derinlikleri.

| Analiz | 20 N | 30 N | 40 N |
|----------|-------------|-------------|-------------|
| 0,25 m/s | -3,7148 mm | -5,9627 mm | -10,206 mm |
| 0,5 m/s | -0,40006 mm | -0,60001 mm | -1,0245 mm |
| 1 m/s | -0,1 mm | -0,15 mm | -0,42075 mm |

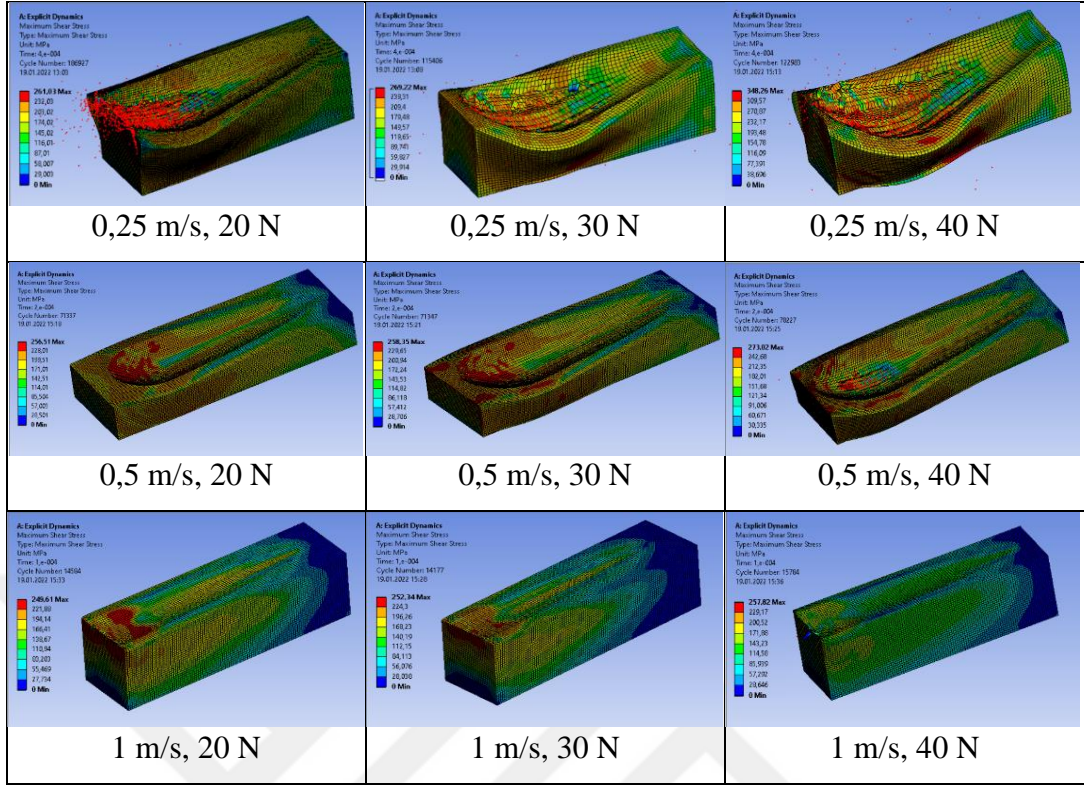
5.2. MAKSİMUM KAYMA GERİLMELERİ

Yapılan analizlerden elde edilen kayma gerilmelerine ait sonuçlar Şekil 5.2’de verilmiştir. Hız parametresinin 0,25 m/s ve kuvvetlerin 20 N, 30 N ve 40 N olduğu analizlerde gerilme değerlerinin kuvvet artışına göre sırasıyla %3,13 ve %29,37 oranında arttığı görülmektedir (Çizelge 5.2).

Hız 0,5 m/s’ye çıkarıldığında yine 20 N, 30 N ve 40 N’luk kuvvetler altındaki gerilme değerlerinin kuvvet artışına göre sırasıyla %0,72 ve %5,68 oranında arttığı gözlenmektedir (Çizelge 5.2).

Aynı kuvvet parametreleri altında hız parametresinin 1 m/s olduğu durumda ise kuvvet artış sırasıyla gerilme değerlerinde % 1,1 ve %2,17 artış olduğu görülmektedir (Çizelge 5.2).

Analiz sonuçlarından anlaşılacağı gibi malzemelerin üzerinde etki eden hız ve yük miktarları gerilmelerin büyüklüğünü etkilemektedir. Sabit hızlarda yük kuvvetinin artmasıyla malzemenin maksimum gerilmesi artmaktadır. Sabit yüklerde hız parametresinin yükselmesiyle ters orantılı bir şekilde malzemenin gerilmeleri azaltmaktadır. Yujin (2013), sabit hızda, yük kuvvetlerini yüzdesel olarak arttığı analizlerde belirli sapmalar altında %4,67’lik bir oranda gerilim artışı olduğunu ve sabit yüzey alanlarında basma kuvvetinin artmasıyla kayma gerilmesinin arttığını belirtmiştir. Sabit hız değerlerinde olup yük parametresinin artmasıyla oluşan gerilmelerdeki artış Yujin’in yaptığı çalışma ile benzerlik taşımaktadır [87].



Şekil 5.2. Kesme gerilmelerinin analiz görselleri ve sonuçları.

Çizelge 5.2. Analiz sonucu maksimum kayma gerilmeleri.

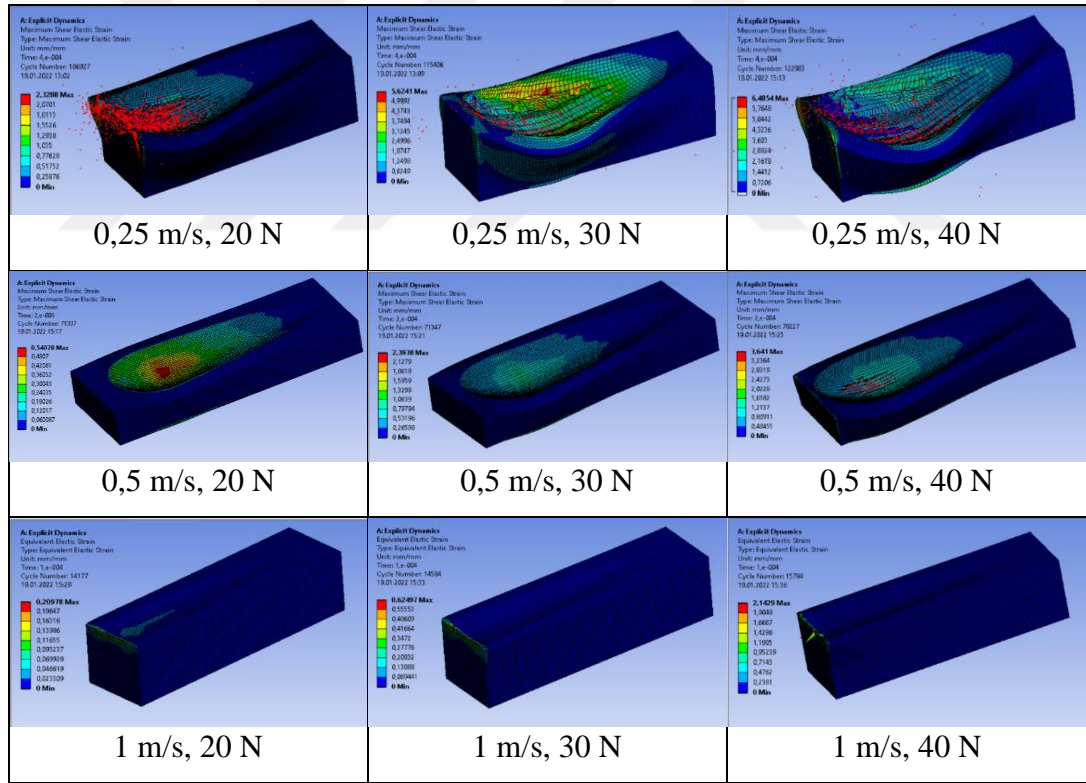
| Analiz | 20 N | 30 N | 40 N |
|----------|------------|------------|------------|
| 0,25 m/s | 261,03 MPa | 269,22 MPa | 348,26 MPa |
| 0,5 m/s | 256,51 MPa | 258,35 MPa | 273,02 MPa |
| 1 m/s | 249,61 MPa | 252,34 MPa | 257,82 MPa |

5.3. MAKSİMUM KAYMA GERİNİMLERİ

Hız ve yük parametrelerinin değişikliği malzemelerin üzerinde oluşan deformasyonu etkilemektedir. Yapılan analizlerden elde edilen kayma gerinimlerine ait sonuçlar Şekil 5.3'te verilmiştir. 0,25 m/s'lik hızda 20, 30 ve 40 N'luk kuvvetler uygulandığında maksimum kayma gerinimleri sırasıyla %141,5 ve %15,31 oranında arttığı gözlenmiştir (Şekil 5.3).

Hız parametresi 0,5 m/s olarak başlatılan simülasyonda aynı kuvvetler için gerinim miktarlarının ise sırasıyla %341,35 ve %52,1 oranında arttığı görülmektedir (Şekil 5.3).

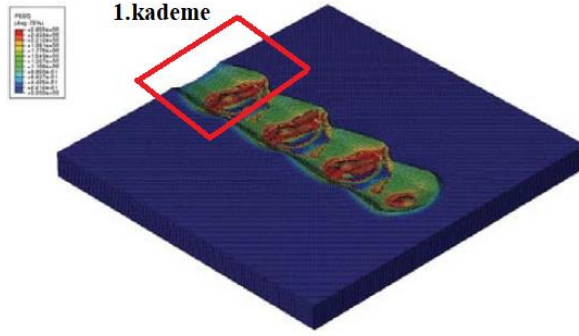
Hız parametresinin 1 m/s'ye olduğu durumda ise kayma gerinimlerinin kuvvet artışına göre sırasıyla %198 ve %242,8 olarak arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan anlaşılmaktadır ki aynı hız parametrelerine sahip simülasyon analizlerinde kuvvet arttıkça malzemenin kayma gerilmesi artmaktadır. Fakat kuvveti sabit tuttuğumuz, hızı arttırdığımız analizlerde kayma gerinimi azalmaktadır. Bu analiz sonuçları Abdi' nin yapmış olduğu çalışmada elde ettiği sonuçlar ile benzer niteliktedir. Abdi çalışmasında, kuvvet parametresini %112,2 oranda arttırması sonucunda gerinimin %90,2 arttığı bulgusuna varmıştır [88].



Şekil 5.3. Kesme gerinimlerinin analiz görselleri ve sonuçları.

Çizelge 5.3. Analiz sonucu maksimum kesme gerinimleri.

| Analiz | 20 N | 30 N | 40 N |
|----------|-------------|-------------|------------|
| 0,25 m/s | 2,3288 MPa | 5,6241 MPa | 6,4854 MPa |
| 0,5 m/s | 0,54078 MPa | 2,3938 MPa | 3,641 MPa |
| 1 m/s | 0,20978 MPa | 0,62497 MPa | 2,1429 MPa |



Şekil 5.4. Abrasif aşınma analizinin aşınma derinliği görseli [89].

Woldman ve takım arkadaşlarının yaptıkları çalışmada sonlu elemanlar yöntemiyle aşınma davranışlarını inceledikleri görülmüştür. Malzemenin üzerine uyguladıkları kayma hızı numuneye plastik deformasyona uğratmıştır. Çalışmada, bu deformasyonun belirli bir seviyeye kadar geldiği ve deformasyon kalıntılarının biriktiği görülmektedir. Woldman ve arkadaşlarının çalışmasında yer alan Şekil 5.4'teki görüntü ile yapılan çalışmada elde edilen Şekil 5.1'deki görüntüler kıyaslandığında, yapılan çalışma sonucunda elde edilen görüntülerin Şekil 5.4'te belirtilen alan ile uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak, gerçekleştirilen çalışmada titreşimin etkisinde yük değişkeni dinamik davranış sergilediği için daha yüksek donanım gerektiren cihazlar üzerinde test işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Mevcut imkanlarla gerçekleştirilen analizlerde tekrarlı iz kalıntılarına gidilememiştir [89].

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. SONUÇ

Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemelerin ömürlerini, dayanımlarını ve erken hasar oluşumunu tayin etmek ekonomik açıdan son derece önemlidir. Bu tez çalışmasında malzeme ömrünü azaltan, hatta üretimi durdurabilen etkenlerin önemli bir yerini tutan aşınma üzerine çalışmalar yapılmıştır. Litaratürde, sürtünmeden kaynaklı oluşan abrasif aşınma üzerine çalışmaların çokça bulunmaktadır. Ancak yapılan araştırmalarda abrasiv aşınmayla aynı anda darbeye maruz kalan malzemeler ile ilgili çalışmalara rastlanmamıştır. Her iki aşınma mekanizmasını aynı test cihazı üzerinde uygulanabilir olması yapılan çalışmanın özgün değerini oluşturmaktadır. Geleneksel lineer kayma aşınma test cihazı SolidWorks 3D çizim programı ile çizildikten sonra numunenin bağlı olduğu gövdenin altına darbe etkisi oluşturacak titreşim motoru eklenmiştir. Titreşim motorunun hareketi gövde altına yerleştirilmiş yaylar sayesinde salınım hareketi oluşturabilecek şekilde tasarlanmıştır. Tasarım işlemleri tamamlandıktan sonra test ünitesinin çalışma prensipleri doğrultusunda ANSYS Workbench programı üzerinden “Explicit Dynamics” modülü ile numune olarak oluşturulan AA 6061-T6 malzemesinin analizleri yapılmıştır. Yapılan analizin aşınma derinlikleri, kesme gerilmeleri ve kesme gerinme sonuçları değerlendirilmiştir. Tez çalışmasının adımları ve sonuçları aşağıda verilmiştir.

- Titreşim destekli darbeli aşınma test cihazı SolidWorks 3 boyutlu çizim programı kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarım pratik uygulamalarda kullanılacak ölçülere uygun olarak hazırlanmıştır. Hareketi sınırlandırılmış sabit aşındırıcı uç altına numunelerin yerleştirilebileceği lineer hareketli tabla eklenmiştir. Lineer hareketin oluşumunu sağlayan eksantirik mil ile bağlanmış bir servo motor gövdenin orta yerinde konumlandırılmıştır.

Gövdenin alt kısmına darbe etkisini oluşturacak mikro titreşim motoru yerleştirilmiştir. Gövdenin tamamı salınım etkisini oluşturabilmesi için yaylar üzerine konumlandırılmıştır. Titreşim motorunun yaylar sayesinde salınımlı hareketi, lineer kayma aşınması gerçekleşirken aşındırıcı uç ile sıkıştırılmış numune üzerine darbe etkisi uygulayacak şekilde tasarlanmıştır.

- Darbe etkisini oluşturacak titreşim motoru seçimi ilgili firmalarla iletişime geçilerek test düzeneği için en uygun olabilecek şekilde yapılmıştır. Test düzeneği için gerçekleştirilen literatür çalışmaları kapsamında 0,1 mm genliğine sahip titreşim motoru seçilmiştir ve bu genliğe istinaden test cihazının ağırlığına göre formülasyonlar eşliğinde 1 Nmm statik momenti bulunmuştur. Bulunan statik momenti değerine göre kataloglardan en uygun mikro titreşim motoru olan XV20 modeli seçilmiştir.
- Titreşim motoru seçimi yapıldıktan sonra mekanizma üzerine yaylar sayesinde darbe etkisi oluşturacak kuvvetler sistem ağırlığı göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Titreşim motorunun sisteme uyguladığı yük 20 N olarak hesaplanmıştır.
- ANSYS üzerinde simülasyonların yapılması için AA 6061-T6 aşınacak malzeme olarak seçilerek 12x12x20 mm³ ölçülerinde tasarlanmıştır. Malzemeyi aşındırması için ise 6 mm çapında tungsten bilye tasarlanmıştır.
- Tasarlanan numune ve aşındırıcı bilyenin, ANSYS Workbench Explicit Dynamics modülü kullanılarak analizleri yapılmıştır. Simülasyonlar başlatılmadan önce analizlerin yapılacağı bilgisayarın performans özellikleri ele alınarak uygun mesh ataması 0,1 mm olarak belirlenmiştir. Analiz parametre değerleri 10 mm aşınma mesafesi sabit tutularak uygun literatür taramaları sonucu 0,25 m/s, 0,5 m/s ve 1 m/s hızları seçilmiş olup önce üzerine etki eden herhangi bir ekstra yük olmadan yalnızca titreşim motorunun sisteme etki ettiği 20 N'luk kuvvet ile sonra ise 10 ve 20 N'luk yükler eklenerek analizler yapılmıştır.

- Analiz değerlendirilmesi kapsamında ele alınan sonuçlardan biri aşınma sonucu oluşan iz derinliğidir. Numune üzerine etki eden hız ve kuvvet miktarı arttıkça aşınma derinlikleri artmıştır. Sabit hızlarda kuvvet parametrelerinin %50 ve %100 oranlarında artmasıyla aşınma derinlikleri %60,5 ve %71,6 oranda artmıştır. Sabit kuvvetlerde ise %100'lük hız artışlarda aşınma derinlikleri %89,23 oranında azalmış olup %300 oranındaki hız artışlarında derinlik miktarı %97,3 oranında azalmıştır.
- Analizler sonrası malzemelerin maksimum gerilme değerleri ise sabit hız parametreleri altında önce %50 sonra %100 oranlarında artan kuvvetle malzemenin üzerine etkiyen gerilme kuvvetleri sırasıyla %3,13 ve %29,37 oranlarında artmalar görülmüştür. Sabit kuvvetle ancak hız parametrelerin yükselmesiyle yapılan analizlerde ise ters orantılı bir şekilde malzemenin gerilmeleri azalmaktadır.

6.2. ÖNERİLER

- Mühendislik malzemelerinin hizmet servis ömürlerinin geliştirilmesi ve malzeme dayanımlarının artırılması için gerçek çalışma koşullarına uygun darbe ve kayma aşınmalarına maruz kalan sistemlerin ve test ünitelerinin imal edilmesi ileride yapılacak çalışmalardan daha gerçekçi sonuçların elde edilmesine katkı sağlayacaktır.
- Literatürde, benzer aşınma yükleri ve aşınma hızları altında gerçekleştirilen analizlerde AA 6061-T6 malzemesi üzerinde daha düşük seviyede deformasyonların olduğu çalışmalar bulunmaktadır. Darbeli aşınma koşulları kullanılarak gerçekleştirilecek ileriki çalışmalarda titreşim modülü de hesaba katılarak uygulanacak yüklerin daha hassas belirlenmesi, literatürdeki çalışmalara daha yakınsak sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.
- Bu ve benzer çalışmalarda analizler gerçekleştirilerek elde edilen sonuçların deneysel çalışmalar ile desteklenebilmesi sonuçların daha anlamlı hale gelmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Swain, B., Bhuyan, S., Behera, R., Mohapatra, S. S., and Behera, A., "Wear: a serious problem in industry", *Tribology in Materials and Manufacturing- Wear, Friction and Lubrication* 2nd ed., **Intech Open**, 200–221 (2020).
2. Varenberg, M., "Towards a unified classification of wear", **Friction**, 1 (4): 333–340 (2013).
3. Torrance, A. A., "Modelling abrasive wear", **Wear**, 258: 281–293 (2004).
4. Deuis, R. L., Subramanian, C., and Yellup, J. M., "Abrasive wear of aluminium composites-a review", **Wear**, 201: 132–144 (1996).
5. Chen, Y., Gong, W., and Kang, R., "Review and propositions for the sliding/impact wear behavior in a contact interface", **Chinese Journal of Aeronautics**, 33 (2): 391–406 (2020).
6. Ratia, V., Miettunen, I., and Kuokkala, V. T., "Surface deformation of steels in impact-abrasion: The effect of sample angle and test duration", **Wear**, 301 (1–2): 94–101 (2013).
7. Zmitrowicz, A., "Wear patterns and laws of wear-a Review", **Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 44 (2): 219–253 (2006).
8. Pei, Z., Song, R., Ba, Q., and Feng, Y., "Dimensionality wear analysis: Three-body impact abrasive wear behavior of a martensitic steel in comparison with Mn13Cr2", **Wear**, 414–415: 341–351 (2018).
9. Zhang, J., Guan, P., Su, C., and Wang, W., "Simulation of vitrified CBN grinding wheel abrasive wear based on SPH", **Advanced Materials Research**, 317–319: 498–502 (2011).
10. Jin, Z. and Fisher, J., "Tribology in joint replacement", **Joint Replacement Technology, Elsevier Ltd.**, 31–55 (2008).
11. Yan, Y., "Tribology and tribo-corrosion testing and analysis of metallic biomaterials", **Metals for Biomedical Devices, Elsevier Ltd**, 178–201 (2010).
12. Rabinowicz, E., "Wear", **Materials Science and Engineering**, 25: 23–28 (1976).
13. Zhang, P., Zhang, F. C., Yan, Z. G., Wang, T. S., and Qian, L. H., "Wear property of low-temperature bainite in the surface layer of a carburized low carbon steel", **Wear**, 271 (5–6): 697–704 (2011).

14. Chen, Y., Gong, W., and Kang, R., "Review and propositions for the sliding/impact wear behavior in a contact interface", *Chinese Journal of Aeronautics*, 33 (2): 391–406 (2020).
15. İnternet: Mühendislik Malzemelerin Özellikleri Mekanik özellikler, "Aşınma Sistemini Oluşturan Unsurlar", <https://docplayer.biz.tr/105006781-Muhendislik-malzemelerinin-ozellikleri-mekanik-ozellikler.html> (2019).
16. Badisch, E., Varga, M., and Eder, S. J., "A brief review of abrasive wear modelling using a numerical-experimental approach", *Key Engineering Materials*, 799: 83–88 (2019).
17. Ogedengbe, T. S., Abideen, Y. A., and Adanikin, A., "Design and development of a testing machine for manufacturing laboratories", *1st fuoye International Engineering Conference*, (2018).
18. Gee, M. G. and Owen-Jones, S., "Wear testing methods and their relevance to industrial wear problems", *CMMT* (A) 92: (1997).
19. Kurgan, N., "Sürtünme ve Aşınma Ölçme Yöntemleri Ders Notları", *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü*, Samsun (2018).
20. Tekin, H., "Co3O4 katkılı zirkonya (8ysz) seramiklerin tribolojik özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa, (2015).
21. Fıçırcı, F., "Al/AlB2 kompozit malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi", Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2012).
22. Jian, Y., Ning, H., Huang, Z., Wang, Y., and Xing, J., "Three-body abrasive wear behaviors and mechanism analysis of Fe–B–C cast alloys with various Mn contents", *Journal of Materials Research and Technology*, 14: 1301–1311 (2021).
23. Torrance, A. A., "Modelling abrasive wear", *Wear*, 258: 281–294 (2004).
24. Jiménez, A.-E. and Bermúdez, M.-D., "Friction and wear", *Tribology for Engineers, Elsevier*, 33–63 (2011).
25. Güngör, K., "Sinterlenmiş bronz esaslı kaymalı yataklarda polimer kullanımının tribolojik özelliklere etkisi", Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2016).
26. Aghababaei, R. and Zhao, K., "Micromechanics of material detachment during adhesive wear: A numerical assessment of Archard's wear model", *Wear*, 476: (2021).

27. Yuan, Z. G., Pan, L. Y., Jiang, S., Wang, L. H., Zuo, M., and Zhao, D. G., "TiN-Al composite coatings on A356 alloy by mechanical alloying", *Materials Science Forum*, 898: 1359–1368 (2017).
28. Campo, E. A., "5.1 introduction 5.2 ASTM physical properties of polymeric materials", Selection of Polymeric Materials 1st ed., *William Andrew* (2008).
29. Liu, H., Zhang, D., Cao, S., Shen, Y., Hou, X., and Xu, L., "Fretting corrosion wear behaviors of steel wires in hoisting ropes in alkaline condition" *Applied Mechanics and Materials*, 1014–1017 (2011).
30. Landolt, D., Mischler, S., and Stemp, M., "Electrochemical methods in tribocorrosion: a critical appraisal", *Electrochimica Acta*, 46: 3913–3929 (2001).
31. Fan, L., Chen, H., Du, H., Hou, Y., and Cheng, Q., "Corrosion resistance of nickel-based composite coatings reinforced by spherical tungsten carbide", *Materials Science Forum*, 993: 1075–1085 (2020).
32. Zhou, Q., Han, W., Du, Y., Wu, H., Bird, A., Zhao, X., Wang, X., Wang, H., and Beake, B. D., "Enhancing fatigue wear resistance of a bulk metallic glass via introducing phase separation: A micro-impact test analysis", *Wear*, 436–437: (2019).
33. Hattori, T., Nishimura, N., and Yamashita, M., "Fretting fatigue strength and life estimation considering the fretting wear process", *Key Engineering Materials*, 353–358: 882–885 (2007).
34. Xiaoqi, S., Saigawa, J., and Ihara, T., "Influence of high-cycle fatigue on crater wear characteristics of cemented carbide tool", *Key Engineering Materials*, 326–336 (2016).
35. Zhang, C., "Understanding the wear and tribological properties of ceramic matrix composites", *Advances in Ceramic Matrix Composites: Second Edition, Elsevier Inc.*, 401–428 (2014).
36. Zalzal, M., Lewis, R., and Slatter, T., "Defining the role of “zero wear volume” in percussive impact", *Wear*, 464–465: (2021).
37. Yılmaz, H., "AISI 316L çeliğinin anodik ve katodik polarizasyon potansiyelleri altında korozyonlu yorulma ve darbeli aşınma davranışına bilye ile ezerek parlatma işleminin etkisi", Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, (2019).
38. Topcuoğlu, İ. S., "Kaynaklı 7020 alüminyum alaşımının korozyonlu yorulma ve darbeli aşınma davranışlarının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, (2021).
39. Filiz, H. İ., "AISI D2 soğuk iş takım çeliklerinin darbeli kayma aşınma davranışına mikroyapının etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İstanbul, (2019).

40. Cai, Z., Bing, G. H., Chen, Z., Qiang, Q. H., Tang, L., Chen, Z. Z. R., and Zhu, M. H., "Impact fretting wear behavior of 304 stainless steel thin-walled tubes under low-velocity", *Tribology International*, 105: 219–228 (2017).
41. Ba, L., Gao, Q., Cen, W., Wang, J., and Wen, Z., "The impact-abrasive wear behavior of high wear resistance filling pipeline with explosion treatment", *Vacuum*, 192: (2021).
42. Cao, S., Zhang, H., and Li, S., "The influence of rotor bar wear of impact crusher on impact effect", *Applied Mechanics and Materials*, 42: 135-138 (2011).
43. Yılmaz, H. and Sadeler, R., "Impact wear behavior of ball burnished 316L stainless steel", *Surface and Coatings Technology*, 363: 369–378 (2019).
44. Soydaş S., "Üniversal aşınma test cihazı tasarımı ve imalatı", Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2006).
45. Urun R., "Sürtünme ve aşınma test cihazı tasarımı ve imalatı", Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, (2008).
46. Ercan H., "Adhezif aşınma test cihazı tasarımı ve imalatı", Yüksek Lisans Tezi, *Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekirdağ, (2008).
47. Büyükkelleci Ü., "Yeni bir aşınma test cihazı tasarımı ve bazı metallerin aşınma davranışlarının araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Firat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (2008).
48. Zhang, G. Q. and To, S., "A novel tool wear measurement method in ultra-precision raster milling", *Key Engineering Materials*, 679: 123–127 (2016).
49. Davidson, S., Perkin, M., and Buckley, M., "The measurement of mass and weight", *Measurement Good Practice Guide*, No:71 (2004).
50. Korkmaz, M. E., "Sertleştirilmiş soğuk iş takım çeliğinin işlenmesinde kesici takımında oluşan gerilmelerin modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2015).
51. Şentürk B. G., "Bir demiryolu yük vagonunun sayısal yöntemlerle seyir emniyeti ve yorulma dayanımının araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İstanbul, (2014).
52. Simitçioğlu G., "Dinamik sonlu eleman analizleri yardımıyla otobüslerde kullanılan polietilen yakıt tanklarının dayanımının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İstanbul, (2016).
53. Esteves, P. J., de Macêdo, M. C. S., Souza, R. M., and Scandian, C., "Effect of ball rotation speed on wear coefficient and particle behavior in micro-abrasive wear tests", *Wear*, 426–427: 137–141 (2019).

54. Silva, F. J. G., Casais, R. B., Martinho, R. P., and Baptista, A. P. M., "Role of abrasive material on micro-abrasion wear tests", *Wear*, 271 (9–10): 2632–2639 (2011).
55. Wang, Y., Qin, Y., Fu, D., Chen, H., Pan, Y., Zhu, C., and Yao, F., "Behaviors of ZTA (zirconia toughened alumina) reinforced iron composites under impact abrasive wear conditions", *Wear*, 458–459: (2020).
56. Wen, E., Song, R., and Cai, C., "Study of the three-body impact abrasive wear behaviour of a low alloy steel reinforced with niobium", *Journal of Manufacturing Processes*, 46: 185–193 (2019).
57. Konyashin, I., Antonov, M., and Ries, B., "Wear behaviour and wear mechanisms of different hardmetal grades in comparison with polycrystalline diamond in a new impact-abrasion test", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 92: (2020).
58. Li, Y., Song, R., Zhao, Z., and Pei, Y., "Effect of three-staged normalizing on the impact wear resistance of 3.23 mass% Cr-Mn-Cu-Si cast iron", *Wear*, 426–427: 59–67 (2019).
59. Wang, S., Cui, Q., Zou, J., and Zhang, Z., "Impact wear mechanism of 2Cr13 steel under small stress multi-impact conditions", *Wear*, 462–463: (2020).
60. Pokhmurs'ka, H. V., Student, M. M., Lanets', O. S., and Voitovych, A. A., "Influence of vibration in the course of surfacing of a protective layer on its microstructure and impact-abrasive wear", *Materials Science*, 51 (3): 412–417 (2015).
61. Saha, G., Valtonen, K., Saastamoinen, A., Peura, P., and Kuokkala, V. T., "Impact-abrasive and abrasive wear behavior of low carbon steels with a range of hardness-toughness properties", *Wear*, 450–451: (2020).
62. Deng, X., Wang, Z., Tian, Y., Fu, T., and Wang, G., "An investigation of mechanical property and three-body impact abrasive wear behavior of a 0.27% C dual phase steel", *Materials and Design*, 49: 220–225 (2013).
63. Yin, M. gui, Cai, Z. bing, Zhang, Z. xing, and Yue, W., "Effect of ultrasonic surface rolling process on impact-sliding wear behavior of the 690 alloy", *Tribology International*, 147: (2020).
64. Herpen, A. V., Reynier, B., and Phalippou, C., "Effect of test duration on impact/sliding wear damage of 304L stainless steel at room temperature: metallurgical and micromechanical investigations", *Wear*, 249: 37–49 (2001).
65. Zhang, D., Beeley, P. R., and Baker, A. J., "The design of an impact abrasion testing machine", *Wear*, 173: 59–64 (1994).

66. Yousif, B. F., "Design of newly fabricated tribological machine for wear and frictional experiments under dry/wet condition", *Materials and Design*, 48: 2–13 (2013).
67. Ogedengbe, T. S. and Adanikin, A., "Design and development of a testing machine for manufacturing laboratories transportation policy view project industrial refrigeration for manufacturing processes view project", *1st fuoye International Engineering Conference* (2018).
68. Ramesh, R. and Gnanamoorthy, R., "Development of a fretting wear test rig and preliminary studies for understanding the fretting wear properties of steels", *Materials and Design*, 27 (2): 141–146 (2006).
69. Leonard, B. D., Sadeghi, F., Shinde, S., and Mittelbach, M., "A novel modular fretting wear test rig", *Wear*, 274–275: 313–325 (2012).
70. Huq, M. Z., Butaye, C., and Celis, J.-P., "An innovative system for fretting wear testing under oscillating normal force", *Department of Metallurgy and Materials Engineering*, 15: 1591–1599 (2000).
71. Liu, Y. and Zuo, Y., "Structural failure analysis of shaft of wobbly and attrited testing equipment", *Applied Mechanics and Materials*, 224: 105–108 (2012).
72. Ma, S., Chen, M., and Skelton, R. E., "Tensegrity system dynamics based on finite element method", *Composite Structures*, 280: (2022).
73. Ukadgaonker, V. G., Powar, S. P., Lahane, S., and Nehete, D. V., "Comparative analysis of unit force problems using IP theory and FEM (ANSYS)", *Procedia Manufacturing*, 20: 201–206 (2018).
74. Fischer, M., Giousouf, M., Schaepperle, J., Eichner, D., Weinmann, M., von Miinch, W., and Assmus, F., "A electrostatically deflectable polysilicon micromirrors-dynamic behaviour and comparison with the results from FEM modelling with ANSYS", *Sensors and Actuators*, A 67: 89–95 (1998).
75. Avikal, S., Bisht, A., Sharma, D., Hindwan, H., Yadav, S., Nithin Kumar, K. C., and Thakur, P., "Design and fatigue analysis of front axle beam of a heavy-duty truck using ansys", *Materials Today: Proceedings*, 3211–3215 (2019).
76. Yılmaz, F. H., "Ac ve dc servo sistem eğitim setinin gerçekleştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya (2008).
77. Pollefliet, J., "Speed- and (or) torque- control of three-phase a synchronous motor", *Power Electronics, Elsevier*, 20.1–20.94 (2018).
78. Daş, T., "Titreşim destekli yüzey aşırı plastik deformasyon cihazı tasarımı ve imalatı", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2019).

79. Kendimiz, H., "Salımlı ve titreşimli götürücüler ve bunların tasarım kriterleri", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2007).
80. İnternet: Friedrich Schwingtechnik, "Montaj ve İşletim Klavuzu", <https://www.friedrich-schwingtechnik.de/en/> (2006).
81. Şevik, Y., "Radyal kaymalı yataklarda fretting aşınmasının incelenmesi için deney düzeneği tasarımı ve imalatı", Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta (2015).
82. İnternet: Miksan Motor, "Mikro Serisi Miksan Motorları", http://www.miksanmotor.com/index.php?option=com_content&view=article&id=121&Itemid=187&lang=tr (2021).
83. Atkaya, M., "Alüminyum 6061 T6 özelliğindeki malzemenin elektron ışın kaynağı yöntemi ile kaynaklanabilirliğinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2021).
84. Kondul, B., "Borlama ile yüzeyi sertleştirilmiş ray çeliğinin aşınma davranışının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük (2020).
85. Elalem, K. and Li, D. Y., "Dynamical simulation of an abrasive wear process", *Journal of Computer-Aided Materials Design*, 6: 185–193 (1999).
86. Wu, C., Jiang, Z., Fan, W., and Chen, L., "Finite element analysis of multi-wire saw silicon rods with consolidated abrasive diamonds", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90 (1–4): 241–248 (2017).
87. Fan, Y. J., Li, Z. K., Han, T., and Wang, W., "Finite element simulation of abrasive wear and study of wear resistance of material", *Advanced Materials Research*, 765-767: 3192-3195 (2013).
88. Abdi, M., Taheri, A. K., and Bakhtiarydavijani, A., "A new analysis method of the dry sliding wear process based on the low cycle fatigue theory and the finite element method", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23 (3): 1096–1106 (2014).
89. Woldman, M., van der Heide, E., Tinga, T., and Masen, M. A., "A finite element approach to modeling abrasive wear modes", *Tribology Transactions*, 60 (4): 711–718 (2017).

ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Raşit KARAKOCA ilk ve orta öğrenimlerini Afyon, Ankara ve Muş'ta tamamladı. İskenderun Fatih Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2014 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Raylı Sistemler Programı (%100 İngilizce) bölümüne başlayıp 2019 yılında 2.89 derecesi ile mezun oldu. Lisans mezuniyetinin ardından 2019 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını tamamladı. Akademik çalışmalarının yanında Gençlik ve Spor Bakanlığının düzenlemiş olduğu tiyatro yarışmalarında 2019 ve 2021 yıllarında Türkiye birinciliklerini elde etti.