



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**DENİZ SULARINDA KULLANILAN ÇELİK**  
**MALZEMELERİN SLURRY EROZYON**  
**AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**Elif Sena GÜR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ağustos-2019**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

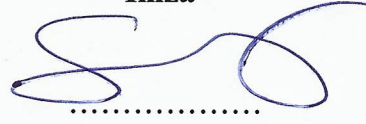
Elif Sena GÜR tarafından hazırlanan “DENİZ SULARINDA KULLANILAN ÇELİK MALZEMELERİN SLURRY EROZYON AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 02/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

#### İmza



#### Danışman

Doç. Dr. Mehmet BAĞCI



#### Üye

Doç. Dr. Murat DİLMEÇ



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK  
Enstitü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Elif Sena GÜR

02.08.2019

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## DENİZ SULARINDA KULLANILAN ÇELİK MALZEMELERİN SLURRY EROZYON AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Elif Sena GÜR

Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet BAĞCI

2019, 61 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN  
Doç. Dr. Murat DİLMEÇ  
Doç. Dr. Mehmet BAĞCI

Slurry (çamur) erozyonu, içerisinde asılı halde katı tanecikler bulunan sıvının malzeme yüzeyi ile etkileşiminden kaynaklanan ve malzemelerin ağır hasara uğramasına neden olan bir aşınma prosesidir. Bu aşınma prosesinde partiküllerin malzeme yüzeyine tekrarlı temasları sonucunda kütle kaybı meydana gelmektedir. Pervaneler, valfler, türbin kanatları, çamur pompaları ve katı partikül taşıyan boru hatları slurry erozyonun sıklıkla karşılaşıldığı endüstriyel uygulama ekipmanlarıdır. Slurry erozyon akış alanı parametreleri, hedef malzeme özellikleri ve aşındırıcı partikül karakteristikleri gibi birçok faktör tarafından etkilenen karmaşık bir proses olduğu için henüz tam anlamıyla anlaşılabilmiş değildir. Bu faktörler arasında malzeme kaldırma prosesi üzerinde en önemli rol oynayan çarpma açısı ve hedef malzemenin mikro yapısıdır. Literatürde sünek ve gevrek malzemelerin slurry erozyon davranışları ve slurry erozyonunu etkileyen parametreler üzerine çeşitli çalışmalar yapılmakla birlikte araştırmalar derinlemesine devam etmektedir.

Ülkemizin üç tarafının denizle çevrili olması ve birçok ülkeyle denizyolu bağlantılarının bulunması sebebiyle Türkiye dış ticaretinin hem ihracat hem de ithalatının yarısından fazlası denizyolu taşımacılığı ile gerçekleştirilmektedir. Ayrıca ülkemiz, denizcilik hatlarındaki stratejik konumda yer alan limanlarıyla, doğu-batı ve kuzey-güney yönlü uluslararası ulaştırma koridorlarının kesişim noktasında çok önemli limanlara ev sahipliği yapmakta dolayısıyla yabancı bayraklı ticari, turistik ve transit filoları deniz sularımızda barındırmaktadır. Tüm bunların yanı sıra savunma ve güvenlik açısından Türk Deniz Kuvvetleri filoları da büyük önem arz etmektedir. Tüm bu sebeplerden dolayı Türkiye deniz sularındaki slurry erozyon aşınmasının incelenmesi önem teşkil etmektedir.

Bu amaçla yapılan tez çalışmasında Türkiye kara sularındaki farklı deniz suyu konsantrasyonlarından dolayı slurry erozyon aşınması üzerine yoğunlaşılması gerektiği düşüncesinden yola çıkarak malzeme, aşındırıcı partikül özellikleri (türü, boyutu, çarpma açısı ve hızı) ve test süresi kombinasyonlarının özel olarak tasarlanan bir deney düzeneği kullanılarak karşılaştırması yapılmıştır.

Slurry erozyon potası test cihazı tasarımının gerçekleştirilmesi ile gemi pervanelerinde, deniz/baraj/akarsu alanı içerisinde kalan köprü ayakları çevresinde, sulu ortamda çalışan makine ve parçalarında slurry aşınmasına maruz kalan malzemelerin kullanım ömürlerinin artırılmasına önemli bir katkı sağlanması hedeflenmiştir. Böylelikle slurry erozyon aşınmasına karşı davranışlar neticesinde aşınmaya maruz kalan sistemlerin ve parçaların en uygun ve en ekonomik şekilde korunma metotları

araştırılarak önleyici sistemlerin geliştirilmesi ve parçaların ömrünün arttırılabilirliği ve ekonomik açıdan kazanımları sorgulanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmada, Alman standartlarında (DIN) St 12 kalite, Amerikan kalite standartlarında (ASTM - SAE – API) A366/CQ olarak geçen dekape sac malzemenin slurry erozyon aşınma davranışları su-kum bulamacında ve tuzlu su-kum bulamacında sırasıyla incelenmiştir. Bulamaç hazırlanırken 400 µm büyüklüğindeki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve çelik grid aşındırıcı partiküller kullanılmış olup Akdeniz, Karadeniz, Ege Denizinden alınan tuzlu su ile ayrıca mukayese yapabilmek için saf su karşılaştırılmıştır.

Revize edilen tezgâh üstü sütunlu matkaba bağlanan numune tutucular vasıtasıyla numunelerin, 30<sup>0</sup> , 60<sup>0</sup> ve 90<sup>0</sup> çarpma açılarındaki slurry erozyon aşınma davranışları incelenmiştir. Deneyler, 1900 dev/dk mil dönme hızında 300 dk süreyle üç tekrarlı olacak şekilde gerçekteştirilmifitir.

Aşındırıcı partikül boyutu, konsantrasyon yüzdesi, çarpma hızı parametreleri sabit tutularak çarpma açısının ve tuzluluk yoğunluğunun meydana getirdiği erozyon oranındaki değişime ait sonuçlar belirlenmiştir. Bulamaçtaki tuzluluk oranının yoğunlaşmasıyla slurry erozyon aşınmasının arttığını gözlemlenmiştir. Ayrıca çarpma açısı küçüldükçe numunelerdeki kütle kaybının arttığı sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Bulamaç erozyonu, Çamur erozyonu, Çarpma açısı, Deniz suyu, Erozyon aşınması, Konsantrasyon

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

# **INVESTIGATION OF SLURRY EROSION WEAR BEHAVIOR OF STEEL MATERIALS USED IN SEAWATERS**

**Elif Sena GÜR**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Mechanical Engineering**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet BAĞCI**

**2019, 61 Pages**

**Jury**

**Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN  
Assoc. Prof. Dr. Murat DİLMEÇ  
Assoc. Prof. Dr. Mehmet BAĞCI**

Slurry erosion is a wear process that results from the interaction of the liquid with solid particles suspended in it and the surface of the material, causing severe damage to the materials. In this erosion process, massive loss occurs as a result of repeated contact of the particles to the material surface. Propellers, valves, turbine blades, sludge pumps and solid particle carrying pipelines are industrial application equipment where slurry erosion is often encountered. Slurry is not yet fully understood because it is a complex process affected by many factors such as erosion flow field parameters, target material properties and abrasive particle characteristics. Among these factors, the impact angle and the microstructure of the target material play the most important role on the material removal process. In the literature, researches have been continuing thoroughly together with the studies on slurry erosion behaviors of ductile and crunchy materials and parameters affecting slurry erosion.

Because three sides of our country are surrounded by four seas and there are sea links with many countries, more than half of both exports and imports of Türkiye's foreign trade are carried by sea transport. Türkiye is also home to very important ports at the intersection of the east-west and north-south international transport corridors with the ports at strategic locations in the maritime lines, therefore we have foreign flagship commercial, tourist and transit fleets in our sea waters. In addition to all these, the Turkish Naval Forces are also of great importance in terms of defense and security.

This study provides an examination of slurry erosion at different sea water concentrations (especially seawaters in Turkey). In this thesis, the effects of experimental parameters, angle of attack, slurry velocity, sand particle size and sand concentration on slurry erosion in both of water-sand and saline-sand mixtures of steel sheets reference material were compared using a specially designed test setup.

Within the scope of this postgraduate thesis, when examining the slurry erosion wear in different sea water concentrations (different concentrations of the four seas on three sides of our country have been prioritized), the idea that sample, abrasive (particle properties and size, impact angle, velocity) and test time combinations have been examined with a single experimental setup has been established. Therefore, in this study, with materializing a slurry erosion tank test device design, it was aimed to make an important contribution to increase the service life of materials exposed to slurry wear in machinery and parts working in an aqueous environment, around bridges in marine / dam / river area in ship propellers.

Thus, if behaviors against slurry erosion wear are known, the most appropriate and economical methods of protection are questioned for systems and parts exposed to this erosion.

In the present work, erosion wear due to water–sand/saline-sand mixture have been investigated using a slurry erosion pot tester. In the experimental study, slurry erosion wear behavior of St 12 / A366/CQ quality dekap steel sheet material was investigated in water-sand slurry and saline-sand slurry respectively. For slurry; 400  $\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  and steel grid abrasive particles and brine from the Mediterranean, Black Sea and Aegean Sea were also used to compare with the mains water.

Slurry erosion wear behaviors of the samples at  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$  impact angles were examined by means of the sample holders connected to the revised bench top column drill. The experiments were carried out in three sets for 300 min at spindle rotation speed 1900 rpm. Corrosive particle size, concentration percentage, impact velocity parameters were kept constant and the results of the change in erosion rate caused by impact angle and salinity density were compared.

Abrasive particle size, concentration percentage, impact velocity parameters were kept constant and the results of the change in erosion rate caused by impact angle and salinity density were determined. The results showed that slurry erosion wear increased as salinity increased. Maximum erosion wear was observed at  $30^\circ$  in the Mediterranean saline-sand slurry, and minimum erosion wear was measured at  $90^\circ$  in water-sand slurry.

**Keywords:** Erosion wear, Impact angle, Seawater, Slurry erosion, Volume concentration,

## ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında, yönlendirmelerinden faydalandığım ve desteğini hissettiğim danışmanım Doç. Dr. Mehmet BAĞCI' ya teşekkür ederim.

Aynı zamanda manevi ve teknik desteklerinden dolayı aileme teşekkürleri bir borç bilirim.

Elif Sena GÜR  
KONYA-2019





## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>v</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vi</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>viii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>3</b>
<b>3. TEORİK ESASLAR</b> .....	<b>11</b>
3.1. Aşınma.....	11
3.1.1. Abrasyon aşınması.....	12
3.1.2. Adhezyon aşınması .....	12
3.1.3. Yüzey yorulması .....	13
3.1.4. Erozyon aşınması .....	13
3.1.4.1. Slurry erozyon.....	14
3.1.4.1.1. Slurry erozyona etki eden faktörler .....	15
3.1.4.1.2. Slurry erozyonun değerlendirilmesinde kullanılan test yöntemleri ve modelleri .....	17
3.2. Çelik Malzemeler.....	20
3.3. Çelik Malzemelerde Slurry Erozyon Aşınması .....	26
<b>4. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	<b>29</b>
4.1. Test Metodu .....	29
4.2. Deney Düzeneği.....	30
4.3. Aşındırıcı Partikül Özelliği.....	33
4.4. Deney Numuneleri ve Özellikleri.....	34
4.5. Deney Numunelerinin Kütle Kaybı Tespiti .....	35
4.6. Deney Prosedürü.....	36

<b>5. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA .....</b>	<b>38</b>
5.1. Deneysel Sonuçlar .....	38
5.2. Korozyon Etkisinin İncelenmesi.....	42
5.3. Tartışma .....	43
5.3.1. Tuzluluk oranı .....	43
5.3.2. Çarpma açısı.....	44
5.4. Aşınmış Yüzeylerin Mikroskop Görüntüleri .....	46
5.5. İstatiksel Değerlendirme .....	49
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>52</b>
6.1. Sonuçlar .....	52
6.2. Öneriler .....	53
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>55</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>57</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>61</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

E	: Maksimum erozyon oranı, (mg/kg)
E <sub>C</sub>	: Erozyon hasarı kesme bileşeni, (mg/kg)
E <sub>D</sub>	: Erozyon hasarının deformasyon bileşeni, (mg/kg)
E <sub>T</sub>	: Toplam erozyon oranı (mg/kg)
H	: Malzemenin sertliği, (N/mm <sup>2</sup> )
K	: Malzemedeki aşınma çukurunu tanımlayan boyutsuz faktör
M <sub>0</sub>	: Numune son ağırlığı, (mg)
M	: Numune ilk ağırlığı, (mg)
M <sub>P</sub> :	: Etkiyen partikülün kütlesi, (mg)
U	: Parçacığın başlangıçtaki hızı, (m/s)
V <sub>N</sub>	: Parçacık normal hızı, (m/s)
V <sub>T</sub>	: Parçacık teğet hızı, (m/s)
ε	: Ampirik sabit
φ	: Ampirik sabit
Θ	: Çarpma açısı, (°)
ρ	: Erozyona maruz kalan malzemenin yoğunluğu, (g/mm <sup>3</sup> )
ΔM'	: Erozyon oranı, (mg/kg)

### Kısaltmalar

GF/EP	: Glass Fibre Reinforced Epoxy (Cam Elyaf Takviyeli Epoksi)
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Norm Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu)
CFD	: Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
SEM	: Scanning Electron Microscope

## 1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisiyle üretilip farklı sektörlerde hizmet veren makine sistem ve ekipmanları, son derece mükemmel tasarlanmış olsalar bile, gerek malzemeden gerekse işletme şartlarından kaynaklanan olumsuz faktörler sebebiyle zamanla iş yapabilme fonksiyonlarını yitirmektedirler. Bu sonucu hazırlayan en önemli etkenlerden biri aşınmadır. Aşınma, DIN 50320 ve ASTM G40–05 standartlarına göre; kullanılan malzemelerin, başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması olarak tanımlanmaktadır (Bağcı, 2010).

Başlıca aşınma mekanizmaları; adhezyon, korozyon, delaminasyon (kavkıma), kavitasyon, yorulma (çukurcuk ve pullanma), abrazif, adezif (adezyon, yenme, sürtme ve kırma), erozif (kavitasyon, sıvı çarpmalı, katı çarpmalı ve slurry) aşınmalarıdır.

Slurry (çamur) erozyonu, içerisinde asılı halde katı tanecikler bulunan sıvının malzeme yüzeyi ile etkileşiminden kaynaklanan ve malzemelerin ağır hasara uğramasına neden olan bir aşınma prosesidir. Bu aşınma prosesinde partiküllerin malzeme yüzeyine tekrarlı temasları sonucunda kütle kaybı meydana gelmektedir. Pervaneler, valfler, türbin kanatları, çamur pompaları ve katı partikül taşıyan boru hatları slurry erozyonun sıklıkla karşılaştığı endüstriyel uygulama ekipmanlarıdır.

Slurry erozyon akış alanı parametreleri, hedef malzeme özellikleri ve aşındırıcı partikül karakteristikleri gibi birçok faktör tarafından etkilenen karmaşık bir proses olduğu için henüz tam anlamıyla anlaşılabilmiş değildir. Bu faktörler arasında malzeme kaldırma prosesi üzerinde en önemli rol oynayan çarpma açısı ve hedef malzemenin mikro yapısıdır. Literatürde sünek ve gevrek malzemelerin slurry erozyon davranışları ve slurry erozyonunu etkileyen parametreler üzerine çeşitli çalışmalar yapılmakla birlikte araştırmalar derinlemesine devam etmektedir.

Ülkemizin üç tarafının denizle çevrili olması ve birçok ülkeyle denizyolu bağlantılarının olması sebebiyle Türkiye dış ticaretinin hem ihracat hem de ithalatının yarısından fazlası denizyolu taşımacılığı ile gerçekleştirilmektedir. Ayrıca denizcilik hatlarındaki stratejik konumda yer alan limanlarıyla, doğu-batı ve kuzey-güney yönlü uluslararası ulaştırma koridorlarının kesişim noktasında çok önemli limanlara ev sahipliği yapmakta dolayısıyla yabancı bayraklı ticari, turistik ve transit filoları deniz

sularımızda barındırmaktayız. Tüm bunların yanı sıra savunma ve güvenlik açısından Türk Deniz Kuvvetleri filoları da büyük önem arz etmektedir. Tüm bu sebeplerden dolayı Türkiye deniz sularındaki slurry erozyon aşınmasının incelenmesi önem teşkil etmektedir. Bu amaçla yapılan tez çalışmasında Türkiye kara sularındaki farklı deniz suyu konsantrasyonlarından dolayı slurry erozyon aşınması üzerine yoğunlaşılması gerektiği düşünülmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalarda; Stack ve Badia (2008) sentetik deniz ortamında, Toro ve arkadaşları (2001) okyanus ortamında slurry erozyon aşınmaları üzerine çalışmalar yapmışlardır. Türkiye deniz sularındaki farklı konsantrasyonda kullanılan malzemelerin slurry (çamur) erozyon aşınma davranışlarının (farklı çarpma hızları, çarpma açıları, aşındırıcı partikül boyutları vb.) araştırılması hedeflenmektedir. Böylece savunma ve güvenlik, ihracat, ithalat ve transit taşımalarından Türk deniz ticaret filosunun ve limanlarının daha fazla pay almasını sağlamak için gerekli tedbirleri almaya, pazar payının büyümesi ve milletlerarası rekabet gücü kazanmaya yönelik çalışmalara destek olunması planlanmaktadır .

Gerçekleştirilen bu deneysel çalışmada, deney numunesi olarak kullanılan Alman standartlarında (DIN) St 12 kalite, Amerikan kalite standartlarında (ASTM - SAE – API) A366/CQ olarak geçen dekape sac kullanılmıştır.

Dekape sac kullanılmasının sebebi, gemi inşaatında çelik, dökme çelik ve hadde çeliği (levha ve profil olarak) en çok kullanılan yapı malzemeleri olmasından dolayıdır (Anonim, 2012).

Numunenin; 30<sup>0</sup> , 60<sup>0</sup> ve 90<sup>0</sup> çarpma açılarındaki slurry erozyon aşınma davranışları incelenmiş olup deneylerde aynı boyutlara sahip 400 µm aşındırıcı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve çelik grid partiküller kullanılmıştır. Akdeniz, Karadeniz ve Ege Denizinden alınan tuzlu su ile ayrıca saf sundan bulamaç hazırlanmıştır. Testler, 1900 dev/dk mil dönme hızında 300 dk süreyle gerçekleştirilmiştir. Üç tekrarlı gerçekleştirilen deneylere göre çarpma açısının ve tuzluluğun aşınmaya etkisi incelenmiştir.

Yapılan deneyler sonunda, aşındırıcı partikül boyutu, konsantrasyon yüzdesi, çarpma hızı sabit tutularak çarpma açısının ve tuzluluk yoğunluğunun meydana getirdiği erozyon oranındaki değişime ait grafikler oluşturulmuş ve deney numunelerinin aşınan yüzeylerinin mikroskop görüntüleri karşılaştırılmıştır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Andrews ve arkadaşları, çarpma açısının Stellite 6 süper alaşımı ve SS316 paslanmaz çeliğinin slurry erozyon ve korozyonu üzerine etkilerini araştırdıkları çalışmalarında jet tipi aşındırıcı test düzeneği kullanmışlardır. Testlerdeki slurry konsantrasyonu ağırlıkça % 3.5 NaCl ve 1.177 g/l açısız kum partikülleri içermektedir. Testler 19 m/s çarpma hızında bir saat süreyle 20<sup>0</sup> , 45<sup>0</sup> , 60<sup>0</sup> ve 90<sup>0</sup> çarpma açılarında gerçekleştirilmiştir. Aşınma mekanizmaları ve yüzey hasarı seviyelerinin değerlendirilmesi ışık mikroskobu, yüzey profillerinin çıkarılması ve SEM görüntüleriyle desteklenmiştir. Stellite 6, SS316 çeliği ile karşılaştırıldığında üstün aşınma direnci sergilemiştir. SS316 çeliği için en şiddetli aşınma sünekliği nedeniyle 45<sup>0</sup> çarpma açısında görülmüştür. Krom karbürlerin kırılmalı ağ yapısının Stellite 6'nın erozyon-korozyon davranışı üzerine önemli bir etkisi olmuş ve kritik hasar 60<sup>0</sup> 'de meydana gelmiştir (Andrews ve ark., 2014).

Frosell ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, çarpma jeti için slurry konsantrasyonunun katı partikül erozyonu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Slurry partikül konsantrasyonunun parça bileşenlerinin erozyon oranı üzerindeki etkileri, endüstriyel ekipmanların tasarım ve bakımında kritik bir faktördür. Çalışmada slurry partikül konsantrasyonu ve erozyon oranı arasındaki ilişki akrilonitril bütadien stiren (ABS) numunelerin jet tipi slurry cihazında cam küreler ile aşındırılmasıyla değerlendirilmiştir. Partikül konsantrasyonu ağırlıkça % 4.6 ve % 22.4 arasında değişmektedir. Nozzle ve numune arası mesafe üç farklı yükseklikte sabit tutulmuştur (H/D=3.0, 5.2 ve 7.4). Sonuçlar erozyon oranının slurry konsantrasyonuna ve test süresine bağlı olduğunu göstermektedir. Testler sonucunda iki farklı erozyon profili ortaya çıkmıştır. Bu profiller arasındaki ve erozyon oranındaki değişim başlangıçtaki test geometrisine ve slurry konsantrasyonuna bağlıdır (Frosell ve ark., 2015).

Gnanavelu ve arkadaşları çalışmalarında, slurry erozyonuna maruz kalan çeşitli geometrilerdeki aşınma profillerinin belirlenmesi için laboratuvar testleri sonuçlarından dikkatle seçilen veriler ve CFD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) simülasyonlarıyla bir erozyon tahmin modeli geliştirmişlerdir. Standart laboratuvar testi (90<sup>0</sup> çarpma açısında su-kum süspansiyonu ile jet çarpma testi) verileri, aşınma verilerini konumun bir fonksiyonu olarak erozyon parametreleri aralığında elde etmek için, CFD kullanılarak karakterize edilmiştir. Bu veriler 316L çelik malzeme ve AFS50/70 aşındırıcı kumu için aşınma haritası oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. Tahmini

modelle öngörülen ve deneylerle ölçülen aşınma arasında iyi bir uyum gözlenmiştir (Gnanavelu ve ark., 2011).

Grewal ve arkadaşları, termal sprey kaplamaların slurry erozyon performanslarına kum konsantrasyonunun etkilerini araştırmışlardır. Slurry erozyonu kontrol edebilmek için alınan çeşitli önlemlerden biri de yüzey kaplama yöntemlerinden biri olan ve çok yönlü yapısı nedeniyle tercih edilen termal sprey kaplamadır. Çalışmada Ni esaslı kaplama, farklı oranlarda Al karıştırılarak yaygın kullanılan CA6NM türbin çeliği üzerine termal sprey yöntemiyle biriktirilmiştir. Kaplamalarda yüksek hızda alev püskürtme (HVFS) tekniği kullanılmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız çeliğin slurry erozyon testleri özel olarak tasarlanmış olan jet tipi aşındırıcı test düzeneğinde yapılmıştır. Konsantrasyonun erozyon üzerindeki etkilerini belirleyebilmek amacıyla ağırlıkça %1 ve %5 kum ihtiva eden su-kum çamuru hazırlanmıştır. Tüm kaplamaların erozyon direncinde iyileşmeye fayda sağladığı, ağırlıkça %40 Al içeren kaplamalarda maksimum iyileşmenin olduğu görülmüştür. Bu durum kaplamaların mikro sertliği ve kırılma tokluğuyla ilişkilidir. Geri sıçrayan partiküllerin perdeleme etkisi (shielding effect) erozyon oranında büyük bir etkiye sahip olmakla birlikte konsantrasyondakine benzer bir artış göstermemiştir. Kaplamanın kaldırılmasıyla birlikte alümina fazın kırılmasının belirgin erozyon mekanizması olduğu görülmüştür (Grewal ve ark., 2015).

Jafar ve arkadaşları, kırılğan malzemeler için erozyon modellemesi yaptıkları çalışmalarında mikro-jet slurry erozyon (ASJM) cihazı kullanmışlardır. Çalışmada alümina partiküllerinin kinetik enerjisinin pürüzlülük ve erozyon oranı üzerine etkileri incelenmiştir. CFD modeli kullanılarak lokal çarpma açıları, hızları ve böylelikle yüzeye çarpan partiküllerin kinetik enerjileri hesaplanmıştır. Yüksek kinetik enerjili sıvı jetleri yüksek erozyon oranına neden olmakta ve çarpan partiküllerin etkisiyle daha büyük yanal çatlaklar meydana getirmektedir. Bu durum daha büyük parçaların yüzeyden kaldırılmasıyla sonuçlanmaktadır. Çeşitli çarpma açılarında ölçülen aşınma oranı ve alümina partiküllerin etkileri nedeniyle görülen hasar, malzeme kaldırmada kırılğan erozyon davranışının baskın mod olduğunu göstermiştir. Hava tahrikli mikro abrazif jet (AJM) için geliştirilen benzer iki analitik kırılğan-erozyon modeli mikro-jet slurry erozyon (ASJM) kanallarındaki erozyon oranının ve pürüzlülüğün tahmin edilmesinde makul sonuçlar vermiştir. Modeller kanal erozyon oranı ve merkez hattı pürüzlülüğü için sırasıyla %12 ve %17 hata öngörmektedir. Buna ek olarak daha önce

kırılğan malzemelerin AJM erozyonunu tahmin etmek için geliştirilmiş olan sayısal simülasyon, çeşitli koşullar altında ASJM kanallarındaki ortalama merkez hattı pürüzlülüğü, şekil parametreleri ve derinliğin tahmin edilmesinde kullanılmıştır (Jafar ve ark., 2015).

Jha ve arkadaşları, ticari alüminyumun çarpma açısı ve döndürme hızının etkisi altındaki slurry erozyon davranışını incelemişlerdir. Numuneler çeşitli açılarda monte edilmiş ve farklı hızlarda teste tabi tutulmuştur. Aşınma oranı kütle kaybı ölçümü kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar aşınma oranının çarpma hızının artmasıyla birlikte ( $90^{\circ}$  'ye kadar) arttığını göstermiştir. Sünek malzemelerde maksimum kaybın  $45^{\circ}$  çarpma açılarında meydana geldiği bilinirken, çalışmada bunun aksine maksimum erozyon oranı  $90^{\circ}$  'de gözlenmiştir. Ancak numunelerin döndürme hızı arttırıldıkça aşınma oranında üstel artış meydana gelmiştir. Sonuçlar aşınma yüzeyinde yapılan metalografik çalışmalar ile doğrulanmıştır (Jha ve ark., 2011).

Joshi ve arkadaşları, yaptıkları bir çalışmada alümina dolgu içeren cam/epoksi kompozitlerin slurry erozyon davranışlarını araştırmışlardır. Çalışmada %5, %10 ve %15 oranlarında alümina dolgulu kompozitlerle birlikte dolgusuz kompozitler de incelenmiştir. Numunelerin erozyon testleri pota tipi slurry erozyon test cihazında slurry konsantrasyonu, çarpma açısı ve hızı olmak üzere üç parametre dikkate alınarak yapılmıştır. Çalışmada aşındırıcı partikül olarak boyutları 170  $\mu\text{m}$  ve 250  $\mu\text{m}$  aralığında değişen kum partikülleri kullanılmıştır. Etken parametrelerin katkısı ANOVA yardımıyla belirlenmiştir. Sonuçlara göre hızın ve çarpma açısının artmasıyla birlikte erozyon oranı da artmaktadır. Çarpma açısının artmasıyla erozyon oranı  $60^{\circ}$  'ye kadar artış göstermiştir. Açının bu seviyeden sonra daha da artması kompozitlerin yarı sünek doğası gereği erozyon hacminde düşüşe neden olmuştur. ANOVA analizine göre slurry erozyon ve çarpma açısı cevabı önemli ölçüde etkileyen parametrelerken hızın katkısı daha az olmuştur. Mevcut regresyon modelleri deneysel sonuçlarla doğrulanmış ve uygulanabilir olduğu tespit edilmiştir (Joshi ve ark., 2014).

Kishor ve arkadaşları, 13Cr4Ni paslanmaz çeliğin termo-mekanik işlem ardından slurry erozyon direncini araştırmışlardır. Termo-mekanik işleme Gleeble 3800 termomekanik simülatörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.  $950^{\circ}\text{C}$  ve  $1050^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda deformasyon şekil değiştirme hızları olarak 0.001 ve 10 s<sup>-1</sup> kullanılmıştır. Termo mekanik proses sonrasında östenit tane büyüklüğü ve iğne martensit yapı optik mikrograflar kullanılarak incelenmiştir. Termo-mekanik işlenmiş numuneler paslanmaz



çelik ile karşılaştırıldığında daha yüksek slurry erozyon direnci göstermiştir. 950 ° C'de işlenmiş numunelerin direnci ise daha yüksektir. Erozyon mekanizması mikro yapı ve mekanik özellikler ilişkilendirilerek tartışılmıştır (Kishor ve ark., 2016).

Lindgren ve Perolainen, aşındırıcı karakteristiklerinin titanyumun erozyon direnci üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmalarında pota tipi slurry erozyon cihazı kullanmışlardır. Titanyum hidrometalurjik sanayiindeki erozyon-korozyona maruz kalan proses ekipmanlarında, en zorlu işlem koşulları altında yapı malzemesi olarak kullanılır. Titanyumun karmaşık erozyon-korozyon davranışını anlamak için öncelikle kendi erozyon davranışının anlaşılması gerekir. Titanyum (ASTM Sınıf 2) partikül büyüklüğü ve şekli değişen dokuz farklı aşındırıcı kullanılarak normal çarpma etkisiyle (90° ) slurry pot test cihazında aşındırılmıştır. Ölçülen ağırlık kaybı benzer deneysel koşullar altında elde edilen 316 paslanmaz çeliğin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar titanyumun çeşitli aşındırıcılar ile mikro kesme ve krater oluşumu gibi mekanizmalar ile hasara uğradığını göstermektedir. Aşınma sonucunda numunelerde meydana gelen ağırlık kaybı sadece partiküllerin kinetik enerjisine değil şekillerine de bağlıdır. Titanyum 316L çeliğe göre biraz daha yüksek kütle kaybı göstermiştir (Lindgren ve Perolainen, 2014).

Mens ve Gee çalışmalarında, iki referans malzemesi olan C22 ve doğal kauçuğun kum-su karışımlarında slurry erozyonu üzerindeki deneysel parametrelerin, çarpma açısının, bulamaç hızının, kum parçacık boyutunun ve kum konsantrasyonunun etkisini açıklamışlardır. Erozyon/hız katsayı değerleri, C22 ve kauçuk için çarpma açısı arttıkça azaldığını gözlemlemişlerdir (Mens ve Degee, 1986).

Nanjo ve arkadaşları, AlCrSiN gradyan kaplamadaki mukavemet özellikleri dağılımını mikro slurry-jet erozyon (MSE) yöntemiyle değerlendirmişlerdir. AlCrSiN gradyan kaplama numuneleri ve aynı zamanda farklı (Al+Si) konsantrasyonlarındaki tek katlı AlCrSiN numuneleri katodik ark yöntemi ile yüksek hız çeliği üzerine biriktirilmiştir. MSE testleri 1.2 µm boyutundaki alümina partiküllerin yüzeye slurry jet ile çarptırılmasıyla gerçekleştirilmiş, aşınmış yüzey profil derinlikleri ölçülmüş ve erozyon oranı elde edilmiştir. AlCrSiN tek katmanlı kaplamalar için erozyon derinlik eğrileri doğrusal olarak değişmiştir. Erozyon oranları (Al + Si) konsantrasyonunun artması ile önemli ölçüde büyürken sertlik yavaş yavaş azalmıştır. Erozyon oranının değişimi nano kompozit oluşumuna ve aynı zamanda kapalı bir altıgen faz ayrılmasına neden olmuştur. Genel bir sonuç olarak, MSE yönteminin uygulaması kolay ve sert

gradyan kaplamaların özellik dağılımını değerlendirmek için yararlı bir teknik olduğu tespit edilmiştir (Nanjo ve ark., 2016).

Ojala ve arkadaşları, su verilmiş aşınmaya dayanıklı çeliklerin slurry erozyon içerisindeki aşınma performansını değerlendirdikleri çalışmalarında pota tipi slurry aşınma cihazı kullanmışlardır. Çalışmada % 9 ve % 33 konsantrasyon oranlarında granit ve partikülleri kullanılmış ve testler  $45^{\circ}$  - $90^{\circ}$  olmak üzere iki farklı çarpma açılarında gerçekleştirilmiştir. İncelenen çeliklerin performansları sertlik ve mikro yapı gibi özelliklerine göre değerlendirilmiştir. Bundan başka test numunelerinin kesitleri ve aşınma yüzeyleri analiz edilerek slurry erozyon boyunca mekanik özelliklerdeki olası farklar ortaya çıkarılmıştır. Aşınma yüzey analizleri, en küçük partikül boyutları için baskın aşınma mekanizmasının abrazif aşınma olduğunu göstermektedir. Düşük gerilimli slurry erozyonda elastomerler çelikten daha yüksek erozyon direncine sahiptir. Yüksek gerilimli slurry erozyon koşullarında ise su verilmiş aşınmaya dayanıklı çeliklerin erozyon direnci elastomerler ile rekabet edebilecek düzeydedir. Çeliklerin aşınma performansı aşındırıcı boyutu arttıkça artarken elastomerlerin ki azalmaktadır (Ojala ve ark., 2016).

Sarlin ve arkadaşları, vinilester matrisli kompozitlerin yüksek sıcaklıklardaki slurry erozyonlarını ve test parametrelerinin etkilerini araştırdıkları çalışmalarında pilot ölçekli pota tipi bir slurry erozyon cihazı kullanmışlardır. Cam elyaf takviyeli vinilester kompozitler (VE-CTP) mükemmel kimyasal dirençleri ve iyi mekanik performansları nedeniyle kâğıt sanayi ve atık su arıtma tesislerindeki hidrometalurjik reaktörlerde yaygın olarak kullanılırlar. Bu uygulamalarda malzemeler erozyona, yüksek sıcaklıklara ( $95^{\circ}$ ) ve çeşitli kimyasal ortamlara maruz kalmaktadır. Literatürde vinilester matrisli kompozitlerin yüksek sıcaklıklardaki slurry erozyonu ile ilgili çalışmalar mevcut değildir. Bu çalışmada slurry konsantrasyonunun, aşındırıcı partiküllerin kinetik enerjisinin ve slurry sıcaklığının etkileri incelenmiştir. Sonuçlar abrazif aşınmanın baskın aşınma mekanizması olduğunu göstermektedir. VE-CTP kompozit yapısının erozif türbülans akışına ve kavitasyona eğilimli olduğu bulunmuştur. Aşındırıcı partikül konsantrasyonundaki (%10-20) ve aşındırıcı partiküllerin toplam kinetik enerjisindeki (30-770 kJ) artış malzemelerin aşınma oranını belirgin bir şekilde (~6 kat ağırlık kaybı) arttırmıştır. Bununla birlikte, birbirleri ile ilişkili farklı parametrelerin toplam etkisinin karmaşık olduğu bulunmuştur. Bunun dışında VE-CTP kompozitlerin erozyon oranı

tahmin edilirken testlerin gerçek şartları simule eden koşullarda yapılması önerilmektedir (Sarlin ve ark., 2015).

Singh ve arkadaşları, çalışmalarında slurry aşınmasında pota tipi test cihazı kullanmışlardır. Erozyon testleri, dönme hızının, partikül boyutunun, katı konsantrasyonun ve sürenin etkisini belirlemek için santrifüjlü bulamaç pompa malzemesi kullanmışlardır. Numune, paslanmaz çelik SS304 ile yürütülmüştür.

Ağırlıkça %30 ila 60 arasında değişen kum ve uçucu kül katı konsantrasyonları aşındırıcı olarak kullanmışlardır. Deneyler; 600, 900, 1200 ve 1500 rpm (dev/dk) olmak üzere dört farklı hızda, 90, 120, 150 ve 180 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. Aşınma direncini arttırmak için WC-10Co-4Cr ve Ni-20Cr203 kaplama tozları kullanmışlardır. Kaplama tozları, yüksek hızlı oksijenli yakıt (HVOF) kaplamanın süpersonik alevi ile pompalanan materyal üzerine çökertilmiştir. Deneysel sonuçlar erozyon aşınmasının, test cihazı dönme mili hızı, deney süresi ve katı parçacıkların doğasına bağlı olduğunu göstermiştir (Singh ve ark., 2017).

Sinha ve arkadaşları, çalışmalarında; bulamaç boru hattında katı partiküllerin aşınmasına ilişkin literatürleri kapsamlı incelemişlerdir. Aşınma ve aşınma mekanizması aşınma oranını etkileyen çeşitli parametrelerin (boyut, şekil, yoğunluk ve sertlik) etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için, farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen çeşitli modellerin/parametrelerin erozyon üzerindeki etkisini aşama aşama incelemişlerdir. Aşınma oranının, parçacık boyutundaki artışla birlikte arttığını ve 75µm'dan daha ince parçacıkların ilavesi arttıkça önemli ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca aşınma oranının çamur akış hızındaki artışla birlikte arttığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca çalışmalarında çarpma açısının slurry erozyon aşınma miktarını etkilediği sonucuna varmışlardır. Sünek malzemeler için 15°-30° açıda maksimum erozyon oluşurken, gevrek malzemeler için maksimum aşınma 90° açıda gerçekleşmiştir (Sinha ve ark., 2015).

Stack ve Badia, sulu bulamaç ortamlarına maruz bırakılan malzemeleri; sadece katı parçacıkların ve akış ortamının etkisine değil, aynı zamanda elektrokimyasal korozyondan kaynaklanan bozulmaya karşı da direnmesi gerekliliğini düşünerek bu çalışmalarını ortaya çıkarmışlardır. Çalışmalarında, bulamaç partikül konsantrasyonunun ve hızının, WC/Co-Cr kaplama üzerindeki kombine etkilerini, kum partikülleri içeren bir sentetik deniz suyu solüsyonunda bir dizi elektrokimyasal

potansiyelde değerlendirdiler. Elde ettikleri sonuçlara göre, çeşitli potansiyelerde partikül hızı ve konsantrasyon arttırıldığında, kaplamanın ve yumuşak çeliğin erozyon-korozyon mekanizmasının belirgin farklılıklar gösterdiğini elde etmişlerdir. Her iki materyal için, bozunma mekanizmaları tanımlayarak erozyon-korozyon haritaları elde ettiler. Bu çalışmanın bir parçası olarak, aşınan parçaçık miktarlarını, süreçler arasındaki sinerjinin derecesini ve optimum malzeme performansını gösteren haritaları da oluşturdular. Deney sonuçlarını teyit etmek için taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Polarizasyon testlerini; 2-4 m.s<sup>-1</sup> arpma hızlarında, %4-6-8 bulamaç partikül konsantrasyonlarında gerçekleştirmişlerdir (Stack ve Abd El-Badia, 2008).

Suihkonen ve arkadaşları, çalışmalarında vinilester matrisli kompozitlerin yüksek sıcaklıklarda sulu ve asidik ortamdaki erozyon aşınmasını araştırmışlardır. Testlerde aşındırıcı malzeme olarak ince kuvars kullanılırken, vinilster matrisli kompozit özellikle yüksek sıcaklıklarda sulu bir ortamda asidik koşullara göre daha yüksek malzeme kaybı göstermiştir. Aşındırıcı ince kuvars, kalın kuvars ile değiştirildiğinde koruyucu matris fazının ayrılması daha kapsamlı görülebilirken, fiberler için asitli solüsyon doğrudan daha ciddi bir hasara neden olmuştur. Asidik ozelti içinde test edilen numunelerdeki erozyon akışı boyunca fiber yassılaşması SEM görüntüleri yardımıyla belirgin bir şekilde görülmüştür. Test sıcaklığının ortamın kaynama sıcaklığına kadar arttırılmasıyla kompozitin aşınmasında bir artış görülebileceği belirtilmiştir. Ancak dönme hızındaki artış otomatik olarak malzeme kaybının artacağı anlamına gelmemektedir. Bu durum mevcut test cihazı içindeki aşınma ortamının hayli karmaşık olmasıyla birlikte birbiriyle ilişkili parametrelerin sonuçları etkilediğini göstermektedir (Suihkonen ve ark., 2016).

Thakur ve arkadaşları, yaptıkları bir çalışmada iki farklı boyutta tungsten karbür (WC) biriktirilerek edilerek üretilen WC-CoCR sermet kaplamanın slurry erozyon davranışlarını araştırmışlardır. Düşük yanma sıcaklığı karakteristikleri sonucunda daha kaliteli kaplama elde edilmesi nedeniyle termal sprey kaplama yöntemlerinden yüksek hızda oksijen yakıt püskürtme (HVOF) kullanılmıştır. Kaplamanın slurry erozyon direncini değerlendirmek için pota tipi slurry test cihazı kullanılmıştır. Testlerde aşındırıcı partikül boyutu ve çamur konsantrasyonu olmak üzere iki parametre dikkate alınmıştır. Yüzey morfolojisi SEM görüntüleri dikkate alınarak incelenmiş, XRD ile faz tanımlamaları yapılmıştır. Erozyon davranışları ve malzeme kaldırma mekanizması içyapı incelemesine dayalı olarak çalışılmış ve değerlendirilmiştir. İnce taneli tungsten

karbürün biriktirilmesiyle elde edilen WC–CoCr sermet kaplama tüm test koşullarında geleneksel sermet kaplamaya kıyasla yüksek slurry erozyon direnci göstermiştir (Thakur ve ark., 2011).

Toro ve arkadaşları, çalışmalarında, deniz suyunu-kuvartz bulamacında test edilen, düşük karbonlu, gaz nitrürlü bir martensitik paslanmaz çeliğin slurry erozyon direncini incelemişlerdir. Sonuçları; AISI 410 ve 420 martensitik paslanmaz çeliklerden elde edilenlerle karşılaştırmışlardır. Test bulamaçları, 20 kg okyanus suyuna (% 20) 5 kg kuvartz ilavesi pH değeri tüm deney boyunca  $8.2 \pm 0.1$  değeri kontrol edilerek hazırlanmıştır. Bulamaç ve kuvars parçacık boyutu 0.3 ila 0.5 mm arasında tutularak 96 saat süren deneylerini gerçekleştirmişlerdir. AISI 410S'nin 473 K'de nitrürlenmiş ve tavllanmış özel kütle kaybı, aynı sıcaklıkta temperlenmiş ticari AISI 410 ve 420 çelikleri için görülen kütle kaybından daha düşük ölçmüşlerdir. Ayrıca, nitrürlenmiş AISI 410S numuneleri için  $45^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik çarpma açıları elde edilen kütle kayıplarının, normal insidansa bağlı kütle kayıplarından daha fazla olduğunu kaydetmişlerdir (Toro ve ark., 2001).

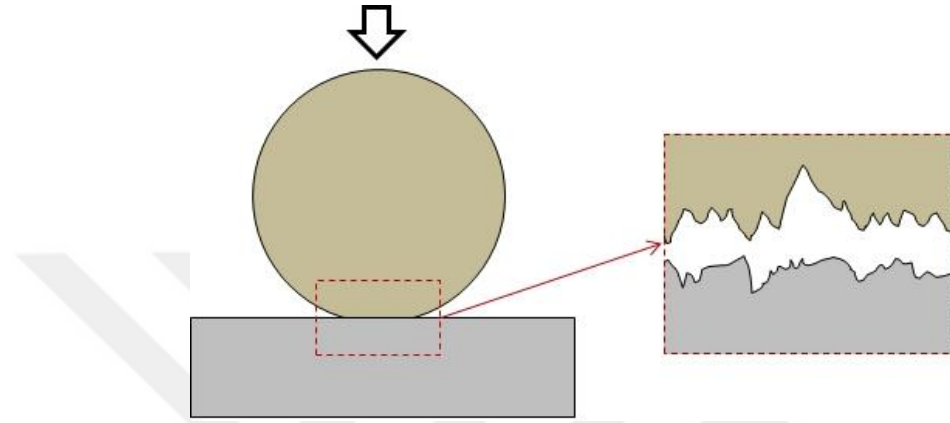
Yang ve arkadaşları, plazma sprej yöntemiyle biriktirilmiş  $Al_2O_3-Cr_2O_3$  kompozit kaplamaların erozyon aşınma mekanizmaları ve davranışlarını yeni bir slurry enjeksiyon yöntemi ile incelemişlerdir.  $Al_2O_3-Cr_2O_3$  kompozit kaplama,  $Al_2O_3$  kaplamadan daha iyi mekanik özelliklere sahiptir. Slurry (su+partikül) nozulda basınçlı hava ile karıştırılmakta ve sonuçta yüksek hızda kaplama yüzeyi üzerine enjekte edilmektedir. Enjeksiyon, kompozit malzemenin mukavemetiyle orantılı olarak aşınma ilerlemesi (aşınma oranı) ile sonuçlanmıştır.  $Al_2O_3-Cr_2O_3$  kompozit kaplamalar, saf  $Al_2O_3$  kaplamadan daha yüksek erozyon direncine sahiptir (Yang ve ark., 2016).

Araştırmacılar, slurry erozyon aşınmasının malzemenin sertliği, katı parçacıkların boyutu ve şekli, parçacıkların hızı, yoğunluğu, katı partiküllerin hedef malzeme yüzeyine çarpma açıları ve çarpma hızları, deniz suyunun konsantrasyonu gibi çeşitli parametrelere fonksiyonel olarak bağlılığını incelemek için sistematik çalışmalar yapmışlardır. Tüm bu çalışmalar söz konusu tez için ışık tutmuş olup, yol haritamızın belirlenmesinde belirleyici olmuştur.

### 3. TEORİK ESASLAR

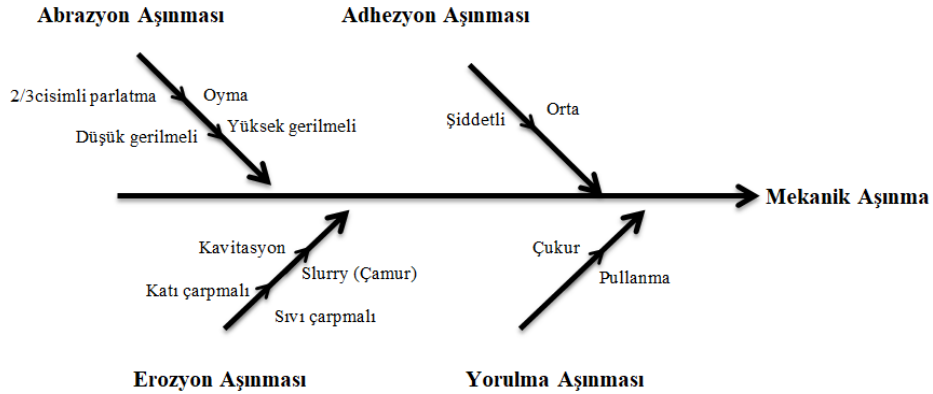
#### 3.1. Aşınma

Aşınma; iki veya ikiden fazla katı yüzey arasındaki etkileşim ile özellikle bir yüzeyden parça kopması deformasyonu şeklinde gerçekleşen malzeme kaybına denilmektedir (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Aşınma sistem elemanları

Aşınma süreci sonrasında makine elemanlarının temel yapı ve yüzey kalitelerinde deformasyonlar meydana gelmektedir dolayısıyla hedeflenen performansı yakalamak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle makine, gemi, uçak, inşaat mühendisleri tarafından tasarlanan yapı ve bileşenler de aşınma etkisi göz ardı edilmemelidir. Ancak buna rağmen ihmal edilebilmektedir. Neticede tamir, tadilat, parça değişimi vs. durumlar söz konusu olmaktadır.

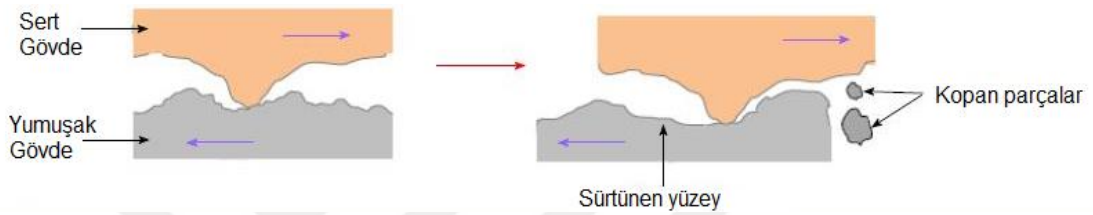


Şekil 3.2. Mekanik aşınma çeşitleri

Temelde mekanik (abrezif, erozif, adezif, yüzey yorulması) ve kimyasal (oksidasyon, korozyon) olarak iki ana başlık altında ele alınmaktadır. Başlıca mekanik aşınma mekanizmaları Şekil 3.2.'deki gibi sınıflandırılmaktadır.

### 3.1.1. Abrazyon aşınması

Abrazyon aşınması, maruz kaldığı yük ve hareketin etkisi ile temas halindeki iki cisimden daha sert ve pürüzlü olanın yumuşak yüzeyli cisimden talaş kaldırması olayıdır (Şekil 3.3.).

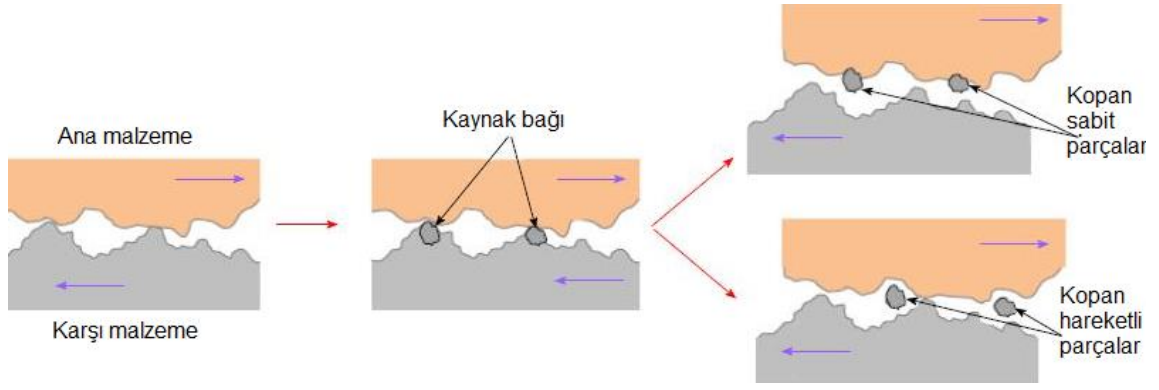


Şekil 3.3. Abrazyon aşınma çeşitleri

Abrazif aşınma 2 cisimli, 3 cisimli, oyma, düşük gerilmeli ve yüksek gerilmeli olarak ayrılır. Eş zamanlı çalışan malzemelerden aşınarak kopan parçacıklar veya oksit parçacıkları veya çalışma ortamında prosese dâhil olan yabancı maddeler, toz veya mineraller olabilir.

### 3.1.2. Adhezyon aşınması

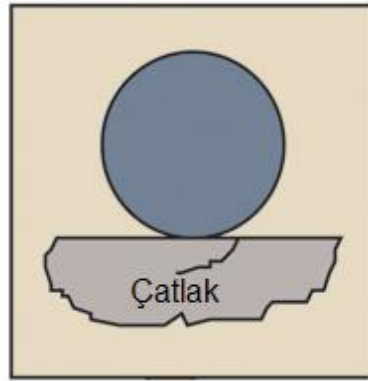
En hassas işlenmiş parça yüzeyinde dahi moleküler boyutta pürüzler olmaktadır. Bu pürüzlerin birbirleri ile temas halinde kaynama veya yapışma sonucunda ovalama/kırılma şeklinde aşınmayla adhezyon aşınması meydana gelmektedir. Adhezyon aşınması, yüzey pürüzlülüğünün yanında yüzeylerin oksit, gaz, rutubet ve yağlayıcı maddelerden arınmışlığına da bağlıdır. Belirtilen maddeler, yüzeyler arasında oluşabilecek adhezyon aşınmasını azaltır. Adhezif aşınma orta ve şiddetli aşınma olarak ayrılır (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. Adezyon aşınma örnekleri

### 3.1.3. Yüzey yorulması

Belirli periyotlarda döngü tamamlayan çalışma parçaları yüzeylerinde çatlamlar meydana gelmektedir (Şekil 3.5.). Özellikle dişliler, çarklar, rulmanlar vs. gibi kam mekanizmaları stiliyle çalışan makine elemanlarında görülmektedir. Çoğu uygulamalarda kayma yüzeyinin yağlanması ve bu durumda yüksek basınç altında çatlaklara yağların girmesi ise bu çatlakların büyümesine sebep olmaktadır.



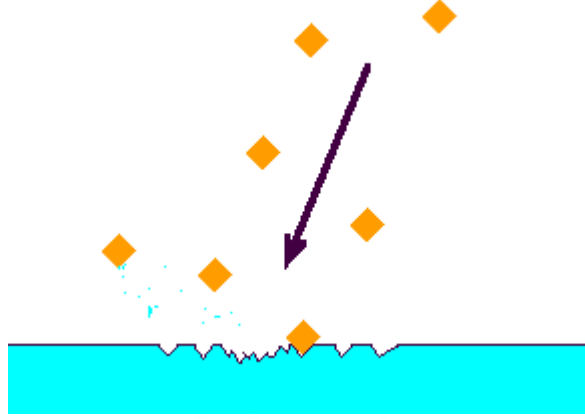
Şekil 3.5. Yorulma yüzeyinde çatlak oluşumu

### 3.1.4. Erozyon aşınması

Erozyon aşınması, bir numune yüzeyine çarptırılan katı veya sıvı aşındırıcı parçacıklarının o yüzeyde kütle kaybetmesine yol açmasıdır. Şekil 3.6.'da görüldüğü üzere kavitasyon, katı çarpmalı, sıvı çarpmalı ve slurry erozyon olmak üzere 4 farklı erozyon mekanizmaları mevcuttur.



Erozyon aşınması küçük parçacıkların mekanik bileşenlere çarptırılması ile oluşturulan belirsiz sayıda aşınma mekanizmalarını kapsar.



Şekil 3.6. Olası erozyon mekanizmaları

Dezavantajı olan her sürecin avantajı olacağından erozyon aşınmasının da bir takım proseslerde avantajları bulunmaktadır. Yüzey temizleme işlemlerine kumlama adı verilen kum püskürtme yöntemi, madencilik, tünel açma vs. jeolojik etüt proseslerde sıvı jeti kesme işlemleri kullanılmaktadır.

#### 3.1.4.1. Slurry erozyon

Slurry erozyon; genellikle sıvı ve büyüklüğü birkaç mikron ila birkaç milimetre arasında değişen bir ya da daha fazla türde katı parçacığın heterojen karışımı olarak tanımlanır.

Bulamaç veya çamur olarak da literatüre giren slurry, yüksek partikül konsantrasyonundan dolayı, viskozite oranı yüksek bir akışkan olduğundan dolayı non-newtonian akışkan olarak sınıflandırılmaktadır. Bundan dolayı bulamaçlar reolojileri ile tanımlanmaktadır.

Reoloji, süspansiyon halindeki katı parçacıkların şekli, boyutu, yoğunluğu, kütle oranı ve taşıyıcı sıvının viskozitesi ve yoğunluğu gibi çeşitli faktörlerden etkilenen bulamacın mikro yapısının dinamik bir özelliğidir (B.E.A., 2005).

Slurry erozyon, genellikle türbülanslı akışlarda hem parçanın çamurun içinden geçmesiyle hem de çamurun parçanın yüzeyine çarpmasıyla yüzeyden parçacıkların koparılması şeklinde görülür.

#### **3.1.4.1.1. Slurry erozyona etki eden faktörler**

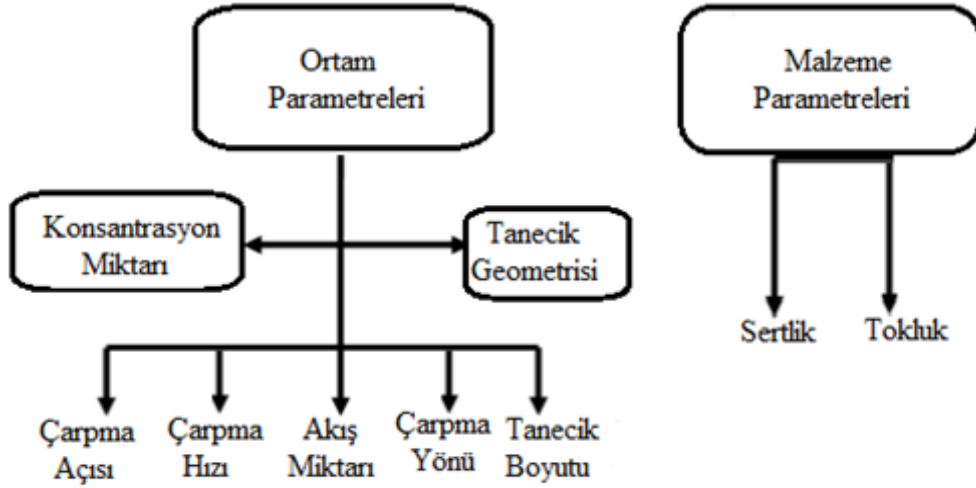
Slurry erozyon akış alanı parametreleri, hedef malzeme özellikleri ve aşındırıcı partikül karakteristikleri gibi birçok faktör tarafından etkilenen karmaşık bir proses olduğu için henüz tam anlamıyla anlaşılabilmiş değildir. Bu faktörler arasında malzeme kaldırma prosesi üzerinde en önemli rol oynayan çarpma açısı ve hedef malzemenin mikro yapısıdır. Literatürde sünek ve gevrek malzemelerin slurry erozyon davranışları ve slurry erozyonunu etkileyen parametreler üzerine çeşitli çalışmalar yapılmakla birlikte araştırmalar derinlemesine devam etmektedir.

Özellikle petrol ve gaz üretim sistemlerinde, hidrolik makinelerde, pompalarda, hidroelektrikte, maden endüstrisinde, pervanelerde, valflerde, türbin kanatlarında, çamur pompalarında ve katı partikül taşıyan boru hatları gibi aşındırıcı parçaların taşınmasıyla ilgili birçok mühendislik uygulamasında, slurry erozyona sıklıkla karşılaşıldığı için hayati öneme sahiptir. Son dönemlerde, pek çok bulamaç taşıma sistemi ortaya çıktıkça, slurry (bulamaç) erozyonu önem kazanmıştır.

Katı-sıvı karışımının akışı ekipmanların, bileşenlerin aşınmasına neden olarak hizmet ömrünü kısaltır. Bulamaç erozyonu problemi birçok endüstriyel ekipmanda, gemi pervanelerinde, deniz/baraj/akarsu alanı içerisinde kalan köprü ayakları çevresinde, sulu ortamda çalışan makine ve parçalarında ortaya çıkar, bu nedenle herhangi bir sisteminin tasarımı ve seçimi için slurry erozyonu aşınmasının tahmin edilmesi gerekir.

Slurry erozyon aşınması, malzemenin sertliği, katı parçacıkların boyutu ve şekli, parçacıkların hızı, yoğunluğu erozyon sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. Bunların yanı sıra slurry aşınma; katı partiküllerin hedef malzeme yüzeyine çarpma açıları ve çarpma hızları, deniz suyunun konsantrasyonu gibi çeşitli faktörlere de bağlıdır.

Araştırmacılar, slurry erozyon aşınmasının bu gibi çeşitli parametrelere fonksiyonel olarak bağlılığını incelemek için sistematik çalışmalar yapmışlardır. Erozyon aşınmasını etkileyebilecek parametreler Şekil 3.7.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Aşınmayı etkileyen parametreler

Slurry erozyon akış alanı parametreleri, hedef malzeme özellikleri ve aşındırıcı partikül karakteristikleri gibi birçok faktör tarafından etkilenen karmaşık bir proses olduğu için henüz tam anlamıyla anlaşılabilmiş değildir. Bu faktörler arasında malzeme kaldırma prosesi üzerinde en önemli rol oynayan çarpma açısı ve hedef malzemenin mikro yapısıdır. Literatürde sünek ve gevrek malzemelerin slurry erozyon davranışları ve slurry erozyonunu etkileyen parametreler üzerine çeşitli çalışmalar yapılmakla birlikte araştırmalar derinlemesine devam etmektedir.

Slurry erozyon çalışmaları petrol ve gaz üretim sistemleri, hidrolik makineler, pompalar ve maden sanayi gibi aşındırıcı partiküllerin taşındığı birçok mühendislik uygulamasında oldukça önemlidir. Erozyon nedeniyle meydana gelen hasarlar zararlı ekonomik sonuçların yanı sıra güvenlik kaygılarına yol açmaktadır. Şekil 3.8.'de bazı çamur pompaları ve boruların yıpranmış bileşenleri görülmektedir.



Şekil 3.8. Slurry erozyonunun görüldüğü endüstriyel aşınma örnekleri

Erozyon testlerinde, bazı yerlerde gerçek hayatımızda meydana gelen farklı durumları simüle etmek için çeşitli aşındırıcılar kullanılmıştır. Katı parçacık nedeniyle oluşan aşınma, çarpma açısı, katı konsantrasyon, çarpma hızı ve parçacık büyüklüğü gibi etkileyen parametreleri kontrol ederek en aza indirilebilir. Kullanımda ağırlıklı olarak *Pota Tipi Test Cihazı* ve *Jet Tipi Test Cihazı* başta olmak üzere *Sürgülü Yatak Aparatı*, *Döner Test Cihazı* ve *Miller Test Aparatı* gibi erozyon aşınmasını deneysel olarak değerlendirmek için çeşitli teknikler mevcuttur.

Erozyon nedeniyle oluşan başarısızlıklar güvenlik sorunlarının yanı sıra zararlı ekonomik sonuçlara da yol açabilir. Sonunda bakım maliyetini azaltan daha uzun hizmet süresi talebi, birçok araştırma laboratuvarını ve şirketi belirli uygulamalar için bulamaç erozyonunu incelemeye teşvik etmiştir.

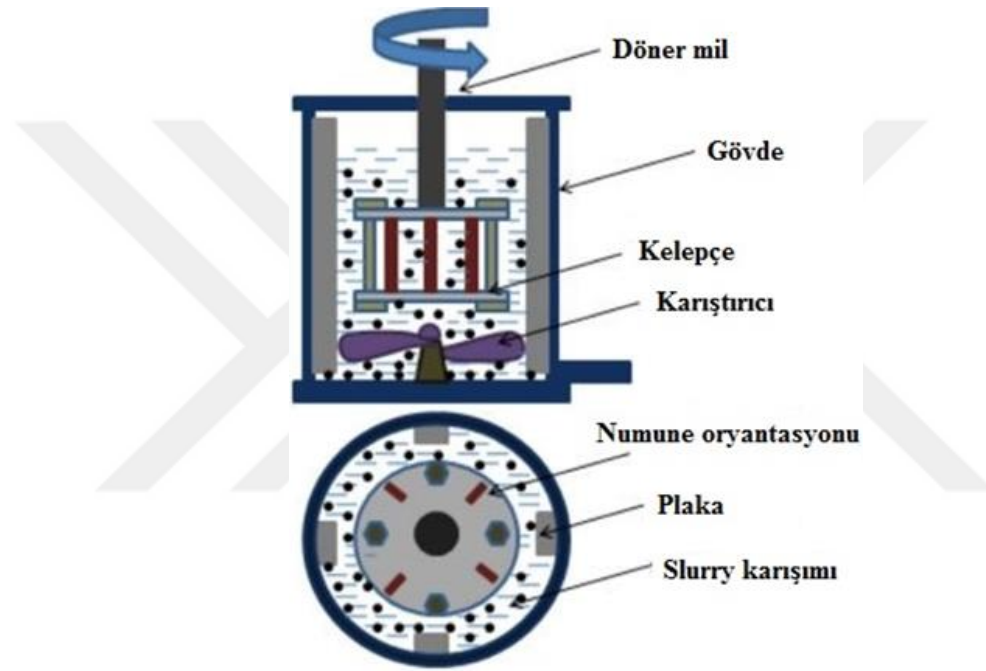
#### **3.1.4.1.2. Slurry erozyonun değerlendirilmesinde kullanılan test yöntemleri ve modelleri**

Çeşitli parametrelerin, numune üzerindeki etkisini incelemek ve bu mekanizmaları daha iyi anlamak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Slurry erozyonu test yöntemlerinde kullanılan en yaygın iki yöntem; laboratuvar simülasyon testleri ve pilot yöntemlerdir. Prototip tarzda yapılan pilot yöntemler her ne kadar endüstriyel uygulamalara daha yakın sonuçlar verse de tercih edilmemektedir. Laboratuvar test cihazları ile çarpma açıları, hızları, konsantrasyon yüzdeleri gibi birçok parametreyi kullanarak düşük maliyetli, kolay kurulum ve kullanım sebeplerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Farklı koşullar altında farklı malzemelerin slurry erozyon davranışını değerlendirmek ve/veya geliştirmek için birçok araştırma yapılmıştır. Yapılan çalışmaların neticesinde genel modeller geliştirmek için test düzenekleri tasarlanmıştır.

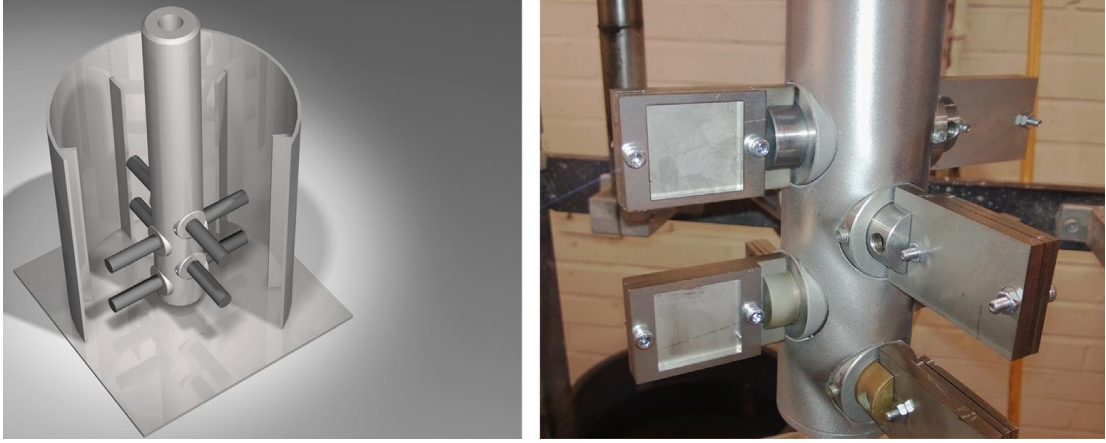
Fakat bunun yanında, önerilen her bir model ve test düzeneği spesifik yaklaşımın sonucu olduğundan, gerçek slurry erozyon koşullarını tam anlamıyla simüle edebilen bir test teçhizatı henüz mevcut değildir. Ayrıca uluslararası literatürde kabul görmüş genel bir model bulunmamaktadır. Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılan *pota tipi* ve *jet tipi* test düzeneği ayrı ayrı ele alınmıştır.

İlk pota tipi test cihazı Gupta ve arkadaşları tarafından 1995 yılında tasarlanmıştır ve hala en popüler test düzeneği olarak kabul görmektedir. Slurry erozyon deney düzeneklerinde en çok tercih edilen pota tipi test düzeneği yaklaşık olarak; silindirik bir bulamaç potası, shaft, karıştırıcı düzeneği, yatak takımı, motor ve numune tutucu parçalarından oluşur (Şekil 3.9.). Numune oryantasyonu ile çarpma açısı istenilen değerlerde ayarlanabilmektedir. Shaft yani döner mil, değişken hızlı bir motorla farklı hızlarda döndürülebilir. Pota tipi test cihazının çalışma düzeneği, Bölüm 4.2. Deney Düzeneği kısmında detaylı olarak anlatılmıştır.



Şekil 3.9. Pota tipi test cihazı

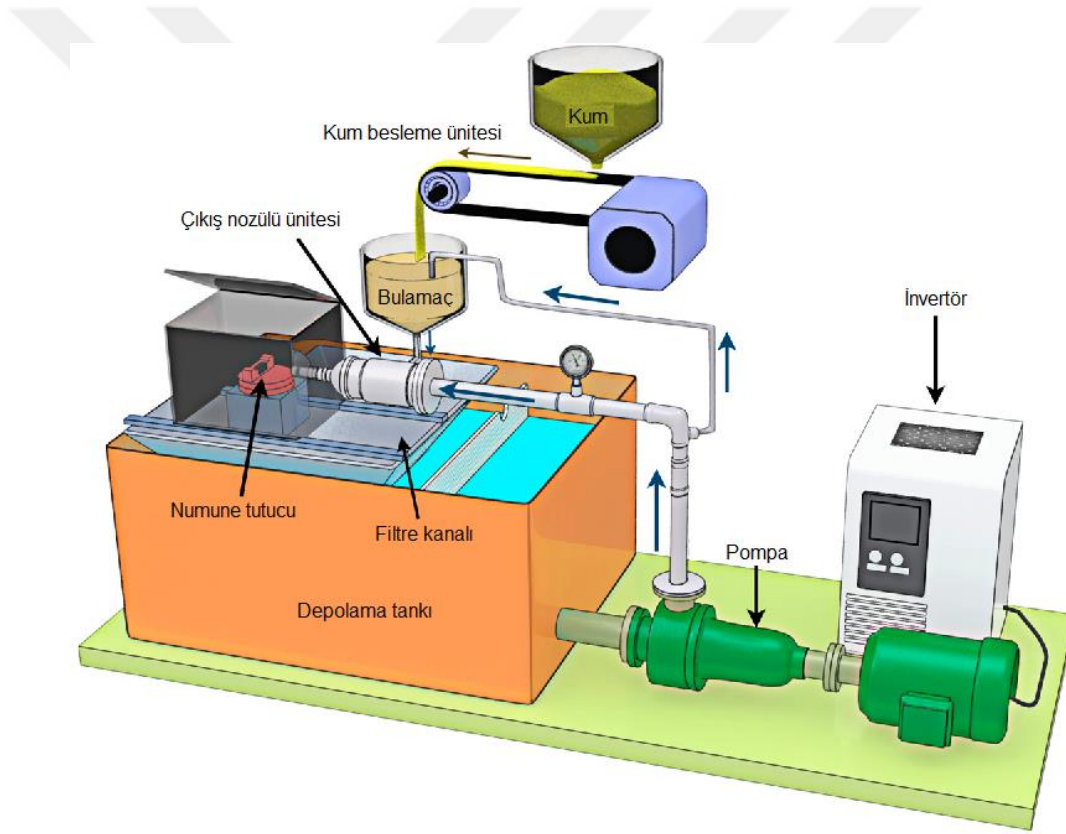
2015 yılında, Tampere Aşınma Merkezi, slurry erozyonu yüksek hızda çalışabilir şekilde simüle etmek için pota tipi test cihazını güncelledi. Bu güncelleme, büyük partikül boyutları kullanılarak sert erozif koşullar altında farklı büyüklükteki numunelerin erozyonunun değerlendirilmesi için bir imkan olarak görüldü. Şekil 3.10. ile 18.5–26 mm çapındaki pim numunelere ait pota tipi test cihazının şematik ve fotoğrafik görünüşünü vermektedir.



a)

b)

Şekil 3.10. Yüksek hızlı pota tipi test cihazı a) şematik görünüş, b) fotoğrafik görünüş



Şekil 3.11. Jet tipi test cihazı

Jet tipi test cihazı, hem ampirik hem de CFD erozyon modellerini geliştirmek için kullanılan ikinci en yaygın slurry erozyon test ekipmanıdır. Bu test düzeneği prosedüründe, numune taze bulamaç akışının etkisiyle sürekli aşınır. Bir bulamaç haznesi, pompa veya kompresör, numune tutucu, nozül ve kontrol valfleri ekipmanlarını içerir (Şekil 3.11.).

Şekil 3.11'de şematik olarak gösterildiği gibi; bulamaç, bulamaç haznesinden hava ile çalışan bir pompa ile pompalanır. Ardından daha önceden belirlenen çarpma açısıyla deney numunesi yüzeyine bir nozülünden kontrollü hızla püskürtülür. Püskürtülen bulamaç tekrar hazneye döner, böylece numune sürekli bulamaç akışının etkisiyle aşınır. Bulamacın akış hızı, basınçlı havayı kontrol etmek için bilgisayar kontrollü bir elektronik valf ile sağlanır.

Pota tipi ve jet tipi test düzeneklerinin avantaj ve dezavantajlarının mukayesesi Çizelge 3.1. ile yapılmıştır.

**Çizelge 3.1.** Slurry erozyonun değerlendirilmesinde kullanılan test düzenekleri

Test cihazı adı	Avantajlar	Dezavantajlar	Test süresi
Pota tipi	Tasarımı basit, üretimi ve kullanımı kolay	Bulamaç sirkülasyonunun homojen olmaması	Saatler
	Farklı malzemelerin ve parametrelerin verilerini basit ve kolayca kıyaslayabilen bir düzenek	Parçacık büyüklüğü, çarpma hızı ve çarpma açısının etkisi değişiklik yapılmadan gözlemlenemez	
	Birçok saha uygulaması için nispeten gerçekçi sonuçlar		
Jet tipi	Sürekliliği olduğu için kullanımı kolay	Püskürtme hızı, nozülün aşınması nedeniyle periyodik olarak ölçülmeli ve kalibre edilmelidir	Saatler
	Çarpma açısı ve hızının kolay kontrolü	Çarpma açısı ve çarpma hızı, test süresince aynı kalmaz	

### 3.2. Çelik Malzemeler

Çeliklerin genel kullanım alanına bakıldığında yelpaze çok geniştir. Otomotiv sektörü, havacılık endüstrisi, iletişim araçları-parçaları, gıda sektörü, sağlık sektörü, deri-kimya-petrol sektörü, nükleer mühendislik gibi alanlar çelik malzemenin kullanımının en yaygın kullanıldığı başlıca alanlardır. Ayrıca söz konusu çalışma alanı olan gemi ve gemi aksamları, köprü ayakları vs. deniz suyuyla etkileşim halin olan kısımlarda da çelik malzemeler özellikle tercih edilmektedir. Çünkü omurga, dış kaplama, güverte, perde, posta, bodoslama, kemer, stringer, dikme gibi pek çok sayıda

gemi elemanın hammaddesi olan çelik, deniz araçlarının emniyetini, mukavemetini ve su geçirmezliğini sağlamaktadır.

Çelikler esas olarak Fe – C alaşımlarıdır. Ancak sadece karbon bulunduran çelikler kullanım ve imalat açısından yeterli özelliklere sahip değildirler. Bu nedenle çeliklere Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V, W, Al gibi elementlerle alaşımlama yapılır.

Demire doğada en çok oksit cevherleri ( $MFe_3O_4$ ), kükürtlü cevher ( $FeS_2$ ) ve karbonatlı cevher ( $FeCO_3$ ) olarak rastlanır. C, Si, Mn, S, P ve O çelikte, demir cevheri topraktan çıkarıldığından itibaren bulunur ya da üretim aşamasındaki işlemlerden itibaren ilave edilir. C, Si ve Mn çeliğin özelliklerini iyileştirici etkiye sahiptirler. Bu yüzden eşlik elementleri olarak anılırlar. Çelikten istenen özelliklere göre miktarları değiştirilebilir. Eğer %1 civarında bulunuyorlarsa eklenmiş demektir. S ve P ise kırılma gibi istenmeyen etkilere sebep olurlar. Çelikte istenmeyen elementlerdir ve safsızlık olarak nitelendirilirler. Çeliklerin kalitesini özellikle katılan faydalı elementler kadar istenmeyen elementler de, olumsuz yönde etkilerler.

**Karbon (C):** En önemli elementtir. Değişim yüzdesi malzeme özelliklerini diğer alaşım elemanlarının aynı miktardaki değişiminden çok fazla etkiler. Su vermeyle sertleşebilirliğin ilk şartı karbon miktarıdır. Aşınma direncini artırır. Malzemeye sertlik verir. %0.8 karbon değerine kadar akma ve çekme mukavemetini artırır, karbon miktarı bu değer üzerine çıkarsa çelik kırılma olur. Karbon miktarının yüksek olması çeliğin sünekliğini, dövülebilirliğini, derin çekme ve kaynaklanabilirlik özelliğini düşürmektedir. Karbon, çelikte sadece östenitik bölgede çözünür. Martenzitik yapıda kafes sistemine sıkışmış olarak, normalize çelikte perlitik sementit olarak bulunur.

**Krom (Cr):** Östenit bölgede %12 civarında çözünür. Karbon miktarına bağlı olarak bu oran %20'ye kadar çıkabilir. Ferritte çözünürlüğü sınırsızdır. Ferrit bölgede karbonun bağlayıcılığından fazla olursa ve artı kalan miktar %12'den fazla olursa hem korozyon dayanımı hem de paslanmazlık sağlar. Sertliğe fazla etkisi yoktur. Östenitik bölgede ise sertliği kısmen artırır. Karbon miktarıyla birlikte aşınma direncini artırıcı etkisi de vardır. Malzeme içindeki krom yüzdesiyle talaşlı imal edilebilirlik ters orantılıdır.

**Kobalt (Co):** Yüksek sıcaklıklarda tane büyümesini yavaşlattığı için, daha çok hız çeliklerine ve sığa dayanıklı çeliklere ilave edilir. Yüksek hız çeliklerinde oluşan



karbürleri birbirine bağlar. Östenit bölgede çözünürlüğü sınırsızdır. Ferritik bölgede ise %75 civarında çözünür. Ferritte belirgin şekilde sertlik artışı sağlar.

Mangan (Mn): Alaşimsız çelikler %1.6'ya kadar mangan içerebilirler, bunun üzerindeyse alaşımlandırılmış sayılırlar. Mangan, çelikte %0.5'ten azsa kükürt giderici olarak kullanılır. Havada soğutularak sertleşme özelliği verir. Çeliğin bileşimindeki mangan, çelikte FeS bileşiği olarak bulunan ve kızıl sıcaklıkta kırılmaya yol açan kükürdü zararsız MnS bileşiği olarak bağlar. Böylece çelik yüksek sıcaklıkta şekillendirilebilme kabiliyeti kazanmış olur. MnS haddeme sırasında hadde doğrultusunda uzar ve sadece bu doğrultuda tokluk özelliklerini belirgin olarak azaltır. Mangan çelikte oksit giderici olarak da kullanılır ama asıl etkili olduğu yer ray çelikleridir. Ray çeliklerinde ısıl işleme yüzey sertleştirme yapılır, dolayısıyla rayların dışında sert bir kabuk tabaka vardır. İç kısım ise yumuşaktır. Kabuk kısmındaki bir aşınma sonucu iç kısım hemen aşınıp biter. Bunun önlenmesi için soğuk deformasyonla sertleşmesi gerekir. Mangan soğuk deformasyonla sertleşme kabiliyetini yükseltir. Bu yüzden ray çeliklerinde kullanılır. Rezilyansı da kısmen yükselttiği için yay çeliklerinde de bulunabilir. Bunların yanı sıra mangan çeliğin dayanımını ve kaynak edilme kabiliyetini artırır. Manganın dayanıma olumlu etkisi karbon miktarı arttıkça artar. Kükürt ile bileşik yaptıktan sonra artan miktar  $Mn_3C$  şeklinde bağlanır.  $Mn_3C$ 'nin etkisi sementitle aynıdır. Yüksek karbon ve mangan aşınma ve aşındırma direnci sağlar.

Molibden (Mo): Östenitik bölgede %3 – 8 aralığında çözünür. Ferritik bölgede %37 civarında bir çözünürlüğe sahiptir. Östenitik bölgede molibden miktarı krom miktarından yüksek olduğu takdirde sertliği önemli ölçüde artırır. Ferritik malzemede ise yüksek miktarda Mo – Fe bulunursa malzemede yaşlandırma sertleşmesi olur. Yaşlandırma sertleştirmesinde yumuşamaya karşı etki yapar. Kuvvetli karbür oluşturunucudur. Diğer alaşım elementleriyle birlikte kullanılır. Çeliğin yüksek sıcaklıklardaki mukavemet, kızıl sıcaklıkta sertlik gibi özelliklerini geliştirir. Paslanmaz çeliklerde korozyon direnci sağlar. Sert bir bileşik olan molibden karbürleri oluşturarak aşınma direncini geliştirir.

Nikel (Ni): Östenitik bölgede sınırsız, Ferritik bölgede ise karbon miktarından bağımsız olarak, %10 civarında çözünürlüğe sahiptir. Nikel, soy metaldir. Karbür oluşturmaz, arayer asalyer olarak bulunur. Sertlik açısından karbon yerine geçer. Uygulamalarda düşük karbonlu nikel seçildiği durumlarda çeliği sert fakat az kırılğan yapar. Çelik sertleştirilmemiş ve tavlannmamış olsa dahi mukavemet kazandırır.

Paslanmaz çeliklerde işlem sertleşmesini geciktirir. Çeliğin ısıtma ve soğutma arasında oluşan kritik derece ısılarını düşürür. Bu sayede düşük derecede sertleştirme, ısıl işleme yapılabilir. Düşük sıcaklıklarda ısıl işlem tane irileşmesini de engellemektedir. Nikel refrakter, yani yüksek sıcaklıkta oksitlenmeyen metallere aittir. Çeliğin oksidasyonunu engeller. Çelikte yeterli karbon olmadığı takdirde karbür yapmadan, katı eriyik halde de bulunabilirler. Nikel YMK kafes sistemine sahiptir. Bu yüzden yapıyı da YMK yapmaya çalışır, yani östenit yapmaya çalışır. Östenitik sıcaklığı oda sıcaklığının altına düşürür. Ferritik paslanmaz çeliğin içine %8 civarında katılırsa rengi parlaklaşır.

Nikel dökümde tane inceltici olarak kullanılabilir ama perlit yapıcı özelliği olduğu için ferritik yapıyı bozar, perlitik yapıyı artırır.

Silisyum (Si): Alaşımız çeliklerde %0.5'e kadar silisyum bulunabilir. Miktar bunun üzerinde ise çelik alaşımlandırılmış demektir. Östenitik bölgede %2'ye kadar, ferritik bölgede ise %18 civarında çözünürlük değerlerine sahiptir. Ferritik bölgede çözünebilme özelliğinden dolayı malzemenin süneklik ve tokluğunu fazla düşürmeden dayanım ve sertliği artırır. Östenitik bölgede de nikelden daha fazla sertleştirici etkiye sahiptir. Silisyum rezilyansı yükseltir. Bu yüzden yay çeliklerinde bulunur. Trafo saclarında histerisiz kayıplarını azaltarak zırlamayı önler. Oksit giderici etkisi vardır. Oksijeni  $SiO_2$  şeklinde bağlar.  $SiO_2$  yüzeyde film tabakası oluşturur ve çeliklerde korozyon dayanımı sağlar. Şok yüklere mukavim ve sıcak işlem çeliklerine darbe dayanımı için eklenir. Grafit açığa çıkarır. Çeliklerde döküme akıcılık sağlamak için kullanılabilir.

Kükürt (S): Kükürt çelikte istenmeyen bir elementtir. Normalde %0.055'e kadar bulunmasına izin verilirken ıslah çeliklerinde bu oran %0.020'ye kadar düşürülmüştür. Çünkü kükürt oranı yüksek çeliğe su verildiğinde kükürt kırılma yol açar. Kükürtün çelikte çözünürlüğü yok denecek kadar azdır. FeS bileşimini oluşturur. Kükürdün erime noktası çeliğinkinden düşüktür. Katılma esnasında kararsız bölge olan tane sınırlarında demirsülfür olarak birikir. Demirsülfür düşük sıcaklıkta kırılmandır, tane sınırlarını zayıflatır. Yüksek sıcaklıkta da erir ve tane sınırlarının ayrılıp zayıflamasına yol açar. Böylece iki durum için de mukavemeti düşürür. Kükürt çok bol ise, olması gerektiğinin iki katı belki daha fazla miktarda bulunuyorsa bu çeliğin otomat çeliği olduğu anlaşılır.

Fosfor (P): Fosfor çelikte kükürt gibi istenmeyen bir elementtir. Demirle asalyer katı çözümlenmesi oluşturur. Diğerleri kalay olmak üzere tokluğu en çok azaltan iki elementten biridir. Fosfor miktarının izin verilebilen üst sınırı %0.080'e kadar çıkabilir. Kükürtte olduğu gibi, bazı özel durumlarda daha yüksek miktarlarda fosfor bulunması istenebilir. Buna örnek otomat çelikleridir. Kuvvetli makrosegregasyon gösteren fosforun yayılım hızı da düşük olduğundan makrosegregasyon çok belirgindir. Söz konusu fosfor segregasyonu uzun süreli bir ısıtma işlemi sonucunda zor bir şekilde giderilebilir. Bu yüzden fosforun sınır değerinin altında kalmasını sağlamak daha ekonomiktir.

Azot (N): Çelik için genellikle çok zararlı katışkılarıdır. On bin de bir oranında bulunması bile akma sınırı ve çekme dayanımını biraz yükseltirken şekil değiştirme kabiliyetini ve özellikle çentik tokluğunu kuvvetle düşürür. Hızlı soğutma sonucu yapıda zorunlu çözülmüş halde kalıp sıcaklığa bağlı olarak belirli bir sürenin geçmesiyle çok ince dağılmış demir nitrit bileşimlerini oluşturur. Hızlı soğuma yaşlandırması diye anılan bu olay çeliğin tokluğunu azaltır. Bir de çelikte çözülmüş olan azot atomları dislokasyonların yoğun olduğu bölgelere yayılarak dislokasyonların ilk hareketini engellerler. Çeliği gevrekletiren bu olaya da şekil değiştirme yaşlanması denir. Azotun olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için çelikteki azotu tamamen ortadan kaldırmak zordur.

Hidrojen (H): Hidrojen atom çapı en küçük elementtir. Genel olarak her metal malzemeye atomsal olarak girebilir. Oda sıcaklığında demirdeki yayılım hızı çok yüksektir. Azot gibi hidrojen de dayanım değerlerini önemli miktarda yükseltmeden çeliği gevrekletirir. Demir içinde yayılan hidrojen atomlarının kafes kusurları veya diğer süreksizliklerde moleküllere dönüşmesi çok kuvvetli basınç artışına yol açar. Moleküler hidrojen yayılamaz. Oluştığı yerde çok küçük bir bölgede üç eksenli gerilme oluşturur. Böylece çelik gevrekleşir.

Oksijen (O): Oksijen çelikte hemen hemen hiç çözünmez ancak azot ve hidrojen gibi çok az miktarda bulunması bile çeliğe belirgin bir gevreklik verir. Düşük karbonlu, dolayısıyla oksijen miktarı yüksek çelikte FeO bileşiğine rastlanır. FeO'nun çeliğe etkisi FeS gibidir. Si, Al gibi oksit gidericilerle oksijenin bir kısmı alınır. Reaksiyon ürünleri olan SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, sert ve çoğunlukla küresel parçacıklardır. Bunlardan cürufa geçmemiş olanlar haddeleme sırasında kırılıp çizgisel biçimde dizilerek daha sonraki şekillendirme işlemlerini güçleştirebilirler.

Alüminyum (Al): Alüminyum çelikte silisyuma benzer etki yapar. Oksitleri alıcı etkisi vardır. Sıvı durumundaki çeliğe alüminyum katıldığında oksijen zararsız hale gelir. Çelikteki fazla alüminyum çelikteki karbonun grafit şeklinde ayrılmasına sebep olur. Alüminyumun azota karşı ilgisi fazla olduğundan alüminyumlu çelikler nitrasyon çeliği olarak kullanılırlar. Nitrasyon çeliğinde temel alaşım elementi alüminyumdur. %1 alüminyum miktarı nitrasyon çelikleri için ayırt edicidir. Azotlu ortamda yüzeyde sert alüminyum nitrür bileşiği oluşturur ve bu şekilde yüzey sertliği sağlar.

Bakır (Cu): Bakır, dökümde yapıyı perlitleştirir. Çeliğin akma sınırını ve çekme dayanımı yükseltir. Asitlere ve korozyona karşı direncini artırır. Kromlu, paslanmaz çeliklere bakır katılmaktadır. Çelikte fosforla birlikte bulunursa çeliğin atmosfer etkilerine direncini yükseltir.

Çelikler üretim yöntemlerine göre, alaşımsız, alaşımli ve yüksek alaşımli çelikler olarak üçe ayrılırken kullanım alanlarına göre, yapı çelikleri, karbon çelikleri, takım çelikleri, hız çelikleri, yay çelikleri ve paslanmaz çelikler olarak kategorize edilmektedir.

Söz konusu çalışma kapsamındaki deneylerde, gemi gövdelerinde de kullanımı tercih edilen Alman standartlarında (DIN) St 12 kalite, Amerikan kalite standartlarında (ASTM - SAE – API) A366/CQ olarak geçen dekape sac malzeme kullanılmıştır.

İlk olarak sıcak haddeme sonrasında soğuk haddeme ile levha haline getirilmiş malzeme yüzeyinde işlem sonrası pul pul oluşan oksit tabakalar asitle temizlenir. Bunlara “dekape” edilmiş saclar denir. Böylelikle elde edilen nihai yapının şekillendirilebilmesi, kaynak edilmesi kolaylaştırılmış oluyor. Genellikle 0.30 ile 2 mm arasında kalınlıklarda haddelenmektedir. Kullanılan numune sacın % ağırlıkça kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2.’ de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Deney numunelerinin kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri

Çelik Türü	Kimyasal Bileşimi (% ağırlık)				Mekanik Özellikler		
	C <sub>maks</sub>	Mn <sub>maks</sub>	P <sub>maks</sub>	S <sub>maks</sub>	Çekme Dayanımı MPa	Akma Dayanımı < MPa	Kopma Uzaması < %
St 12 A366/CQ	0.07	0.4	0.02	0.02	270...410	280	28

### 3.3. Çelik Malzemelerde Slurry Erozyon Aşınması

Mühendislikte temel olarak metal alaşımlı malzemeler kullanılsa da günümüzde teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte çelik dışı malzemelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Örneğin pek çok sahada kompozit malzemelerin, çelik gibi geleneksel malzemelere oranla hafiflik, dayanım/yoğunluk, korozyon dayanımı gibi avantajlara sahip olmasından dolayı tercih edilmektedir. Fakat tüm gelişme ve ihtiyaca yönelik hamlelere karşın mühendislikte kullanılan çelik dışı malzemenin, çelik malzemeye oranı %7 civarlarındadır. Dolayısıyla bu durum; üretimi ve tüketimi hâlâ revaçta olan çelikler için malzeme kullanımında en büyük problemlerden biri olan aşınma problemini de beraberinde getirmektedir.

Slurry aşınma prosesinde partiküllerin malzeme yüzeyine tekrarlı temasları sonucunda kütle kaybı meydana gelmektedir. Yağışlar uçakların polimer radar kubbelerini bu yüzden aşındırır. Pervaneler, valfler, türbin kanatları, çamur pompaları ve katı partikül taşıyan boru hatları slurry erozyonun sıklıkla karşılaşıldığı endüstriyel uygulama ekipmanlarıdır.

Slurry erozyon akış alanı parametreleri, hedef malzeme özellikleri ve aşındırıcı partikül karakteristikleri gibi birçok faktör tarafından etkilenen karmaşık bir proses olduğu için henüz tam anlamıyla anlaşılabilmiş değildir. Bu faktörler arasında malzeme kaldırma prosesi üzerinde en önemli rol oynayan çarpma açısı ve hedef malzemenin mikro yapısıdır.

Literatürde sünek ve gevrek malzemelerin slurry erozyon davranışları ve slurry erozyonunu etkileyen parametreler üzerine çeşitli çalışmalar yapılmakla birlikte araştırmalar derinlemesine devam etmektedir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, aşındırıcı partikül formu, çarpma açısı ve kullanılan numunenin malzeme özellikleri slurry erozyon oranlarını ve yüzey bozulmasını önemli derecede etkileyen belli başlı parametreler olarak kabul edilmiştir.

Şöyle ki;

- Aşındırıcı partikülün açısız formda olması, küresel formu aşındırıcı partiküllerden dört kat daha fazla erozyona yol açabileceği bulunmuştur.

- Çarpma açısının düşük olduğu durumlarda, sertleştirilmiş çelik, yumuşak çelikten daha az aşınmıştır. Yüksek çarpma açılarında ise bu durumun tam tersi gözlemlenmiştir.
- Kırılgan malzemeler için erozyon oranlarının, artan darbe açısıyla arttığı ve 90° açıyla maksimum seviyeye ulaştığı bildirilmiştir.
- Sünek malzemeler için, erozyon oranı düşük çarpma açılarında, 15° - 30° arasındaki açılarda, maksimuma ulaşmıştır.
- Literatüre göre, kırılgan malzemeler yüksek darbe açılarıyla kırılırken, sfero malzemelerin yüzeyinde ağır plastik deformasyon görülmüştür.
- Çarpma hızı arttıkça erozyon oranı da doğru orantılı olarak artmıştır.
- Ayrıca, numune yüzey pürüzlülüğü, artan test süresi ve çarpma hızıyla birlikte artmıştır.
- Ek olarak, çelik malzemelerde slurry erozyon etkilerinden biri de sıcaklık parametresidir. Ancak bu parametrenin erozyon oranına etkisi daha fazla çalışmaya ihtiyaç duymaktadır.

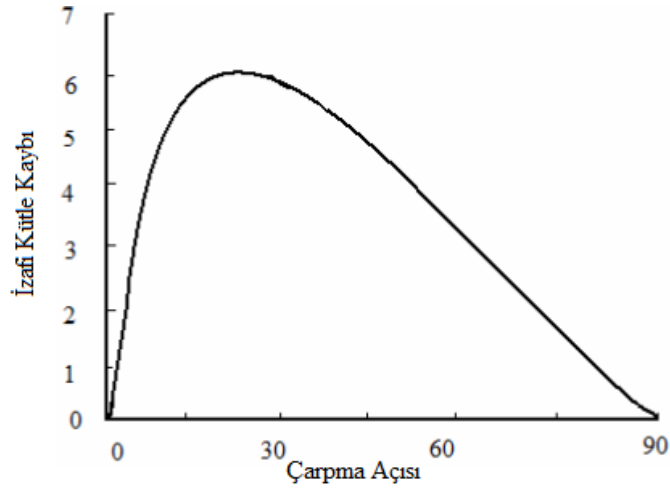
Erozyon sonucu oluşan aşınma çukurcuklarının büyük bölümünün birden çok etki sonucunda deforme olduğu yönündeki kanıtlara rağmen, erozyon konusunda geliştirilmiş olan modeller temel olarak düzgün bir yüzeye çarpan bir parçacığın etkisi için geçerli olan modellerdir. Malzemenin, kesme işlemi yolu ile kaldırıldığı varsayılarak, normal etki için geliştirilen basit model, diğer etki durumları içinde genişletilebilir. Bu tür bir yaklaşımdan yola çıkarak parçacık üzerindeki kuvvetlerin en üst noktada olduğunun varsayıldığı bir analiz yöntemi aşağıdaki denklemi ortaya çıkarmaktadır:

$$E = \frac{K\rho U^2}{H} f(0) \quad (3.1)$$

Formülde E erozyon oranını tanımlamaktadır.

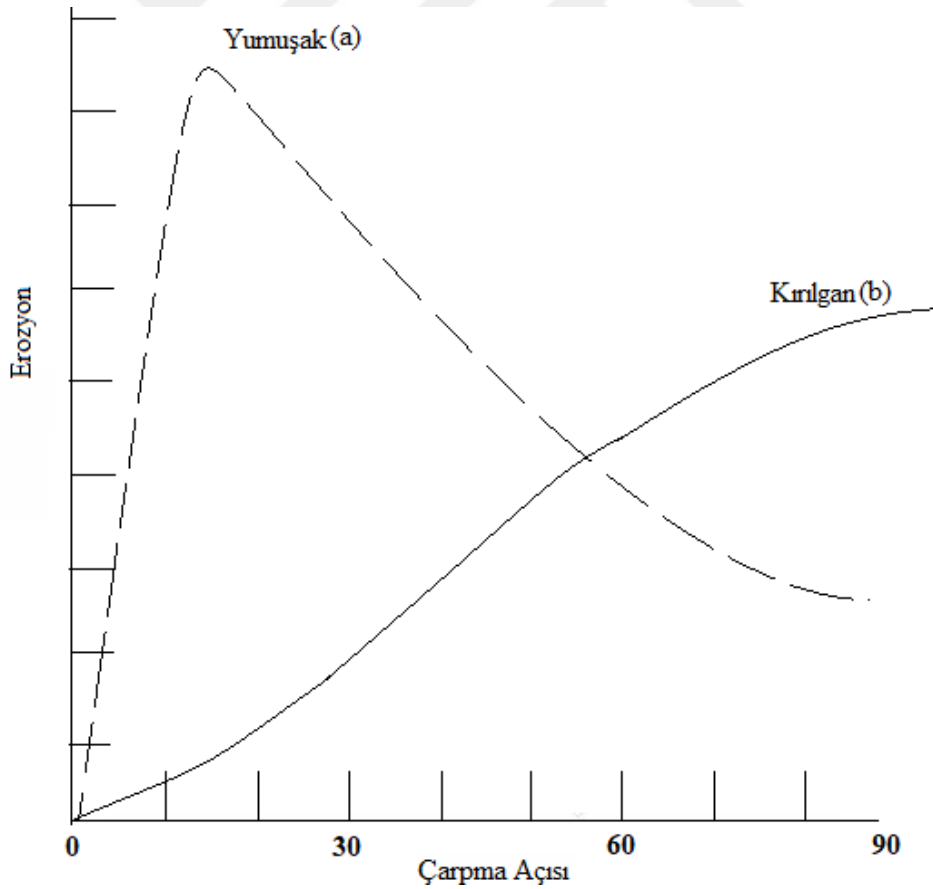
E = Temizlenen malzeme kütlesi/Yüzeye çarpan parçacıkların kütlesi

Denklemden K boyutsuz bir sabit olup, U parçacık hızı, H ise sertliği belirtmektedir. K'nin değeri parçacığın geometrisine ve gerçekte idealize bir şekilde kesim işlemi gerçekleştiren parçacıkların oranına bağlı olarak değişir.



Şekil 3.12. Yumuşak malzeme erozyonunun teorik temas geometrisi (Divakar ve ark., 2005)

Teorinin öngördüğü  $f(\theta)$  fonksiyonu Şekil 3.12. ile gösterilmiştir ve her ne kadar normal geliş açısı sıfıra düşüyorsa da pratikte Şekil 3.13 'de deneysel olarak gözlenmiş olan (a) eğrisine benzeyeceği gerçeği kabul edilmiştir.



Şekil 3.13. Erozyonun çarpma açısına bağlı değişimi (Divakar ve ark., 2005)

## 4. MATERYAL ve YÖNTEM

### 4.1. Test Metodu

Erozyon aşınma testleri için yaygın olarak Kuşlama testi (ASTM G76-07), Slurry (Çamur) erozyon testi (ASTM STP 946) ve Gaz akış (jet vuruş) testi (ASTM G76-95) kullanılmaktadır. Bu metotlarda parçacıklara hava ya da sıvı akıntısında ivme kazandırılması ve çarpma hızını elde etmek için sirküler hareketin kullanılması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada ise çamurlu ortamda yüzeylere aşındırıcı partiküllerin çarptırılması esasına dayanan slurry (çamur) erozyon testi (ASTM STP 946) metodu kullanılması hedeflenmektedir. Bu teste ait sistematik aşamaların tanımlandığı şematik gösterim Şekil 4.1.'de ifade edilmiştir.

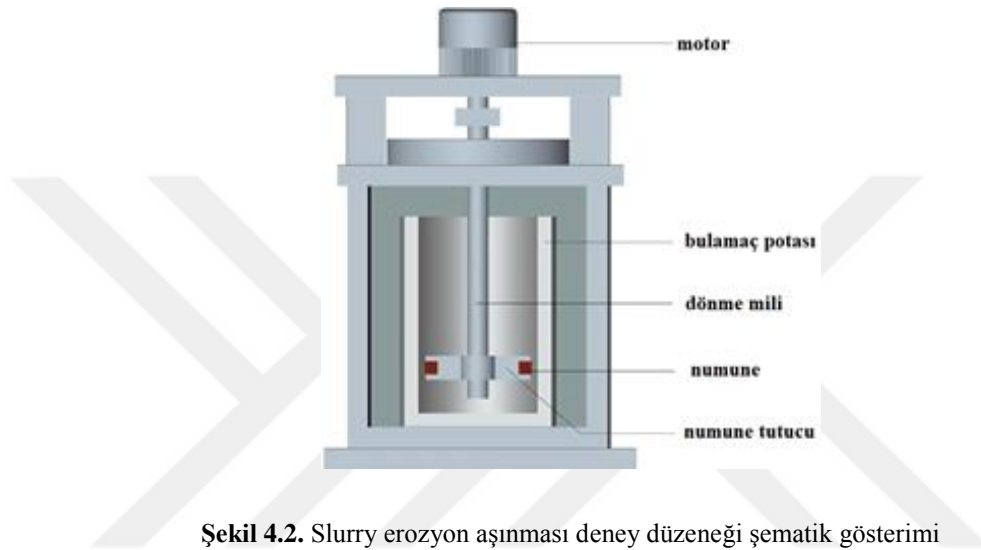


Şekil 4.1. Deney sistematığı aşamaları



## 4.2. Deney Düzeneği

Deney düzeneği tasarımında, başta çelik malzemeler olmak üzere kompozit ve kauçuk numunelerin aşınma olaylarını test edilebilecek yeterliliğe sahip pota tipi slurry test cihazı tercih edilmiştir. Deneyler Şekil 4.2.'de şematik gösterimi verilen test cihazı ile gerçekleştirilmiş olup, su-aşındırıcı/tuzlu su-aşındırıcı çamuru içerisindeki erozyon aşınma davranışları incelenmiştir.



Deney tesisatında, su-kum ve tuzlu su-kum bulamacının olduğu Şekil 4.3.'de gösterilen bir adet bulamaç potası bulunmaktadır.

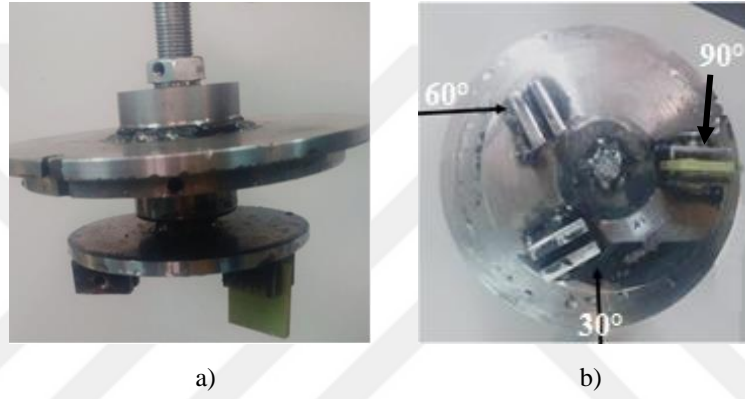


Şekil 4.3. Bulamaç potası

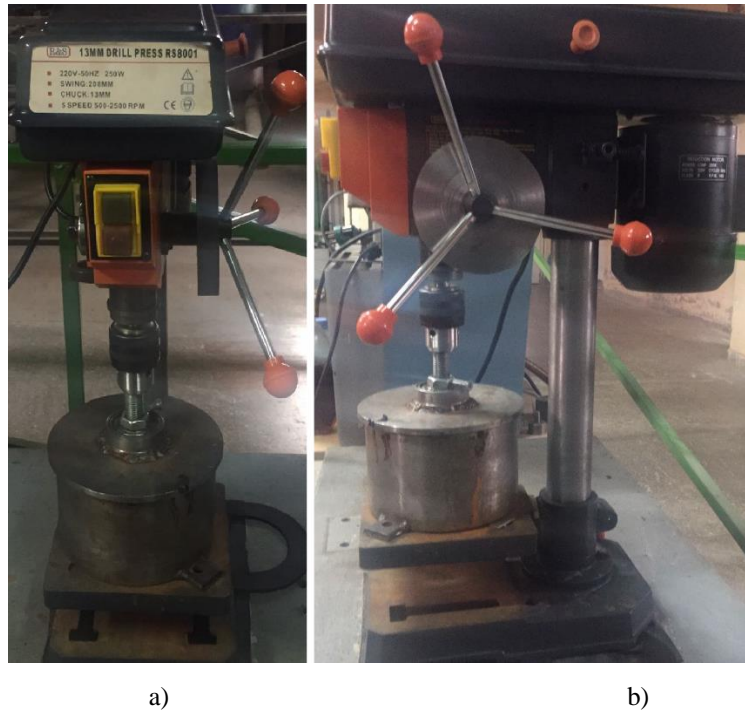
Çalışma öncesinde istenilen miktarda bulamaç hazırlanarak bulamaç potasına doldurulur. Her test için bulamaç potasına su-kum bulamaç çözeltisi doldurulmaktadır.

Hazırlanan çamur çözeltinin içerisinde numunelerin bırakılması gerekmektedir. Fakat çarpma açısını ve aşınma miktarını tespit edebilmek adına kontrollü yapılabilmesi için özel bir numune tutucu aparat tasarlanmıştır.

Numuneler, 30°, 60° ve 90°'lik çarpma açılarının belirlendiği Şekil 4.4. ile gösterilen tutuculara monte edilir. Şekil 4.4.'te gösterildiği üzere dönme milinden kaynaklanan çalkantı ile bulamacın taşmasını engelleyecek kapak görevi gören aynı zamanda tutucuların açılarla yerleştirildiği çelik disk mevcuttur. Bu disk üzerinde numunelerin, tutucunun içine sıkı bir şekilde oturmasını sağlayan 1 mm kalınlığında çıkıntılar mevcuttur. Numuneler bu çıkıntılara oturtularak vida ile sabitlenmiştir.



Şekil 4.4. Tutucular a) önden görünüş, b) üstten görünüş



Şekil 4.5. Deney tesisatı fotoğrafları a) ön görünüş, b) sol yan görünüş

Şekil 4.5.'te görüldüğü üzere tutucular, diskin dönme eksenine paralel eksen etrafında döndürülmektedir.

Deney numunelerine uygulanan darbe hızı, motorla kontrol edilmektedir. Dönme hızı deneylerde devir/dakika olarak değişen parametrelere göre ayarlanmaktadır. Deneylerin; belirli bir süre boyunca, değişen hızlarda, ihtiyaç görülen setlerde tekrar edilmesi hedeflenmektedir. Tüm bu özellikleri ihtiva edecek pota tipi slurry test cihazı, maksimum 250 W güç ile 500-2500 dev/dk'ya kadar olan aralıkta çalışma hızına sahip tezgâh üstü sütunlu matkabın revizyonu ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.5.).

Çalışmalar normal şartlar altında, yukarıdaki paragrafta da açıklandığı üzere tezgâh üstü sütunlu matkap ile devam ettirilecekti ve fakat kayda değer sonuçlar almak adına planlanandan daha uzun sürelerde çalışıldı. Tekrarlı deneylerde, 1400 dev/dk ile çalıştırılan tezgah 60 dk sonra 250 W gücündeki motorun fazla ısınmasından dolayı devre dışı kalmıştır. Ancak üçer tekrarlı yapılan deneyler 300 dk devam edebilecek şekilde 450 W gücündeki sütunlu matkapta 1900 dev/dk ile tam randımanlı çalışmıştır. Dolayısıyla deneyler, Şekil 4.6 'de b) ile gösterilen deney seti ile başlayıp a) ile gösterilen deney setine dönüştürülmüştür.



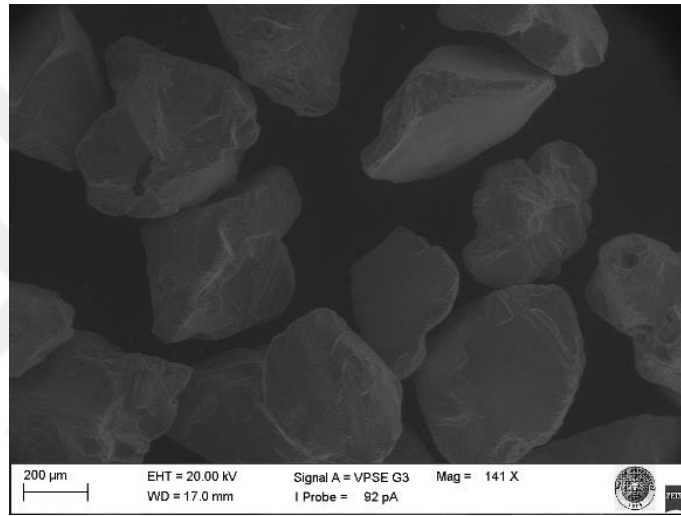
a)

b)

**Şekil 4.6.** Bulamaç potasının deney düzeneğine bağlanmış görünüşü a) 450 W güç ile çalışan düzenek  
b) 250 W güç ile çalışan düzenek

### 4.3. Aşındırıcı Partikül Özelliği

Numunelerde aşınma etkilerini görebilmek için daha agresiv bir ortam gerekmektedir. Bunun için köşeli  $Al_2O_3$  ve çelik grid parçacıkları aşındırıcı olarak kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan aşındırıcı partiküller 400  $\mu m$  çapında olup amaç bulamaç ortamındaki kum, taş, deniz canlılarına ait sert kabuk parçaları, istenmeyen atıklar, kopan malzeme parçacıkları vb. istenmeyen katı partikülleri temsil etmesi adına kullanılmıştır.  $Al_2O_3$  partiküllerin SEM görünüşleri Şekil 4.7.'de, kimyasal bileşimleri Çizelge 4.1. ile gösterilmiştir.



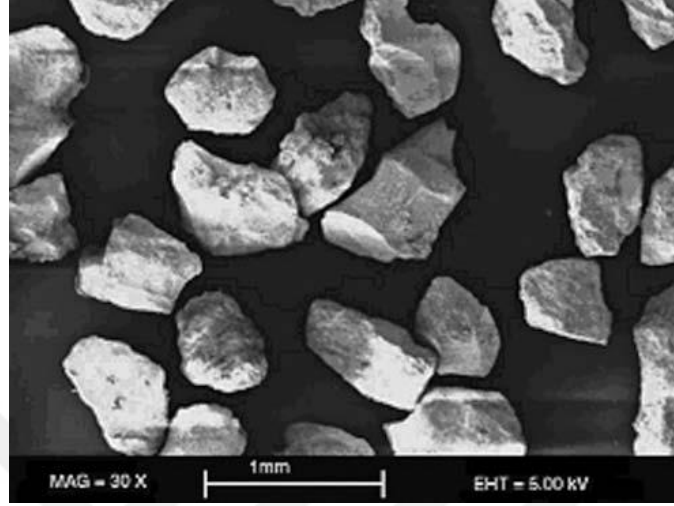
Şekil 4.7. 400  $\mu m$   $Al_2O_3$  aşındırıcı partiküllerin SEM görüntüsü (Bağcı, 2010)

Çizelge 4.1. 400  $\mu m$   $Al_2O_3$  aşındırıcı partikülün özellikleri (Bağcı, 2010)

Element	min.	max.
$Al_2O_3$ (%)	94,5	95,5
$SiO_2$ (%)	0,5	0,8
$Fe_2O_3$ (%)	0,2	0,4
$TiO_2$ (%)	2,6	3,2
CaO+MgO (%)	0,2	0,4

Alümina Özellikleri		
Yoğunluk ( $g/cm^3$ )	94,5	95,5
Sertlik (Mohs)	0,5	0,8
Erime Noktası ( $^{\circ}C$ )	0,2	0,4

SAE G40 çelik grid, martenzitik mikro yapıya sahip olup 400 µm büyüklüğündeki aşındırıcıdır. SEM görüntüleri ve kimyasal yapıları Şekil 4.8. ve Çizelge 4.2. ile gösterilmiştir.



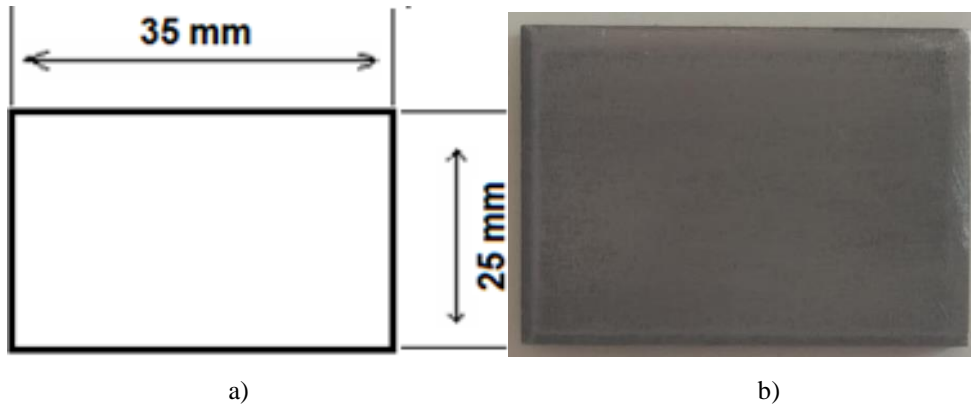
Şekil 4.8. 400 µm ortalama çapa sahip çelik grid aşındırıcı partikülün SEM görüntüsü

Çizelge 4.2. 400 µm çelik grid aşındırıcı partikülün kimyasal yapısı

C	Mn	Si	S	P
0,85 - 1,20 %	0,60 - 1,20 %	min. 0,40	max % 0,05	max. % 0,05

#### 4.4. Deney Numuneleri ve Özellikleri

Deneylerde, St12-A366/CQ kalite dekape sac malzeme kullanılmıştır. Numuneler 2x25x35 mm ebatlarında hazır edilmiştir (Şekil 4.9.).



Şekil 4.9. Deney numunesi a) ölçüleri b) fotoğrafik görseli

Söz konusu çalışma kapsamındaki deneylerde, gemi gövdelerinde de kullanımı tercih edilen Alman standartlarında (DIN) St 12 kalite, Amerikan kalite standartlarında (ASTM - SAE – API) A366/CQ olarak geçen dekape sac malzeme kullanılmıştır.

Sıcak haddelenmiş yassı çeliklerin, ısıtma işlemi yapılmadan haddelenmesi prosesi ile oluşan çelik ürünlerin üzerinde oluşan tufal yani oksit tabakalar asitle temizlenir. Bunlara “dekape” edilmiş saclar denir. Böylelikle elde edilen nihai yapının şekillendirilebilmesi, kaynak edilmesi kolaylaştırılmış oluyor. Genellikle 0.30 ile 2 mm arasında kalınlıklarda haddelenmektedir.

Sacın % ağırlıkça kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 4.3.’ de verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Deney numunelerinin kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri

Çelik Türü	Kimyasal Bileşimi (% ağırlık)				Mekanik Özellikler		
	C <sub>maks</sub>	Mn <sub>maks</sub>	P <sub>maks</sub>	S <sub>maks</sub>	Çekme Dayanımı MPa	Akma Dayanımı < MPa	Kopma Uzaması < %
St 12 A366/CQ	0.07	0.4	0.02	0.02	270...410	280	28

#### 4.5. Deney Numunelerinin Kütle Kaybı Tespiti

Deneylerde, numunelerinin deney öncesi ve aşınma sonrası kayıpları  $10^{-4}$  gr hassasiyetteki hassas terazi ile ölçülmüştür (Şekil 4.10.).



**Şekil 4.10.** Hassas terazi

#### 4.6. Deney Prosedürü

Deneylerin yapılışı aşağıda verilen sıraya göre gerçekleştirilmiştir.

1. Numuneler, 25x35 mm<sup>2</sup> ve 2 mm kalınlığında olacak şekilde sac kesim tezgâhında kesildi ve çalışma yüzeyleri taşlandı.
2. Deney numunelerinin yüzeyleri alkol ile temizlenip, basınçlı hava ile kurutuldu ve uygun çalışma yüzeyleri hazırlandı.
3. Deney numuneleri temizlendikten sonra ilk ağırlığının belirlenebilmesi için 10<sup>-4</sup> gr hassasiyetteki laboratuvar tipi terazi ile tartıldı ve kaydedildi.
4. Numuneler, 30<sup>0</sup>, 60<sup>0</sup> ve 90<sup>0</sup> çarpma açılarındaki numune tutuculara yerleştirilip sabitlendi.
5. Konsantrasyonun erozyon üzerindeki etkilerini belirleyebilmek amacıyla ağırlıkça %50 aşındırıcı ihtiva eden su-kum ve tuzlu su-kum çamuru hazırlanmıştır.
6. 400 µm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve 400 µm çelik gridden oluşan katı aşındırıcı partiküller ve tuzluluk oranları değişen Akdeniz, Karadeniz ve Ege Denizinden alınan tuzlu su ile ayrıca saf sundan hazırlanan çamur, bulamaç haznesine yerleştirilmiştir.
7. Testler; 1900 dev/dk mil dönme hızında, 300 dk süreyle 30<sup>0</sup>, 60<sup>0</sup> ve 90<sup>0</sup> çarpma açılarında gerçekleştirilmiştir.
8. Deney tamamlandıktan sonra numuneler tutucudan çıkartıldı ve yeniden basınçlı hava ile temizlenip yağlandı.
9. Numunelerin son ağırlığını hesaplamak için tekrar hassas terazi kullanıldı ve elde edilen veriler kaydedildi.
10. Kaydedilen ilk ağırlık ve son ağırlık arasındaki fark ile ağırlık kaybı hesaplandı. Kaydedilen verilerin literatürde kabul gören 4.1. formülünde yerine konulmasıyla erozyon oranlarına (g/kg) ulaşıldı.

Literatürde, her bir deneysel çalışmanın kendi erozyon özelliğini yansıttığı erozyon oranını hesaplamamanın birkaç yolu mevcuttur.

Finnie, değişen partikül çarpma açısının etkilerini araştırırken, numunede meydana gelen ağırlık kaybının tüketilen aşındırıcının ağırlığına oranlayarak boyutsuz bir erozyon oranını benimsemiştir (Finnie, 1995).

$$E = \text{Ağırlık kaybı (g)} / \text{Tüketilen kum ağırlığı (kg)} \quad (4.1)$$

Finnie (1960) ve Bitter (1963) tarafından yapılan çalışmalara dayanarak, Clark ve Wong (1995), birim zamanda ortaya çıkan toplam erozyonun ( $E_T$ ), deformasyon ( $E_D$ ) ve kesme ( $E_C$ ) erozyon mekanizmalarının toplamı olarak ifade edilebileceğini (4.3.) öne sürdüler.

$$E_T = E_D + E_C \quad (4.2)$$

$$E_T = \frac{1/2M_p(V_N^2)}{\epsilon} + \frac{1/2M_p(V_T^2)\sin 2\alpha}{\phi} \quad (4.3)$$

Erozyon oranı ( $\text{g.kg}^{-1}$ ) biriminde ifade edilir. Erozyon oranının boyutsuz olması sebebiyle, farklı parametre etkisini araştıran çalışmalar arasında deneysel sonuçların kolayca karşılaştırılmasını sağlamaktadır.

11. Yeni bir deneye geçmeden önce bulamaç haznesi boşaltılarak içerisine yeni su-kum çamuru hazırlandı. Numune tutucular ve üzerindeki sabitleme elemanları temizlendi. Böylece deneylerdeki standardı korumaya özen gösterildi.
12. Deney sonuçlarına göre deney numunelerinde meydana gelen erozyon oranına deniz sularındaki tuz oranının nasıl etki ettiği değerlendirildi.

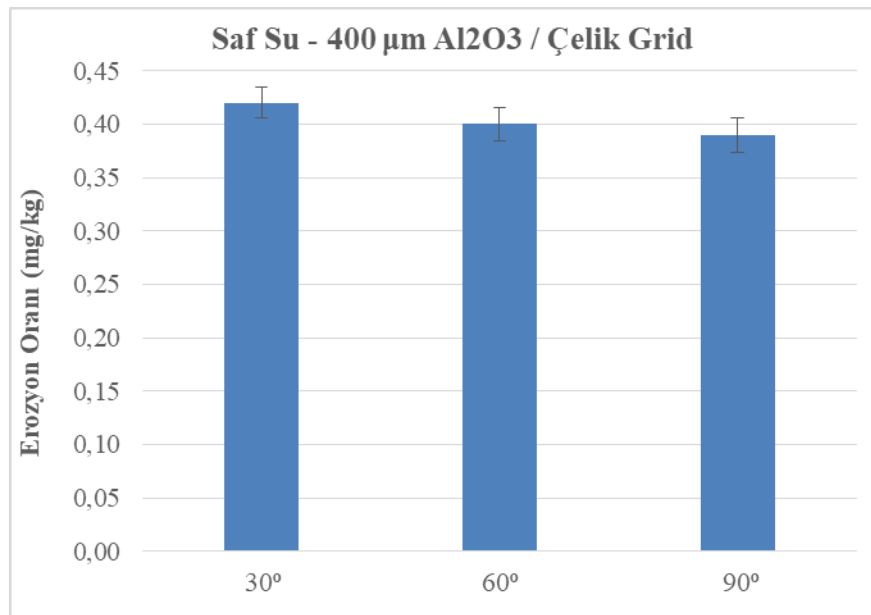


## 5. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

### 5.1. Deneysel Sonuçlar

Çelik numuneler; üç farklı deniz suyundan (Akdeniz, Karadeniz, Ege Denizi) hazırlanan bulamaçta üç farklı çarpma açısına (30°, 60° ve 90°) tabi tutulmuştur. Deniz sularındaki değişimi kıyaslayabilmek adına saf suyla da üç tekrarlı olmak üzere birer set deney yapılmıştır. 400 µm boyutundaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcı ve 400 µm çelik grid ile %50 lik konsantrasyonlarda bulamaçlar hazırlanmıştır. Her bir deney, 450 W gücündeki deney setinde 1900 dev/dk mil dönme hızı ile 300 dk tekrarlanmıştır.

Hedeflenen çalışma ile kullanılan numune malzemesine; aşındırıcı partikül, deney hız ve süresi sabit tutulmak kaydı ile çarpma açılarının ve bulamaçtaki tuzluluk yoğunluğunun aşınmaya etkisi incelenmiştir. Grafiklerdeki noktaların belirlenebilmesi için aynı şartlar altında üçer tekrarlı deneyler yapılmış olup bu deneylere ait veriler baz alınmıştır. Saf su ve aşındırıcı partikül ile hazırlanan konsantrasyonu %50 olan bulamaca tabii tutulmuş numunelere ait 30°, 60° ve 90° çarpma açısındaki erozyon oranlarındaki değişimler Şekil 5.1. ile verilmiştir.

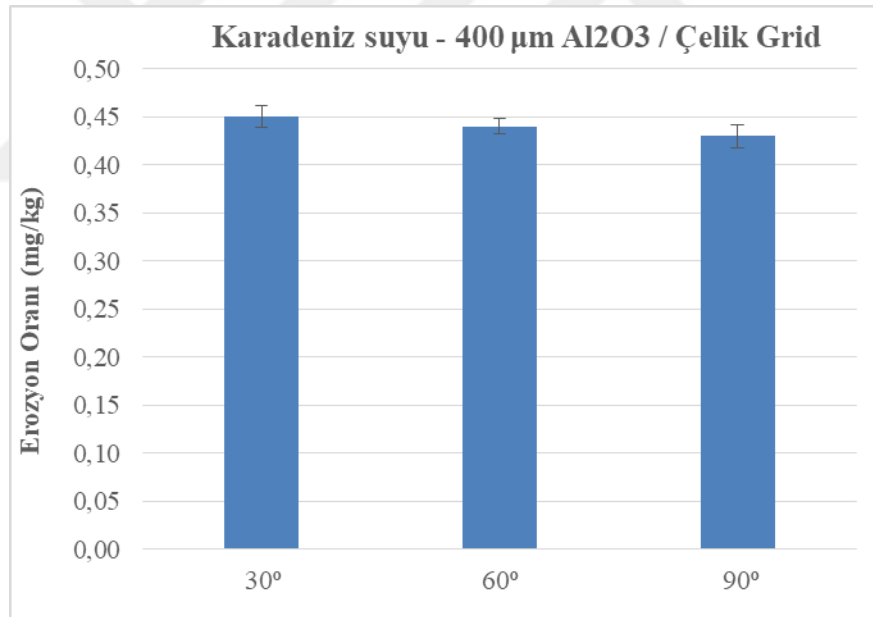


Şekil 5.1. Saf su-kum bulamacındaki deneylerin çarpma açısı–erozyon oranı

Her üç deneye ait veriler grafiğe aktarıldığında görüldü ki %50 konsantrasyon oranına sahip 400  $\mu\text{m}$  büyüklüğündeki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve çelik grid aşındırıcı partikül ve saf suyla hazırlanan bulamaç için en fazla aşınma oranı  $30^\circ$  de elde edilmiş çarpma açısı büyüdükçe erozyon oranı küçülmüştür.  $30^\circ$  ve  $60^\circ$  çarpma açılarında birbirine yakın sonuçlar ortaya çıkmış olup  $90^\circ$  deki çarpma açısının erozyon oranı daha küçük bulunmuştur.

Literatür çalışmalarındaki deneylerde elde edilen ve Şekil 3.13.'te de gösterildiği gibi sünek malzemelerin erozyon oranının çarpma açısı büyüdükçe azalan değişimini teyit etmiştir.

Şekil 5.2. ile gösterilen grafik, dekape sac deney numunelerinin 400  $\mu\text{m}$  büyüklüğündeki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - Çelik grid aşındırıcı partikül ve Karadeniz suyu kullanılarak hazırlanan %50 tuzlu su-kum bulamacı ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçları aittir.

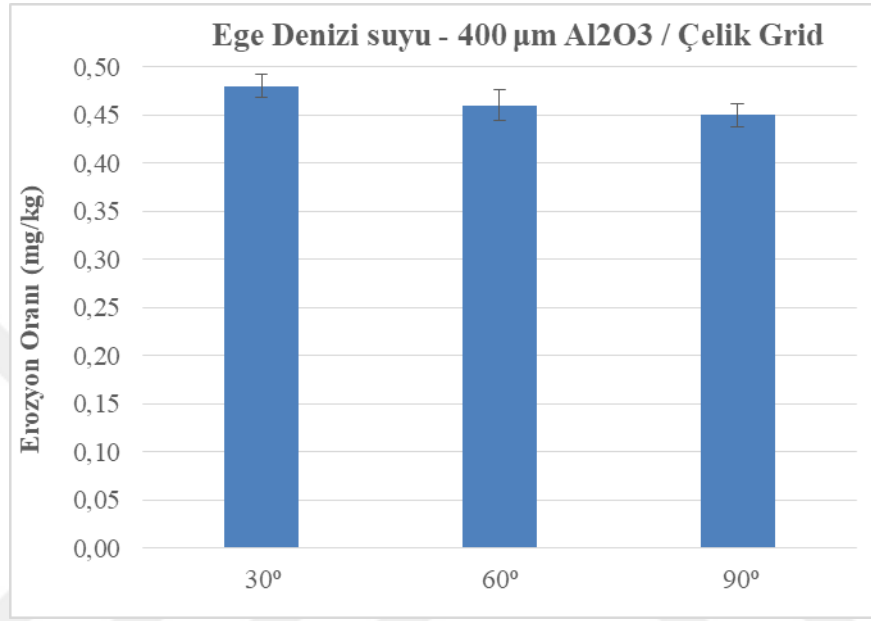


Şekil 5.2. Karadeniz tuzlu su-kum bulamacındaki deneylerin çarpma açısı–erozyon oranı

Karadeniz tuzlu suyu ile hazırlanan deneylere ait grafik incelendiği zaman, 400  $\mu\text{m}$  büyüklüğündeki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve çelik grid aşındırıcı partikülü için maksimum erozyon oranı  $30^\circ$  çarpma açısında ve minimum erozyon oranı  $90^\circ$  çarpma açısında gerçekleşmektedir.

Aynı koşullarda gerçekleşen saf su ile hazırlanmış bulamaca ait grafiklerle kıyaslayacak olursak, erozyon oranı daha fazla olmuştur. Bu durum saf su ile hazırlanan bulamacın yapısında tuz konsantrasyonunun bulunmamasına yorumlanmıştır.

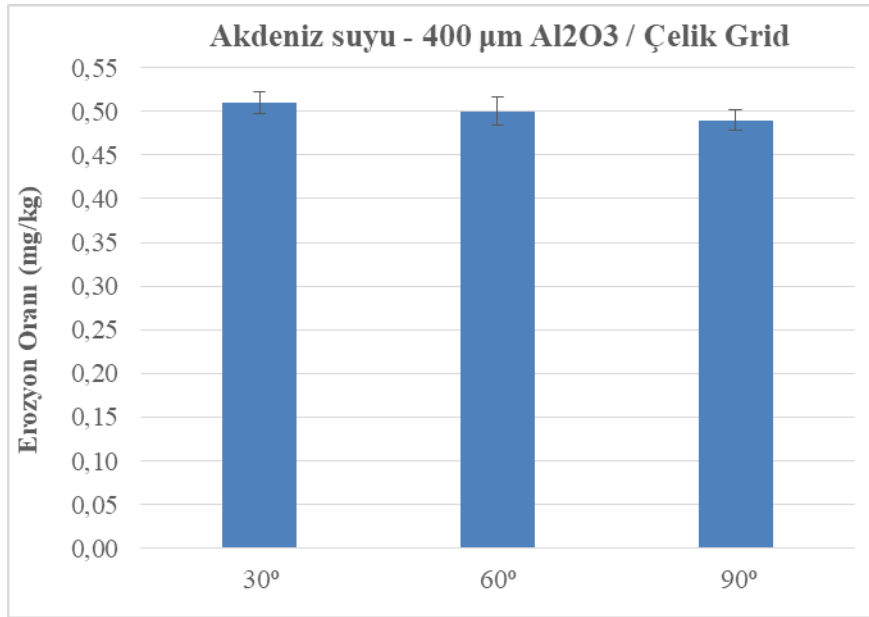
Şekil 5.3.'deki grafik %50 lik konsantrasyondaki Ege Denizi tuzlu suyu ile hazırlanan bulamaçtaki deneylere aittir.



Şekil 5.3. Ege denizi tuzlu su-kum bulamacındaki deneylerin çarpma açısı–erozyon oranı

Ege denizi tuzlu suyu ile hazırlanan bulamaca ait deneylerin grafikleri incelendiğinde önceki iki deneyde olduğu gibi çarpma açısı arttıkça erozyon oranının azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca Ege denizi tuzlu su-kum bulamacı erozyon oranı, Karadeniz tuzlu su-kum bulamacına göre daha fazla artış göstermiştir. Bölüm 5.2.1. 'de daha detaylı açıklandığı üzere tuzluluk oranı Ege denizinde ilk iki deney koşuluna göre daha yoğun olduğundan dolayı slurry erozyonda tuzluluğun aşınmaya olan etkisini ispatlamıştır.

Şekil 5.4. ile gösterilen grafik, 400 µm büyüklüğündeki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Çelik grid aşındırıcı partikül ile Akdeniz'den alınan %50'lik tuzlu su-kum bulamacında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara aittir.



**Şekil 5.4.** Akdeniz tuzlu su-kum bulamacındaki deneylerin çarpma açısı–erozyon oranı

Çarpma hızı, aşındırıcı partikül boyutu ve bulamaç konsantrasyonu parametreleri sabitken çarpma açısı ve farklı deniz sularındaki (Akdeniz, Karadeniz, Ege Denizi) tuzluluk yoğunluğunun etkilerini incelemek için yapılan slurry erozyon aşınması deneyleri sonunda görülmüştür ki en yüksek tuzluluk oranına sahip Akdeniz’e ait tuzlu su-kum bulamacında en yüksek erozyon oranları meydana gelmiştir. Yine önceki deneylerde olduğu gibi 30° çarpma açısında en yüksek, 90° çarpma açısında en küçük erozyon oranına ulaşılmıştır.

Akdeniz tuzlu suyu ile hazırlanan bulamaç ile saf su-kum bulamacı kıyaslandığında ise maksimum artışla erozyon oranına ulaşılmıştır. Bu durum ile literatürde geçen tuzluluk oranı arttıkça slurry erozyon aşınmanın da artacağı bilgisi birbirini desteklemiştir.

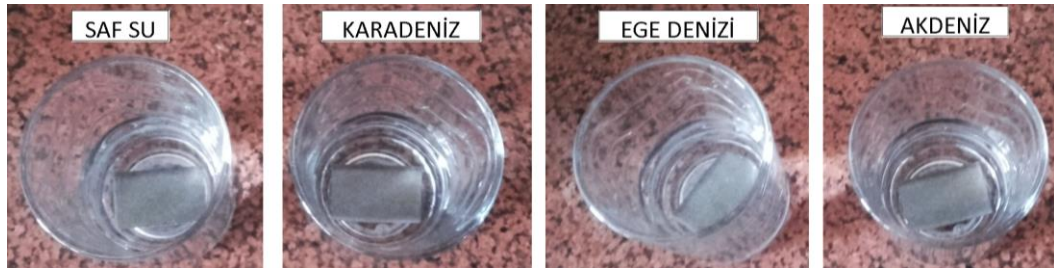
Elde edilen deneysel verilerin ve bu verilere göre oluşturulan grafiklerin birbirleri ile olan karşılaştırmalarından da anlaşılacağı üzere tuzluluğu değişen bulamaçlarda deneye tabi tutulan dekape sac numunelerinde açı ve tuzluluk oranı arttıkça erozyon oranı azalmıştır. Bu da yapılan deneylerin literatür çalışmaları ile tutarlılığını ispatlamış ve elde edilmek istenen seğrilme gözlemlenmiştir.

## 5.2. Korozyon Etkisinin İncelenmesi

Yapılan araştırmalara ve tutulan istatistiklere göre makine elemanlarının ortalama %70'inin hurdaya ayrılmasına aşınma kadar korozyonda sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak meydana gelen malzeme kayıpları, aşınan parçaların yenileriyle değiştirilmesi zorunluluğu, makinelerin bakım-onarım faaliyetleri için harcanan zaman ve emek ve bu faaliyetler için istihdam edilen teknik personel göz önüne alındığında, her yıl milli sermayeye oldukça büyük yükler getirmektedir.

Elektrolit içinde (deniz suyu) korozyonun oluşabilmesi için, iki elemanın aynı ortamda bulunması gerekir bu iki eleman anot, katottur. Bir tek metalin yüzeyinde olabileceği gibi ayrı ayrı iki metal olarak elektrolit içinde bulunabilir. Pervanelerin malzemeleri bakir esaslı olup katkılarla sertleştirilmiştir. Gemiler, işlenebilir karbonlu elik saclardan yapılır. İdeal bir elektrolit olan deniz suyu iki değişik potansiyelde bulunan pervane ve elik tekne; mangan -bronz pervane-katot elik tekne-anot, aynı ortamda bulunur ve böyle bir ortamda galvanik pil meydana gelir. Yani korozyonu oluşturan elektrik akımı demir iyonları anottan(tekneden) ıkararak deniz suyunun içinden geçip katoda (pervane) geçer. Böylelikle akımın çıktığı anot yani tekne sacları erir.

Bu kapsamda, deniz sularındaki gemi aksamları, pervane, çamur pompaları gibi yapıların slurry erozyona maruz kalırken korozyonun nasıl bir etki yapacağı tespit etmek istendi. Literatürdeki alışmaları incelendiğinde görülmüştür ki 96 ve üzeri saatlerde slurry erozyonun yanı sıra korozyon etkisinde numunelerde tahribatlar meydana getirmiştir. Söz konusu çalışmada ne gibi etki meydana getireceği gözlemlemek için sac numuneler, bulamaç eldesi için hazır edilen sularda deney standardı olan 300 dk süre ile bekletildi.



şekil 5.5. Deney numunelerinin, tuzluluk oranı farklı dört suda bekletilmesi

Neticede; saf su, Karadeniz tuzlu suyu, Ege Denizi tuzlu suyu ve Akdeniz tuzlu suyu içinde 300 dk bekletilen numunelerde korozyon etkisi meydana gelmemiştir. Dolayısıyla beşer saatlik yapılan deneyler, korozyon etkisinden bağımsız olarak değerlendirilmiştir.

### 5.3. Tartışma

Aşındırıcı partikül, çarpma hızı ve deney süresi sabit kalmak şartıyla gerçekleştirilen deneylerde elde edilen bulgulara göre slurry erozyon aşınması iki ana etkene bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bunlar, hazırlanan bulamaçtaki tuzluluk oranı arttıkça aşınmanın artması ve çarpma açısı arttıkça erozyon oranının azalmasıdır.

#### 5.3.1. Tuzluluk oranı

Çalışmanın amacı Türkiye deniz sularındaki slurry erozyonun gemi pervanelerinde, köprü ayakları çevresinde, sulu ortamda çalışan makine ve parçalarında ne kadar aşınma meydana getireceğini somut olarak göstermek idi.

Deniz Suyu, deniz ve okyanuslarda bulunan içinde bir çok element ve tuz içeren saf olmayan sudur. Tuzluluk, çoğunluğu sodyum klorür iyonları olan Na<sup>+</sup> ve Cl<sup>-</sup> içeriğini belirtir. Deniz Kuvvetleri Komutanlığı resmi internet sayfasında açıklanan bilgiye göre Türkiye deniz sularındaki tuzluluk oranı Karadeniz’de 1.8 mg/ml, Ege’de 2.5 mg/ml, Akdeniz’de 3.6 mg/ml’dir (Çizelge 5.1.).

Çizelge 5.1. Türkiye deniz suları tuzluluk oranı

Bölge	Tuzluluk oranı (mg/ml)
Akdeniz	3.6
Karadeniz	1.8
Ege Denizi	2.5

Guanghong ve arkadaşları (2010) yaptıkları çalışmada, östenitik paslanmaz çeliklerin (316L ve 13Cr24Mn0.44N) slurry erozyon aşınma davranışlarını su-kum bulamacında ve tuzlu-kum bulamacında sırasıyla incelenmiştir. Elde ettikleri verilere

göre su-kum bulamacındaki aşınma oranının tuzlu su-kum bulamacındaki aşınmaya göre daha az olduğunu kaydetmişlerdir.

Wood (2017) yaptığı çalışmada deniz suyu taşıma sistemlerindeki ve okyanus ortamlarındaki aşınmanın etkilerini azaltmak için kullanılan stratejilere ve malzemelere odaklanmıştır. Deneplerinde elde ettiği verilere göre tuzlu su çözeltilerinde aşınmanın maksimum seviyelere ulaştığını gözlemlemiştir.

Mahmood ve Khadom yaptıkları çalışmadan elde ettikleri kütle kaybı ölçüm sonuçlarına göre, tuzlu sudaki yumuşak çeliğin erozyon oranının zaman, kum konsantrasyonu, numune ve çarpma hızı ile arttığını göstermektedir (Mahmood ve Khadom, 2016).

Elde edilen veriler ile literatürdeki çalışmaların sonuçlarının birbirini destekler nitelikte olduğu görülmüştür. Tuz yoğunluğu sırasıyla Karadeniz, Ege denizi ve Akdeniz şeklinde artan tuzlu su-kum bulamaçlarında 300 dk süreyle slurry erozyon deneyine tabi tutulan numunelerdeki aşınma oranının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca tuzluluğun erozyona olan etkisini daha net yorumlayabilmek adına saf su-kum bulamacı ile de deneyler yapılmış ve farklılık gözlemlenmiştir.

### 5.3.2. Çarpma açısı

Çarpma hızının erozyon aşınması üzerindeki etkinliğinde temel faktör aşındırıcı partiküllerin kinetik enerjisinin değişmesidir. Yani daha yüksek hız ve dolayısıyla daha yüksek kinetik enerji ile sünek yapıdaki dekape sac malzemenin yüzeyine çarpan aşındırıcı partiküller numuneyi daha kolay aşındırmıştır (Bağcı, 2010).

Andrews ve arkadaşları, çarpma açısının Stellite 6 süper alaşımı ve SS316 paslanmaz çeliğinin slurry erozyon ve korozyonu üzerine etkilerini araştırdıkları çalışmalarında jet tipi aşındırıcı test düzeneği kullanmışlardır. Testlerdeki slurry konsantrasyonu ağırlıkça % 3.5 NaCl ve 1.177 g/l açısız kum partikülleri içermektedir. Testler 19 m/s çarpma hızında bir saat süreyle 20<sup>0</sup>, 45<sup>0</sup>, 60<sup>0</sup> ve 90<sup>0</sup> çarpma açıları gerçekleştirilmiştir. Aşınma mekanizmaları ve yüzey hasarı seviyelerinin değerlendirilmesi ışık mikroskobu, yüzey profillerinin çıkarılması ve SEM görüntüleriyle desteklenmiştir. Stellite 6, SS316 çeliği ile karşılaştırıldığında üstün aşınma direnci sergilemiştir. SS316 çeliği için en şiddetli aşınma sünekliği nedeniyle

45° çarpma açısında görülmüştür. Krom karbürlerin kırılğan ağ yapısının Stellite 6'nın erozyon-korozyon davranışı üzerine önemli bir etkisi olmuş ve kritik hasar 60° 'de meydana gelmiştir (Andrews ve ark., 2014).

Ojala ve arkadaşları, su verilmiş aşınmaya dayanıklı çeliklerin slurry erozyon içerisindeki aşınma performansını değerlendirdikleri çalışmalarında pota tipi slurry aşınma cihazı kullanmışlardır. Çalışmada % 9 ve % 33 konsantrasyon oranlarında granit ve partikülleri kullanılmış ve testler 45° - 90° olmak üzere iki farklı çarpma açılarında gerçekleştirilmiştir. İncelenen çeliklerin performansları sertlik ve mikro yapı gibi özelliklerine göre değerlendirilmiştir. Bundan başka test numunelerinin kesitleri ve aşınma yüzeyleri analiz edilerek slurry erozyon boyunca mekanik özelliklerdeki olası farklar ortaya çıkarılmıştır. Aşınma yüzey analizleri, en küçük partikül boyutları için baskın aşınma mekanizmasının abrazif aşınma olduğunu göstermektedir. Düşük gerilimli slurry erozyonda elastomerler çelikten daha yüksek erozyon direncine sahiptir. Yüksek gerilimli slurry erozyon koşullarında ise su verilmiş aşınmaya dayanıklı çeliklerin erozyon direnci elastomerler ile rekabet edebilecek düzeydedir. Çeliklerin aşınma performansı aşındırıcı boyutu arttıkça artarken elastomerlerinki azalmaktadır (Ojala ve ark., 2016).

Toro ve arkadaşları çalışmalarında, deniz suyunu-kuvartz bulamacında test edilen, düşük karbonlu, gaz nitrürlü bir martensitik paslanmaz çeliğin slurry erozyon direncini incelemiştir. Sonuçları; AISI 410 ve 420 martensitik paslanmaz çeliklerden elde edilenlerle karşılaştırmışlardır. Test bulamacı, 20 kg okyanus suyuna (% 20) 5 kg kuvartz ilavesi pH değeri tüm deney boyunca  $8.2 \pm 0.1$  değeri kontrol edilerek hazırlanmıştır. Bulamaç ve kuvars parçacık boyutu 0.3 ila 0.5 mm arasında tutularak 96 saat süren deneylerini gerçekleştirmişlerdir. AISI 410S'nin 473 K'de nitrülenmiş ve tavllanmış özel kütle kaybı, aynı sıcaklıkta temperlenmiş ticari AISI 410 ve 420 çelikleri için görülen kütle kaybından daha düşük ölçmüşlerdir. Ayrıca, nitrülenmiş AISI 410S numuneleri için 45° ve 90°'lik çarpma açıları elde edilen kütle kayıplarının, normal insidansa bağlı kütle kayıplarından daha fazla olduğunu kaydetmişlerdir (Toro ve ark., 2001).

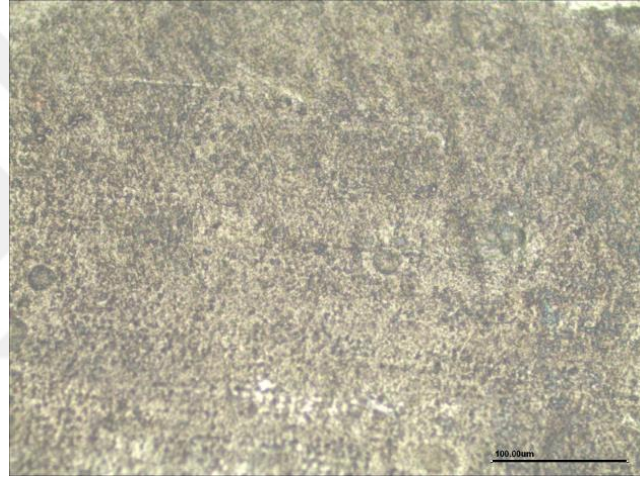
Sonuç olarak EK-1 ile EK-4 arasındaki deneysel verilere ait tablolar incelendiğinde görülmüştür ki; 400 µm büyüklüğündeki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Çelik grid aşındırıcı partikül ile hazırlanan bulamaçlarda (deney süresi ve deney hızı sabit kalmak koşuluyla deneyler gerçekleştirilmiştir) sünek yapıdaki dekape sac numunelerde kütle kaybı olmuş



ve erozyon oranı  $30^\circ$  çarpma açısında maksimuma,  $90^\circ$  çarpma açısında minimum değerlere ulaşmıştır. Literatür çalışmalarındaki deneylerde elde edilen ve Şekil 3.13.'te de gösterilen sünek malzemelere ait erozyon oranını veren eğim elde edilmiştir.

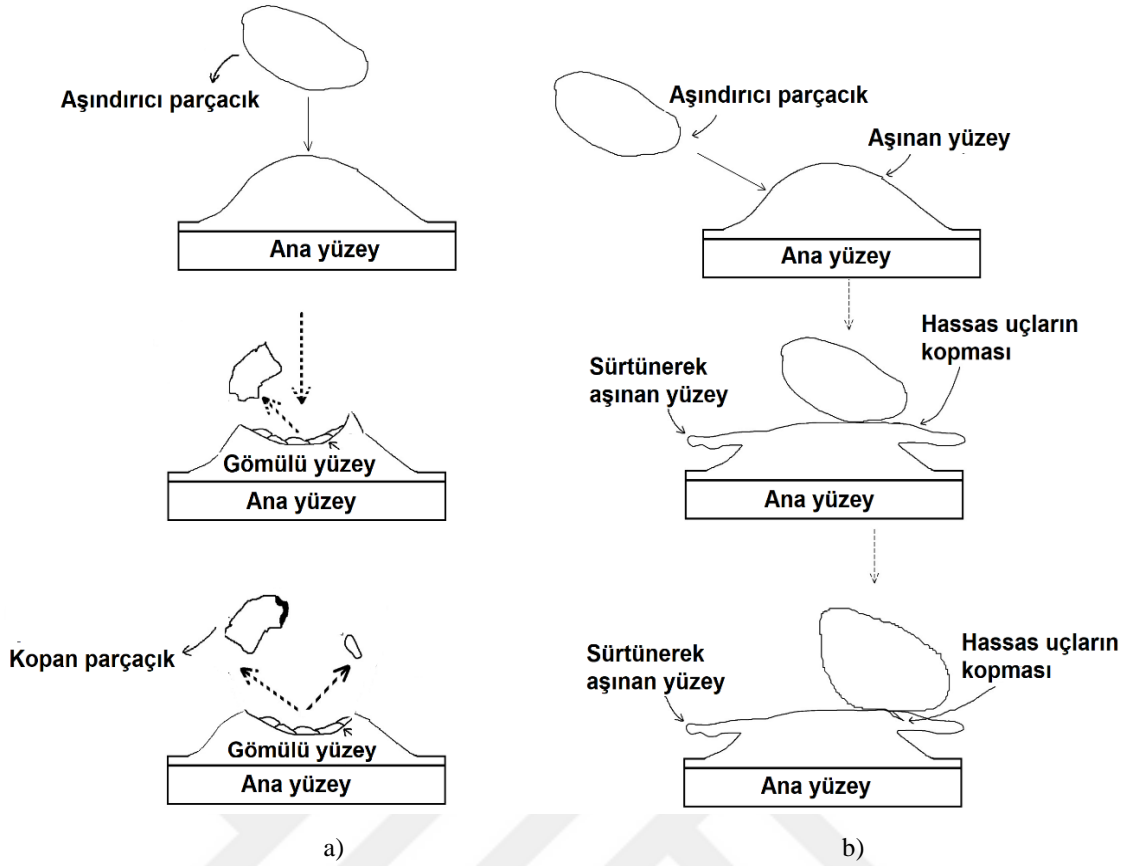
#### 5.4. Aşınmış Yüzeylerin Mikroskop Görüntüleri

Aşınan yüzeyin malzeme kaldırma mekanizmasını anlamak için aşınan numuneler mikroskop ile incelenmiştir. İncelenecek numuneler alkol ile yıkanıp kurutulduktan sonra numune yüzeyi yağ ve diğer kalıntılardan temizlenmiştir. Deney numunesinin aşınmaya maruz kalmadan önceki görüntüsü Şekil 5.6. ile verilmiştir.

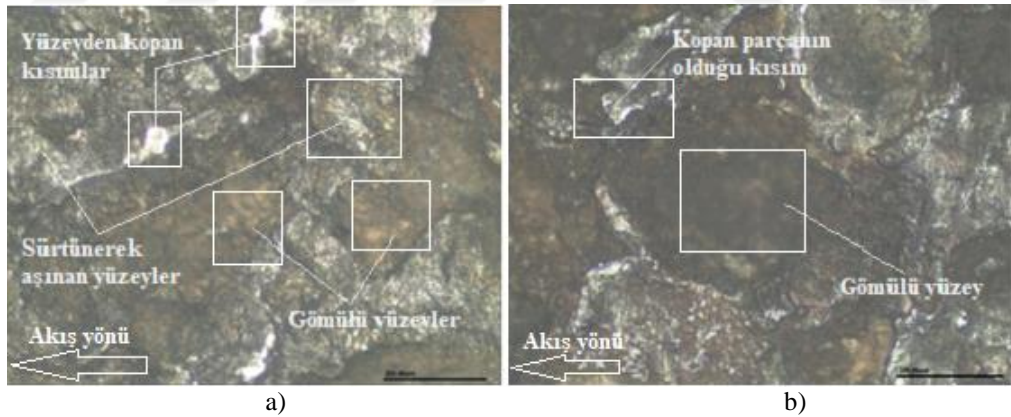


Şekil 5.6. Deney numunesinin aşınmadan önceki görüntüsü x200 büyütme

$12 \text{ kg/mm}^2$  çekme dayanımına sahip dekape sac, sünek davranış gösterdiğinden dolayı  $30^\circ$  çarpma açısında aşındırıcı partikül, malzeme yüzeyinden sıyrarak parça koparıırken  $90^\circ$  çarpma açısında, malzeme yüzeyinde gömü oluşturacak şekilde aşınma meydana getirir. Aşındırıcı parçacığın yüzeye nasıl çarptığı ve yüzeyden nasıl parça kopardığı Şekil 5.7. ile şematik olarak açıklanmıştır.

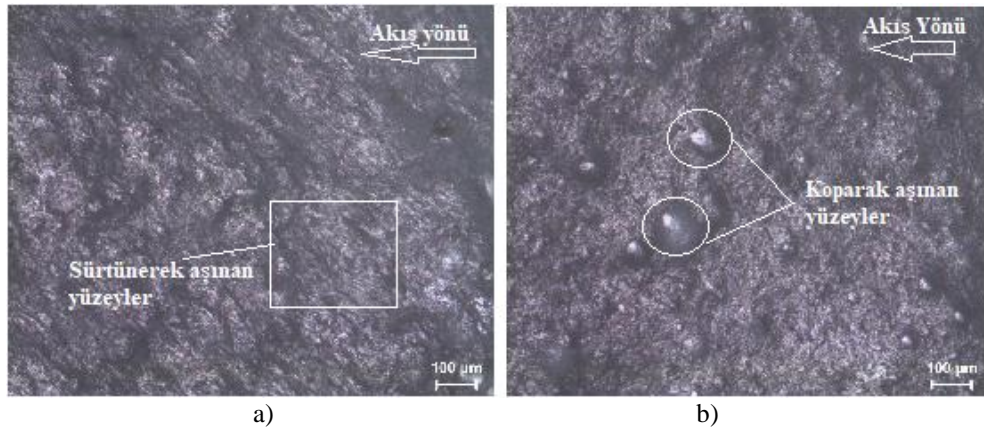


Şekil 5.7. Sünek malzemenin; a) 90° ve b) 30° çarpma hızlarındaki slurry erozyon aşınmasına ait şematik diyagramı

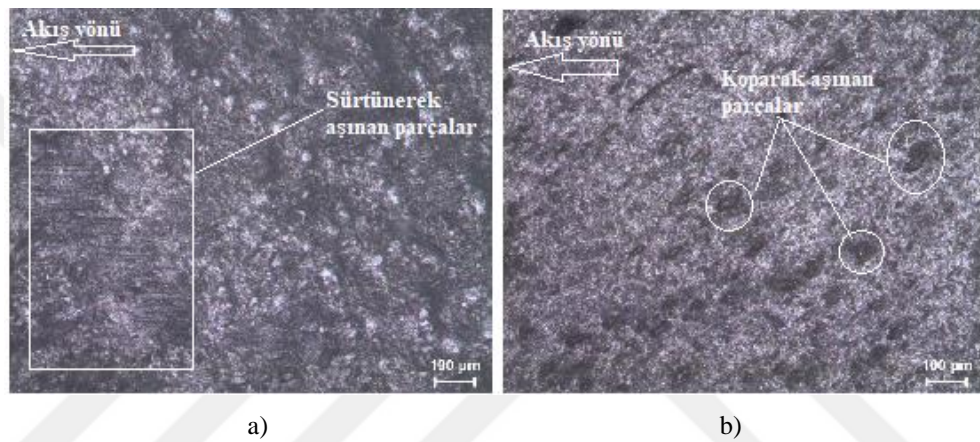


Şekil 5.8. Saf su ile hazırlanan bulamaçtaki a) 30° ve b) 90° lik numunelerin x200 büyütme görüntüleri

Şekil 5.8.'de saf su ile hazırlanan bulamaçtaki numune incelendiğinde, mikroyapısal morfoloji de görüldüğü üzere sünek malzeme yüzeyine 90° lik açıyla çarpan aşındırıcı partiküller daha çok gömülme şeklinde hasarlar oluşturmuştur. 30° lik çarpma açısına maruz kalan numunede ise sürtünerek aşınan ve sıyrıklar sonucu hassaslaşan yüzeylerdeki meydana gelen kopmalar görülmektedir.



Şekil 5.9. Karadeniz suyu ile hazırlanan bulamaçtaki a) 30° ve b) 90° lik numunelerin x100 büyütme görüntüleri



Şekil 5.10. Ege denizi suyu ile hazırlanan bulamaçtaki a) 30° ve b) 90° lik numunelerin x100 büyütme görüntüleri

Şekil 5.9. ve Şekil 5.10.'daki mikroskop görüntüleri incelendiğinde, a) görüntüsüne ait numuneler 30° lik çarpma açısına maruz kalmıştır ve sıyrık şeklinde aşınmalar yorumlanmakta, b) görüntüsüne ait 90° lik çarpma açısında aşınmaya uğrayan yüzeylerde ise gömü şeklinde aşınmalar yorumlanmaktadır.



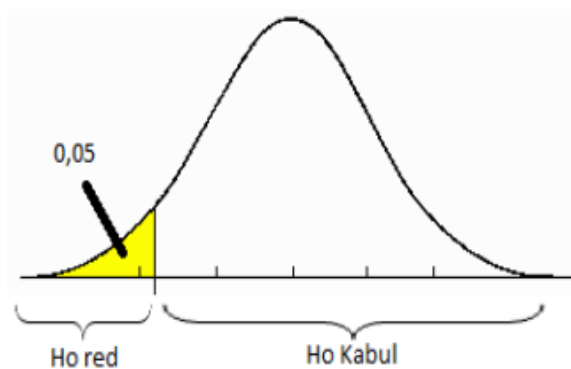
Şekil 5.11. Akdeniz suyu ile hazırlanan bulamaçtaki a) 30° ve b) 90° lik numunelerin x200 büyütme görüntüleri

Şekil 5.11. incelendiğinde ise, 200 büyütmedeki mikroyapısal morfolojide; a) çarpma açısı  $30^\circ$  iken sıyrıklar ve buna bağlı hassaslaşıp kopan parçacıkların bıraktığı yüzeyler yoğun olarak görülmektedir.

Numunelerin yüzey morfolojilerinin, çarpma açısı ve malzeme yapısı parametrelerine bağlı olarak değişimi gözlenmiştir. Şekilde beyaz oklar ile çarpma açısına bağlı olarak aşındırıcıların oluşturduğu izler gösterilmiştir. Şekil 5.8 ile 5.11 arasındaki a) yüzey görüntülerinde maksimum aşınmanın olduğu  $30^\circ$  çarpma açısında sıyrıklarla oluşan parça kopmaları şeklinde derin hasar kraterleri olduğu ve bütün yüzeye yayılarak geniş alanlı bir malzeme kaybına yol açtığı görülmektedir. Dikleşen çarpma açısı malzemede mikro sürmeden ziyade mikro dövme etkisi yaparak malzeme yüzeyinde plastik deformasyona yol açmakta ve bu mekanizmalar sonucu Şekil 5.8 - 5.11. b) yüzey görüntülerinde verilen yüzey morfolojileri ortaya çıkmaktadır.

### 5.5. İstatiksel Değerlendirme

Yapılan deneylerin istatistiki açıdan anlamlı bir fark oluşturup oluşturmadığı test edilmek istenmiş ve t-test uygulanmıştır. Deneysel veriler EK-1 ile EK-4 arasındaki tablolarda verilmiştir. T-testine ait sonuç tabloları okunurken öncelikle çizelgelerdeki “P” değerine bakılmalıdır. “P” değerinin 0,05’ten küçük olması (%95 güven aralığı kullanıldığı için)  $H_0$  hipotezinin reddedildiğini yani hata sayısının yerleşim tipine bağlı olarak değiştiği anlamına gelmektedir. “P” değerinin 0,05’ten büyük olması ise  $H_0$  hipotezini reddetmek için elimizde yeterli kanıt olmadığı yani  $H_0$  hipotezinin reddedilemediği anlamındadır. Şekil 5.12.’de grafik üzerinde  $H_0$  hipotezinin hangi durumlarda kabul hangi durumlarda reddedileceği gösterilmektedir.



Şekil 5.12. P değeri için  $H_0$  hipotezi



Her bir deney grubuna ait t-testi tabloları Çizelge 5.2. – 5.5. arasında verilmiştir.

**Çizelge 5.1.** Saf su deneylerine ait T-testi

		Numune ilk ağılık	Numune son ağılık
30°	Ortalama	11,89924333	11,2712
	Gözlem	3	3
	P	0,000201844	
	t	4,30265273	
60°	Ortalama	11,30249	10,68676667
	Gözlem	3	3
	P	0,000258655	
	t	4,30265273	
90°	Ortalama	11,36471333	10,7671
	Gözlem	3	3
	P	0,000127567	
	t	4,30265273	

Saf su ile yapılan üçer setlik deneylerde  $P < 0.05$  olduğu için  $H_0$  reddedilir ve deneylerin istatistiksel olarak anlamlılık ifade ettiği söylenebilir.

**Çizelge 5.1.** Karadeniz suyu deneylerine ait T-testi

		Numune ilk ağılık	Numune son ağılık
30°	Ortalama	11,36536667	10,6924
	Gözlem	3	3
	P	0,000149838	
	t	4,30265273	
60°	Ortalama	11,3548	10,70616667
	Gözlem	3	3
	P	0,000231601	
	t	4,30265273	
90°	Ortalama	11,53226667	10,9004
	Gözlem	3	3
	P	0,000172145	
	t	4,30265273	

Karadeniz tuzlu suyu ile yapılan üçer setlik deneylerde  $P < 0.05$  olduğu için  $H_0$  reddedilir ve deneylerin istatistiksel olarak anlamlılık ifade ettiği söylenebilir.

**Çizelge 5.1.** Ege Denizi suyu deneylerine ait T-testi

		Numune ilk ağılık	Numune son ağılık
30°	Ortalama	11,50266667	10,78053333
	Gözlem	3	3
	P	0,000131628	
	t	4,30265273	
60°	Ortalama	11,74306667	11,0543
	Gözlem	3	3
	P	0,00013647	
	t	4,30265273	
90°	Ortalama	11,51576667	10,8402
	Gözlem	3	3
	P	0,000146584	
	t	4,30265273	

Ege denizi tuzlu suyu ile yapılan üçer setlik deneylerde  $P < 0.05$  olduğu için  $H_0$  reddedilir ve deneylerin istatistiksel olarak anlamlılık ifade ettiği söylenebilir.

**Çizelge 5.5.** Akdeniz suyu deneylerine ait T-testi

		Numune ilk ağılık	Numune son ağılık
30°	Ortalama	11,46833333	10,69563333
	Gözlem	3	3
	P	0,000232964	
	t	4,30265273	
60°	Ortalama	11,22736667	10,4831
	Gözlem	3	3
	P	0,0407	
	t	4,30265273	
90°	Ortalama	11,2806	10,54973333
	Gözlem	3	3
	P	0,043	
	t	4,30265273	

Akdeniz tuzlu suyu ile yapılan üçer setlik deneylerde  $P < 0.05$  olduğu için  $H_0$  reddedilir ve deneylerin istatistiksel olarak anlamlılık ifade ettiği söylenebilir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

Slurry erozyon aşınması; hedef malzeme özellikleri, aşındırıcı partikül karakteristikleri, deney parametreleri gibi birçok faktör tarafından etkilenen karmaşık bir prosese sahiptir.

Ancak çarpma hızı ve aşındırıcı partikül parametreleri sabit kalmak koşuluyla yapılan deneysel çalışmada aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

Dekape sac numunelerde baskın olan aşınmanın 30° çarpma açısında gerçekleşmesinden dolayı, saf su ile hazırlanan bulamaçta %2,52 ve sırasıyla Karadeniz, Ege denizi, Akdeniz tuzlu suları ile hazırlanan bulamaçlarda %2,56-2,53-3,15 hata paylarına sahip olması sonuçların anlamlı olduğu şeklinde yorumlanmaktadır.

400 µm boyutundaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Çelik grid aşındırıcı partikül ile üç tekrarlı yapılan deneylerde;

- Slurry erozyon oranına, çarpma açısı ve bulamaçtaki tuzluluk oranının etki ettiği görülmüştür ve literatür ile tutarlılık sağlamıştır.
- Sünek yapıdaki dekape sac numunelerinde, 90° çarpma açısında minimum kütle kaybı ve erozyon oranları ortaya çıkarken sırasıyla 60° ve 30° çarpma açılarında bu oran artış göstermiştir. Bu veriler doğrultusunda literatürdeki sünek malzemelerde karşılaşılan duruma benzer veriler elde edilmiştir.
- Ağırlıkça %50 oranında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Çelik grid içeren slurry ortamında kullanılan deniz suyundaki tuzluluk oranı arttıkça aşınmanın da arttığı gözlemlenmiş ve yapılan diğer çalışmalar ile tutarlılık göstermiştir. Saf su ile yapılan deneylerde minimum erozyon oranları verileri elde edilirken tuzluluk oranı arttıkça sırasıyla Karadeniz, Ege denizi ve Akdeniz sularıyla yapılan deneylerde erozyon oranları da artış göstermiştir.
- Mikroskop görüntüleri incelemelerinden deney numunelerinin yüzey morfolojilerinde ortaya çıkan plastik deformasyon, mikro kesilmeler, mikro çatlaklar, oyuklar gözlemlenmiş olup erozyon etkisiyle yüzeylerde ortaya çıkan bu durumlar karakterize edilmiştir.

- Slurry erozyon işlemi sonucunda aşınmış yüzeylerdeki mikroskobik değişiklikler ve kütle kayıpları göz önüne alındığında; Türkiye deniz sularındaki slurry erozyona maruz kalan gemi pervanelerinde, köprü ayakları çevresinde, sulu ortamda çalışan makine ve parçalarında erozyona dayanıklı malzemelerin geliştirilmesinde yardımcı olabilir.
- Saf suyla hazırlanan bulamaçta, 30<sup>0</sup> çarpma açısında ortalama % 4.6, 60<sup>0</sup> çarpma açısında % 4.51 ve 90<sup>0</sup> çarpma açısında ortalama % 4.62 ağırlıkça fark olmuştur. Karadeniz tuzlu suyuyla hazırlanan bulamaçta, 30<sup>0</sup> çarpma açısında ortalama % 5.92, 60<sup>0</sup> çarpma açısında % 5.82 ve 90<sup>0</sup> çarpma açısında ortalama % 5.56 ağırlıkça fark olmuştur. Ege denizi tuzlu suyu ile hazırlanan bulamaçta, 30<sup>0</sup> çarpma açısında ortalama % 6.28, 60<sup>0</sup> çarpma açısında % 5.95 ve 90<sup>0</sup> çarpma açısında ortalama % 5.92 ağırlıkça fark olmuştur. Akdeniz tuzlu suyuyla hazırlanan bulamaçta, 30<sup>0</sup> çarpma açısında ortalama % 6.68, 60<sup>0</sup> çarpma açısında % 6.67 ve 90<sup>0</sup> çarpma açısında ortalama % 6.48 ağırlıkça fark olmuştur.
- Deneyler, en baskın olan 30<sup>0</sup> çarpma açısında saf su-kum bulamacında % 2.52, Karadeniz suyu-kum bulamacında % 2.56, Ege Denizi suyu-kum bulamacında % 2,53, Akdeniz suyu-kum bulamacında % 3,15 hata payları ile gerçekleştirilmiş olmasından dolayı anlamlılık kazanmıştır şeklinde yorumlanmaktadır.
- Yapılan T-testi analizine göre tüm deney koşullarında  $P < 0.05$  olduğu için deneyler istatistiksel olarak anlamlılık ifade etmektedir.

## 6.2. Öneriler

Şimdiye kadar ülkemiz deniz sularında slurry erozyona dair çalışılmaması söz konusu çalışmanın farklılığını anlamlı kılmıştır. Bu anlamda, devam edilecek olan diğer lisansüstü çalışmalar için bir çıkış noktası teşkil etmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde temel öneriler şu şekilde sıralanabilir;

- Bulamaç haznesi içerisindeki yönelmelere ait açısal konumlamalar aerodinamik tasarımlarla zenginleştirilebilir.
- Malzeme değişkenliği hususunda ise kompozit malzemeler ve kaplama uygulanan malzemeler üzerine çalışmalar derinleştirilebilir.



- Bununla birlikte, aşındırıcı partikül boyutu, konsantrasyon yüzdesi, çarpma hızı ve açısı sabit tutularak yapılan deneyler kesin yargılara ulaştırmak için yeterli değildir. Yapılan literatür taraması sonucunda; numune malzemesi, çarpma hızı, çarpma açısı, aşındırıcı partikül boyutu, tuzluluk oranı, çalışma sıcaklığı etkileri de erozyon oranı üzerine anlamlı sonuçlar vereceği bilgisine ulaşılmıştır.

Örneğin; kimyasal tesis gibi ortamlarda çözünürlüğü yüksek olan çözeltilerdeki bulamaçlarda, boru bükümü, dirsek ve boru bağlantı parçaları gibi akış yönünün değiştiği türbülanslı bölgelerde, çamur pompalarında veya deniz suyu boru hatlarında slurry erozyon oranını etkileyen ciddi parametreler bulunmaktadır.

Bunlar, gelecekteki ayrıntılı çalışmalara konu olabilecek, mevcut eksikliklerdir.

- Bundan sonra yapılacak olan lisansüstü çalışmalarda haznenin ağırlığının hafifletilmesi ve çarpma hızının değişkenliğinin sağlanması üzerine yayınlar düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Andrews, N., Giourntas, L., Galloway, A. M. ve Pearson, A., 2014, Effect of impact angle on the slurry erosion-corrosion of Stellite 6 and SS316, *Wear*, 320, 143-151.
- Anonim, 2012, Gemi Yapımı, *Ankara*, Megep, p.
- B.E.A., J., 2005, Design of Slurry Transport Systems, *London*, Elsevier Science Publishers Ltd., p.
- Bağcı, M., 2010, Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Mazlemelerin Erozyon Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi*, 167.
- Bitter, J. G. A., 1963, A study of erosion phenomena: Part II, *Wear*, 6 (3), 169-190.
- Clark, H. M. ve Wong, K. K., 1995, Impact Angle, Particle Energy and Mass-Loss in Erosion by Dilute Slurries, *Wear*, 186 (2), 454-464.
- Divakar, M., Agarwal, V. K. ve Singh, S. N., 2005, Effect of the material surface hardness on the erosion of AISI316, *Wear*, 259 (1-6), 110-117.
- Finnie, I., 1960, Erosion of surfaces by solid particles, *Wear*, 3 (2), 87-103.
- Finnie, I., 1995, Some Reflections on the Past and Future of Erosion, *Wear*, 186 (1), 1-10.
- Frosell, T., Fripp, M. ve Gutmark, E., 2015, Investigation of slurry concentration effects on solid particle erosion rate for an impinging jet, *Wear*, 342, 33-43.
- Gnanavelu, A., Kapur, N., Neville, A., Flores, J. F. ve Ghorbani, N., 2011, A numerical investigation of a geometry independent integrated method to predict erosion rates in slurry erosion, *Wear*, 271 (5-6), 712-719.
- Grewal, H. S., Singh, H. ve Yoon, E.-S., 2015, Interplay between erodent concentration and impingement angle for erosion in dilute water-sand flows, *Wear*, 332-333, 1111-1119.
- Jafar, R. H. M., Nouraei, H., Emamifar, M., Papini, M. ve Spelt, J. K., 2015, Erosion modeling in abrasive slurry jet micro-machining of brittle materials, *Journal of Manufacturing Processes*, 17, 127-140.
- Jha, A. K., Batham, R., Ahmed, M., Majumder, A. K., Modi, O. P., Chaturvedi, S. ve Gupta, A. K., 2011, Effect of impinging angle and rotating speed on erosion behavior of aluminum, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21 (1), 32-38.
- Joshi, A. G., Kumar, M. P. ve Basavarajappa, S., 2014, Influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Filler on Slurry Erosion Behavior of Glass/Epoxy Composites, *International Conference on Advances in Manufacturing and Materials Engineering (Icamme 2014)*, 5, 863-872.
- Kishor, B., Chaudhari, G. P. ve Nath, S. K., 2016, Slurry erosion of thermo-mechanically processed 13Cr4Ni stainless steel, *Tribology International*, 93, 50-57.
- Lindgren, M. ve Perolainen, J., 2014, Slurry pot investigation of the influence of erodant characteristics on the erosion resistance of titanium, *Wear*, 321, 64-69.

- Mahmood, A. K. ve Khadom, A. A., 2016, Erosion-Corrosion of Low-Carbon Steel in the Absence and Presence of Slurry in Saline Water: Kinetic and Mathematical Views, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16 (6), 1071-1081.
- Mens, J. W. M. ve Degee, A. W. J., 1986, Erosion in Seawater Sand Slurries, *Tribology International*, 19 (2), 59-64.
- Nanjo, Y., Okazaki, K., Sentoku, E. ve Iwai, Y., 2016, Evaluation of the distribution of the strength properties in AlCrSiN gradient coating by a micro slurry-jet erosion (MSE) method, *Surface & Coatings Technology*, 291, 172-178.
- Ojala, N., Valtonen, K., Antikainen, A., Kemppainen, A., Minkkinen, J., Oja, O. ve Kuokkala, V. T., 2016, Wear performance of quenched wear resistant steels in abrasive slurry erosion, *Wear*, 354-355, 21-31.
- Sarlin, E., Lindgren, M., Suihkonen, R., Siljander, S., Kakkonen, M. ve Vuorinen, J., 2015, High-temperature slurry erosion of vinylester matrix composites - The effect of test parameters, *Wear*, 328, 488-497.
- Singh, J., Kumar, S. ve Mohapatra, S. K., 2017, Tribological analysis of WC-10Co-4Cr and Ni-20Cr 2 O 3 coating on stainless steel 304, *Wear*, 376-377, 1105-1111.
- Sinha, S. L., Dewangan, S. K. ve Sharma, A., 2015, A review on particulate slurry erosive wear of industrial materials: In context with pipeline transportation of mineral-slurry, *Particulate Science and Technology*, 35 (1), 103-118.
- Stack, M. M. ve Abd El-Badia, T. M., 2008, Some comments on mapping the combined effects of slurry concentration, impact velocity and electrochemical potential on the erosion-corrosion of WC/Co-Cr coatings, *Wear*, 264 (9-10), 826-837.
- Suihkonen, R., Lindgren, M., Siljander, S., Sarlin, E. ve Vuorinen, J., 2016, Erosion wear of vinylester matrix composites in aqueous and acidic environments at elevated temperatures, *Wear*, 358-359, 7-16.
- Thakur, L., Arora, N., Jayaganthan, R. ve Sood, R., 2011, An investigation on erosion behavior of HVOF sprayed WC-CoCr coatings, *Applied Surface Science*, 258 (3), 1225-1234.
- Toro, A., Sinatora, A., Tanaka, D. K. ve Tschiptschin, A. P., 2001, Corrosion-erosion of nitrogen bearing martensitic stainless steels in seawater-quartz slurry, *Wear*, 251, 1257-1264.
- Yang, K., Rong, J., Liu, C. G., Zhao, H. Y., Tao, S. Y. ve Ding, C. X., 2016, Study on erosion-wear behavior and mechanism of plasma-sprayed alumina-based coatings by a novel slurry injection method, *Tribology International*, 93, 29-35.

**EKLER****EK-1 Saf su İle Hazırlanan Bulamacın Deney Sonuçları**

<b>Aşındırıcı Partikül</b>	<b>Partikül Boyutu</b>	<b>Konsantrasyon</b>	<b>Deney Hızı dev/dk</b>	<b>Deney Süresi (dk)</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Çelik Grid	400 µm	50%	1900	300
<b>Numune İlk Ağırlık (g)</b>	<b>Numune Son Ağırlık (g)</b>	<b>Ağırlık Farkı (g)</b>	<b>Çarpma Açısı (°)</b>	<b>Erozyon Oranı (mg/kg)</b>
11,7423	11,1031	0,6392	30	0,43
11,2847	10,6505	0,6342	60	0,42
11,2341	10,6245	0,6096	90	0,41
11,9742	11,3638	0,6104	30	0,41
11,5326	10,9323	0,6003	60	0,40
11,0918	10,5056	0,5862	90	0,39
11,9812	11,3467	0,6345	30	0,42
11,0902	10,4775	0,6127	60	0,41
11,7682	11,1712	0,5970	90	0,40

**EK-2 Karadeniz Tuzlu Suyu İle Hazırlanan Bulamacın Deney Sonuçları**

<b>Aşındırıcı Partikül</b>	<b>Partikül Boyutu</b>	<b>Konsantrasyon</b>	<b>Deney Hızı (dev/dk)</b>	<b>Deney Süresi (dk)</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Çelik Grid	400 µm	50%	1900	300
<b>Numune İlk Ağırlık (g)</b>	<b>Numune Son Ağırlık (g)</b>	<b>Ağırlık Farkı (g)</b>	<b>Çarpma Açısı (°)</b>	<b>Erozyon Oranı (mg/kg)</b>
10,9912	10,3024	0,6888	30	0,46
11,5107	10,8449	0,6658	60	0,44
11,0474	10,4028	0,6446	90	0,43
11,4317	10,7627	0,6690	30	0,45
11,0072	10,3587	0,6485	60	0,43
11,8622	11,2275	0,6347	90	0,42
11,6732	11,0121	0,6611	30	0,44
11,5465	10,9149	0,6316	60	0,42
11,6872	11,0709	0,6163	90	0,41

**EK-3 Ege Denizi Tuzlu Suyu İle Hazırlanan Bulamacın Deney Sonuçları**

<b>Aşındırıcı Partikül</b>	<b>Partikül Boyutu</b>	<b>Konsantrasyon</b>	<b>Deney Hızı (dev/dk)</b>	<b>Deney Süresi (dk)</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Çelik Grid	400 µm	50%	1900	300,00
<b>Numune İlk Ağırlık (g)</b>	<b>Numune Son Ağırlık (g)</b>	<b>Ağırlık Farkı (g)</b>	<b>Çarpma Açısı (°)</b>	<b>Erozyon Oranı (mg/kg)</b>
11,7849	11,0495	0,7354	30	0,49
11,8574	11,1562	0,7012	60	0,47
11,7164	11,0271	0,6893	90	0,46
11,4678	10,7437	0,7241	30	0,48
11,8580	11,1666	0,6914	60	0,46
11,4957	10,8193	0,6764	90	0,45
11,2553	10,5484	0,7069	30	0,47
11,5138	10,8401	0,6737	60	0,45
11,3352	10,6742	0,6610	90	0,44

#### EK-4 Akdeniz Tuzlu Suyu İle Hazırlanan Bulamacın Deney Sonuçları

<b>Aşındırıcı Partikül</b>	<b>Partikül Boyutu</b>	<b>Konsantrasyon</b>	<b>Deney Hızı (dev/dk)</b>	<b>Deney Süresi (dk)</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Çelik Grid	400 µm	50%	1900	300
<b>Numune İlk Ağırlık (g)</b>	<b>Numune Son Ağırlık (g)</b>	<b>Ağırlık Farkı (g)</b>	<b>Çarpma Açısı (°)</b>	<b>Erozyon Oranı (mg/kg)</b>
11,4662	10,6701	0,7961	30	0,53
11,4222	10,6700	0,7522	60	0,50
11,7475	11,0089	0,7386	90	0,49
11,5965	10,8381	0,7584	30	0,51
10,9572	10,2096	0,7476	60	0,50
10,8727	10,1381	0,7346	90	0,49
11,3423	10,5787	0,7636	30	0,51
11,3027	10,5697	0,7330	60	0,49
11,2216	10,5022	0,7194	90	0,48

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Elif Sena GÜR  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Konya- 1990  
**Telefon** : 0539 893 9180  
**Faks** : -  
**e-mail** : elifsenagur@gmail.com

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Cumhuriyet Lisesi, Selçuklu, Konya	2008
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi Selçuklu, Konya	2013
Yüksek Lisans	:	
Doktora	:	

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2013-2015	Seç Metal Mutfak ve Banyo Eşyaları	Üretim Sorumlusu
2015	Genmot Krankşaft San. Tic. A.Ş.	Satınalma Mühendisi
2016-2017	Bilimsel Destek Merkezi Müh.	Proje Sorumlusu

### UZMANLIK ALANI

#### YABANCI DİLLER

**İngilizce** Upper Intermediate  
**İspanyolca** Beginner

### YAYIN

Elif Sena Gur, Mehmet Bagci , SLURRY EROSION WEAR OF B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FILLED GF/EP COMPOSITES, 3rd International Conference on Polymer Tribology, 24–25 Eylül 2018, Slovenya.