

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİKLERİN EROZİF-ABRAZİF AŞINMASINDA AŞINDIRICI TANE
BÜYÜKLÜĞÜNÜN AŞINMA DİRENCİNE ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

Ergin KOSA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Doktora Programı

HAZİRAN 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİKLERİN EROZİF-ABRAZİF AŞINMASINDA AŞINDIRICI TANE
BÜYÜKLÜĞÜNÜN AŞINMA DİRENCİNE ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

**Ergin KOSA
(503102003)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Doktora Programı

Tez Danışmanı: Y. Doç. Dr. Ali GÖKŞENLİ

HAZİRAN 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503102003 numaralı Doktora Öğrencisi Ergin KOSA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ÇELİKLERİN EROZİF-ABRAZİF AŞINMASINDA AŞINDIRICI TANE BÜYÜKLÜĞÜNÜN AŞINMA DİRENCİNE ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Y. Doç. Dr. Ali GÖKŞENLİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mehmet A. AKGÜN**
Yeditepe Üniversitesi

Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cemal BAYKARA
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Alp Tekin ERGENÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2016**
Savunma Tarihi : **08 Haziran 2016**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bana, akademik alanda hiç bir zaman desteklerini esirgemeyen, engin bilgilerini benimle paylaşan ve akademik çalışmalarına yön veren Y. Doç. Dr. Ali GÖKŞENLİ Hocam'a saygılarımı, tez projeme maddi olarak destek veren İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimine, beni bugünlere getiren ve her zaman yanımda olan anneme ve babama teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2016

Ergin KOSA
(Yüksek Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Aşınma	2
1.2 Aşınma Modelleri İle Aşınma Yöntemlerinin Sınıflandırılması.....	3
1.2.1 Abrazif aşınma	4
1.2.2 Adhezif aşınma.....	5
1.2.3 Yüzey yorulması.....	5
1.2.4 Erozif aşınma	6
2. EROZİF ABRAZİF AŞINMA MEKANİZMALARIN İNCELENMESİ, LİTERATÜR TARAMASI VE ÇALIŞMANIN AMACI.....	9
2.1 Erozi-Abrazif Aşınma Mekanizmaları	9
2.1.1 Mikro oluk	9
2.1.2 Mikro yarık	9
2.1.3 Mikro çatlak	9
2.2 Erozi Aşınmayı Etkileyen Parametreler	11
2.3 Erozi-Abrazif Aşınma İle İlgili Literatürde Yapılan Çalışmalar	12
2.3.1 Literatür inceleme sonuçları.....	29
2.4 Tezin Amacı	29
3. EROZİF AŞINMA DENEY DÜZENİĞİ, DENEYSEL YÖNTEM VE MALZEME	30
3.1 Erozi Aşınma Deney Düzeniği.....	30
3.1.1 Deney düzeniğinde kullanılan ekipmanlar	31
3.2 Malzeme	35
3.2.1 Deney parçalarının hazırlanması.....	36
3.3 Deneyisel Yöntem	38
3.3.1 Deney sistematigi	39
3.3.2 Deney parçalarına ısı işlem uygulanması	39
4. EROZİF AŞINMA DENEY TANKI TASARIMI.....	41
4.1 Amaç	41
4.2 Erozi Aşınma Tankında Fuent Programı İle Akış Analizinin Yapılması Ve Tasarım Parametrelerinin İncelenmesi	42
4.2.1 Erozi aşınma tankında akışın modellenmesi ve deney tankının optimize edilmesi.....	43
4.2.2 Erozi aşınma deney tankı modeli ve tank parametreleri	43

4.2.3 Hız dağılımının analizi ve tasarım parametrelerinin optimize edilmesi ...	46
5. ÇARPMA HIZI, ÇARPMA AÇISI, MALZEME SERTLİĞİ VE AŞINDIRICI KUM TANECİK ÇAPININ EROZİF AŞINMAYA ETKİSİ VE MATEMATİKSEL MODELİN OLUŞTURULMASI.....	51
5.1 Çarpma Açısının Çelik Numunelerde Erozif Aşınmaya Etkisi	51
5.2 Çarpma Hızı Ve Aşındırıcı Tanecik Büyüklüğünün Çelik Numunelerde Erozif Aşınmaya Etkisi	54
5.3 Malzeme Sertliği Ve Kuvarz Kumu Tane Çapının Erozif Abrasif Aşınmaya Etkisi.....	60
5.4 Erozif-Abrasif Aşınmanın Matematiksel Modeli	74
5.4.1 Çarpma hızının ve malzeme sertliğinin aşınma direncine etkisinin matematiksel modelinin oluşturulması.....	74
5.4.2 Malzemenin sertliğinin ve aşındırıcı tane büyüklüğünün aşınma direncine etkisinin matematiksel modelinin oluşturulması.....	75
6. EROZİF-ABRASİF AŞINMA DENEY SONRASI YÜZEYLERİN ANALİZİ VE YORUMLANMASI	77
6.1 Farklı Çarpma Açılarında Aşınan Çelik Numunelerin SEM’de Morfolojik Yapılarının İncelenmesi.....	77
6.2 4.76 m/s Çarpma Hızında Ve Farklı Sertlikte Aşınan Çelik Numunelerin SEM’de Morfolojik Yapılarının İncelenmesi	79
6.3 Farklı Aşındırıcı Tanecik Boyutu Etkisinde Ve Farklı Sertlikteki Aşınan Çelik Numunelerin SEM’de Morfolojik Yapılarının İncelenmesi	81
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	95

KISALTMALAR

SEM : Tarayıcı Elektron Mikroskobu
PIV : Particle Image Velocimetry

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Normalleştirilmiş koriolis aşınma hızları.....	21
Çizelge 3.1: Kuvarz kum kimyasal bileşeni	34
Çizelge 3.2 : Su verilmiş ve ısıtılmış işlem görmüş malzemelerin sertlik değerleri.....	40
Çizelge 3.3 : Ck 45 ve st 37 numunelerin sertlik değerleri.....	40
Çizelge 5.1 : Farklı çarpma açılarında su verilmiş St 37 numunelerde kütle kayıpları	52
Çizelge 5.2 : Farklı çarpma açılarında St 37 ısıtılmış işlem uygulanmamış kütle kayıpları	52
Çizelge 5.3 : Ck 45 su verilmiş numunelerin farklı aşındırıcı çaplarında ve çarpma hızlarında kütle kayıpları	54
Çizelge 5.4 : St 37 su verilmiş numunelerin farklı aşındırıcı çaplarında ve çarpma hızlarında kütle kayıpları	55
Çizelge 5.5 : Ck 45 su verilmiş ve 600 ° C’de tavllanmış numunelerin farklı aşındırıcı çaplarında ve çarpma hızlarında kütle kayıpları	55
Çizelge 5.6 : St 37 su verilmemiş numunelerin farklı aşındırıcı çaplarında ve çarpma hızlarında kütle kayıpları	56
Çizelge 5.7 : Deney matrisinde kullanılacak farklı sertlikteki numuneler.	60
Çizelge 5.8 : 100-200 µm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında ısıtılmış işlem görmüş ve ısıtılmış işlem görmemiş farklı sertlikteki çelik numunelerdeki aşınma direnci.....	61
Çizelge 5.9 : 200-290 µm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında ısıtılmış işlem görmüş ve ısıtılmış işlem görmemiş farklı sertlikteki çelik numunelerdeki aşınma direnci.....	62
Çizelge 5.10 : 290-385 µm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında ısıtılmış işlem görmüş ve ısıtılmış işlem görmemiş farklı sertlikteki çelik numunelerdeki aşınma direnci.....	63
Çizelge 5.11 : 385-505 µm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında ısıtılmış işlem görmüş ve ısıtılmış işlem görmemiş farklı sertlikteki çelik numunelerdeki aşınma direnci.....	64
Çizelge 5.12 : 505-666 µm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında ısıtılmış işlem görmüş ve ısıtılmış işlem görmemiş farklı sertlikteki çelik numunelerdeki aşınma direnci.....	65
Çizelge 5.13 : 666-900 µm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında ısıtılmış işlem görmüş ve ısıtılmış işlem görmemiş farklı sertlikteki çelik numunelerdeki aşınma direnci.....	66
Çizelge 5.14 : Sertliğe göre kritik tanecik çapının değişimi.....	72

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Mekanik aşınma proseslerinin sınıflandırılması	2
Şekil 1.2 : Tribo sistemin elemanlarının şematik gösterimi	3
Şekil 1.3 : Aşınma prosesinin aşınma modüllerine göre sınıflandırılması	4
Şekil 1.4 : Abrasif aşınmanın görüldüğü tribolojik sistemler	4
Şekil 1.5 : Adhesif aşınmanın görüldüğü tribolojik sistemler	5
Şekil 1.6 : Yorulma yüzeyinde çatlak ilerlemesi ve oluşumu	6
Şekil 1.7 : Olası erozyon mekanizmaları	7
Şekil 2.1 : Aşınma mekanizmaları	10
Şekil 2.2 : Aşınmayı etkileyen parametreler	11
Şekil 2.3 : Eroziyon test kabı: 1-tank, 2-mil, 3-karışım 4-disk	13
Şekil 2.4 : Kütle kaybının çarpma hızına göre değişimi	13
Şekil 2.5 : DUCOM TR 40 Erosif test düzeneği: a) numune tutucu, b) tank	14
Şekil 2.6 : Test düzeneğinin kesit görünüşü	15
Şekil 2.7 : 30 °lik çarpma açısında ve farklı su-kum konsantrasyonlarına parçacık çaplarına göre aşınan malzemedeki kütle kaybı	16
Şekil 2.8 : Kum-su karışımının değiştirilme süresinin erozyona etkisi	16
Şekil 2.9 : Farklı açılarda aşınan numunelerin SEM görüntüleri, a) duruş açısı 15°, b) duruş açısı 60°, c) duruş açısı 90°	17
Şekil 2.10 : Farklı çarpma hızlarında ve aşındırıcı parçacık oranlarında çarpma açısına göre eroziyon aşınma	17
Şekil 2.11 : Farklı çarpma açılarında parçacık boyutuna göre eroziyon aşınma	18
Şekil 2.12 : 6.6 litreye sahip test kabı	19
Şekil 2.13 : Çarpma hızının eroziyon aşınmaya etkisi	19
Şekil 2.14 : Test düzeneği	20
Şekil 2.15 : Koriolis aşınma test düzeneği	21
Şekil 2.16 : 6061T-6511 alüminyum numunesinin farklı çarpma açılarında kütle kayıbı	22
Şekil 2.17 : Kuru hava çarptırıcısı deney düzeneği	23
Şekil 2.18 : Çarpma açısına göre erozyon hızları	23
Şekil 2.19 : Çarpma açısına göre sünek ve gevrek malzemelerdeki erozyon	24
Şekil 2.20 : Hava jeti çarpma erozyon test düzeneği	25
Şekil 2.21 : %25 soğuk şekillendirilmiş numunelerin 102 µm ortalama aşındırıcı parçacık boyutunda ve 32m/s çarpma hızında farklı sıcaklıklarda erozyon hızları	25
Şekil 2.22 : Pyrex cam malzemenin çarpma açısı ve tanecik boyutuna göre eroziyon aşınma miktarı	26
Şekil 2.23 : Malzemelerin kum sertliğine göre aşınma miktarları	27
Şekil 2.24 : Çarpma açısına göre Ti-6Al-4V alaşımının aşınma hızı	27
Şekil 2.25 : Aşınma modeli	28

Şekil 3.1 : Matkap	31
Şekil 3.2 : L profili	32
Şekil 3.3 : Karıştırıcı pervane	32
Şekil 3.4 : Numunenin monte edildiği kauçuk kalıp.....	33
Şekil 3.5 : Takometre	33
Şekil 3.6 : Deney tesisatı	35
Şekil 3.7 : Micro vickers sertlik cihazı.....	35
Şekil 3.8 : Hassas terazi.....	36
Şekil 3.9 : Deney parçalarının hazırlanması	37
Şekil 3.10 : Aşınma öncesi malzeme yüzeyi.....	38
Şekil 3.11 : Deney sistematığının aşamaları.....	39
Şekil 4.1 : Tank modeli	41
Şekil 4.2 : Aşınma tankında akış analizi	42
Şekil 4.3 : Eroziyon aşınma deney düzeneği tasarımı.....	43
Şekil 4.4 : Tasarım parametreleri.....	44
Şekil 4.5 : Numunenin konumu	44
Şekil 4.6 : Aşınma tankının boyutları	45
Şekil 4.7 : 84 mm numune yatay yükseklikteyken 15 mm kanat yükselgi ve 34 mm engel genişliğine sahip eroziyon abrazyon aşınma tankındaki numunelerdeki x doğrultusundaki hız gradyeni	46
Şekil 4.8 : 84 mm numune yatay yükseklikteyken 15 mm kanat yükselgi ve 19 mm engel genişliğine sahip eroziyon abrazyon aşınma tankındaki numunelerdeki x doğrultusundaki hız gradyeni	47
Şekil 4.9 : 54 mm numune yatay yükseklikteyken 15 mm kanat yükselgi ve 34 mm engel genişliğine sahip eroziyon abrazyon aşınma tankındaki numunelerdeki x doğrultusundaki hız gradyeni	47
Şekil 4.10 : 54 mm numune yatay yükseklikteyken 24 mm kanat yükselgi ve 34 mm engel genişliğine sahip eroziyon abrazyon aşınma tankındaki numunelerdeki x doğrultusundaki hız gradyeni	48
Şekil 4.11 : 94 mm numune yatay yükseklikteyken 15 mm kanat yükselgi ve 19 mm engel genişliğine sahip eroziyon abrazyon aşınma tankındaki numunelerdeki x doğrultusundaki hız gradyeni.....	48
Şekil 4.12 : Belirlenen ana parametrelerin değerleri.....	49
Şekil 4.13 : Aşınma tankının görünüşü	50
Şekil 4.14 : Aşınma tankının engelleri ve kapak	50
Şekil 5.1 : Çarpma Açısı.....	531
Şekil 5.2 : St 37 su verilmiş çelik numunede çarpma açısına göre kütle kaybı	53
Şekil 5.3 : St 37 su verilmemiş çelik numunede çarpma açısına göre kütle kaybı....	53
Şekil 5.4 : Su verilmiş Ck 45 numunede 300 d/d, 500 d/d ve 700 d/d dönme hızlarındaki kütle kaybı	56
Şekil 5.5 : Su verilmiş St 37 numunede 300 d/d, 500 d/d ve 700 d/d dönme hızlarındaki kütle kaybı.....	57
Şekil 5.6 : Isıl işlem görmemiş St 37 numunede 300 d/d, 500 d/d ve 700 d/d dönme hızlarındaki kütle kaybı	57
Şekil 5.7 : Isıl işlem görmemiş St 37, su verilmiş St 37 ve Ck 45 numunede 300-505 µm aşındırıcı kum tanecik çaplarında 300 d/d, 500 d/d ve 700 d/d dönme hızlarındaki kütle kaybı	58
Şekil 5.8 : Isıl işlem görmemiş St 37, su verilmiş St 37 ve Ck 45 numunede 100-300 µm aşındırıcı kum tanecik çaplarında 300 d/d, 500 d/d ve 700 d/d dönme hızlarındaki kütle kaybı.....	58

Şekil 5.9 : Isıl işlem görmemiş St 37, su verilmiş St 37 ve Ck 45, su verilmiş 500°C’de 1 saat	59
Şekil 5.10 : Isıl işlem görmemiş St 37, su verilmiş St 37 ve Ck 45, su verilmiş 500°C’de 1 saat tavllanmış Ck 45 numunede 300-500 µm aşındırıcı kum tanecik çaplarında farklı çarpma hızlarında erozif aşınma miktarı	59
Şekil 5.11 : 100-200 µm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında farklı sertlikteki çelik numunelerdeki kütle kaybı	62
Şekil 5.12 : 200-290 µm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında farklı sertlikteki çelik numunelerdeki kütle kaybı	63
Şekil 5.13 : 290-385 µm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında farklı sertlikteki çelik numunelerdeki kütle kaybı	64
Şekil 5.14 : 385-505 µm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında farklı sertlikteki çelik numunelerdeki kütle kaybı	65
Şekil 5.15 : 505-666 µm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında farklı sertlikteki çelik numunelerdeki kütle kaybı	66
Şekil 5.16 : 666-900 µm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında farklı sertlikteki çelik numunelerdeki kütle kaybı	67
Şekil 5.17 : Isıl İşlem görmüş ve Isıl işlem görmemiş farklı sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı	68
Şekil 5.18 : 185 HVN sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı	69
Şekil 5.19 : 298 HVN sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı	69
Şekil 5.20 : 400 HVN sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı	70
Şekil 5.21 : 510 HVN sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı	70
Şekil 5.22 : 590 HVN sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı	71
Şekil 5.23 : 707 HVN sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı	71
Şekil 5.24 : 880 HVN sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı	72
Şekil 5.25 : Isıl işlem görmüş ve ısıt işlem görmemiş çelik numunelerde farklı aşındırıcı çaplarında sertliğin değişiminin aşınma direncine etkisi	73
Şekil 5.26 : Çarpma hızı ve sertliğin aşınma direncine etkisi	74
Şekil 5.27 : Aşındırıcı tanecik çapı ve sertliğin aşınma direncine etkisi	75
Şekil 6.1 : Isıl işlem uygulanmamış, 30° çarpma açısında St 37 numunesinin SEM görüntüsü (a) x400, (b) x3000 büyütme	77
Şekil 6.2 : Isıl işlem uygulanmamış, 75° çarpma açısında St 37 numunesinin SEM görüntüsü a) x400, b) x6000 büyütme	78
Şekil 6.3 : Isıl işlem uygulanmamış St 37 numunesinin	78
Şekil 6.4 : Su verilmiş St 37 numunesinin 45 °çarpma acısında SEM görüntüsü a) x200, b) x6000 büyütme	79
Şekil 6.5 : Su verilmiş St 37 numunesinin 75 °çarpma açısında SEM görüntüsü a) x200, b) x6000 büyütme	79
Şekil 6.6 : Isıl işlem görmemiş St 37 (245 HVN) numunesinin SEM görüntüsü	80
Şekil 6.7 : Su verilmiş St 37 (510 HVN) numunesinin SEM görüntüsü	80
Şekil 6.8 : Su verilmiş Ck 45(880 HVN) numunesinin SEM görüntüsü	81
Şekil 6.9 : 100 – 200 mikron aşındırıcı tanecik çapı etkisinde 880 HVN çelik	

numunenin SEM görüntüsü	82
Şekil 6.10 : 505 – 666 mikron aşındırıcı tanecik çapı etkisinde 185 HVN çelik numunenin SEM görüntüsü	83
Şekil 6.11 : 100 – 200 mikron aşındırıcı tanecik çapı etkisinde 185 HVN çelik numunenin SEM görüntüsü	84
Şekil 6.12 : 200 – 290 mikron aşındırıcı tanecik çapı etkisinde 880 HVN çelik numunenin SEM görüntüsü	85

ÇELİKLERİN EROZİF-ABRAZİF AŞINMASINDA AŞINDIRICI TANE BÜYÜKLÜĞÜNÜN AŞINMA DİRENCİNE ETKİSİ

ÖZET

Günümüzde makine sistemlerinin ve parçalarının hasara uğramasında erozif-abrazif aşınma mekanizması önem kazanmaktadır. Erozif-abrazif aşınma, aşındırıcı parçacık yardımıyla sıvı ortamda parçanın yüzeyinden malzeme kaybına sebep olarak makine elemanlarının çalışma ömürlerinin azalmasına ve makine sistemleri içerisinde fonksiyonunu yerine getirememesine neden olmaktadır. Erozif aşınma mekanizmasında birçok faktör aşınmayı etkilemektedir. Bu faktörler; çevresel etkenlerden ve malzeme parametreleri olmak üzere iki başlık altında toplanmaktadır. Çalışmada değişik parametrelerin Erozif – Abrazif aşınma karakteristiği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu parametreler metodik olarak değiştirilerek, her bir parametrenin etki dereceleri incelenmiştir. Sistematik olarak incelenen parametreler şu şekilde tanımlanmaktadır: Çeliğin sertlik değeri, kuvars kumunun boyutları, çarpma açısı ve aşındırıcı çarpma hızı.

Çalışmanın ilk aşamasında deney düzeneği tasarlanmıştır. Deney düzeneğinde numuneler, hazne içerisine yerleştirilmiş karıştırıcı pervane yardımıyla döndürülmektedir. Karıştırıcı pervane elektronik kontrollü ile döndürülmüştür, takometre yardımıyla da dönme hızı kontrol edilmiştir. Her bir deneyde iki adet deney numunesi teste tabi tutulmaktadır. Tank tasarım parametreleri değiştirilerek sıvı-parçacık akış analizi modellenmiştir. ANSYS/FLUENT programı kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçları doğrultusunda en uygun tank deney hazne parametreleri tespit edilmiştir. Tasarım parametrelerin tespit edilmesinden sonra deney düzeneği imal edilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında erozif-abrazif deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler yukarıda belirtilen parametrelerin sistematik olarak değiştirilmesiyle oluşturulmuştur. Deney süresi dört saat olarak tespit edilmiştir ve her bir saatte kuvarz kum-su karışımı değiştirilmiştir. Erozif – abrazif aşınma miktarını tespit etmek amacıyla deney öncesi ve deney sonrasında numunenin kütlesi hassas terazi ile ölçülerek kütle kaybı hesaplanmıştır. Aşındırıcı kuvarz kum çapını etkisini incelemek için kumlar, 6 farklı kum çap sınıfına göre sınıflandırılmıştır; 100-200 μm , 200-290 μm , 290-385 μm , 385-505 μm , 505-666 μm ve 666-900 μm . Parçacık çarpma açısının etkisini tespit etmek amacıyla, parçacıklar malzeme yüzeyine 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° çarpma açılarıyla çarptırılmıştır. Aşındırıcı çarpma hızının etkisini tespit etmek amacıyla pervane dönme hızı 300-700 dev/dak dönme hızları değerleri arasında döndürülmüştür. Çelik numunelerin sertlik değerlerini değiştirmek amacıyla Ck 45 ve St 37 çelikleri kullanılmış ve farklı ısı işlemlere (su verme ve farklı sıcaklıklarda tavlama) tabi tutulmuşlardır.

Deneylerin gerçekleştirilmesinde sonra şu sonuçlara varılmıştır: Parçacık çarpma hızı arttıkça, numune yüzeyinden kütle kaybı artmaktadır. Sünek malzeme için maksimum aşınma miktarı 30° çarpma açısında elde edilmiştir. Malzemenin sertliği 510 HVN olduğunda ise maksimum aşınma miktarı 45° bulunmuştur. Sertlik arttıkça

aşınma miktarının pik yaptığı açı olan 90°'ye doğru kaydığı görülmüştür. Sertlik arttıkça çelik numunelerin aşınmaya karşı dirençleri artmıştır. Altı farklı aşındırıcı kum tanecik çapında da elde edilen deney sonuçlarına göre sertliğin artmasıyla aşınma direnci doğrusal bir artış göstermektedir. Ancak belirli bir kum çapından sonra (Kritik kum çapı) çelik numunelerde aşınma miktarı artış göstermektedir.

Literatür araştırması sonucu mevcut çalışmalar içerisinde çoğunlukla çalışma ortamındaki parametreler olan aşındırıcı parçacık boyutu, şekli, çarpma hızı ve açısı, kum konsantrasyonu gibi parametrelerin erozif-abrazif aşınmaya etkileri incelenmiş ve modellenmiştir. Ancak aşınmaya etkili olan malzeme özellikleri (sertlik, tokluk) çok sınırlı bir şekilde ele alınmıştır. Çalışmanın özgünlüğünü açısından, erozif aşınmaya etki eden parametrelerin sistematik olarak değiştirilmesi sonucu elde edilen veriler yardımıyla erozif – abrazif aşınmasının **matematik modeli** oluşturulmuştur. Aşınma deneyleri sonrasında numunelerin yüzeyinde meydana gelen erozif-abrazif aşınma mekanizması SEM (Tarayıcı Elektron Mikroskobu) görüntüleri yardımıyla aşınan numunelerin morfolojik yapıları incelenmiş ve etkin olan aşınma mekanizmaları tespit edilmiştir. SEM yardımıyla mikro çatlak, mikro yarık ve mikro oluk mekanizmaların çelik numunelerin morfolojik yapılarında gözlenmiştir. Çelik numune yüzeylerindeki meydana gelen çukurcuk boyutları 3 µm'den 150 µm'e kadar malzeme sertliğine bağlı olarak değişiklik göstermiştir.

Önerilen tez bu uygulamanın değişik yönlerinin uygulanacağı ve daha önceki bilimsel çalışmaları tamamlayıcı nitelikte olmuştur. Tasarım ve malzeme seçimindeki farklılar özgün katkı sağlamıştır.

EFFECT OF ABRASIVE PARTICLE SIZE ON WEAR RESISTANCE FOR EROSIVE-ABRASIVE WEAR OF STEELS

SUMMARY

Erosion wear is the removal of the material from the target after many impacting cycles of particles to the surface in a solid-liquid environment. Erosive-abrasive wear plays an important role on mechanical systems and parts causing damage on the structure.

Many methods are applied to minimize the wear of materials such as applying new manufacturing techniques, selecting appropriate material, coatings, surface processes. Erosive-abrasive wear reduces the lifetime of the machine components and causes the machine parts inoperable in machine systems by abrasive wear particles. Erosive, abrasive and corrosive mechanisms can be acting at same time, this can cause rapid damage to the materials. To examine the erosive wear effect, many techniques are used such as air jet impact set up, coriolis approach impact machine and slurry tank tester.

Many factors affect the wear on erosive-abrasive wear mechanism. These factors are arisen from two common parameters such as medium conditions and material properties. The medium parameters are concentration of particles in slurry, impact velocity, impact angle, abrasive particle size and geometry, the material properties are hardness and toughness of materials.

In this study, the effect of different parameters on erosive-abrasive wear characteristic is studied and the effect of each parameters are analysed by changing the parameters methodically. The parameters changed systematically are the hardness of the steel material used as a test sample, the size of the quartz sand the impact velocity of the abrasive particle, the impact angle of the abrasive particle.

Firstly, the slurry tank set up is designed. The samples are placed in slurry tank and are rotated by a propeller mixer. The set-up consists of three baffles, a propeller two specimens and a holder. The propeller is to prevent precipitation of the abrasive particles during the rotation of the propeller at the bottom of the tank and to suspend the particles homogeneously in the particle-liquid slurry. Baffles are added to prevent the rotational movement of the hard particles. The propeller is rotated by an electronic controller. The rotation speed is also controlled by a tachometer. Two samples are used in slurry tank test.

The tank parameters are changed and the liquid-particle flow analyse is modeled. The optimum tank parameters such as width of the baffles, height of the propeller and the position of the samples in the slurry tank is found by ANYSY/FLUENT program. After determining the design parameters, the slurry tank set up is manufactured.

Secondly, erosive-abrasive tests are done. The experiments are done by changing parameters above systematically. The sand particles round during the experiments due to interacting to each other. So, test duration is four hours and quartz sand-water

slurry mixture is replaced in each hour to eliminate rounding effect. Mass loss of the wear specimens before and after 4 hour tests is measured by an electronic balance having least count of 0.1 mg. The materials used in tests are Ck 45, St 37 and C 15. To investigate the effect of abrasive particle size, the quartz sand is sieved and classified in 6 categories. These classes of abrasive particle diameter are as 100-200 μm , 200-290 μm , 290-385 μm , 385-505 μm , 505-666 μm and 666-900 μm . The % 20 weight percentage of the slurry mixture is quartz sand concentration in all experiment. To determine the impact velocity, the rotation speed is changed between 300-700 rpm. To get different hardness values, Ck 45 and St 37 steels are used and heat treatments (such as quenching and annealing at different temperatures) are applied to the steels.

After the tests, results are obtained as; by increasing the particle impact velocity, the mass loss of the sample increases. The maximum wear amount is get at 30° impact angle for ductile non-heat treated St 37 steel material and it is found that the maximum amount of wear is at 45° for heat-treated St 37 steel material having 510 HVN. As the hardness of the steel material increases, the impact angle at which the maximum wear is observed to tend to slide to 90°.

As the hardness of the steel increases, the wear resistance increases. The wear resistance increases linearly at 6 different quartz sand diameters where as in an abrasive wear, the wear resistance behavior according to the hardness was modeled in two section having two different linearity. .

There are many cycles of abrasive particles impacting the surface of the steel samples. The crack nucleation period takes up much time and crack propagation form quickly in brittle material, in contrast, crack propagation period takes up much time in ductile materials. The abrasive particles having smaller diameters are sufficient to start to only crater nucleation in brittle material and mass of removal material is lower. For bigger abrasive quartz particles, mass loss is much more than the smaller particle size and the slope of the linearity in erosive-abrasive resistance decreases according to the smaller abrasive quartz particles.

The mass loss according to the abrasive particle quartz diameter shows two different tendencies. The loss of mass tendency changes after a critical particle size. The critical particle changes between 310-390 μm for steel samples.

It is claimed that a threshold impacting energy of the abrasive particle exists resulting in change of wear mechanism. By low particle size during wear, particles stuck and could not escape from the surface. This phenomenon resulted in three-body abrasion mechanism. By further increase of particle size, particles could abscond from the surface resulting in an erosive wear mechanism. This change in wear mechanism resulted in increase in wear rate.

The investigations and models of erosive-abrasive wear in the literature are generally focused on the medium parameters such as particle size, geometry, impact velocity and impact angle and sand concentration effect on wear mechanism, but the hardness of material property was not studied before. The originality of this study besides investigating the medium conditions effect on erosive-abrasive wear is to determine the loss of mass for steel samples having different hardness values in erosive-abrasive wear and to formulate a mathematical model including the hardness of metallic material.

After wear tests, the erosive-abrasive wear mechanism on sample surfaces are investigated by SEM (Scanning Electron Microscope). The worn surface morphologies are analysed and wear mechanisms are determined by SEM.

The micro cracking, micro ploughing and micro grooves are observed on morphologic structures of the worn steel surfaces. Micro ploughing and micro grooves are characteristic morphological worn pits in ductile material surfaces whereas micro cracking is a characteristic from in brittle material surfaces. The pits' sizes changed from 3-150 μm according to the hardness values of the steel samples.

The diameters of micro crater forms on the surface of the steel samples increase when the impacting abrasive quartz particles' size increases.

This research contributes the previous academic studies. And also it is unique due to differences in design and material selection. This study provides a new projection to determine the effect of the abrasive particle diameter, impact particle velocity and material hardness on fans, pump, pipeline systems, turbines, nozzles. By the mathematical formulae, It is found that how the hardness of material, impact velocity, abrasive particle diameter affect the erosive-abrasive resistance of the steels.

1. GİRİŞ

Sıvı içinde bulunan sert aşındırıcı parçacıkları yüksek hızlarda malzeme yüzeyine çarpması sonucu malzeme yüzeyindeki aşınmaya Eroziyon – Abrasif aşınmaya denmektedir [1]. Meydana gelen aşınma sonucu malzeme kaybı oluşmaktadır. Bu da sistem içinde çalışan bir makinenin veya makine parçasının işlevini yapamaz duruma gelmesine, hasara neden olmaktadır. [2,3]. Eroziyon – Abrasif aşınma mekanizması günümüzde makina sistemleri ve elemanlarında sıkça karşımıza çıkmaktadır. Eroziyon – Abrasif aşınmanın sıkça akışın daraldığı veya yön değiştirdiği konumlar, pompa gövdeleri, vana oturma yüzeyleri, boru ağzları, pervaneler, nozullar, fanlar, yoğunlaştırucular, fırın tüplerinin girişleri, boru eklenti parçalarında görülmektedir.

Meydana gelen Eroziyon – Abrasif aşınmanın etkilerini azaltmak amacıyla değişik önlemler alınmaktadır. Eroziyon aşınmayı önlemek için birçok yöntem uygulanmaktadır, bunlar uygun malzeme seçimi, yeni üretim teknikleri, yüzey işlemleri ve kaplamalardır [4-8]. Eroziyon, abrasif veya koroziyon ortam şartları aynı anda malzemeye etkilediğinde ise çok daha hızlı bir malzeme kaybına ve kısa sürede hasarın oluşmasına neden olmaktadır. Bu çok faktörün etkilediği durum, sinerji etkisi olarak tanımlanmaktadır [9-12]. Aşınmanın gerçekleştiği ortam su içerisinde olacağı gibi tuzlu su ve asidik ortamda da olabilir [13,14].

Eroziyon-abrasif aşınmayı etkileyen parametreler genel olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Ortam parametreleri ve malzeme parametreleri. Ortam parametreleri, aşındırıcı tane büyüklüğü, kum-su konsantrasyonu, aşındırıcı tane geometrisi, aşındırıcı tanecik çarpma hızı, parçacık çarpma açısıdır. Malzeme parametreleri ise sertlik ve kırılma tokluğudur [15-19].

Gevrek malzemelerden sünek malzemelerin aksine aşınma mekanizmasında etkili olan deformasyon aşınmasıdır. Bu ise kum taneciklerinin malzeme yüzeyine dik çarpması ile etkilidir. Sünek malzemelerde ise teğetsel kum taneciğinin çarpma hızı 15-20°'lerde etkili olmaktadır ve kesmenin etkisiyle olan aşınma, eroziyon aşınma mekanizmasında ön plana çıkmaktadır [20,21].

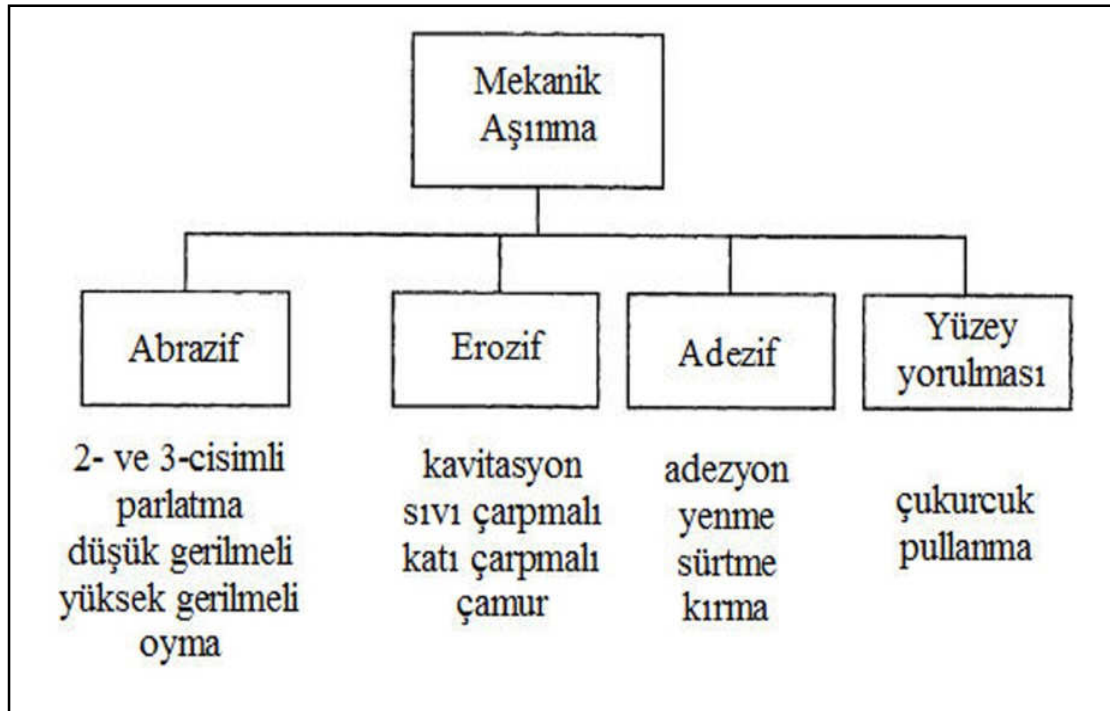
Kum tanecik çapı, büyük aşındırıcı kum tanecik çaplarında daha etkili bir şekilde erozif aşınmaya etki etmektedir.

Literatür araştırması sonucu malzeme parametresi olan sertliğin etkileri fazla incelenmemiştir. Araştırmalar, daha çok gevrek karaktere sahip seramik malzeme olan sert pyrex camda veya sünek karaktere sahip yumuşak metalik malzemede (alüminyum, düşük karbonlu çelikler) erozif-abrazif aşınmanın etkileri üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak orta ve yüksek sertliğe sahip metalik bir malzemenin erozif aşınma davranışı henüz incelenmemiştir. [22].

1.1 Aşınma

Aşınma, Malzemelerin mekanik teması nedeniyle oluşan yüzey hasarıdır. Aşınan numunede malzeme kaybı ve/veya yüzeyde hasara sebep olur. Aşınma prensipte 2 kategoriye ayrılır; mekanik ve oksidasyon ve/veya korozyon gibi kimyasal aşınma.

Mekanik aşınma şekil 1.1'deki gibi sınıflandırılmaktadır.

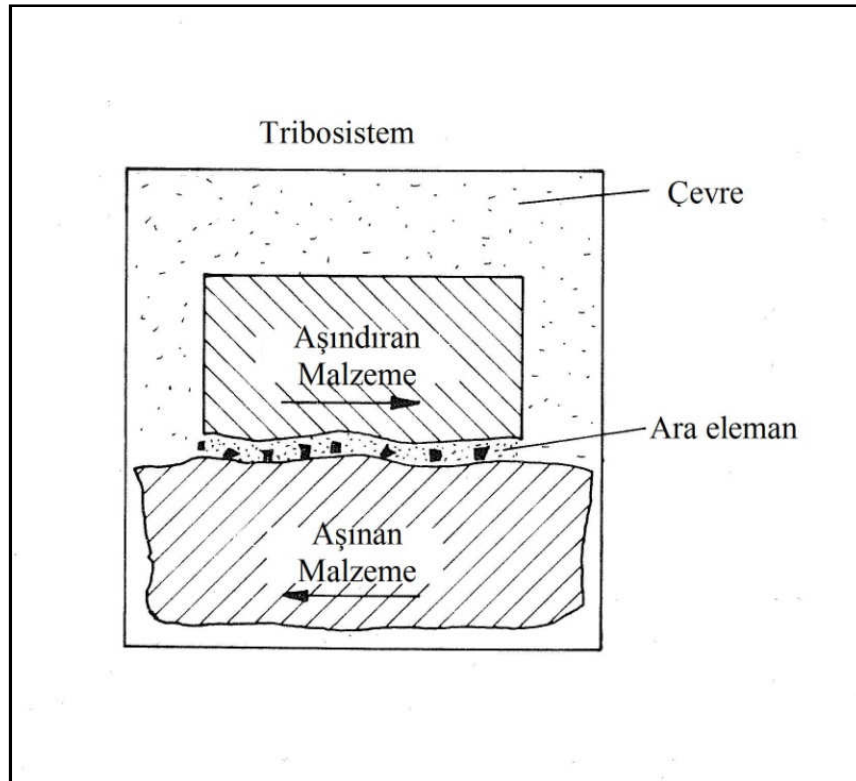


Şekil 1.1 : Mekanik aşınma proseslerinin sınıflandırılması [23].

Aşınma, metalik veya metalik olmayan malzemelerde görülebilmektedir. [24]. Tarımda kullanılan pulluklarda, su-kum gibi çamur karışımlarını kullanan pompalarda, öğütücülerde, bilyalı rulmanlarda, segmanlarda, düz rulmanlarda, dişlilerde, mühürlerde, frenlerde ve günlük yaşamda ayakkabılarda, bıçaklarda,

mobilyalarda, insan eklemlerinde, dizde ve dirsekler gibi çok çeşitli yerlerde görülür. Bu nedenler aşınmaya sebep olan şartlar çok çeşitlidir. Aşınma sisteminde bulunan ve aşınma olayına neden olan genel unsurlar şekil 1.2’de de gösterildiği gibi;

- 1) Aşındıran malzeme, karşı malzeme
- 2) Aşınan malzeme, ana malzeme
- 3) Ara malzeme
- 4) Çevresel durum: yük, harekettir.

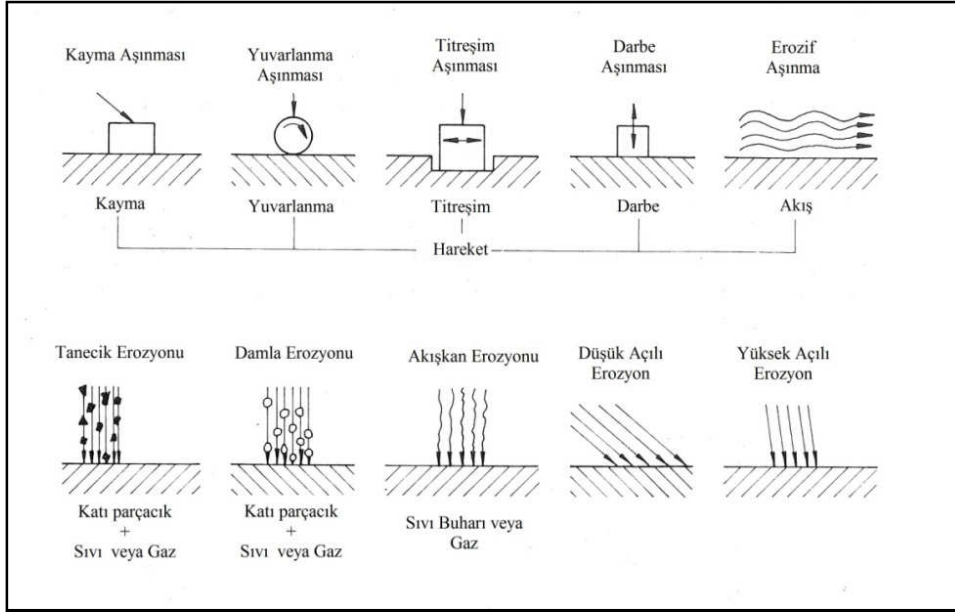


Şekil 1.2 : Tribo sistemin elemanlarının şematik gösterimi [25].

Aşındıran malzeme katı, sıvı, gaz veya bunların karışımı olabilir [25].

1.2 Aşınma Modelleri İle Aşınma Yöntemlerinin Sınıflandırılması:

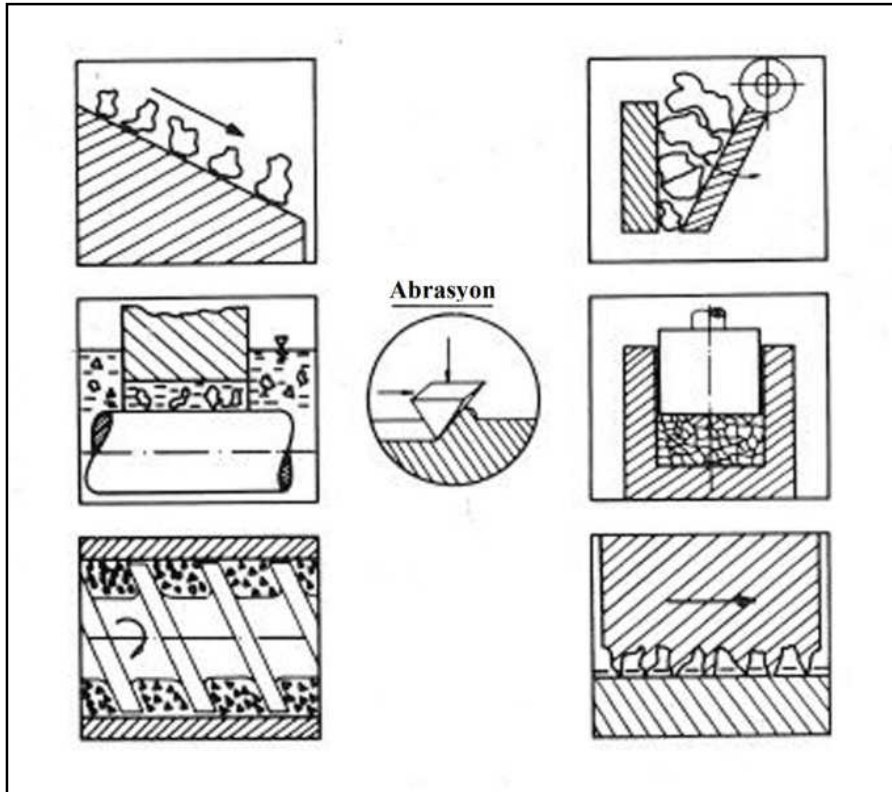
Elemanlardaki hareketler veya birbiriyle olan temasları çok çeşitli değişmektedir. Katı cisimlerin yüzeyindeki farklı tip hareketler şekil 1.3’de görüldüğü gibi tanımlanmıştır. Harekete göre kayma, yuvarlanma, darbe, titreşim ve akış olarak sınıflandırılmıştır. Aşınma prosesi sistem kinematiğine bağlı olarak kayma aşınması, darbe aşınması, erozif aşınma, titreşim aşınması, yuvarlanma aşınma olarak ayrılmıştır.



Şekil 1.3 : Aşınma prosesinin aşınma modüllerine göre sınıflandırılması [25].

1.2.1 Abrazif aşınma:

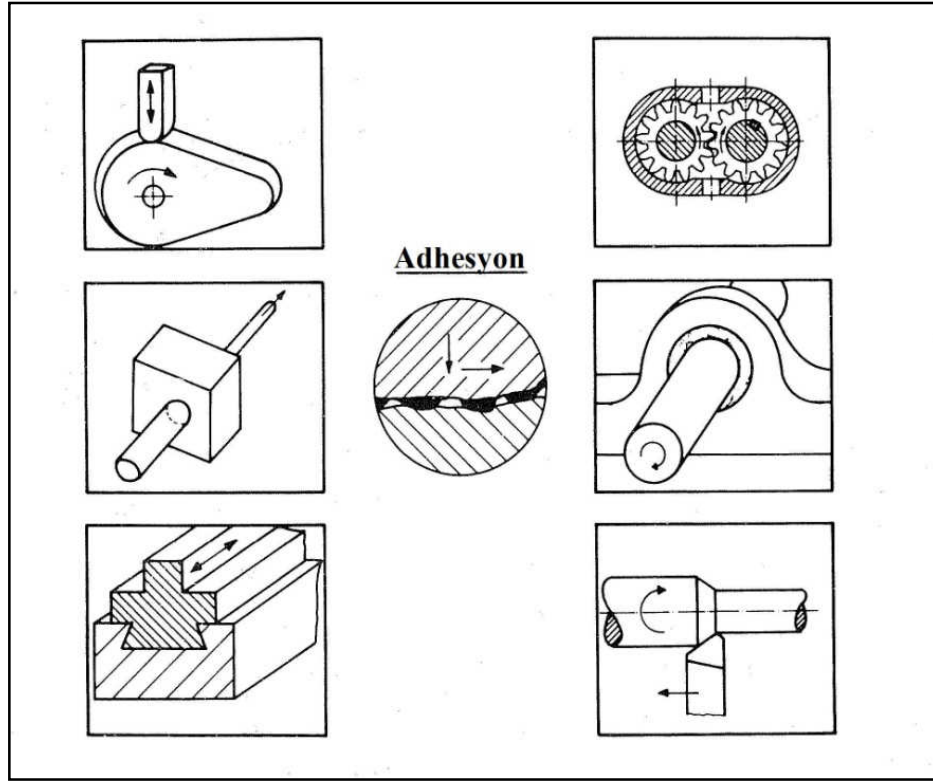
Malzeme, sertliği aynı veya saha sert bir malzemenin parçacıkları tarafından yüke maruz kalıyorsa abrazif aşınma meydana gelir [25, 26]. Toprak kaldırmaya çalışan kepçe abrazif aşınmaya örnektir.



Şekil 1.4 : Abrazif aşınmanın görüldüğü tribolojik sistemler [25].

Şekil 1.4’de abrazif aşınmanın olduğu tribolojik sistemler gösterilmiştir. Kaydırma oluları, kirli hidrolik sistemler, kırıcılar, toz metalürjisinde kullanılan kalıplar, tırtıklı yüzeyle karşılıklı eş çalışan yüzeyler, ekstrüderler abrazif aşınmaya maruz kalırlar [25].

1.2.2 Adhezif aşınma:



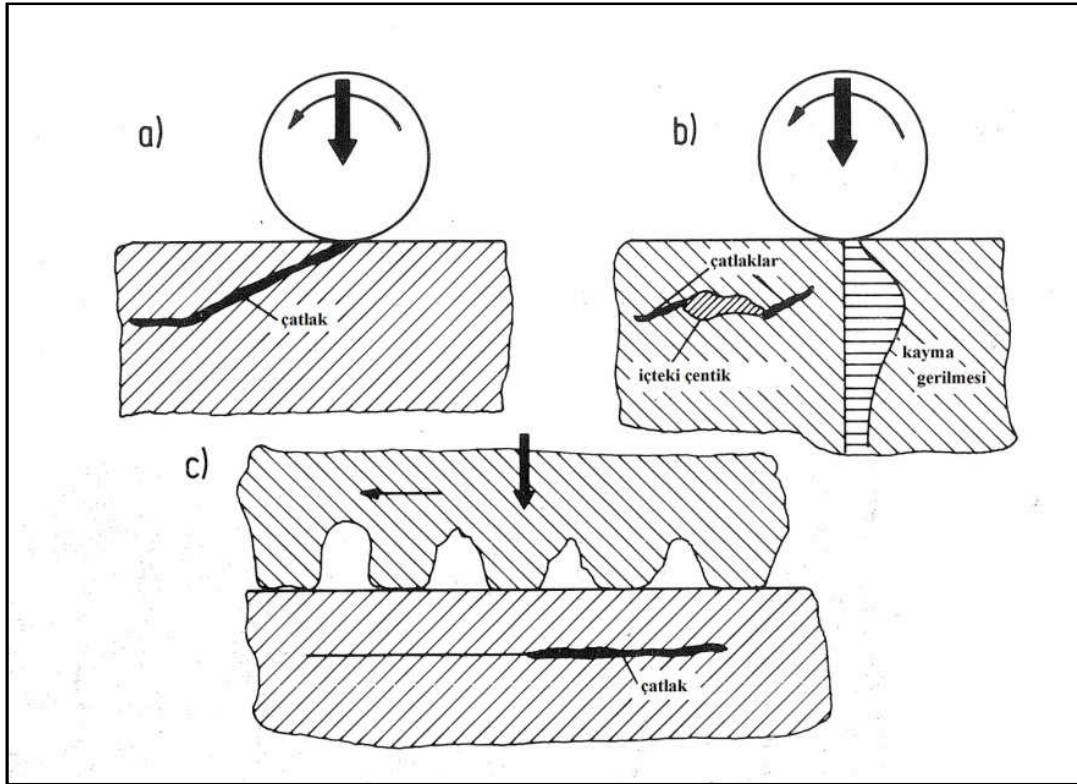
Şekil 1.5 : Adhesif aşınmanın görüldüğü tribolojik sistemler [25].

Şekil 1.5’de adhesif aşınmanın görüldüğü makine parçaları gösterilmiştir. Dişlilerde, kuru ve sınırlı yağlanmış kaymalı yataklarda, kam mekanizmalarında kesme takımlarında, pistonlarda, tel çekmede kalıplarda adhesiv aşınma ile karşılaşmaktadır. Adhesiv aşınma birbirine göre kayan iki yüzey arasında meydana gelir. Temas eden pürüzlülüklerdeki yüksek yerel basınç, plastik şekil değişimine, adhesyona ve yerel birleşmelere neden olur. Bu yüzeyler arasındaki rölatif kayma bu birleşmelerin kopmasına ve sıklıkla bir yüzeyden diğerine geçmesine sebep olur [25].

1.2.3 Yüzey yorulması:

Tekrarlı değişken yüklemeler nedeniyle çatlak oluşumu ve malzeme dökülmesi sonucu meydana gelen aşınmaya yüzey yorulmasının neden olduğu aşınma denir. Temas eden katı parçalar arasındaki yuvarlanma ve/veya kayma veya sıvıların veya

katıların çarbesi sonucu çevrimsel yüzey gerilmeleri oluşur. Rölatif hareket halindeki katı yüzeylerde pürüzlüklerin tekrarlı kayma teması nedeniyle mikroskobik ölçekte yerel yorulma oluşur. Sıcak ve soğuk haddelemede kullanılan merdanelerde, raylı ve tekerlekli sistemlerde, bilyalı rulmanlarda, yazıcılarda ve kavitasyonun olduğu pompalarda yüzey yorulması gözlemlenebilir. Malzemenin yorulması, elastik ve plastik şekil değişimi, pekleşme ve/veya yumuşama, çekirdeklenme ve çatlak ilerleme mekanizmalarını kapsar. Şekil 1.6’da yüzey yorulmasına neden olan çekirdeklenme ve çatlak ilerleme mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 1.6 : Yorulma yüzeyinde çatlak ilerlemesi ve oluşumu [25].

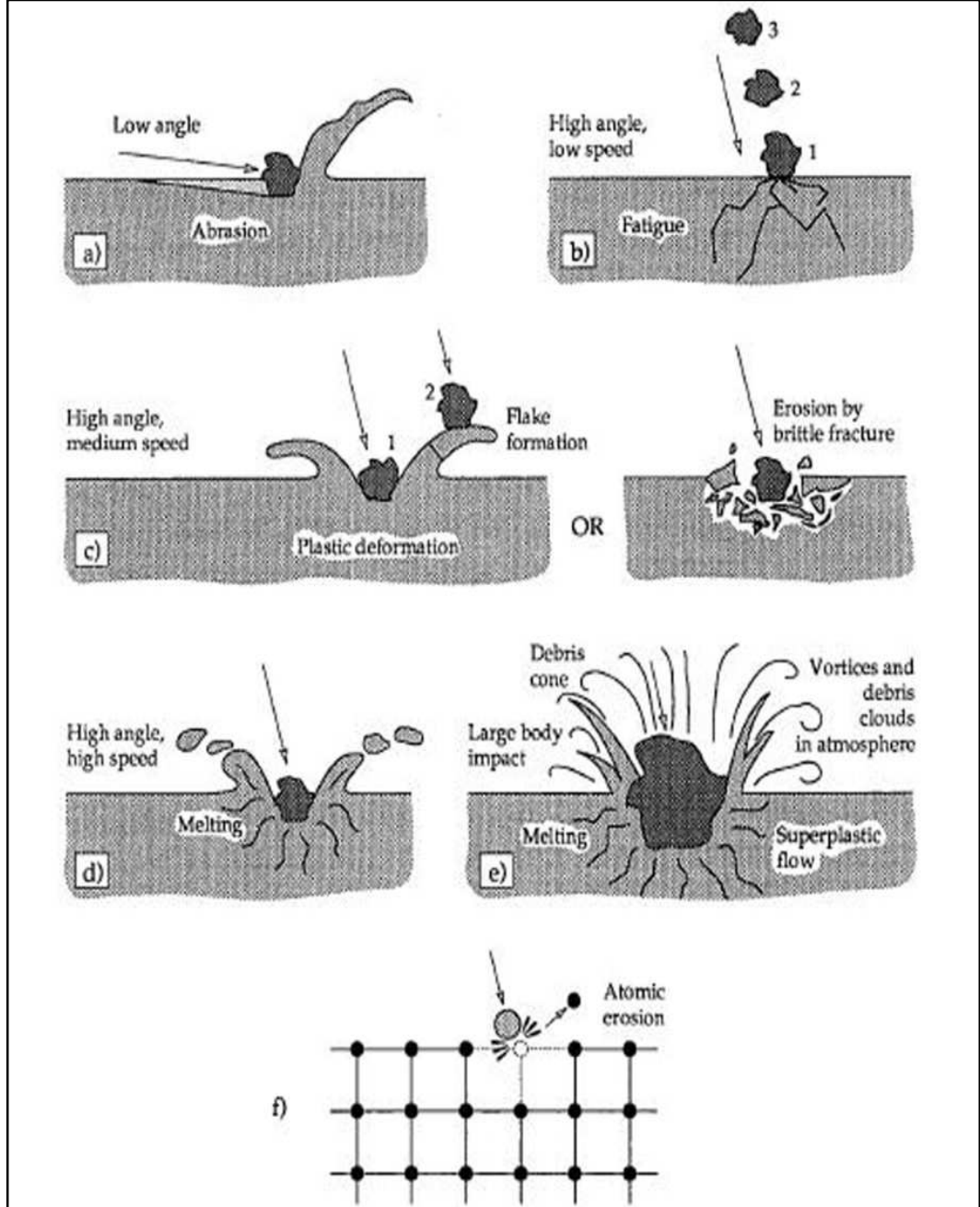
1.2.4 Eroziyon aşınma:

Katı veya sıvı aşındırıcı parçacıkların hava veya sıvı bir ortam içerisinde hedef numunenin yüzeyine çarparak numuneden malzeme kaldırması olayına eroziyon aşınma denir. Eroziyon aşınma, uçağın toz bulutundan geçerken gaz türbin kanatlarında, maden çıkarmaya işlemlerinde pompa çarklarında görülmektedir.

Eroziyon aşınma birkaç aşınma mekanizmasını kapsar. Bu aşınma mekanizmaları, parçacık malzemesi, çarpma açısı, çarpma hızı ve parçacık boyutuyla genelde kontrol edilebilir. Sıvı parçacıkların aşındırıcı olduğu bir durumda, abrazyon aşınmadan söz

edilemez, çarpmaya bağlı tekrar tekrar meydana gelen çarpma kuvvetlerinin ve bunların yarattığı gerilmelerin aşınmaya sebep olması etkilidir [25].

Erozif aşınma, şekil 1.7’de görüldüğü gibi göreceli olarak küçük parçacıkların mekanik bileşenlere çarptırılması ile oluşturulan belirsiz sayıda aşınma mekanizmalarını kapsar.



Şekil 1.7 : Olası erozyon mekanizmaları [24].

Aşınan malzeme ile aşındırıcı parçacığın yörüngesi arasındaki açı şekilde belirtilmiştir. Düşük çarpma açıları aşınma prosesin abrazif aşınmaya benzemesi destekler. Yüksek çarpma açıları ise tipik erozyon mekanizmasına neden olur. Erozi

parçacığın çarpma hızı da aşınmayı durumunu etkiler. Düşük çarpma hızları malzeme yüzeyinde plastik deformasyonu sebep olacak gerilme değerlerinin oluşmasını sağlayamaz ve aşınma yüzey yorulması ile meydana gelir. Eğer hız örneğin 20 m/s değeri gibi bir değere çıkarsa aşınan malzeme plastik olarak deformasyona uğrar. Eğer aşındırıcı parçacıklar küresel ise aşınma yüzeylere aşırı plastik deformasyon sonucu oluşur. Gevrek malzemeler ise çatlak ilerleme mekanizması yardımıyla aşınırlar. Çok yüksek parçacık hızlarında çarpma yüzeyinde erime söz konusu olur. Mikro düzeyde ise kristal kafeste atomik düzeyde bozulmalar meydana gelir [25].

2. EROZİF ABRASİF AŞINMA MEKANİZMALARIN İNCELENMESİ, LİTERATÜR TARAMASI VE ÇALIŞMANIN AMACI

2.1 Eroziyön Aşınma Mekanizmaları

Eroziyön aşınmada aşınan parça yüzeyinde farklı morfolojik yapılar şekil 1.8'deki gibi gözlemlenebilmektedir. Bu morfolojik yapılar mikro oluk, mikro yarık ve mikro çatlak yapılarıdır.

2.1.1 Mikro oluk

Aşındırıcı parçacık malzemenin kenara doğru taşınmasını sağlar, direkt olarak malzeme kaldırılması gibi bir mekanizması söz konusu değildir. Mikro oluğun kenarında ufak tepelikler oluşur ve bu mikro tepeliklere mikro oluğa bitişik oluşur, daha sonraki art arda gelen ve çarpan mikro aşındırıcı parçacıklar bu mikro yükseltileri yok edebilir.

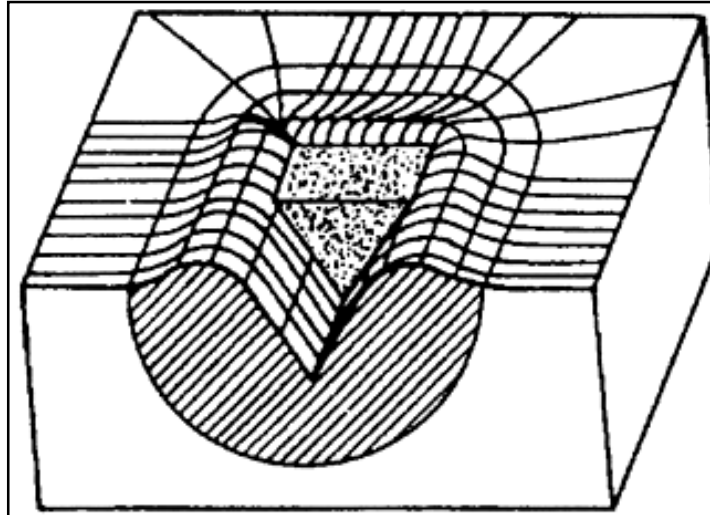
2.1.2 Mikro yarık

Malzemenin yüzeyden ayrılması, mikro çukurcuk ve mikro çentik halinde oluşmaktadır. Hiç veya az miktarda malzeme çukurcuğun kenarın oluşur. Bu mekanizma geleneksel talaşlı işleme mekanizmasına benzemektedir.

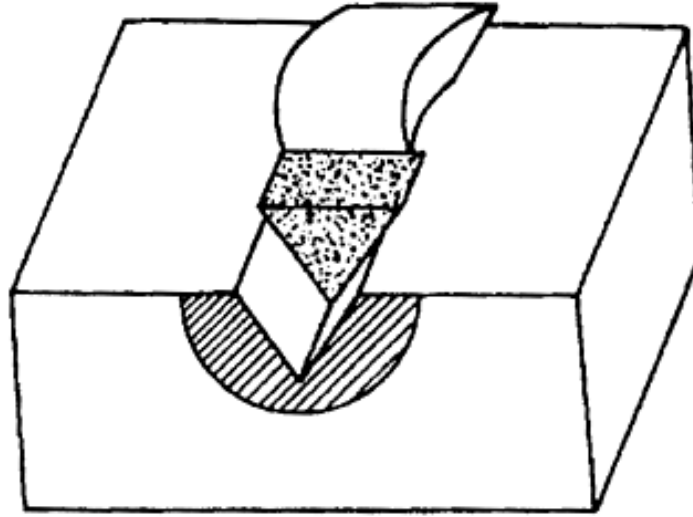
2.1.3 Mikro çatlak

Yüzeyden malzeme kesme prosesi şeklinde ayrılır, yüzeyde yerel kırılma meydana gelir, mikro çukurcuklar çekirdeklenir ve mikro çatlaklar oluşarak ilerler, malzeme parçalanarak yüzeyden ayrılır.

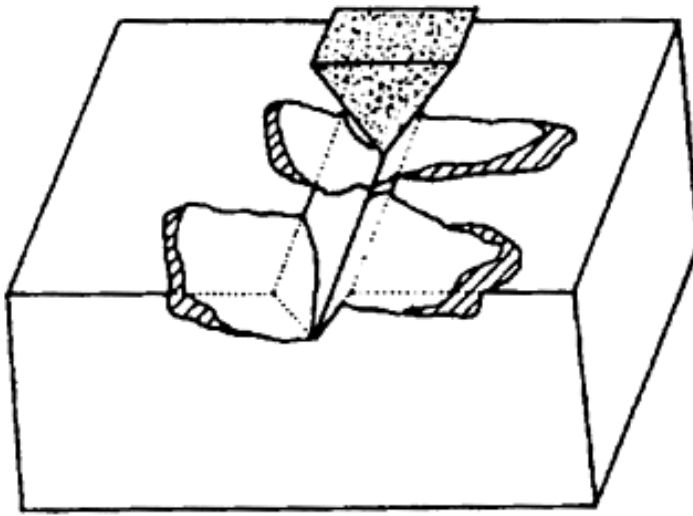
Sünek ve düşük dayanıma sahip malzemelerde genelde yüzey morfolojisinde mikro oluk mekanizması görülürken, gevrek malzemelerin yüzey morfolojisinde ise mikro çatlak mekanizması görülmektedir [27].



Mikro oluk



Mikro yarık

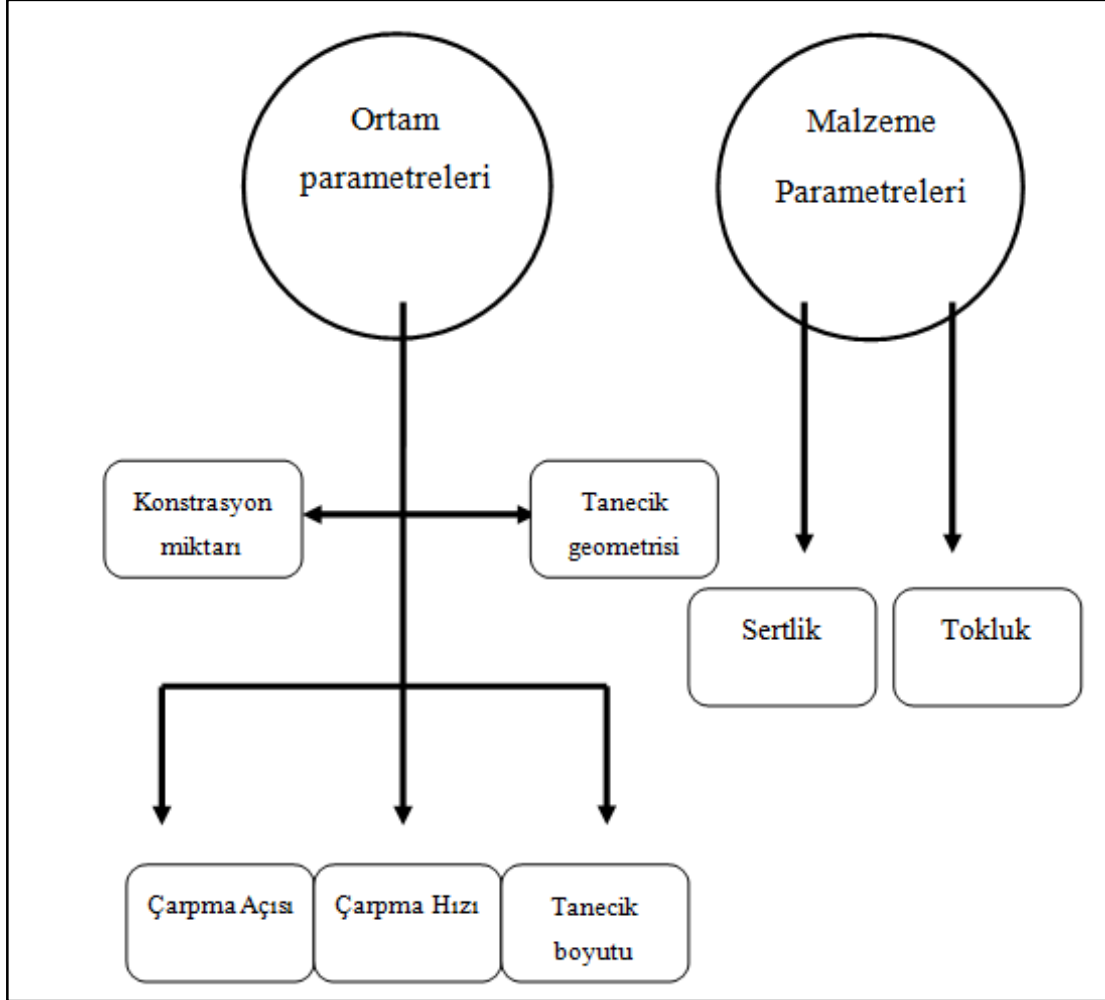


Mikro çatlak

Şekil 2.1 : Aşınma mekanizmaları [27].

2.2 Eroziyon Aşınmayı Etkileyen Parametreler

Eroziyon aşınmayı etkileyen parametreler genel olarak şekil 1.9'daki gibi ortam parametreleri ve malzeme parametreleri olarak 2'ye ayrılmaktadır.



Şekil 2.2 : Aşınmayı etkileyen parametreler.

Çalışmada aşındırıcı çarpma hızı, aşındırıcı tanecik boyutu ve malzeme sertliği parametreleri değiştirilerek Eroziyon – Abrasif aşınma karakteristiği üzerindeki etkileri ele alınacaktır. Malzeme parametresi olarak sertlik önemli bir parametredir. Literatür incelemeleri sonucu malzeme parametresi olan sertlik ile ilgili matematiksel bir ifadenin oluşturulmadığı görülmüştür. Bu doğrultuda, malzeme sertliğinin de **matematiksel model** içerisinde tanımlanması özgün bir çalışma elde edilebilmesi açısından önemlidir. Bu doğrultuda, deney numunesi olarak kullanılan çeliğin sertliği farklı sıcaklıklarda tavlama ve su verme işlemleri gerçekleştirilerek çeliğin sertliği değiştirilecektir. Ortam parametresi olarak aşındırıcı parçacığın tanecik çapı ve aşındırıcı parçacığın çarpma hızı aşınma mekanizması için önemli bir etkiye sahiptir.

Bunun için kuvars kumunun boyutları, 100 – 900 µm arasında değiştirilmiştir. Su - Kuvars kum oranı 20% ağırlıkça oranda alınarak her deney için sabit tutulmuştur. Aşındırıcı çarpma hızı ise 300, 500 ve 700 d/d alınmıştır.

Aşınma miktarını tespit etmek amacıyla deney öncesinde ve deney sonunda aşınan çelik numuneler hassas terazi yardımıyla kütle kayıpları ölçülecektir.

Elde edilen sonuçlar yardımıyla erozif – abrazif aşınmanın **matematik modeli** oluşturulacaktır.

Aşınan yüzeylerin morfolojik yapıları tarayıcı elektron mikroskobu yardımıyla incelenecektir.

Önerilen tez bu uygulamanın değişik yönlerinin uygulanacağı ve daha önceki bilimsel çalışmaları tamamlayıcı nitelikte olacaktır. Tasarım ve malzeme seçimindeki farklılar özgün katkı sağlayacaktır.

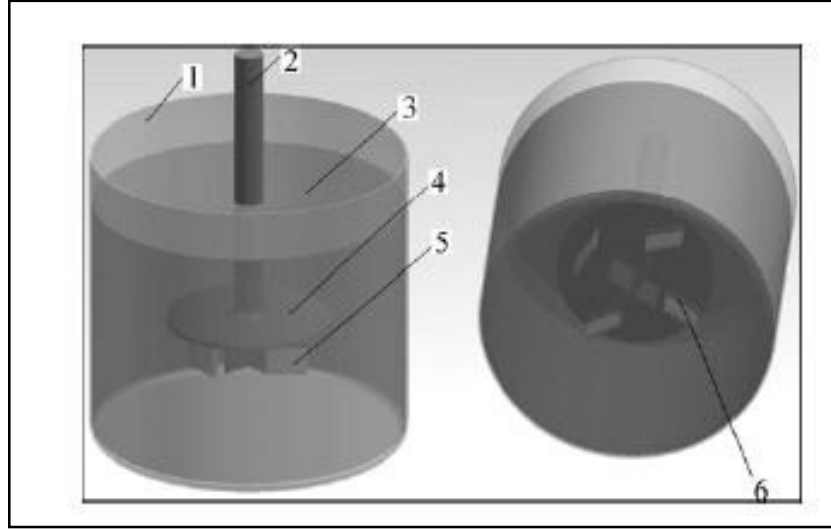
2.3 Erozif-Abrazif Aşınma İle İlgili Literatürde Yapılan Çalışmalar

Farklı araştırmacılar, çeşitli parametrelerin erozif aşınmaya etkisini incelemiştir. Bu çalışmalar şu şekilde özetlenebilir;

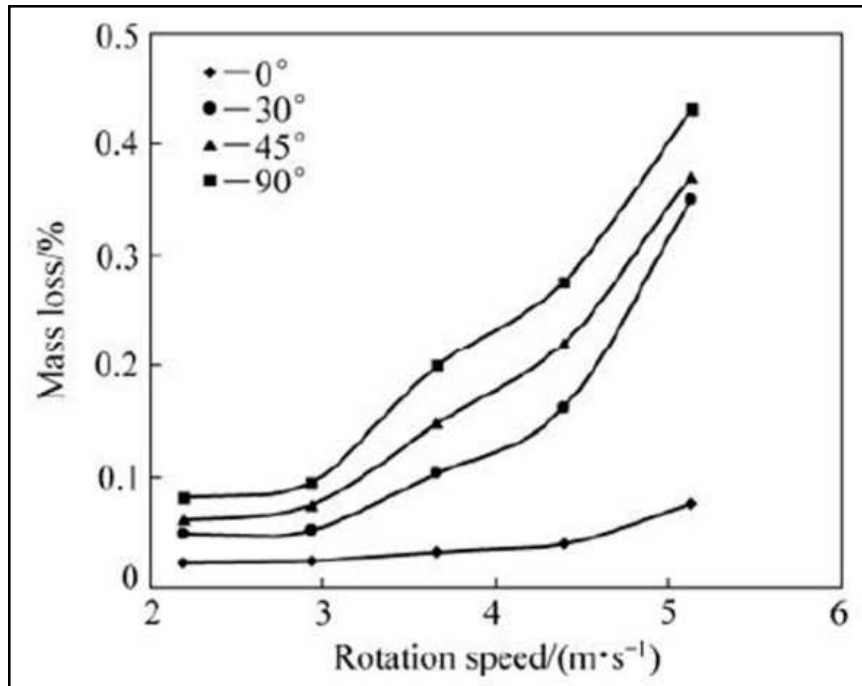
Jha, çalışmasında ortam parametrelerinin erozif aşınmaya etkisini deneysel olarak incelemiştir. Bu deneyler sırasında erozif aşınma tankı kullanmıştır. Çalışmasında çarpma açısının ve çarpma hızının, alüminyumun erozif aşınma davranışına etkisini incelemiştir. Malzeme olarak 40 vickers sertlik değerine sahip alüminyumun, ağırlıkça % 40 kum/su içerisinde farklı çarpma açılarında erozif aşınma davranışı incelenmiştir. Deney numuneleri şekil 2.3’de görüldüğü gibi farklı açılarda yerleştirilmiştir. Aşınma tankının şekil 2.5’teki gerçek tasarım modelinde numune tutucu tank içerisine girmekte ve kumun su içerisinde karışmasını sağlamaktadır. Kuvarz silis kumu aşındırıcı parçacık olarak kullanılmıştır. Aşındırıcı parçacıkların boyutları 200 ila 300 mikron arasında değişmektedir. Silika kumunun sertliği 980 vickerstir. Numuneler dönüş yönüne 0°, 30°, 45° ve 90° açıyla yerleştirilmiştir; 300, 400, 500 ve 600 d/dak hızlarında döndürülmüştür. 4

Jha, çalışmasında farklı çarpma açılarında malzemedeki kütle kayıplarını şekil 2.4’teki gibi değiştiğini göstermiştir. Yüksek hızlarda bu fark düşük hızlara göre daha belirginleşmektedir. Kütle kaybı (1) denkleminde dönme hızına göre

artmaktadır. Hareket eden aşındırıcı parçacıklarının kinetik enerjileri hedef malzemenin kütle kaybında ana etkindir.



Şekil 2.3 : Erozif test kabı: 1-tank, 2-mil, 3-karışım 4-disk, 5-6 numuneler [28].

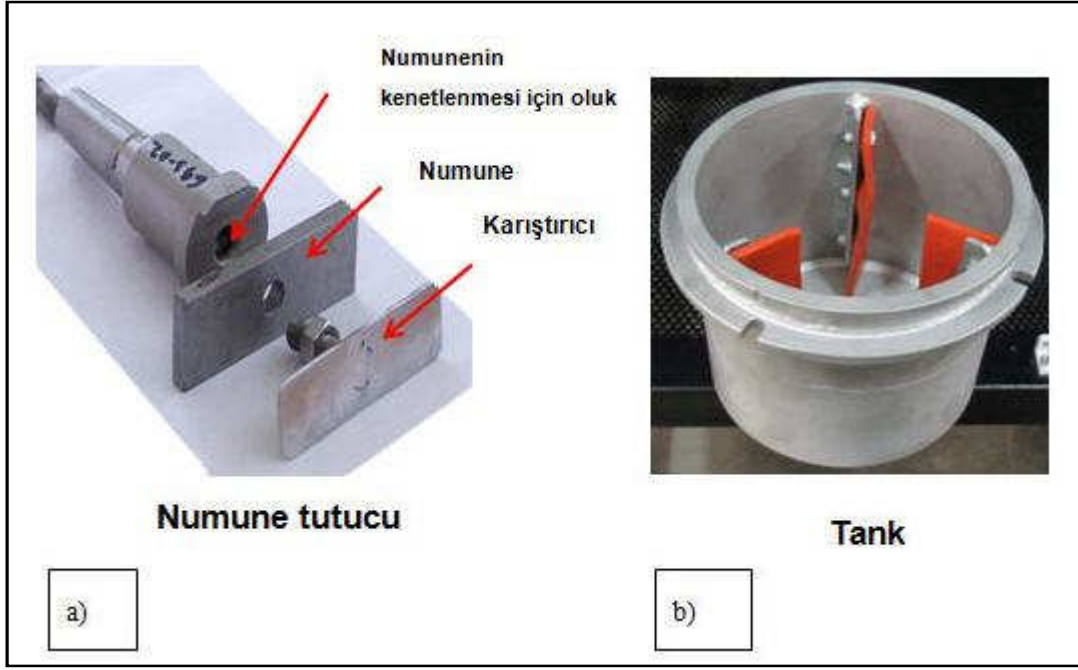


Şekil 2.4 : Kütle kaybının çarpma hızına göre değişimi [28].

Çarpma açıları, erozif parçacıklarının boyutlar, şekli ve sertlikleri, içeride dönen sıvının hızı, hedef malzemenin tokluğu ve sertliği erozif aşınma hızını etkileyen faktörlerdir. Aşınma hızı denklem (2.1)'deki gibi olacak şekilde tanımlanmaktadır.

$$V=k*u^n \quad (2.1)$$

V aşınma hızı, u çarpma hızı, k sabit, n hız üsteli olup 2 ile 4 arasındadır. Çarpma açısı artıkça, n artmaktadır [28].

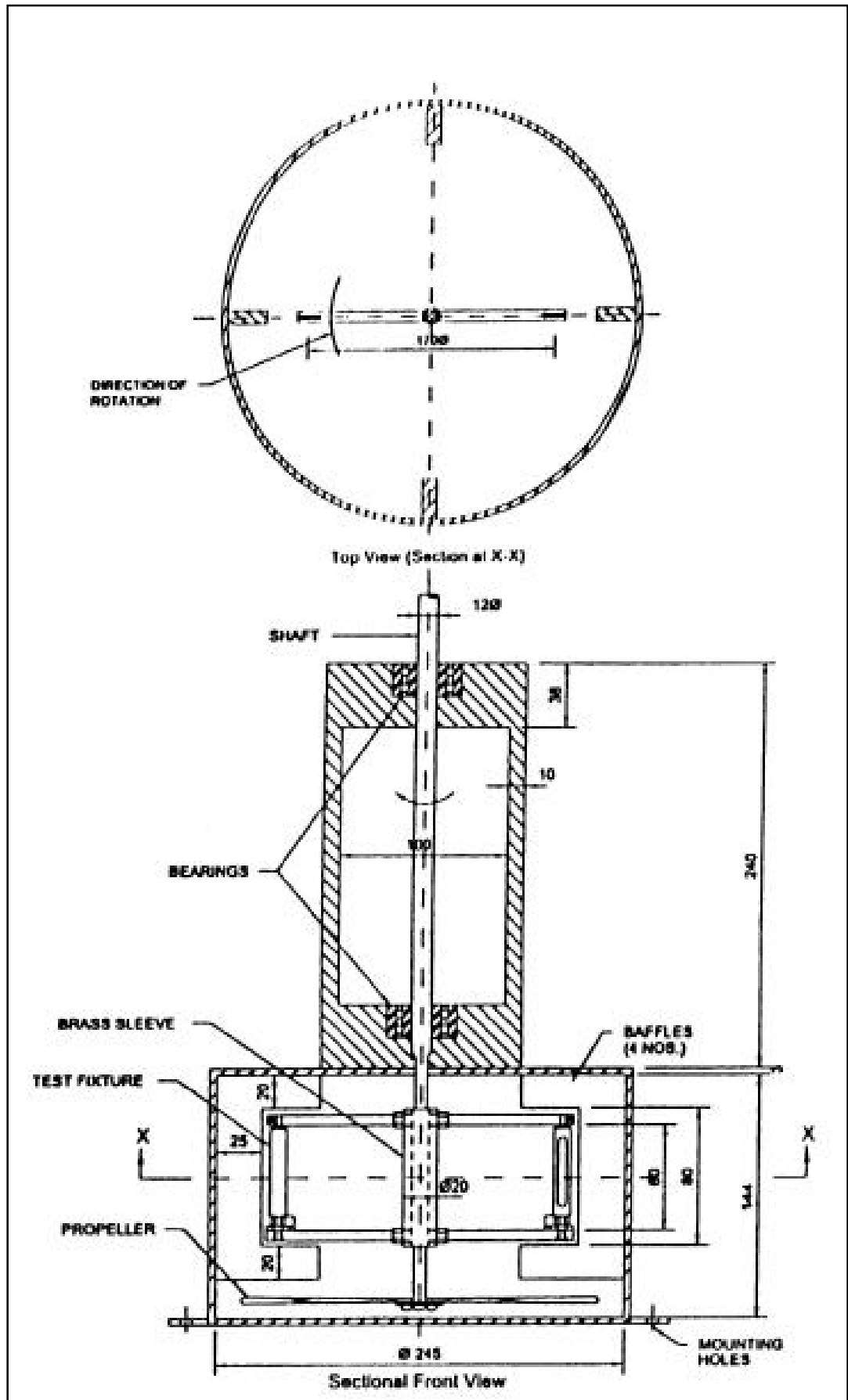


Şekil 2.5 : DUCOM TR 40 Erozif test düzeneği: a) numune tutucu, b) tank [28].

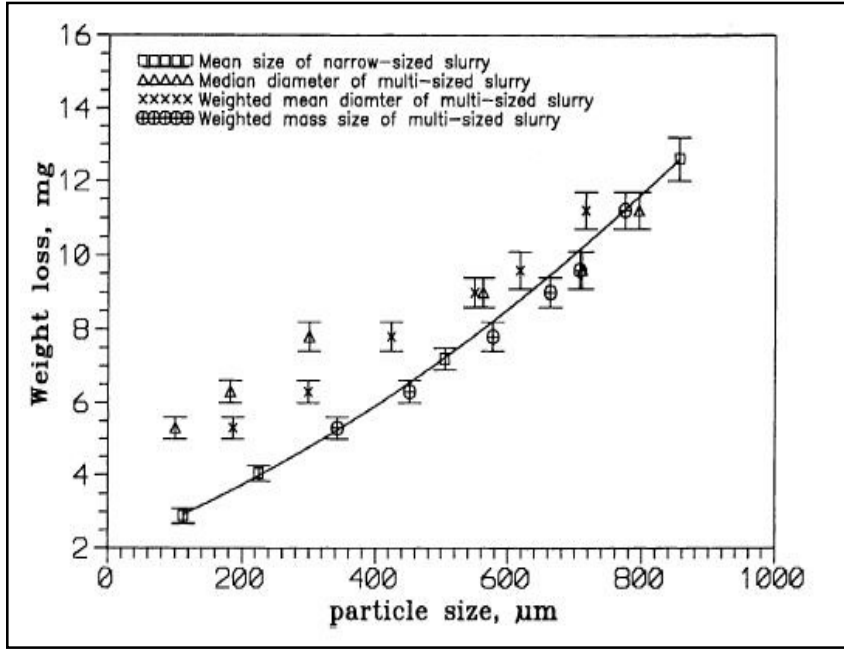
Diğer çalışmada, Gandhi ve Borse, katı-sıvı karışımının içinde aşındırıcı çarpma hızı, çarpma açısı, konsantrasyon miktarı ve süre gibi parametreleri değiştirerek erozif aşınmayı gözlemlemiştir.

Şekil 2.6'daki 6.61 lt'lik alüminyumdan yapılmış silindirik tank kullanılmış olup tank çapı 240 mm ve tank yüksekliği 144 mm'dir. Numuneler dikey pozisyonda yerleştirilmiştir. Altta 2 kanatlı pervane yardımıyla kumlu su karıştırılmıştır. Farklı kum tanecik çap karışımlarına göre aşınan malzemedeki kütle kaybı şekil 2.7'de deneysel olarak bulunmuştur.

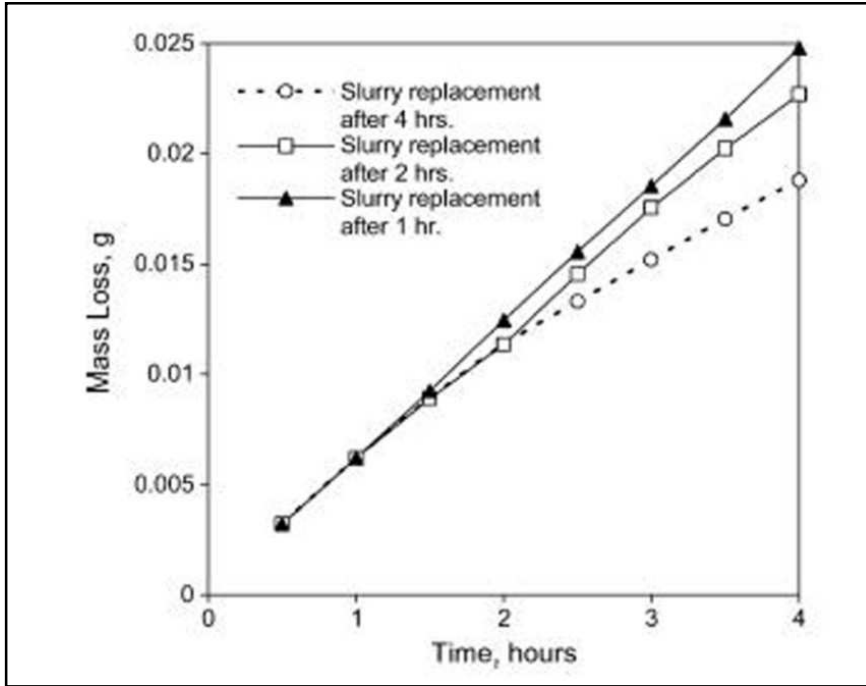
Gandhi, % 20 ağırlıkça kum oranına sahip karışımı 4 saat süreyle karıştırmıştır. Her yarım saatte bir aşınan numune tartılarak malzeme kaybı bulunmuştur. Karışım 1 saatte bir, 2 saatte bir ve 4 saatte 1 olarak değiştirilmiştir. Katı parçacıkların yenmesi ve yuvarlak hale gelmesi nedeniyle kum tanelerinin aşındırıcı etkisi şekil 2.8'de görüldüğü gibi zamanla azalmaktadır. 2 ve 4 saatte bir değiştirilen karışımlarda kütle kaybı non-lineer olarak artmaktadır ve aşınma hızı sabit kalmamaktadır. 1 saatte bir değiştirilen karışımında aşındırıcı kum taneciklerinin aşındırma etkisi sabit kalmaktadır ve malzemedeki kütle kaybı lineer olarak artmaktadır.



Şekil 2.6 : Test düzeneğinin kesit görünüşü [29].

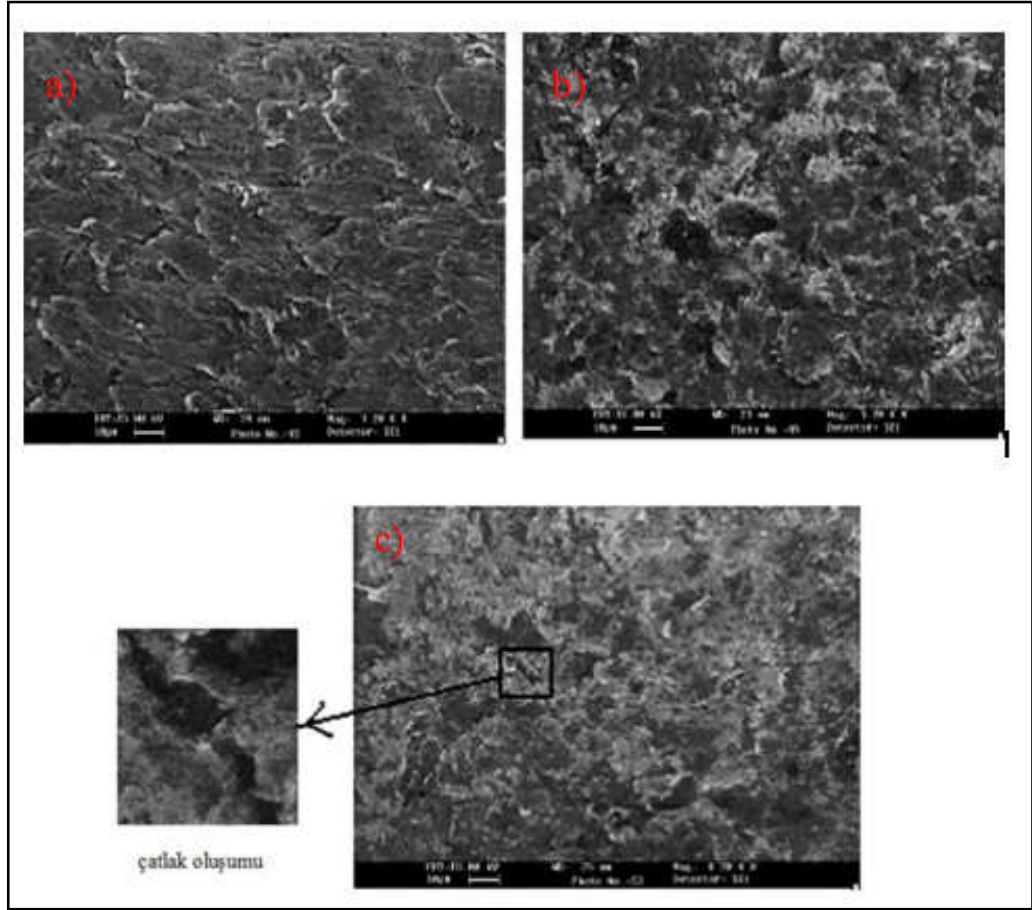


Şekil 2.7 : 30 °lik çarpma açısında ve farklı su-kum konsantrasyonlarına parçacık çaplarına göre aşınan malzemedeki kütle kaybı [29].

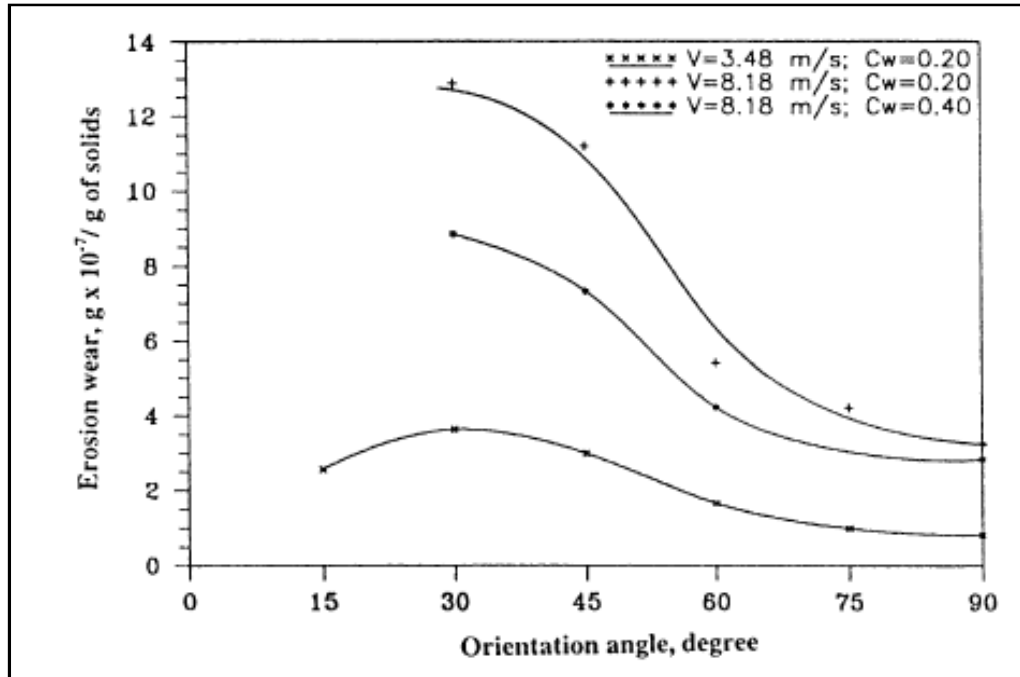


Şekil 2.8 : Kum-su karışımının değiştirilme süresinin erozyona etkisi [30].

Şekil 2.9'da 90 ° açıyla çarpan kum taneciklerinin aşınan AA6063 malzeme yüzeyinin SEM fotoğrafları verilmiştir. İz ve çatlaklar gözlenmektedir. Şekil 2.9'da 15° çarpma açısında konumlandırılan numunelerde ise aşınma yüzeyi pıhtı şeklinde izlere sahiptir. 60° gibi ara değerlerdeki çarpma açılarında ise hem çatlak hem de pıhtı karışımı yüzey gözlemlenmiştir.

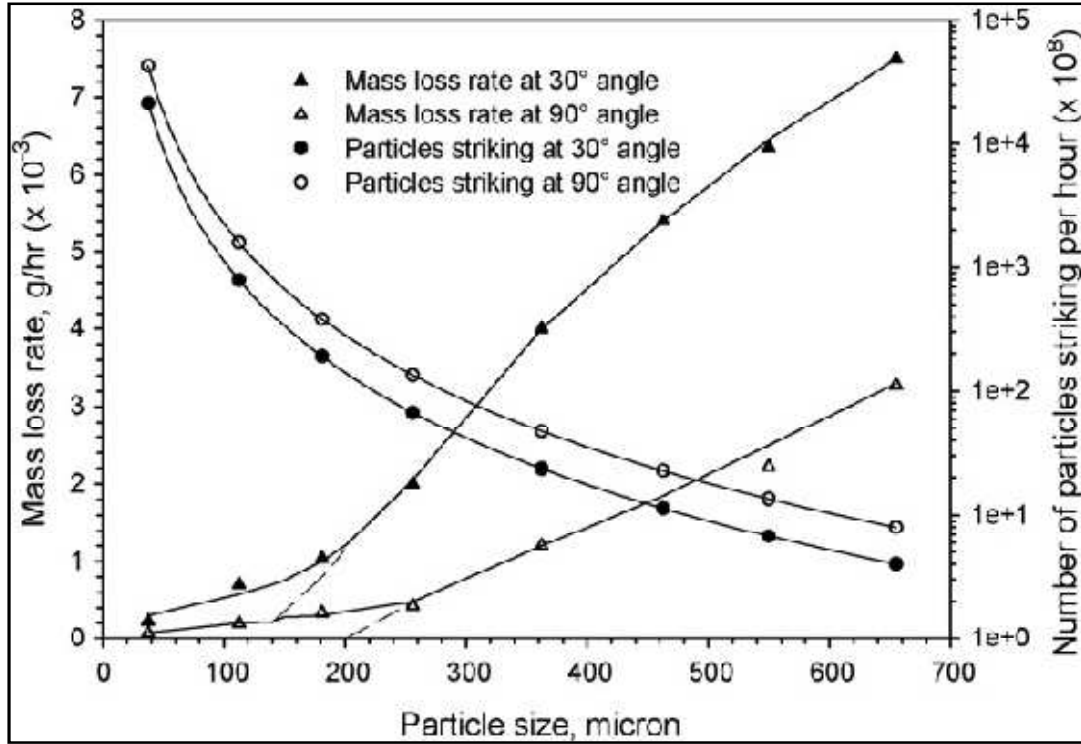


Şekil 2.9 : Farklı açılarda aşınan numunelerin SEM görüntüleri, a) duruş açısı 15°, b) duruş açısı 60°, c) duruş açısı 90° [30].



Şekil 2.10 : Farklı çarpma hızlarında ve aşındırıcı parçacık oranlarında çarpma açısına göre erozif aşınma [31].

Gandhi erozif aşınma çalışmasında 20 % ağırlıkça kum konsantrasyonunda 223.5, 448.5 ve 890 mikron ortalama kum tane boyutları kullanılarak pirinç numunelerin erozif aşınma miktarları hesaplanmıştır. Şekil 2.10'da 30° çarpma açısına kadar erozif aşınmada artış gözlenmekle beraber bu değerden sonraki çarpma açılarında aşınma miktarında azalma meydana gelmektedir. Aynı kum konsantrasyonlarında farklı çarpma hızlarında kum taneciklerinin çarpma hızı arttıkça erozif aşınma miktarı artmakta, aynı çarpma hızında farklı kum su konsantrasyonlarında ise kum oranının ağırlıkça yüzdesi arttıkça erozif aşınma miktarı da artmaktadır [31].



Şekil 2.11 : Farklı çarpma açılarında parçacık boyutuna göre erozif aşınma [32].

Desale ise çalışmasında, 20 % ağırlıkça kum su karışımında farklı tanecik boyutlarında yapılan deneylerde tanecik boyutu arttıkça şekil 2.11'de görüldüğü gibi farklı çarpma açılarında erozif aşınma miktarı da artmaktadır [32].

Başka bir çalışmada, Patil, alüminyum sünek malzemesinde hız, çarpma açısı, konsantrasyon miktarı ve parçacık boyutuna göre erozif aşınma davranışı şekil 2.12 'deki aşınma tankı kullanılarak incelenmiştir.

Şekil 2.12'de gösterildiği gibi deney düzeneği daha önceki çalışmalardaki deney düzeneğine benzer olup alüminyum hedef malzemesi kullanılarak çarpma hızı, kum tanecik boyutu, çarpma açısı ve ağırlıkça konsantrasyon miktarı değiştirilerek erozif

aşınmanın bu parametrelere göre matematiksel modeli (2.2) denklemi şeklinde çıkartılmıştır.



Şekil 2.12 : 6.6 litreye sahip test kabı [33].

$$E_w = 0.075 * \theta^{0.12} * C_w^{1.09} * V^{3.55} * d^{1.37} \quad (2.2)$$

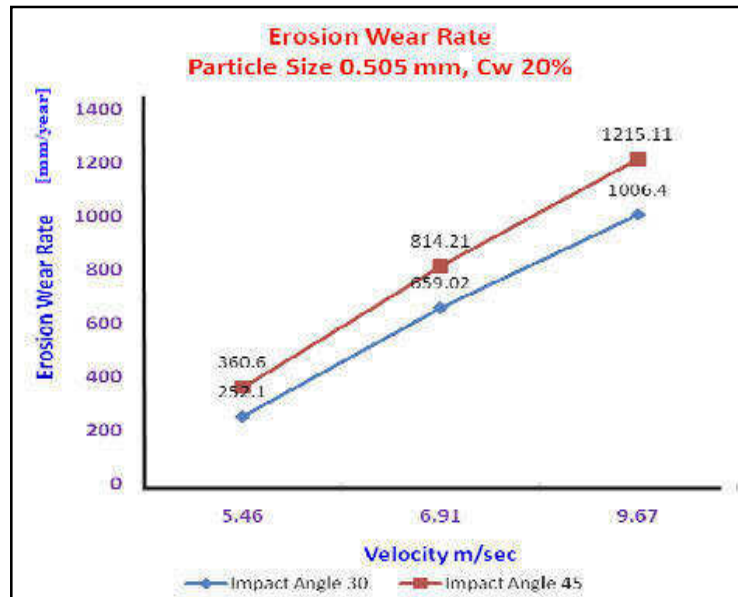
θ : çarpma açısı

C_w : konsantrasyon miktarı

V : hız

d : parçacık yarıçapı'dır.

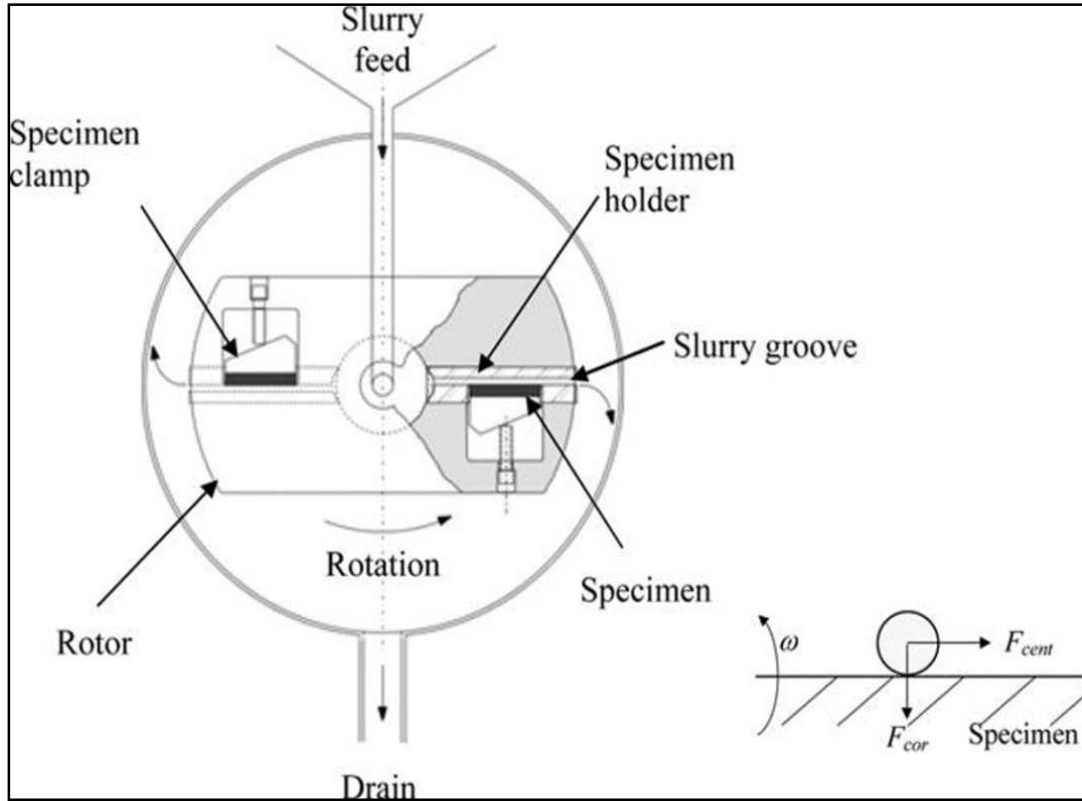
Aşınma hızı, farklı çarpma hızlarına göre şekil 2.13'teki gibi elde edilmiştir. Çarpma hızındaki artış, erosiv aşınma hızını artırmaktadır [33].



Şekil 2.13 : Çarpma hızının eroziv aşınmaya etkisi [33].

Bir diğ er çalışmada ise, Jones, elastomer malzemelerin d uşuk açılı erozif aşınması incelenmiştir [34].

şekil 2.14'te tank 5000 d/dak d onmektedir ve su-kum çamur karışımı saniye 60 ml miktarda olacak şekilde içeriye g onderilmektedir. Merkez kaç kuvveti su-kum karışımının uçlara doğru yayılmasını, koriolis kuvveti ile birlikte de sabit olarak konulan numunelere aşındırıcı parçacık olan kumun d uşuk açılarda çarpıtılması sağlanmaktadır. Hız merkezden dışarıya doğru artmaktadır, 14 m/s den 24 m/s kadar ulaşmaktadır. Su-kum çamur karışımı ağırlıkça %10 silis kum içermektedir. Kum parçacık  arpları 275-415 mikron arasında değşmektedir. Erozif aşınma direnci yüksek elastomer numunelerde aşınma etkilerini g orebilmek için daha agresiv bir ortam gerekmektedir. Bunun için köşeli SiC parçacıkları aşındırıcı olarak kullanılmıştır.



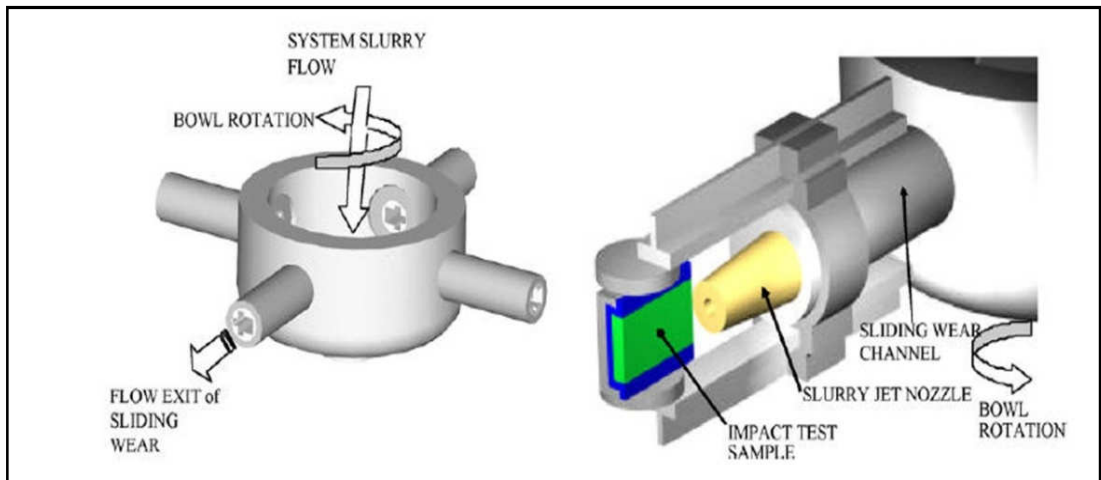
şekil 2.14 : Test düzeneği [34].

Normalize edilmiş erozyon hızları, erozyon hızının aşınma iz uzunluğuna oranlanarak elde edilmiştir. Su-silis kumu karışımının  onemli mertebede elastomerlere aşındırıcı etkisi olmamıştır. Aşağıda  izelge 2.1'de farklı malzemeler için aşınma miktarı verilmiştir [34].

Çizelge 2.1 : Normalleştirilmiş koriolis aşınma hızları [34].

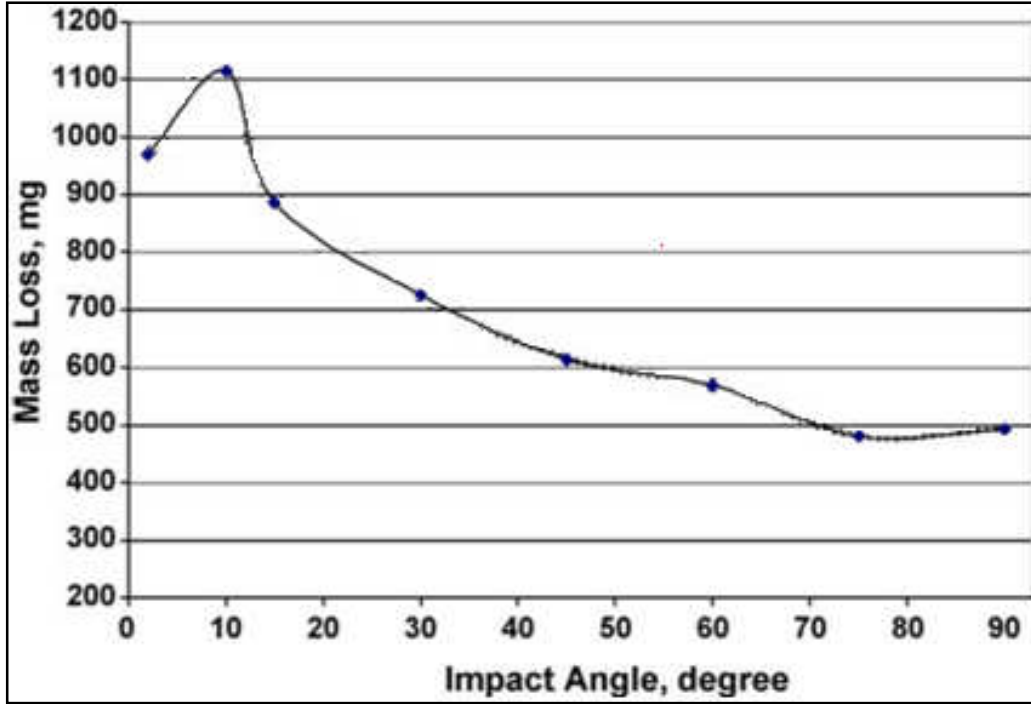
Malzeme	SiO ₂ erosiv [mm ³ *kg ⁻¹ *mm ⁻¹]	80 mesh SiC erosiv [mm ³ *kg ⁻¹ *mm ⁻¹]
AISI 1018 çelik	0.205	0.185
Doğal Lastik 1	-----	0.013
Doğal Lastik 2	-----	0.051
Poliüretan	0.009	0.166
WC/NiBSi BTAW Overlay	0.005	0.033
35%Cr 5%beyazDD	0.002	0.032
27%Cr 3%beyazDD	0.008	0.059
Martenzitik Paslanmaz Çelik	0.179	0.165
AR 600 HB plaka	0.059	0.082
WC-3.3%aoC	0.0004	0.003

Bu çalışmada ise Tian, koriolis ivmesini kullanan yeni çarpma erozif test düzeneği kullanılmıştır [35]. Santrifüj pompalarda koriolis ivmesi yaklaşımı kullanılarak, erozif aşınmayı deneysel olarak gözlemlemek için şekil 2.15'te görüldüğü üzere test düzeneği kurulmuştur. Bu test düzeneğinin diğer şekildeki koriolis erozif test düzeneğinden farkı, değişik çarpma açılarında erozif aşınmaları gözlemleyebilmesi sağlar ve test numunelerindeki erozif aşınmanın kontrol edilebilmesini ve daha efektif sonuçlar elde edilebilmesini sağlamıştır.



Şekil 2.15 : Koriolis aşınma test düzeneği [35].

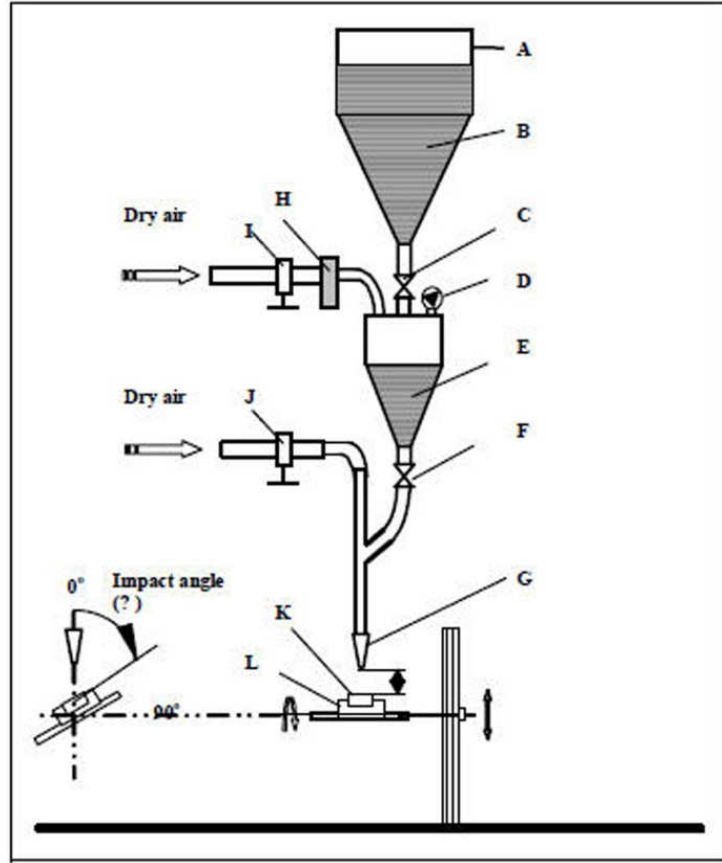
12 inç çapında karıştırıcı yardımıyla silindirik tank içindeki silis kum su ortamında karıştırılarak askıda kalması sağlanmış, pompa yardımıyla karışım dönen 400 ml' lik tankın içine gönderilmiş ve su-kum karışımı dönme etkisiyle akış çıkış notlarından çıkarak hedef numunesi üzerine çarptırılmıştır. Numune açıları değiştirilerek erozif aşınmaları deneysel olarak elde edilmiştir. Tankın dönme hızı 925 d/dak, çamur karışımının akış hızı 15 gal/dak ve yarı köşeli aşındırıcı parçacık çapları yaklaşık 660 mikrondur. Çarpma açısına göre kütle kaybı şekil 2.16'da gösterilmiştir [35].



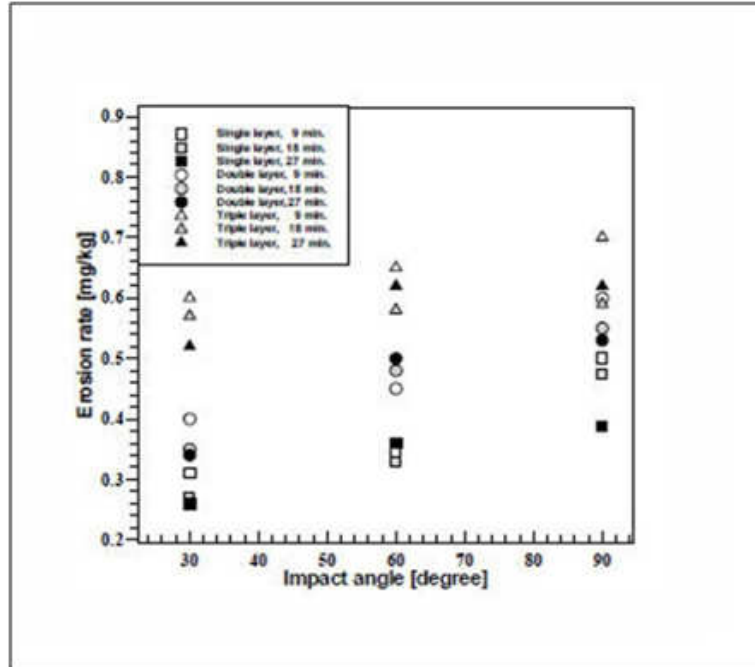
Şekil 2.16 : 6061T-6511 alüminyum numunesinin farklı çarpma açılarında kütle kaybı [35].

Yüzeyi ostenitik mangan kaplı düşük karbonlu çeliğin erozif aşınma davranışını inceleyen çalışmada Yıldızlı, nominal çapı 420 mikron olan aşındırıcı parçacıklar kullanmıştır. Çarpma açıları şekil 2.18'de görüldüğü gibi 0° den 90° arasında değiştirilerek sırasıyla 30°, 60° ve 90° alınmıştır.

Deney düzeneğindeki parçacık hızı gaz basınç regülatörüyle kontrol edilir. Kuru hava parçacıkları ivmelendirmek için kullanılır. Parçacık hızı 30 m/s'dir, 1020 çeliği olan hedef malzemenin aşındırıcı parçacıklara maruz bırakılma süresi 27 dakikadır. Şekil 2.17'de püskürtücü ve numune arasında 10 mm mesafe vardır. Numuneler düşük basınçlı hava ve alkol ile temizlenir ve $\pm 10^{-4}$ g doğrulukla tartılır.



Şekil 2.17 : Kuru hava çarptırıcısı deney düzeneği



Şekil 2.18 : Çarpma açısına göre erozyon hızları [36].

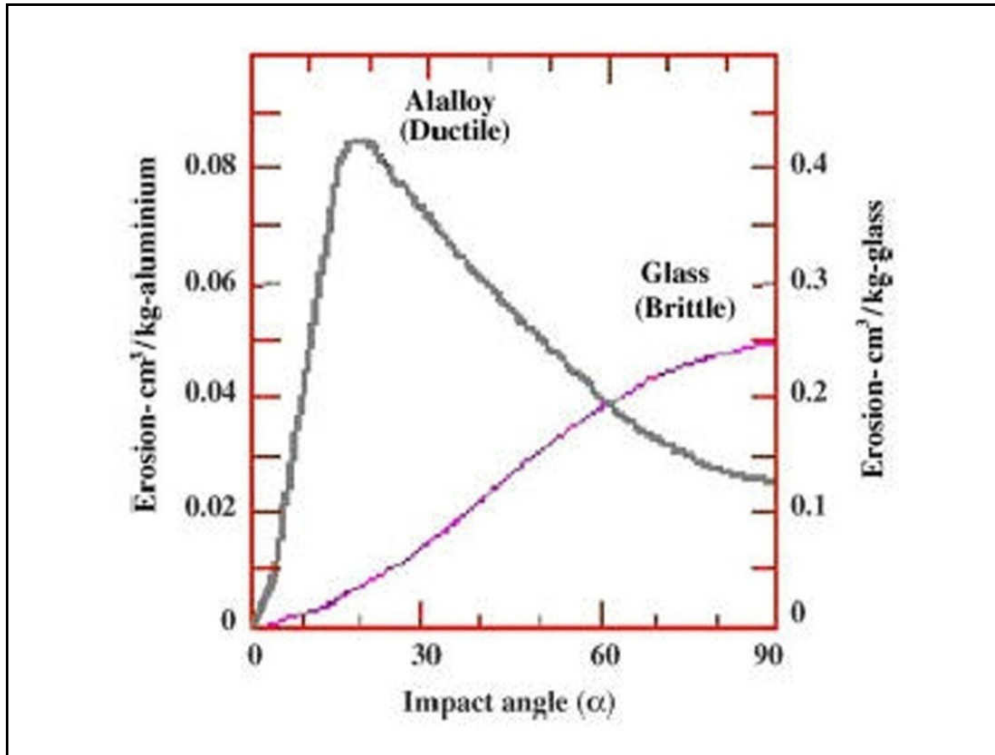
Aşınma hızı, çarpan birim parçacık ağırlığındaki kütle kaybı olarak tanımlanmıştır. Şekil 2.18'de çarpma açısına göre erozyon hızları gösterilmiştir. Sert kaplı yüzey

aşınma direncini artırmıştır. Tekrarlı çarpmalar yüzey sertliğini artırır bunun nedeni pekleşme ve gerilme kaynaklı marzenzik dönüşümdür.

Düşük karbonlu çeliklerin yerel tamir, kuvvetlendirilmesi uygulamalarında ark kaynağı ile yüzey kaplaması erozif aşınmaya karşı kullanılabilir [37].

Divakar, araştırmada yüzey sertliğinin AISI 316 çeliğinin erozif aşınmasına etkisi incelenmiştir.

Şekil 2.19'da görüldüğü üzere sünek ve gevrek olarak farklı iki malzemenin aşınma hızları aşındırıcı parçacıklarının çarpma açılarına göre farklılık gösterdiğini belirtmiştir. Sünek malzeme 20° çarpma açısında maksimum aşınma gösterirken dik doğrultuda çarpmalarda çok iyi aşınma direnci sağlamaktadır. Gevrek malzemelerde ise dik doğrultu aşınma hızı azami değere ulaşırken çarpma açısı azaldıkça aşınma miktarı da düşmektedir.

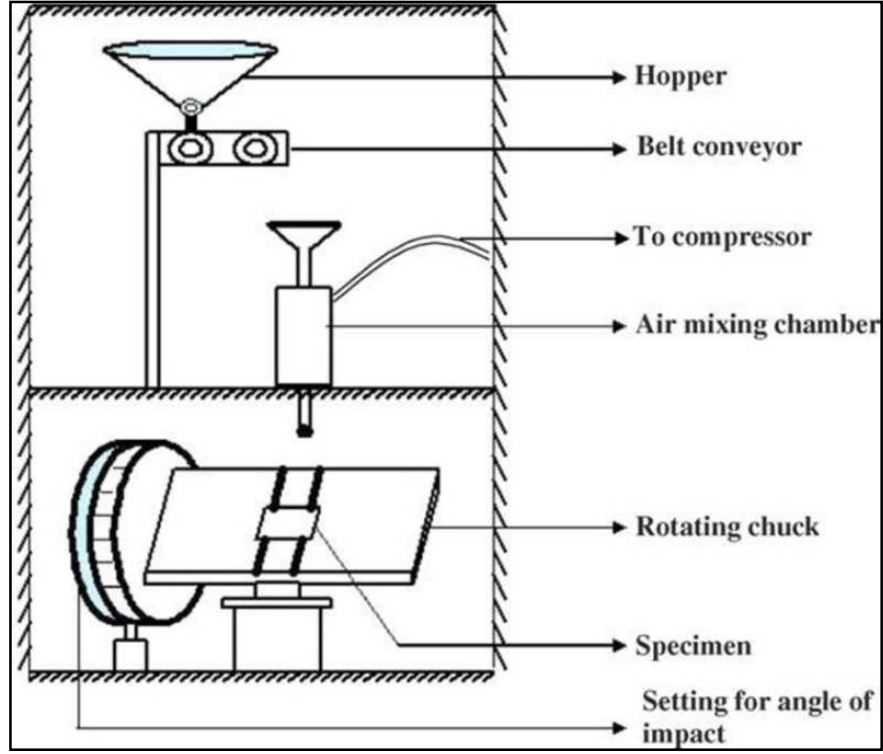


Şekil 2.19 : Çarpma açısına göre sünek ve gevrek malzemelerdeki erozyon [37].

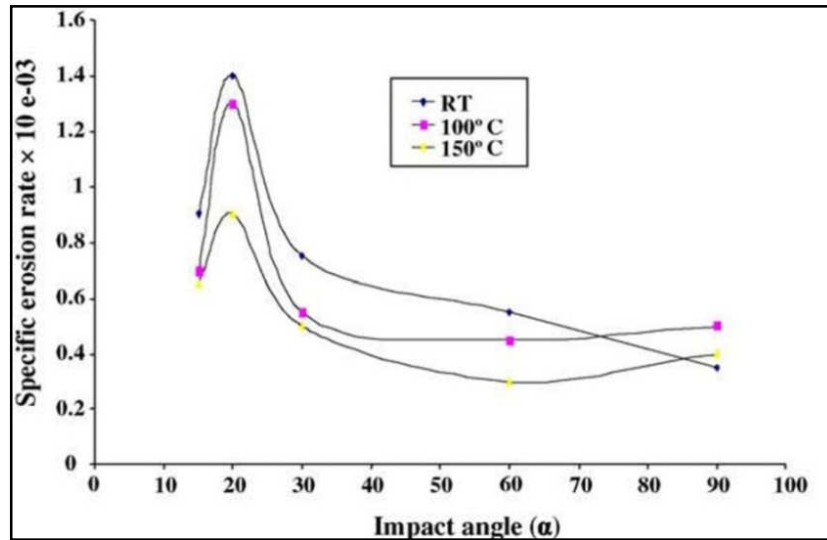
Erozif aşınma çoğu kez aşındırıcı parçacığın aşındırılacak malzemeden daha sert olduğu durumda gerçekleşir. 102, 145, 225 mikrometre ortalama çapa sahip kum parçacıkları aşındırıcı malzeme olarak kullanılmaktadır.

Divakar, hava jeti kullanmıştır. Aşındırıcı tanecikler hava jeti ile 316 çeliği olan malzemenin üzerine püskürtülmektedir. Farklı yüzdelerde soğuk plastik

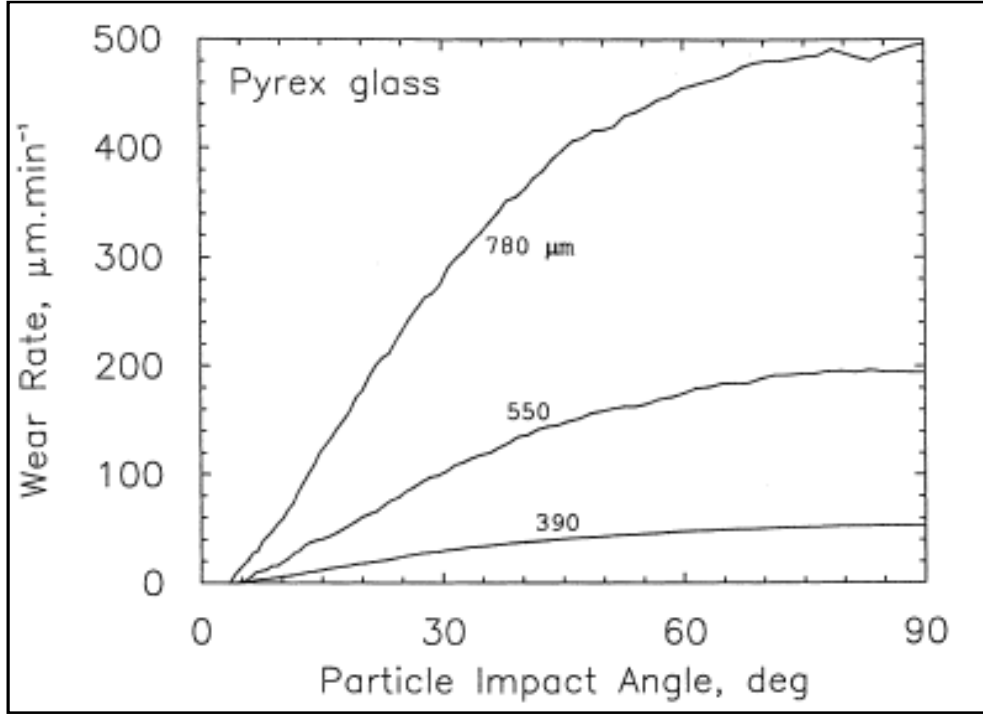
şekillendirilmiş, nitrürlenmiş malzemelerin farklı çarpma hızlarında, farklı sıcaklıklarda ve farklı ortalama aşındırıcı tane çaplarında 316 çeliğinin aşınma miktarları gözlemlenmiştir. Şekil 2.21’de çarpma açlarına bağlı olarak soğuk şekillendirilmiş 316 çeliğinin oda sıcaklığında, 100°C ve 150°C’deki özgül aşınma hızları şekil 2.20’deki deney düzeneği yardımıyla bulunmuştur.



Şekil 2.20 : Hava jeti çarpma erozyon test düzeneği [37].



Şekil 2.21 : %25 soğuk şekillendirilmiş numunelerin 102 µm ortalama aşındırıcı parçacık boyutunda ve 32m/s çarpma hızında farklı sıcaklıklarda erozyon hızları[37].

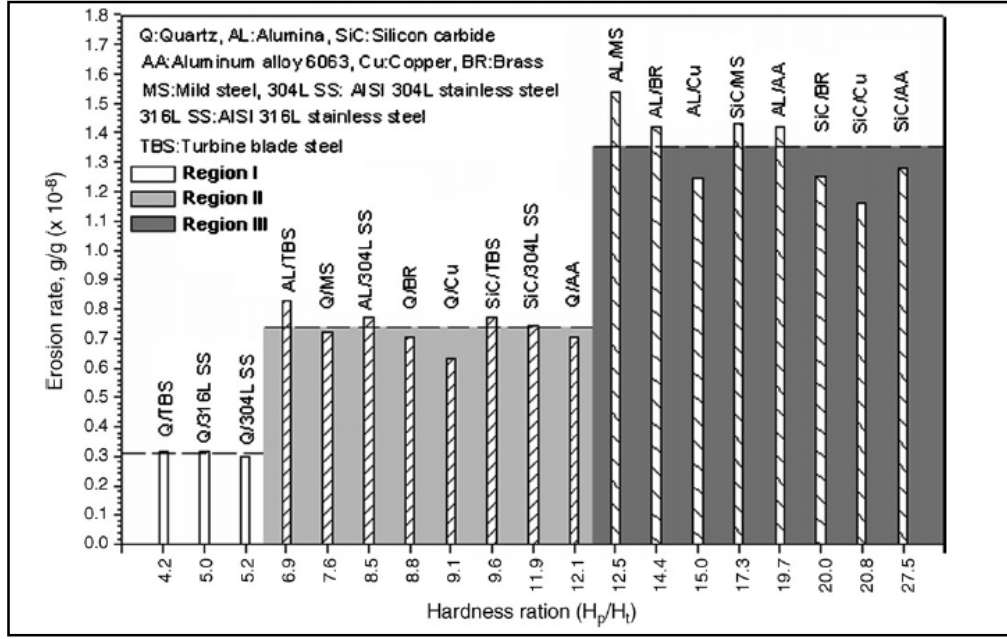


Şekil 2.22 : Pyrex cam malzemenin çarpma açısı ve tanecik boyutuna göre erozif aşınma miktarı [23].

Clark, erozif aşınma çalışmasında gevrek malzeme olarak pyrex cam kullanılmıştır. Gevrek malzemelerde aşınma hızı açıya bağlı olarak şekilde görüldüğü gibi artmaktadır ve 90° çarpma açısında ise maksimum değerine ulaşmaktadır. Şekil 2.22’de Farklı kum çaplarının aşınma hızına etkisi incelenmiştir. Aşındırıcı tanecik büyüklüğünün gevrek malzemelerde aşınma hızına etkisi, çarpma açısı artıkça aşınma hızında belirgin bir artış söz konusudur. Şekil 2.22’de tanecik çapı 2 kat artırıldığında aşınma hızı 50 mikrometre/dak’lardan 500 mikrometre/min arttırmıştır [22].

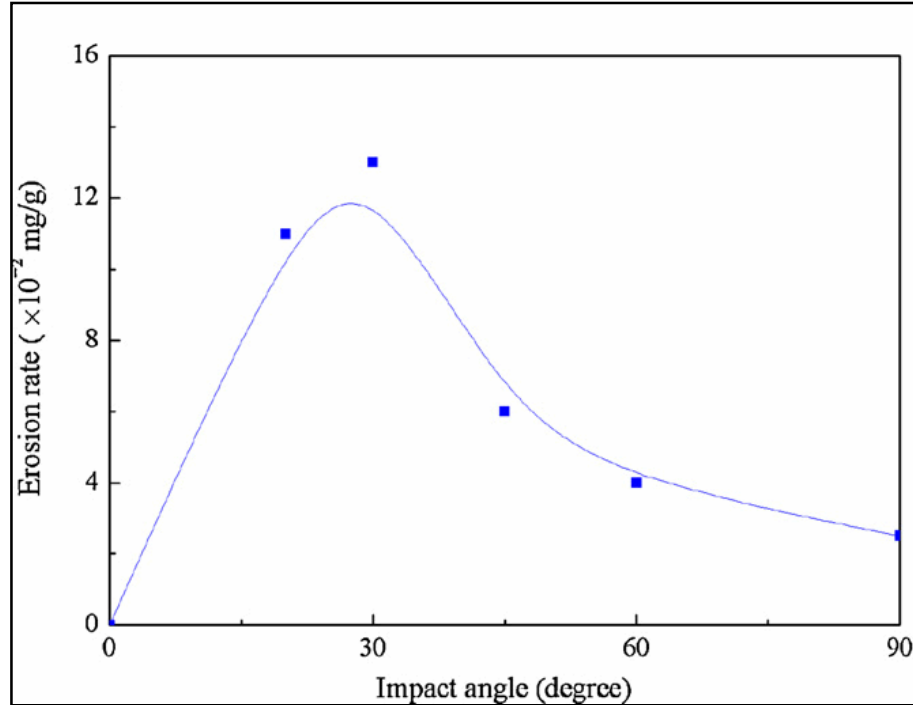
Desale, farklı malzemeler ve farklı aşındırıcı malzemeler kullanılarak da aşınma hızı tespit edilmiştir. Kum sertliği ve malzeme sertliği oranlanarak şekil 2.23’teki gibi 3 farklı aşınma hızı bölgesi bulunmuştur [38].

Kum tanecik çapı yüksek kum tane çaplarında daha etkili bir şekilde erozif aşınmaya etki etmektedir. Kum taneciğinin hızı da erozif aşınmayı etkili bir şekilde belirlemektedir. Gevrek malzemelerden sünek malzemelerin aksine aşınma mekanizmasında etkili olan deformasyon aşınmasıdır. Bu ise kum taneciklerinin malzeme yüzeyine dik çarpması ile etkili bir şekilde kendisini göstermektedir. Bu nedenle, deneylerde numunelere çarpma açısı olarak 90° kum taneciklerinin gelmesi sağlanmıştır [38].



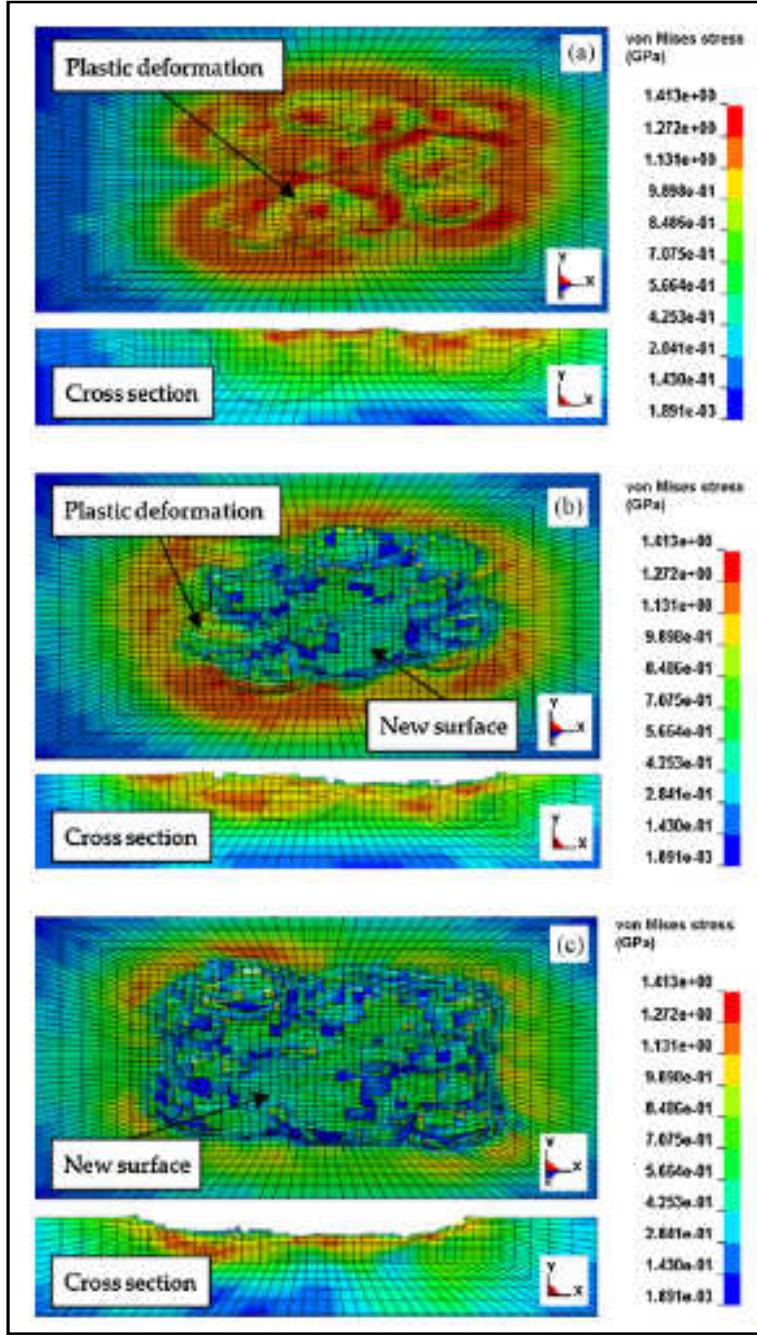
Şekil 2.23 : Malzemelerin kum sertliğine göre aşınma miktarları [38].

Diğer bir araştırmada ise Wang ve Yang, sünek ve gevrek malzemelerde eroziv aşınmanın sonlu eleman analizi yapılmıştır [39].



Şekil 2.24 : Çarpma açısına göre Ti-6Al-4V alaşımının aşınma hızı [39].

Şekil 2.24'te sünek Ti-6Al-4V alaşımının çarpma açısına göre aşınma hızı görülmektedir. Çarpma açısı yaklaşık 30° 'de alaşım malzemesi yüzeyinden azami miktarda kütle kaybı olmaktadır.



Şekil 2.25 : Aşınma modeli [39].

SiC tanecikleri rastgele sünek ve gevrek malzemeler üzerine çarpıtılarak erozif aşınma karakteristiği modellenmiştir. Şekil 2.25'te görüldüğü gibi tanecik sayısı 100 adet olarak modellenmiş ve tanecikler rastgele olarak yüzeye çarpıtılmıştır. Sünek hedef malzemesinde Johnson Cook, gevrek hedef malzemesinde Johnson Hemzholt modeli kullanılmıştır. Sünek hedef malzemesi olarak Ti-6Al-4V, gevrek hedef malzemesi olarak ise SiC seçilmiştir. Çarpma hızları 50-120 m/s mertebelerindedir. Çarpma açıları ise 0 ila 90° arasında değiştirilmiştir. Taneciklerin çapı 120 μm 'dir. R tanecik çapı olmak üzere tanecikler arasındaki mesafe $0,6 \cdot R$ 'den daha az

seçilmemiştir. Bu mesafeden daha az yerleştirildiği takdirde SiC taneciklerin yarattığı etki birbirini etkilemektedir. Erozif aşınma hızı, yüzeyden kopan malzeme miktarının toplam çarpan tanecik miktarına oranı olarak tanımlanmıştır [39].

2.3.1 Literatür İnceleme Sonuçları

Erozif aşınma ile ilgili yapılan çalışmalarda, ağırlıklı olarak ortam parametreleri olan katı-sıvı konsantrasyonu, parçacık çarpma açısı, parçacık çarpma hızının erozif aşınmaya etkisi incelendiği tespit edilmiştir. Ayrıca ilgili deneyler sonrası aşınma yüzeyinin morfolojik yapıları incelenerek hasar oluşum mekanizmaları araştırılmıştır.

2.4 Tezin Amacı

Çalışmanın ilk aşamasında deney düzeneği tasarımı incelenerek akış analizi için bir model oluşturulacaktır. ANSYS/FLUENT programı kullanılarak analiz sonucu en uygun hazne parametreleri tespit edilecektir.

Daha sonra ortam ve malzeme parametreleri sistematik olarak değiştirilerek, erozif – abrazif aşınmaya mekanizmasına ilgili parametrelerin etkileri ve dereceleri tespit edilecek ve sonuçlar yardımıyla erozif – abrazif aşınmanın **matematik modeli** oluşturulacaktır.

Çalışmanın özgünlüğünü oluşturan, mevcut çalışmalar içerisinde çoğunlukla çalışma ortamındaki parametrelerin değiştirilmesidir. Ancak aşınmaya etkili olan malzeme özellikleri (sertlik) ele alınmamıştır. Amaç bu çalışmada çevre etkilerine ek olarak malzeme sertliğinin de aşınmaya etkisini tespit etmek ve erozif-abrazif aşınmayı ifade eden bir adet **matematiksel modelinin** oluşturulmasıdır.

3. EROZİF AŞINMA DENEY DÜZENEĞİ, DENEYSEL YÖNTEM VE MALZEME

3.1 Eroziyon Aşınma Deney Düzenekleri

Fluent programı yardımıyla yapılan akış analizi ve literatürdeki tasarımlardan faydalanılarak optimum deney tasarım parametreleri belirlenmiştir. Bu doğrultuda deney tankı ve karıştırıcı ve deney numunelerin yerleri belirlenerek deney düzenekleri kurulmuştur. Kum-su karışımını tank içerisinde karıştırabilmek üzere şekil 3.1'deki gibi elektronik hız kontrollü ve potansiyometreli matkap kullanılmıştır.



Şekil 3.1 : Matkap.

Karıştırıcı tankın çapı 242 mm ve tank içerisine 3 adet engel konumlandırılmıştır. Tank 2 mm 316 paslanmaz sac'tan üretilmiştir. Karıştırıcı pervanesinin mili düzgün bir şekilde dönmesi için 2 adet rulmanla yataklanmıştır.

Kum – su karışımını döndürmek için potansiyometreli ve elektronik hız kontrollü matkap kullanılmıştır.

3.1.1 Deney düzeneğinde kullanılan ekipmanlar

Karıştırıcı pervane kapak ile birlikte şekilde 3.3'de görüldüğü gibi yekpare olarak yapılmıştır. Şekil 3.2'teki gibi deney numuneleri L profile bağlı şekil 3.4'teki kauçuk kalıp içerisine vida ile montajı yapılmaktadır.



Şekil 3.2 : L profili.



Şekil 3.3 : Karıştırıcı pervane.



Şekil 3.4 : Numunenin monte edildiği kauçuk kalıp.

Malzeme sertlikleri mikro vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. 0,5 kg 'lık yük uygulanmıştır. Matkap dönme hızı elektronik olarak ayarlanmaktadır ve 3.5'teki takometre ile de mil çıkış hızı kontrol edilmiştir. Karıştırıcı tasarımı şekil 3.3'de görülmektedir. Numuneler kalıpların içine vida ile monte edilerek karıştırıcı mile takılmaktadır.



Şekil 3.5 : Takometre.

Deneyler 4 saat süreyle yapılmaktadır. Her saat başında deney tankındaki su ve aşındırıcı kum değiştirilmektedir. Kullanılan kuvarz kumun kimyasal bileşimi çizelge 3.1 'deki gibidir.

Çizelge 3.1: Kuvarz kum kimyasal bileşeni.

Bileşen	% Konsantrasyon
SiO ₂	98,6
Al ₂ O ₃	0,3943
Fe ₂ O ₃	96,6 ppm
TiO ₂	0,04350
CaO	0,3860
MgO	0,114
Na ₂ O	0,4260
K ₂ O	0,00155
P ₂ O ₅	0,17

Şekil 3.6'da deney tesisatının montajlı hali görülmektedir. Kum-su karışımının bulunduğu 316 paslanmaz çelik tank, somunlar yardımıyla matkap tezgahının kanallarına pabuçlar yardımıyla monte edilmiştir. Karıştırıcı milin ucu, matkabın mandrenine bağlanmıştır. Malzemelere fırında St 37 çelik malzemesi için 920 °C östenitleme sıcaklığına çıkılarak Ck 45 çeliği için ise 860 °C östenitleme sıcaklığına çıkılarak su verilmiş ve sertlikleri artırılmıştır . En yüksek sertlik değeri şekil 3.7'de görüldüğü gibi mikro vickers sertlik cihazı kullanılarak 880 HV 0,5 ölçülmüştür ve sertlik değerleri farklı sıcaklıklarda temperleme yapılarak düşürülmüştür. Numunelerin su verildikten sonra üzerinden oluşan tufal sırasıyla 180, 400, 600, 1000' lik zımparalardan geçirilmiş ve en son alumina ile çuhada parlatılmıştır.



Şekil 3.6 : Deney tesisatı.



Şekil 3.7 : Micro vickers sertlik cihazı.

Farklı tanecik boyutlarında farklı devir sayılarında farklı sertlikteki malzemeler şekil 3.6’da görüldüğü gibi deney düzeneğindeki karıştırıcı tankın içine yerleştirilerek aşınma miktarları hesaplanmıştır. Aşınma miktarı, şekil 3.8’deki hassas terazi kullanılarak deney öncesi ve deney sonrası numunelerin kütleleri ölçülerek bulunmuştur.



Şekil 3.8 : Hassas terazi.

3.2 Malzeme

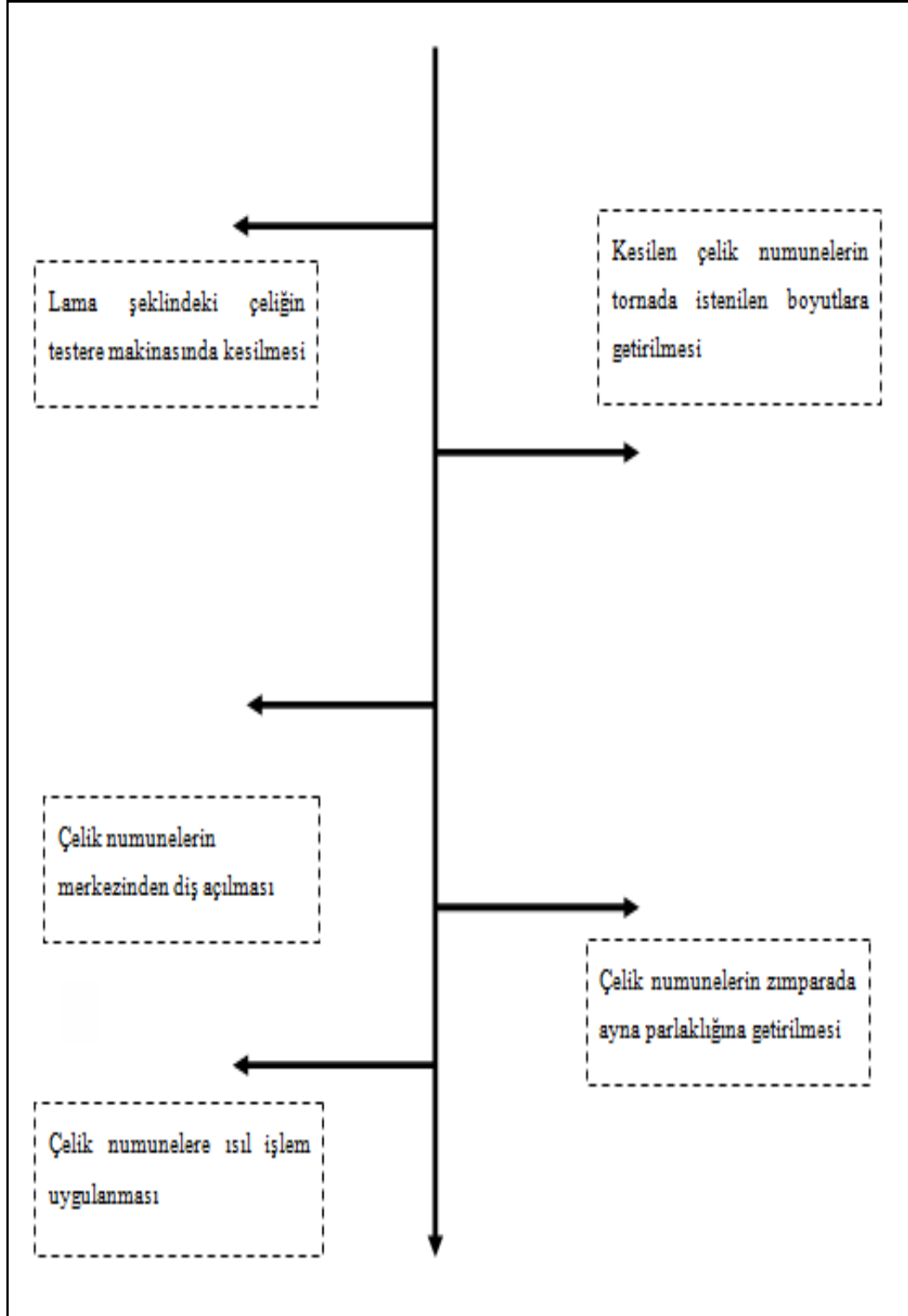
Çalışmada kullanılan çelik numuneler ilk önce hazırlanması gerçekleştirilmiştir. Deneylerde farklı sertlikteki çelik malzemeler kullanılmış ve ısıtma işlemine tabi tutulmuştur.

Kullanılan numuneler, DIN’e göre C15, St 37 ve Ck45’tir.

Konsantrasyon miktarı %20 ağırlıkça kum yüzdesinde çalışılarak sabit tutulmuştur.

Numune boyutları 20 mm x 35 mm ‘dir. Numune kalınlıkları 4 mm’dir.

3.2.1 Deney parçalarının hazırlanması



Şekil 3.9 : Deney parçalarının hazırlanması.

Şekil 3.9’da deney parçalarının hazırlanma prosesi gösterilmektedir. Lama şeklindeki çelik numuneler kesilip tornada istenen boyutlara getirilmiştir. Çelik numunelerin

merkezinden diş açılmış son aşamada ise numuneler parlatılmıştır. Son halde hazırlanan parlatılmış çelik numune şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Aşınma öncesi malzeme yüzeyi.

Kum tanecik çapı yüksek kum tane çaplarında daha etkili bir şekilde erozif aşınmaya etki etmektedir. Kum taneciğinin hızı da erozif aşınmayı etkili bir şekilde belirlemektedir.

Gevrek malzemelerde, sünek malzemelerin aksine erozif aşınmada etkili olan deformasyon aşınmasıdır. Bu ise kum taneciklerinin malzeme yüzeyine dik çarpması ile etkili bir şekilde kendisini göstermektedir.

Kum tanecik çarpma hızının, kum tanecik boyut etkisinin ve malzeme sertliğinin erozif aşınmaya etkisi incelenmiştir.

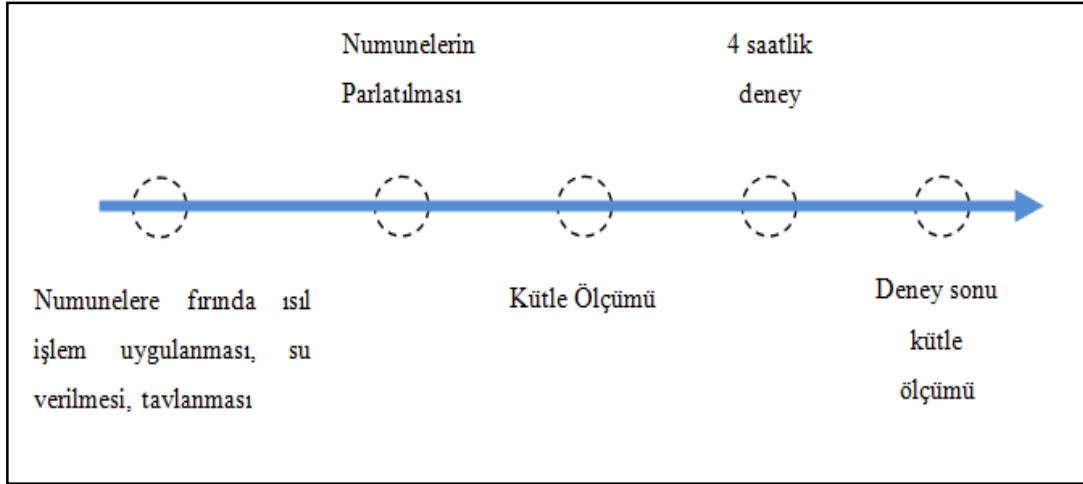
Farklı kum çapları 6 sınıf halinde bulunmaktadır. Öncelikli olarak sertliğin etkileri incelenmiş ve numunelere su verilerek hangi kum çaplarında erozif aşınmanın ve kütle kaybının ne kadar olduğu tespit edilmeye çalışılmıştır.

Çelik numunelerin sertlikleri su verme ve farklı sıcaklıklarda tavlama gibi uygulanan ısıt işlemlerle değiştirilmiştir.

3.3 Deneysel Yöntem

Şekil 3.11’de görüldüğü gibi öncelikli olarak bir deney sistemi oluşturulmuştur.

3.3.1 Deney sistemi



Şekil 3.11 : Deney sisteminin aşamaları.

3.3.2 Deney parçalarına ısıtma işlemi uygulanması

Deney parçalarına ısıtma işlemi uygulanarak farklı sertliklerde numuneler elde edilmiştir. DIN Ck 45 çeliği için östenitleme sıcaklığı 860° C’dir [40]. Ck 45 çelik numuneler 860°C östenitleme sıcaklığına çıkılarak 1 saat süreyle fırında bırakılmıştır. Daha sonra fırından çıkartılarak su verilmiştir. Numuneler su verme işleminden sonra 200° C, 250 °C, 300° C, 400° C, 500° C sıcaklıklarda 1 saat süreyle fırında bekletilerek tavlama yapılmıştır. Daha sonra çıkarılarak parlatılmış ve micro vickers sertlik cihazında sertlik ölçümü yapılmıştır.

Sertlik ölçümünde uygulanan yük 0,5 kg ve kullanılan büyütme merceği 50x’dir. Çizelge 3.2’de malzemelerin farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen vickers sertlik değerleri verilmiştir. Tavlama sıcaklığı yükseldikçe sertlik değerlerinde düşme gözlenmektedir.

St 37 malzemesi östenitleme sıcaklığı 920° C’dir [41]. St 37 çeliği 920° C östenitleme sıcaklığına çıkılarak su verilmiştir. St 37 çeliğinin, su verildikten sonra ve su verilmemiş haldeki sertlik değerleri çizelge 3.3’de belirtilmiştir. Bu durumda St 37 malzemesi kullanılarak elde edilen en yüksek sertlik değeri 510 HV (0,5 kg yük altında) ve en düşük sertlik değeri ise 245 HV (0,5 kg yük altında) bulunmuştur.

Çizelge 3.2 : Su verilmiş ve ısıtılmış malzemelerin sertlik değerleri.

Isıl Durum	Fırın süresi	SICAKLIK	MICRO VICKERS	MALZEME
			(HV 0,5)	
tavlanmamış		860° C	880	Ck 45
tavlanmış	1 saat	200° C	707	Ck 45
tavlanmış	1 saat	250° C	590	Ck 45
tavlanmış	1 saat	300° C	520	Ck 45
tavlanmış	1 saat	400° C	460	Ck 45
tavlanmış	1 saat	500° C	400	Ck 45

Çizelge 3.3 : Ck 45 ve st 37 numunelerin sertlik değerleri.

MALZEMELER	Vickers Sertlik HV 0,5	Isıl İşlem
Ck 45	298	Su verilmemiş
St 37	245	Su verilmemiş
St 37	510	Su verilmiş
C 15	185	Su verilmemiş

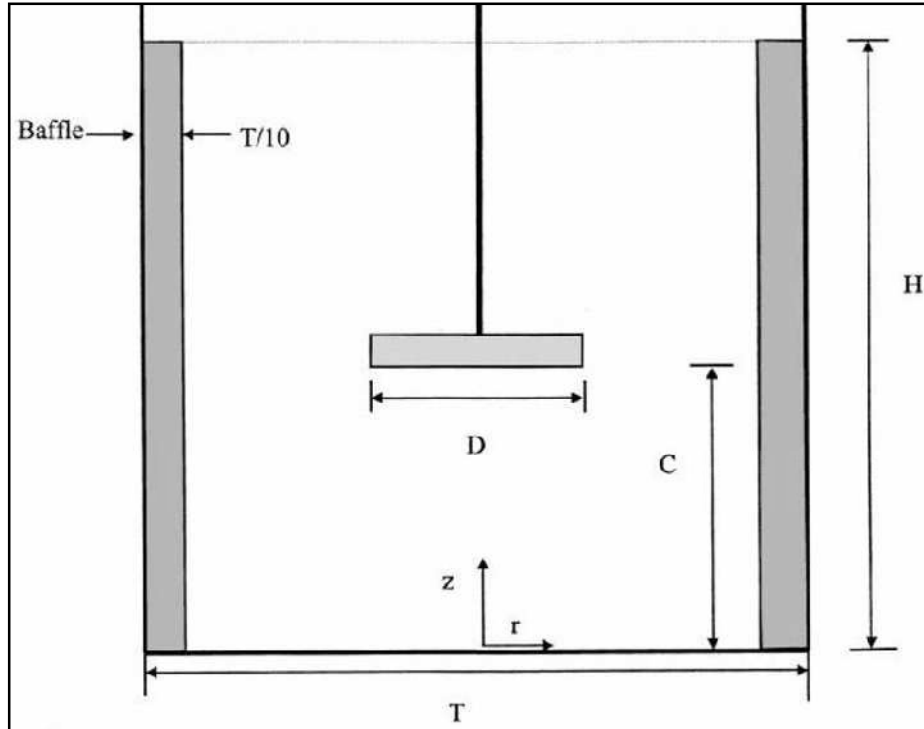
Elde edilen bu değerler doğrultusunda kullanılan tavlama sıcaklıklarından istenilen şekilde sertlik kademelendirmesi yapılabileceği anlaşılmış ve deney planı oluşturulabileceği belirlenmiştir.

4. EROZİF AŞINMA DENEY TANKI TASARIMI

4.1 Amaç

Çalışmanın ilk aşamasında deney düzeneği tasarımı incelenecektir. ANSYS/FLUENT programı yardımıyla akış hız dağılımı incelenecek ve gerçekleştirilecek analiz sonucu en uygun hazne parametreleri tespit edilecektir.

Tank parametreleri, hazne içersindeki sıvının akışını etkilemektedir. Öncelikli olarak çalışmada kullanılacak deney tankının parametreleri optimize edilerek belirlenmiştir. Aşınma deneyi deney düzeneğini oluşturmada önce amaç, ilgili parametrelerin analiz edilmesi, sistematik olarak değiştirilerek, efektif ve homojen bir hız dağılımın gösteren akışın elde edilmesidir. Sıvının tek kütle halinde dönmemesi için tank içerisinde engellere ve homojen bir karışımın sağlanması için bir karıştırıcıya ihtiyaç vardır [42, 43]. Şekil 4.1’de bir tank modeli örnek gösterilmiştir.

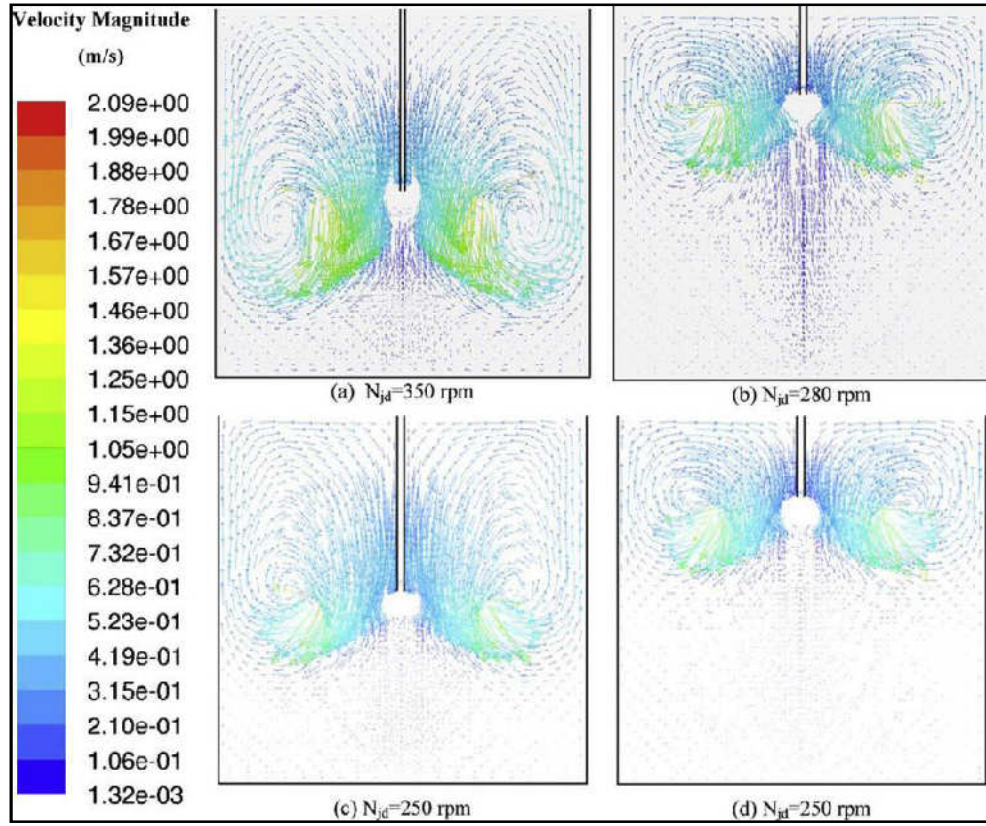


Şekil 4.1 : Tank modeli [44].

4.2 Eroziyon Tankında Fluent Programı İle Akış Analizinin Yapılması Ve Tasarım Parametrelerinin İncelenmesi

4.2.1 Eroziyon tankında akışın modellenmesi ve deney tankının optimize edilmesi

Khazam çalışmasında şekil 4.2'deki gibi ilgili parametrelerden pervanenin kap içerisindeki yüksekliğinin ve devir sayısının değiştirilmesiyle akışın nasıl değiştiği göstermiştir. FLUENT kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada türbülans oluşumu görülmektedir [45].



Şekil 4.2 : Aşınma tankında akış analizi [45].

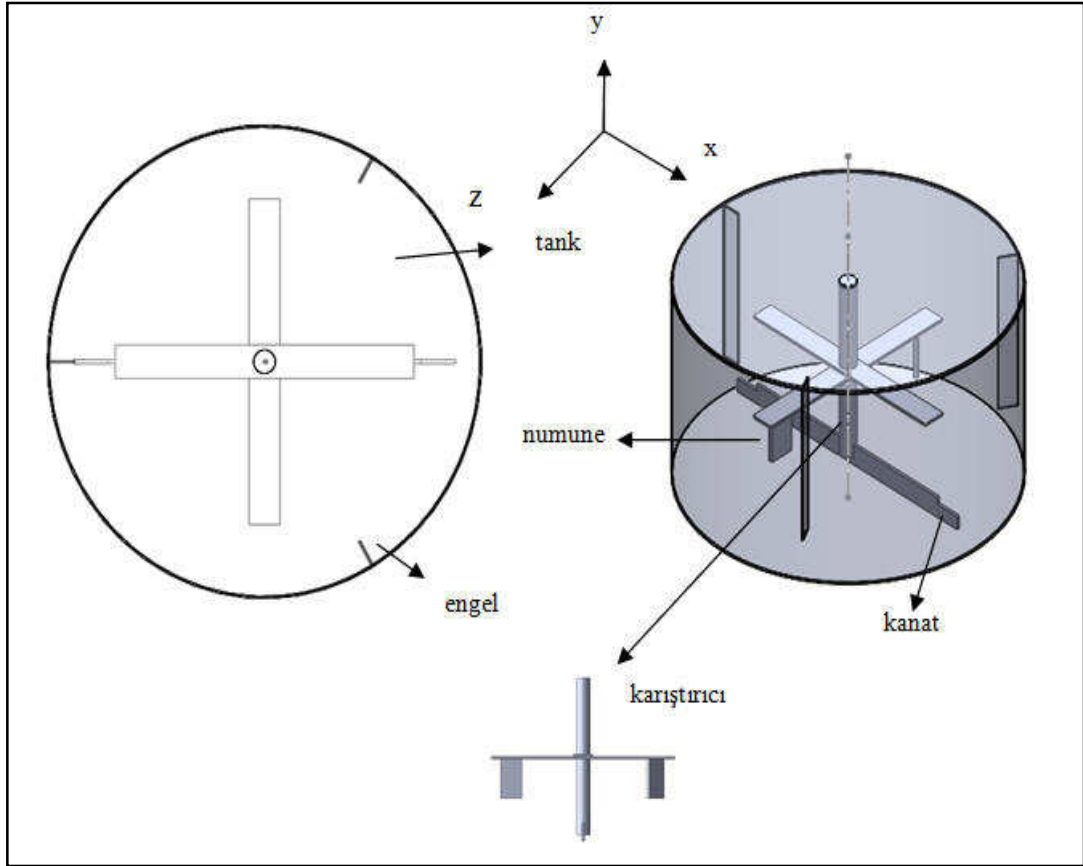
Eroziyon aşınma deney düzeneği şekil 4.3'te görüldüğü gibi tasarlanmıştır. Tankın merkezinde karıştırıcı bir pervane tank içerisindeki kumun havalandırmasını, tank içerisindeki kanatlar da tank içerisinde kum-su karışımının yukarı kısımlara çıkması ve homojen bir karışımın sağlanması için tasarlanmıştır.

Şekil 4.4'te belirtilen parametreler, hazne içerisindeki sıvının akışını etkilemektedir. Aşınma deneyi deney düzeneğini oluşturmadan önce amaç, ilgili parametrelerin analiz edilmesi, sistematik olarak değiştirilerek, türbülans oluşturmeyen ve homojen

bir hız dağılımının gösteren akışın elde edilmesidir. Analiz esnasında FLUENT programı kullanılmıştır.

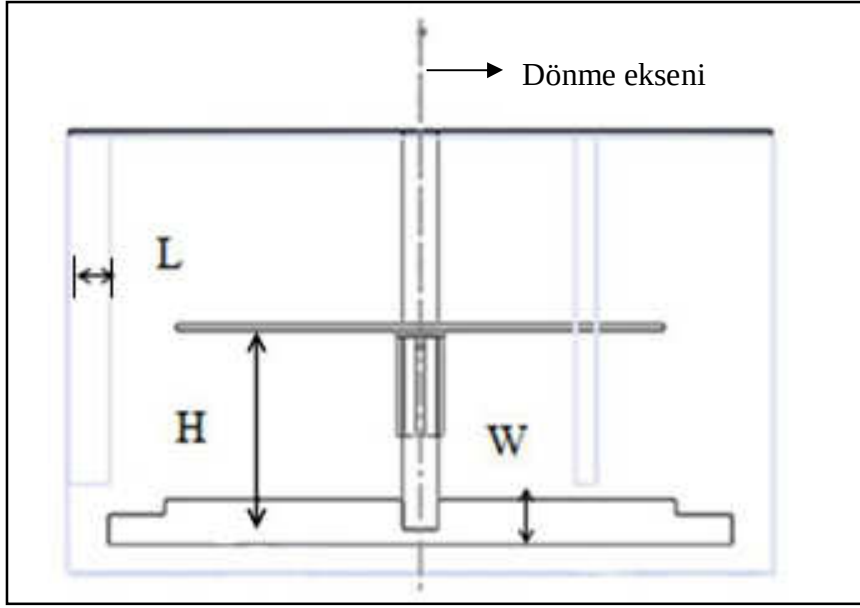
4.2.2 Eroziyon aşınma deney tankı modeli ve tank parametreleri

Tank içerisindeki tasarım parametreleri değiştirilerek Ansys/Fluent programında hız analizi yapılmış ve 3 doğrultuda da numuneye gelen hız vektörleri incelenmiştir.

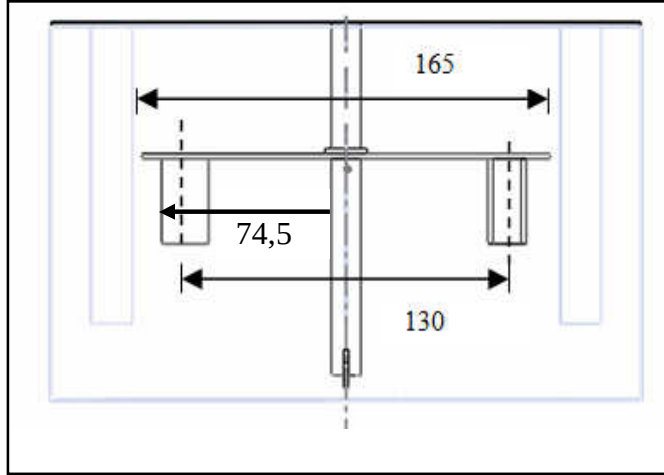


Şekil 4.3 : Eroziyon aşınma deney düzeneği tasarımı.

Şekil 4.3'te eroziyon aşınma tank modeli gösterilmiştir. Şekil 4.5'te gösterildiği gibi tank modelinin çapı 240 mm olup tank içerisinde dikdörtgen kesitli 3 adet engel vardır. Tank yüksekliği 14.5 cm dir. Tank hacmi 6.5 lt'dir. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi tank içerisindeki engel genişlikleri, L; 14 mm, 19 mm, 24 mm, 29 mm ve 34 mm olarak sırasıyla değiştirilmiştir. Tank içindeki numunenin dikey yüksekliği, H; 44 mm, 54 mm, 64 mm, 74 mm, 84 mm, 94 mm olarak değiştirilmiştir. Pervane yüksekliği, W ise 5 mm, 10 mm ,15 mm, 20 mm ve 24 mm olarak değiştirilmiş ve hız vektörlerine bakılmıştır.



Şekil 4.4 : Tasarım Parametreleri.



Şekil 4.5 : Numunenin konumu.

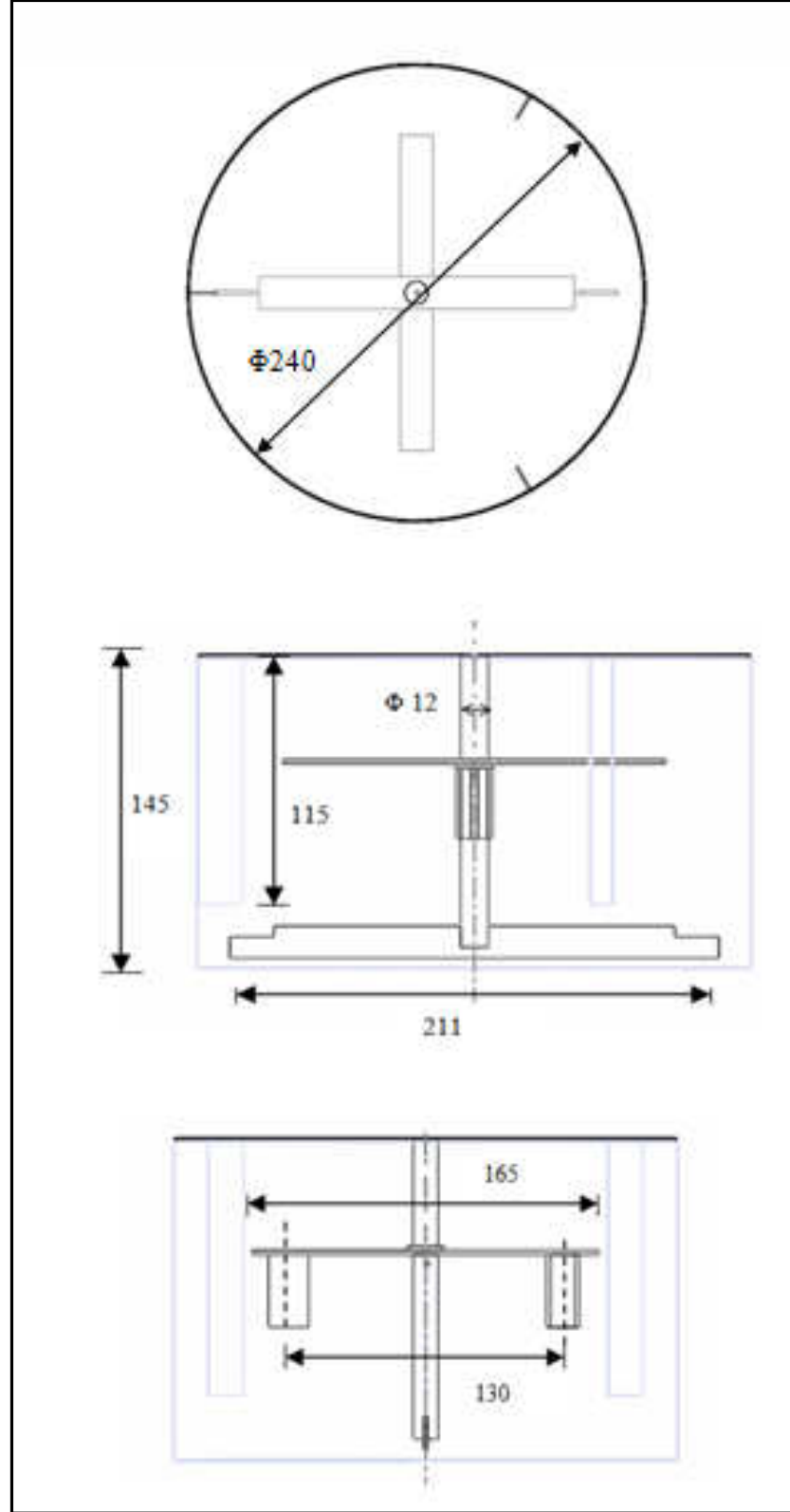
Teorik olarak tank içerisindeki milin dönme eksenin r yarıçapı uzaklıktaki teğetsel hız değeri;

$$V = \omega * r \quad (4.1)$$

olarak hesaplanmaktadır. Karıştırıcı mil 600 d/d ile döndürülmüştür. Şekil 4.5'teki modelde numunenin dış kenarının dönme ekseninden uzaklığı 74,5 mm'dir. Teorik olarak hesaplanan hız değeri;

$$V = 62.83 \text{ rad/s} * 74,5 \text{ mm} = 4680 \text{ mm/s} = 4.680 \text{ m/s} \text{ 'dir.}$$

Ansys/Fluent de gerçekleştirilen simulasyonlar sonucunda şekil 4.6'daki erozif-abrazif aşınma tankında en yüksek 3.5 m/s hız değeri bulunmuştur.

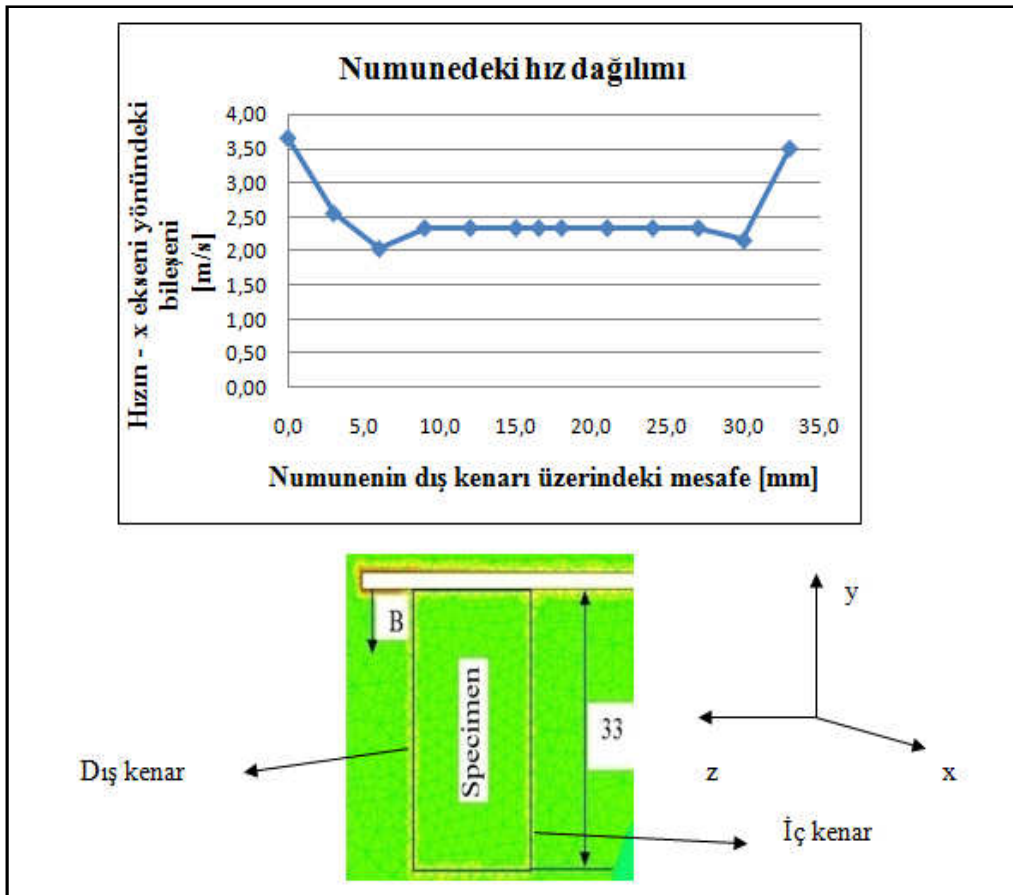


şekil 4.6 : Aşınma tankının boyutları.

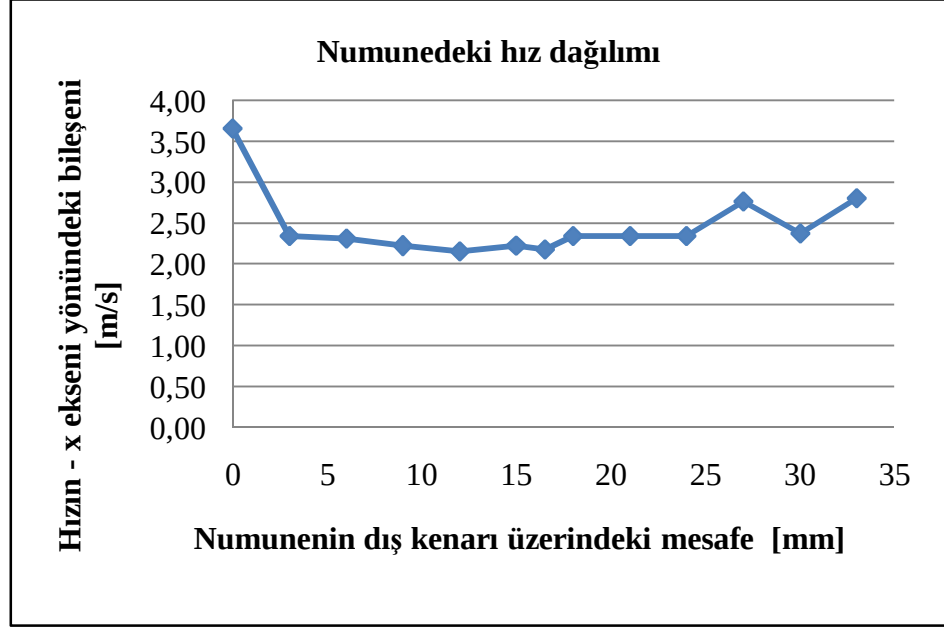
4.2.3 Hız dağılımının analizi ve tasarım parametrelerinin optimize edilmesi

Ansys/Fluent programı kullanılarak numune dış kenar boyunca şekil 4.6’da görüldüğü gibi B noktasında başlanarak numunenin alt uç kenar noktasına kadar hız dağılımı 3 mm aralıklarla grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekil 4.7 ve şekil 4.8’de görüldüğü gibi 34 mm engel genişliğinde, 19 mm engel genişliğine göre numuneye gelen çarpma hızı homojen bir hız dağılımı göstermektedir. Ayrıca, numunedeki hız değerleri bir miktar daha yüksek değerlerdedir. Bununla birlikte, 15 mm kanat genişliğine sahip tasarımlar, 24 mm kanat genişliğine sahip tasarımlara göre daha üniform bir hız dağılımı göstermektedir. Son olarak numunenin dikey yüksekliği 44, 54, 84 ve 94 mm olan tasarım değerlerinde daha yüksek hız değerleri elde edilmiştir. Her modelde x eksenine 90° ve 45° duran 2 adet numune bulunmaktadır. X eksenine 90 ° dik konumda duran numune üzerindeki hız dağılımına bakılmıştır.

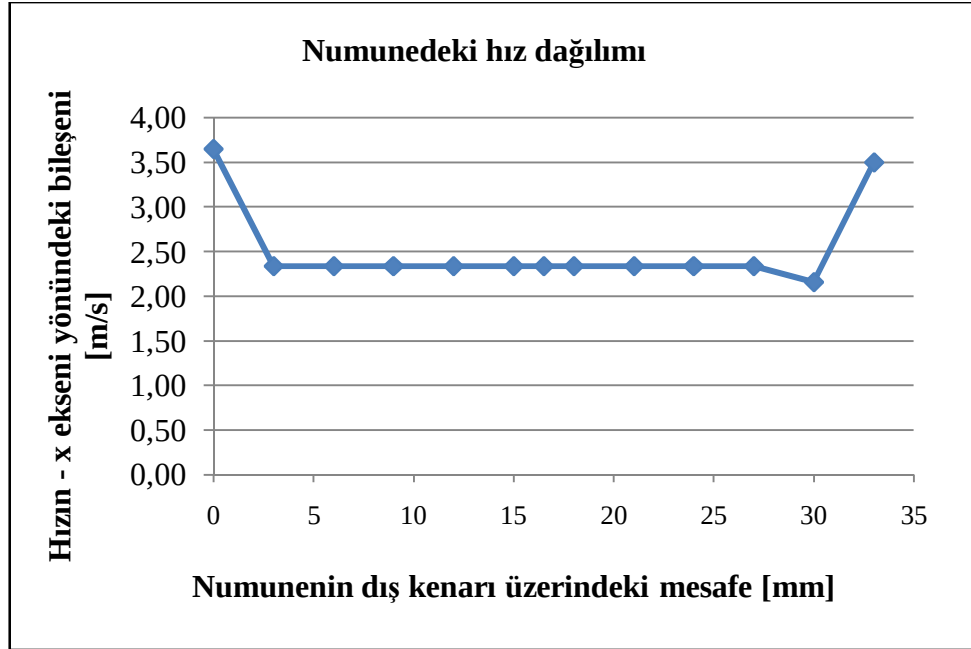


Şekil 4.7 : 84 mm numune dikey yükseklikteyken, 15 mm kanat yüksekliği ve 34 mm engel genişliğine sahip erozif-abrazif aşınma tankındaki numunenin dış kenarı boyunca x-doğrultusundaki hız bileşinin dağılımı.

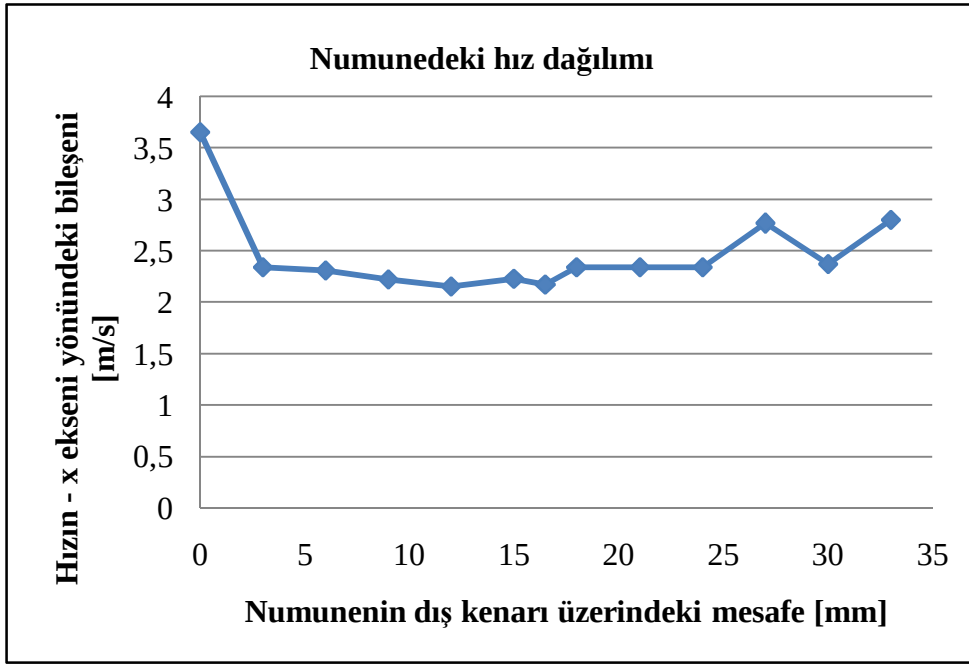


Şekil 4.8 : 84 mm numune dikey yükseklikteyken, 15 mm kanat yüksekliği ve 19 mm engel genişliğine sahip erozif-abrazif aşınma tankındaki numunenin dış kenarı boyunca x-doğrultusundaki hız bileşinin dağılımı.

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi 19 mm engel genişliğinde numune dış kenar boyunca homojen olmayan ve ortalama olarak biraz daha düşük çarpma hızı değeri elde edilmiştir.

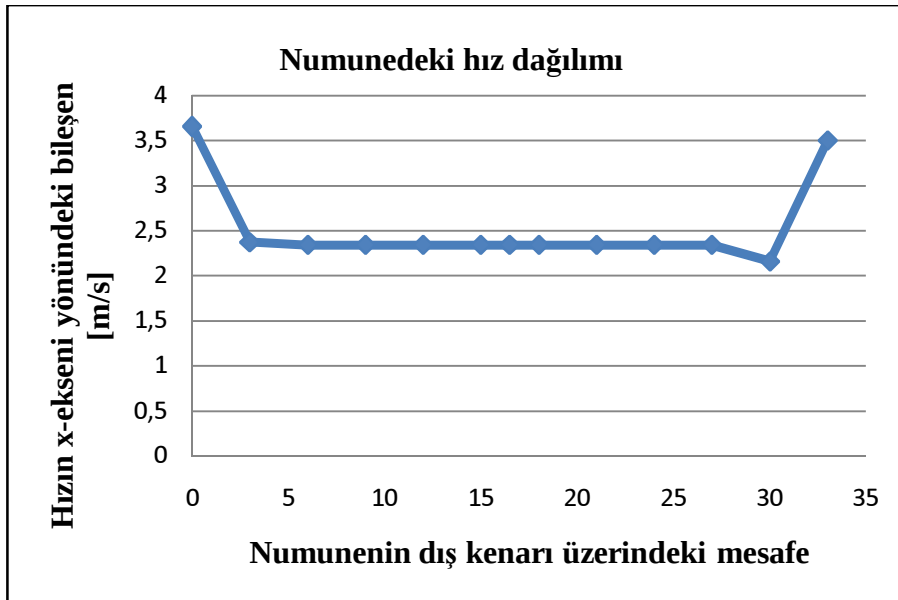


Şekil 4.9 : 54 mm numune dikey yükseklikteyken, 15 mm kanat yüksekliği ve 34 mm engel genişliğine sahip erozif-abrazif aşınma tankındaki numunenin dış kenarı boyunca x-doğrultusundaki hız bileşinin dağılımı.



Şekil 4.10 : 54 mm numune dikey yükseklikteyken, 24 mm kanat yüksekliği ve 34 mm engel genişliğine sahip erozif-abrazif aşınma tankındaki numunenin dış kenarı boyunca x-doğrultusundaki hız bileşinin dağılımı.

Şekil 4.9 ve şekil 4.10'a göre kanat yüksekliği 15 mm olan tasarımda hız dağılımı, kanat yüksekliğinin 24 mm olduğu hız dağılımına göre biraz daha homojen olduğu görülmektedir.

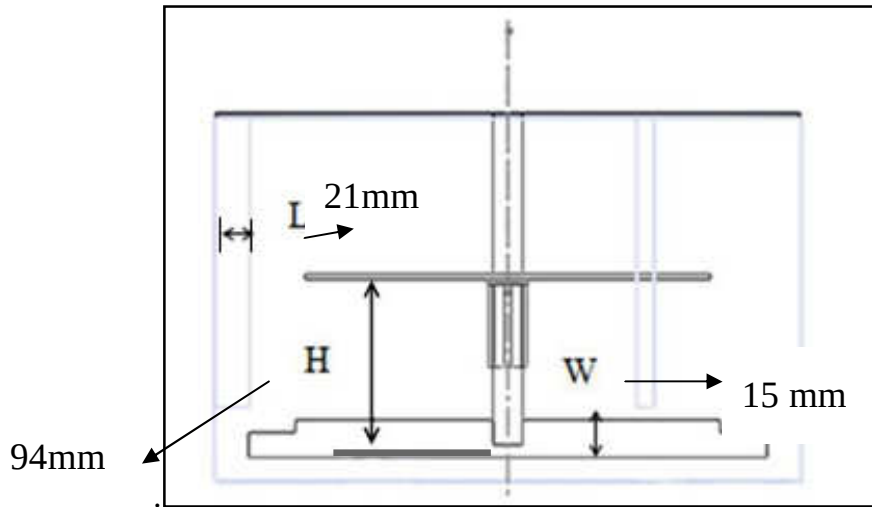


Şekil 4.11 : 94 mm numune dikey yükseklikteyken, 15 mm kanat yüksekliği ve 19 mm engel genişliğine sahip erozif-abrazif aşınma tankındaki numunenin dış kenarı boyunca x-doğrultusundaki hız bileşinin dağılımı.

Şekil 4.11’de H, 94 mm iken numunedeki hız dağılımı gösterilmiştir. 15 mm kanat yüksekliği ve 19 mm engel genişliğine sahip tank tasarımı, H, numune konumu 94 mm iken homojen bir hız dağılımı ve maksimum hız değerlerine ulaşılan tasarımlardan biridir. Numune yüksekliği, H; 94 mm ve kanat genişliği 15 mm iken engel genişlikleri 19 ve 24 mm tasarımlarında maksimum çarpma hızları ve homojen hız dağılımları gözlenen tasarımlardır.

Çalışmada analiz sonuçlarında elde edilen homojen ve maksimum hız dağılımını veren tasarım parametrelerinden biri olan ve numunenin tank içerisindeki konumunu gösteren H= 94 mm değeri literatürde de numunenin bulunduğu tank içerisindeki aynı konuma denk gelmektedir. Yine H=94 mm ve W=15 mm iken L = 19 mm ve L=24 mm değerini aldığı anda homojen ve maksimum bir hız dağılımı elde edilmektedir.

Literatürde ise parçacık görüntü velosimetresi (PIV) kullanılarak efektif aşınmanın olduğu bölgeler deneysel olarak gözlemlenmiştir ve numuneler bu bölgelere yerleştirilmiştir. Literatürde L engel genişlikleri tank tasarımlarında 20 mm veya 25 mm alınmıştır.



Şekil 4.12: Belirlenen ana parametrelerin değerleri

Çalışma sonunda homojen ve maksimum hız dağılımını sağlayan tank tasarım parametre değerleri ve literatürde yerleştirilen numunenin konumu ve engel genişlikleri değerleri dikkate alınarak tank parametreleri;

- Engel genişliği, L: 21 mm
- Numunenin tank içerisindeki konumu, H: 94 mm dikey yükseklik

- Kanat genişliği, W : 15 mm alınarak şekil 4.12’de görüldüğü gibi tank tasarımı yapılmıştır. Bu aşamadan sonra karıştırıcı mil tasarımı da yapılarak deneylere başlanmıştır.

Deney düzeneğinin ana paramerelerinin tespit edilmesinden sonra deney düzeneğinin imalatı aşamasına geçilmiştir. İmalatın ilk aşamasında deney düzeneği için gerekli malzeme listesi tespit edilmiştir. Tank ve mil tasarımı için 316 paslanmaz çelik sac ve mil alınmıştır. % 99 saflıkta 0.1 mm ile 0.9 mm tanecik çapında değişen kuvars kumu temin edilmiştir. Kum tanelerini belli bir aralıkta belirleyebilmek için farklı süzgeç deliklere sahip elekler alınmıştır. Son olarak karıştırıcı mili döndürmek için potansiyometreli elektronik hız kontrollü matkap satın alınmış ve deney tesisatının kurulumu yapılmıştır. Şekil 4.13 ve şekil 4.14’te deney tankının ve kapağının görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4.13 : Aşınma tankının görünüşü.

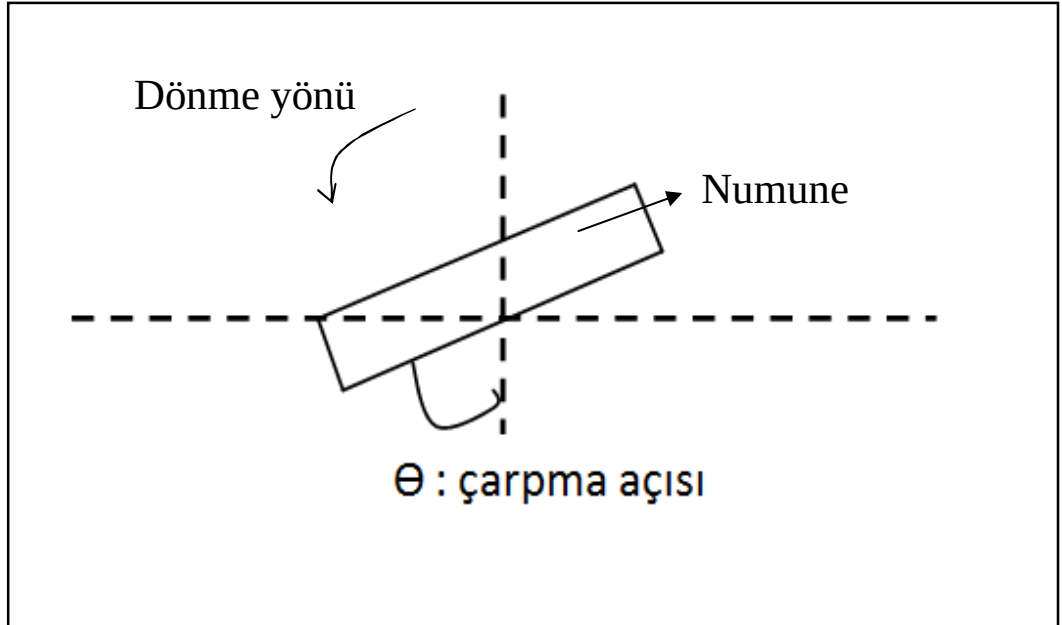


Şekil 4.14 : Aşınma tankının engelleri ve kapak.

5. ÇARPMA HIZI, ÇARPMA AÇISI, MALZEME SERTLİĞİ VE AŞINDIRICI KUM TANECİK ÇAPININ EROZİF AŞINMAYA ETKİSİ VE MATEMATİKSEL MODELİN OLUŞTURULMASI

5.1 Çarpma Açısının Çelik Numunelerde Erozif Aşınmaya Etkisi

Deneylerde, Çizelge 5.1 ve çizelge 5.2'deki gibi St 37 su verilmiş ve St 37 ısıtılmış çelik numuneler kullanılarak farklı çarpma açılarında malzemede meydana gelen kütle kayıpları incelenmiştir. Çizelge 5.1 ve çizelge 5.2'de gösterildiği gibi çarpma açıları 15°, 30°, 45°, 60°, 90° olacak şekilde belirlenmiş ve her çarpma açısındaki erozif aşınma miktarı bulunmuştur. Kum-su konsantrasyonu ağırlıkça 20 % kum olacak şekilde ve her 1 saatte bir aşındırıcı kum ve su karışımı değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Deney sonunda kütle kayıpları hassas terazide ölçülmüştür. Dönme hızı deneylerde 700 d/d olarak uygulanmıştır. Çarpma açısı şekilde 5.1'te gösterildiği gibi ayarlanmıştır.



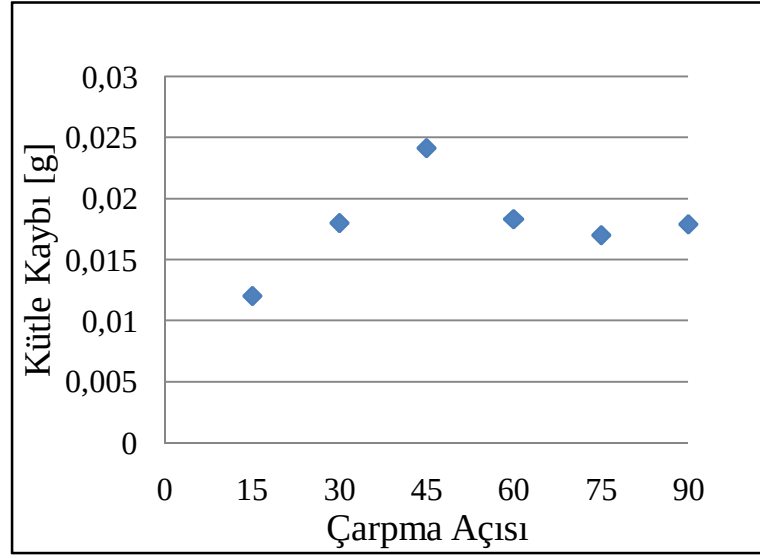
Şekil 5.1 : Çarpma Açısı.

Çizelge 5.1 : Farklı çarpma açılarında su verilmiş St 37 numunelerde kütle kayıpları.

Kütle Kaybı [g]	Çarpma Açısı [°]
0,0179	90
0,0170	75
0,0183	60
0,0241	45
0,0180	30
0,0120	15

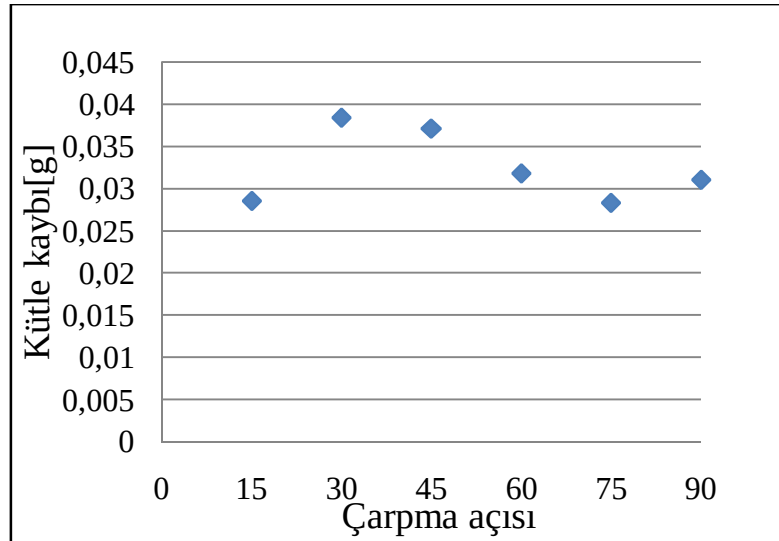
Çizelge 5.2 : Farklı çarpma açılarında St 37 ısıtma işlemi uygulanmamış kütle kayıpları.

Kütle Kaybı [g]	Çarpma Açısı [°]
0,0310	90
0,0283	75
0,0318	60
0,0371	45
0,0384	30
0,0285	15



Şekil 5.2 : St 37 su verilmiş çelik numunede çarpma açısına göre kütle kaybı.

Şekil 5.3’de ısıtılmış St 37 çelik numunede maksimum kütle kaybı 30° çarpma açısında gözlemlenmiştir. Şekil 5.2’de ise su verilerek sertliği artırılan St 37 çelik numunesinde ise maksimum erozif aşınma hızı 45° çarpma açısında keskin bir pik yaptığı gözlemlenmiştir. Malzeme sertliği artıkça maksimum erozif aşınma çarpma açısı 30° dan 45° ye doğru kayma eğilimi göstermiştir. Sünek malzemelerde meydana gelen aşınma mekanizması kesme kuvvetinin etkisi altında olup bu da çarpma açısının daha küçük olduğu açı değerlerinde etkili olmaktadır.



Şekil 5.3 : St 37 su verilmemiş çelik numunede çarpma açısına göre kütle kaybı.

Gevrek malzemede ise aşınma mekanizmasında deformasyon aşınmasının etkisi söz konusudur. Deformasyon mekanizması çarpma açısının 90 ° olduğu durumda etkisi

göstermektedir. Sünek karakterden gevrek karaktere doğru geçerken kütle kaybının maksimum olduğu çarpma açısı da küçük çarpma açısından daha büyük çarpma açılarına doğru kaymaktadır.

5.2 Çarpma Hızı Ve Aşındırıcı Tanecik Büyüklüğünün Çelik Numunelerde Eroziyon Aşınmaya Etkisi

Çarpma hızı ve tanecik büyüklüğü eroziyon-aşınma miktarı etkileyen önemli ortam parametreleridir. Bu çalışmada, 100-300 mikron aşındırıcı kum tanecik boyutu (ortalama tane boyutu 200 μm) ve 300-505 mikron aşındırıcı kum tanecik boyutu (ortalama tane boyutu 400 μm) kullanılarak 300 d/d, 500 d/d ve 700 d/d farklı dönme hızlarında; ısıtılmış işlem görmemiş St 37(245 HV), su verilmiş St 37 (510 HV), su verilmiş Ck 45 (880 HV) ve su verilmiş daha sonra 500 °C de 1 saat tavllanmış Ck 45 (400 HV) çelik numuneler kum-su karışımı deney tankında döndürülerek 4 saatlik deneyler yapılmış ve kütle kayıpları çizelge 5.3, çizelge 5.4, çizelge 5.5 ve çizelge 5.6'daki gibi elde edilmiştir. Çarpma açısı sabit olup 90°'dir.

Çizelge 5.3 : Ck 45 su verilmiş numunelerin farklı aşındırıcı çaplarında ve çarpma hızlarında kütle kayıpları.

Sertlik [VSD]	Tanecik çapı [μm]	Devir[d/d]	mg[kütle kaybı]
880	300-505	700	6,4
880	300-505	500	3,4
880	300-505	300	1,8
880	100-300	700	3,1
880	100-300	500	0
880	100-300	300	0

Çizelge 5.4 : St 37 su verilmiş numunelerin farklı aşındırıcı çaplarında ve çarpma hızlarında kütle kayıpları.

Sertlik [HVN]	Tanecik çapı [μm]	Devir[d/d]	mg[kütle kaybı]
510	300-505	700	18,4
510	300-505	500	7,1
510	300-505	300	5,3
510	100-300	700	10,9
510	100-300	500	2,8
510	100-300	300	1,1

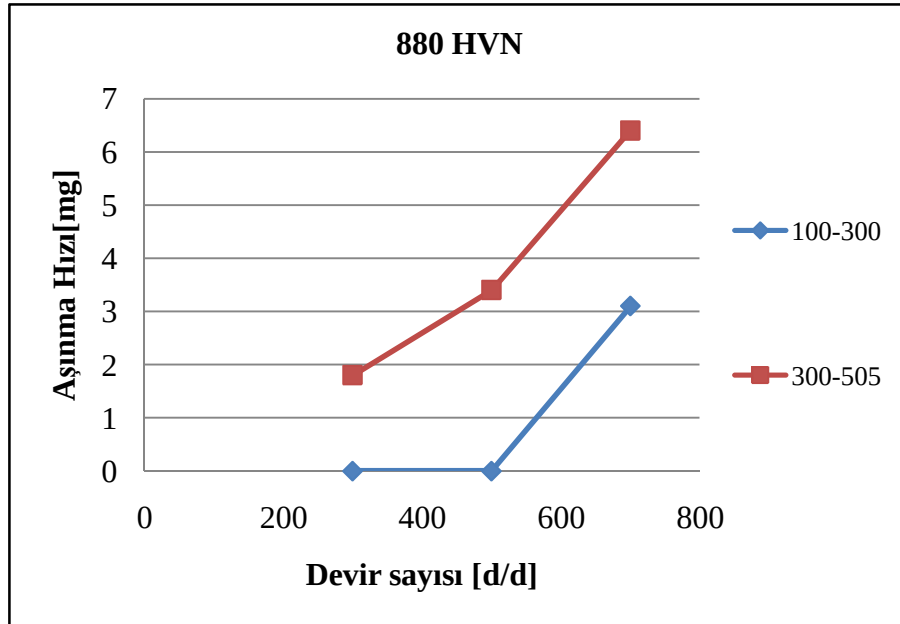
Çizelge 5.5 : Ck 45 su verilmiş ve 500° C’de tavlanmış numunelerin farklı aşındırıcı çaplarında ve çarpma hızlarında kütle kayıpları.

Sertlik [HVN]	Tanecik çapı [μm]	Devir[d/d]	mg[kütle kaybı]
400	300-505	700	20,1
400	300-505	500	13,5
400	300-505	300	6,6
400	100-300	700	14,7
400	100-300	500	3,6
400	100-300	300	2,1

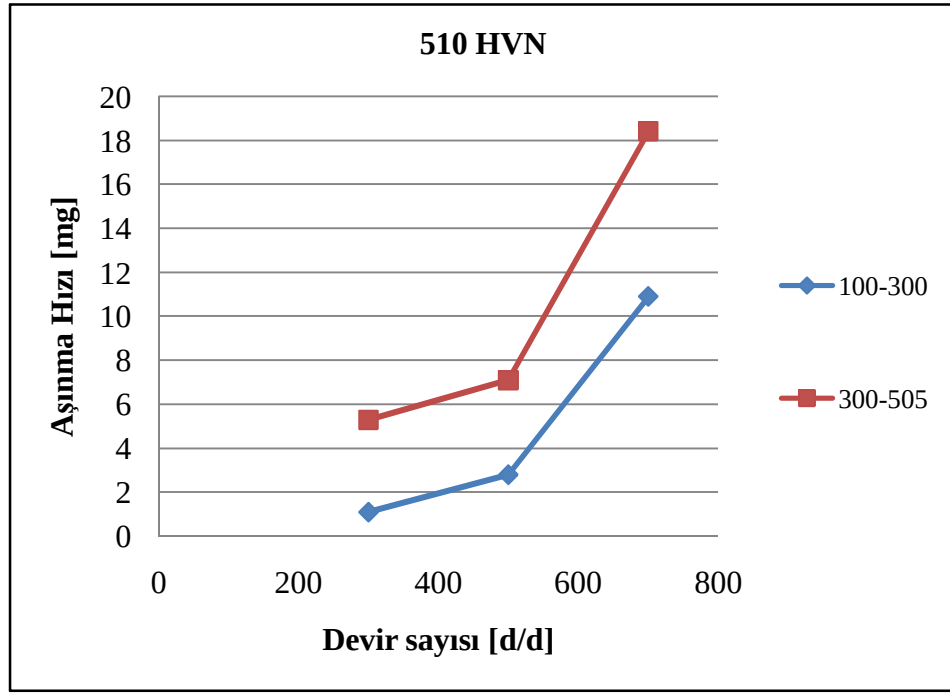
Çizelge 5.6 : St 37 su verilmemiş numunelerin farklı aşındırıcı çaplarında ve çarpma hızlarında kütle kayıpları.

Sertlik [HVN]	Tanecik çapı [μm]	Devir[d/d]	mg[kütle kaybı]
245	300-505	700	31,4
245	300-505	500	22,4
245	300-505	300	12,8
245	100-300	700	19,7
245	100-300	500	5,1
245	100-300	300	3,7

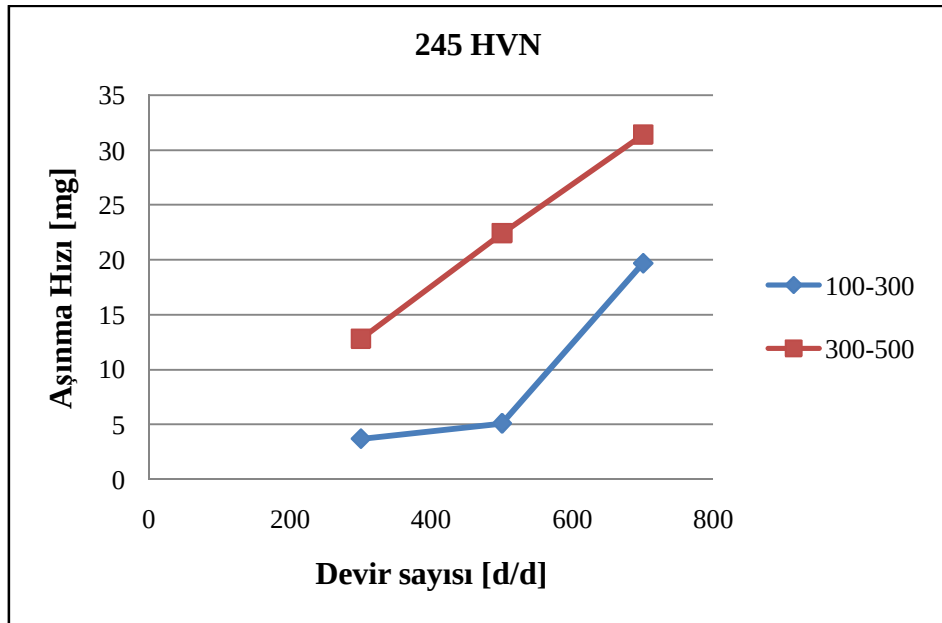
Şekil 5.4 ve şekil 5.5'te görüldüğü gibi tanecik çarpma hızı arttıkça çelik malzeme yüzeyindeki kütle kaybı da artmaktadır. 100-300 μm aşındırıcı tanecik çapında 300 d/d ve 500 d/d dönme hızlarında aşınma mekanizmasının başlamadığı görülmektedir.



Şekil 5.4 : Su verilmiş Ck 45 numunede 300 d/d, 500 d/d ve 700 d/d dönme hızlarındaki kütle kaybı.

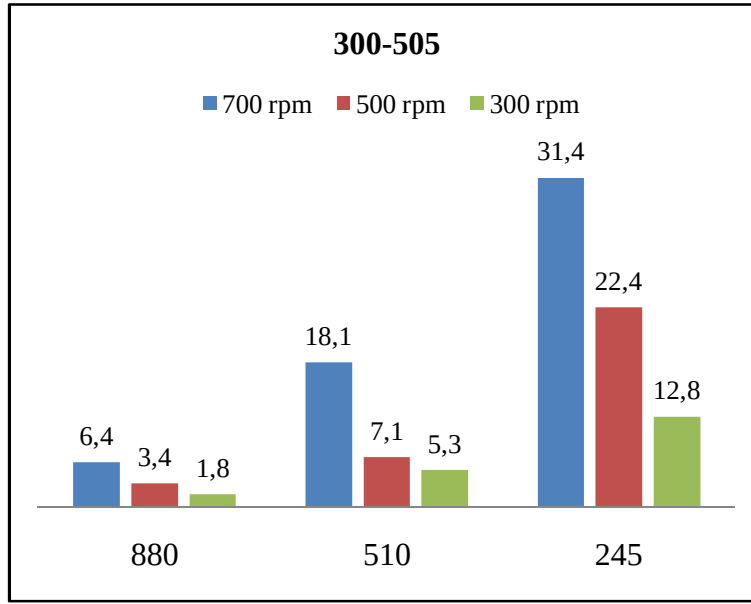


Şekil 5.5 : Su verilmiş St 37 numunede 300 d/d, 500 d/d ve 700 d/d dönme hızlarındaki kütle kaybı.



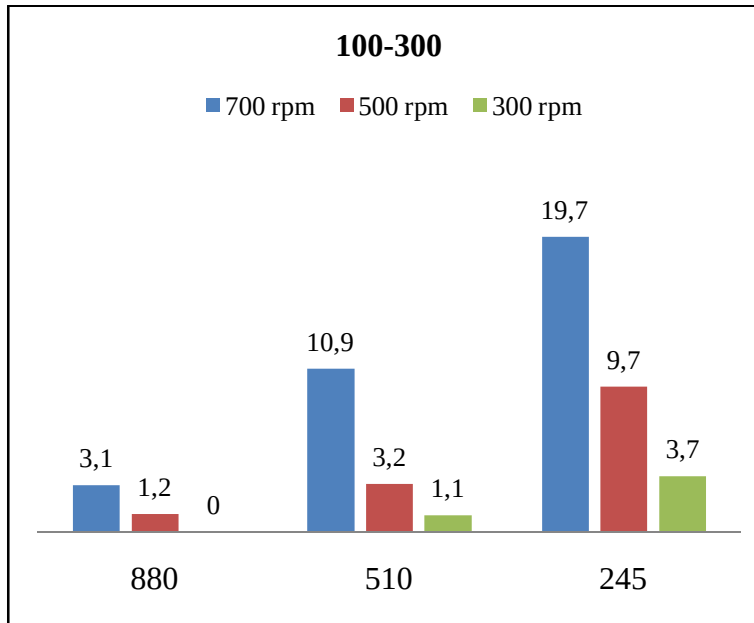
Şekil 5.6 : Isıl işlem görmemiş St 37 numunede 300 d/d, 500 d/d ve 700 d/d dönme hızlarındaki kütle kaybı.

Isıl işlem görmemiş St 37 çelik numunede diğer su verilmiş Ck 45, su verilmiş St 37 ve su verilmiş ve 500° C’de 1 saat tavllanmış ve sertlikleri artırılmış Ck 45 çelik numunelere göre daha fazla kütle kaybı gözlenmiştir. Şekil 5.6’da da gösterildiği gibi 700 d/d ve büyük aşındırıcı kum tanecik çapında 31,4 mg kadar kütle kaybı artmıştır.

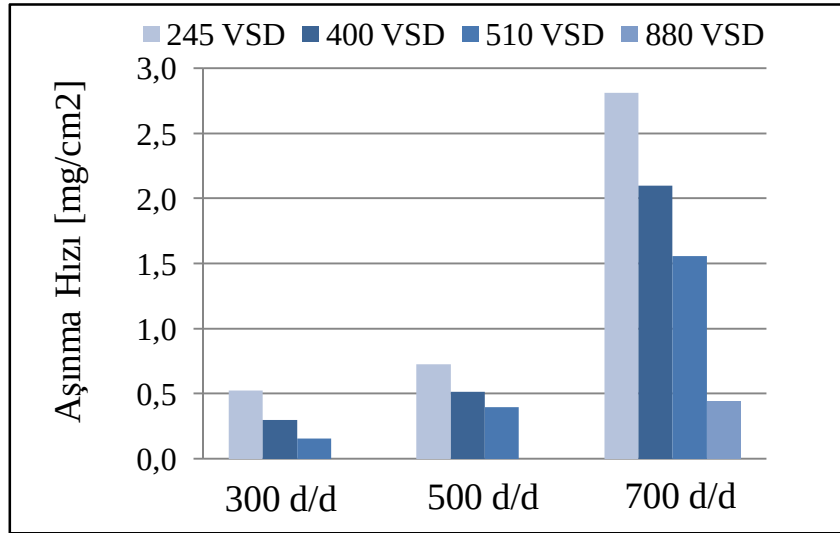


Şekil 5.7 : Isıl işlem görmemiş St 37, su verilmiş St 37 ve Ck 45 numunede 300-505 µm aşındırıcı kum tanecik çaplarında 300 d/d, 500 d/d ve 700 d/d dönme hızlarındaki kütle kaybı.

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de de görüldüğü gibi malzeme sertliği artıkça her 2 aşındırıcı kum tanecik sınıfında erozif aşınma miktarı düşmektedir. Devir sayısının 300d/d ‘dan 700 d/d’ya artması 4 farklı sertlikteki çelik numunelerde erozif aşınmayı arttırmıştır.

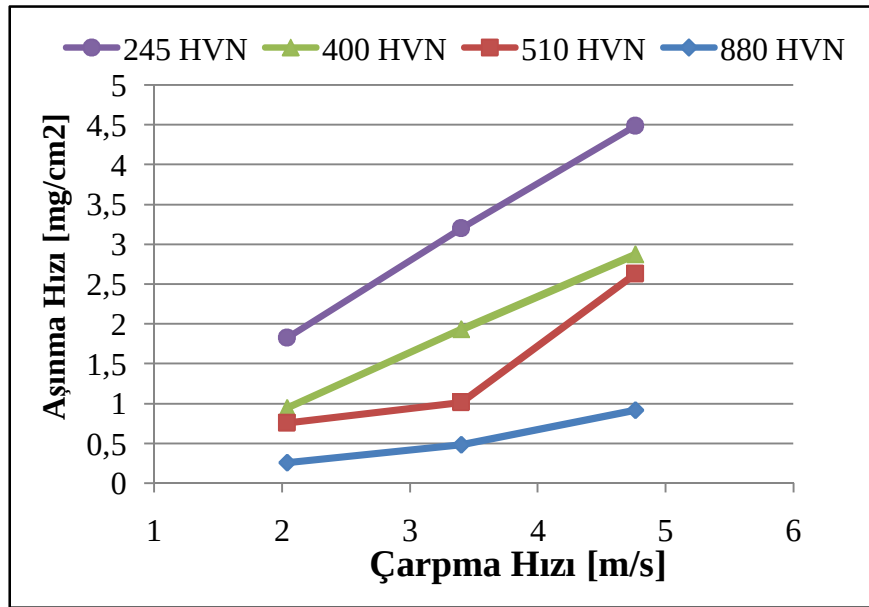


Şekil 5.8 : Isıl işlem görmemiş St 37, su verilmiş St 37 ve Ck 45 numunede 100-300 µm aşındırıcı kum tanecik çaplarında 300 d/d, 500 d/d ve 700 d/d dönme hızlarındaki kütle kaybı.



Şekil 5.9 : Isıl işlem görmemiş St 37, su verilmiş St 37 ve Ck 45, su verilmiş 500° C’de 1 saat tavllanmış Ck 45 numunede 100-300 µm aşındırıcı kum tanecik çaplarında 300 d/d, 500 d/d ve 700 d/d dönme hızlarındaki aşınma hızı.

Şekil 5.9’daki gibi malzeme sertliği arttıkça malzeme yüzeyinden kütle kaybı azalmakta ve erozif aşınmaya direnç gösterme eğilimde olmaktadır. Aşındırıcı kum tanecik boyutu arttıkça çelik numunlerdeki kütle kaybı artmaktadır. Yine şekil 5.10’da görüldüğü üzere aşındırıcı kum parçacığının çarpma hızı arttıkça malzemedeki kütle kaybında artış gözlenmektedir.



Şekil 5.10 : Isıl işlem görmemiş St 37, su verilmiş St 37 ve Ck 45, su verilmiş 500° C’de 1 saat tavllanmış Ck 45 numunede 300-500 µm aşındırıcı kum tanecik çaplarında farklı çarpma hızlarında erozif aşınma miktarı.

Su verilmiş Ck 45 (Gevrek malzemede, 880 HV) malzemesinde 4 saatlik deney sonunda 300 d/d ve 500 d/d dönme hızlarında ve 100-300 mikron aşındırıcı tane boyutunda kütle kaybı gözlenmemiştir. Bu durum, malzeme yüzeyinde aşındırıcı taneciklerin erozif aşınmayı başlatabilmesi için bir eşik enerji seviyesinin olduğunu göstermektedir.

5.3 Malzeme Sertliği Ve Kuarz Kumu Tane Çapının Erozif-Abrazif Aşınmaya Etkisi

Farklı sertliğe sahip ısıtıl işlem görmüş ve görmemiş St 37 ve Ck 45 deney numuneleri kullanılarak erozif aşınmanın sertliğe ve eleklerden geçirilerek sınıflandırılan farklı aşındırıcı kum tanecik çaplarında nasıl bir davranış gösterdiği incelenecektir. Deney çalışmasında kullanılacak malzemeler ve sertlikleri çizelge 5.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7 : Deney matrisinde kullanılacak farklı sertlikteki numuneler.

Malzeme	Sertlik [HVN]	Isıl İşlem
Ck 45	880	Su verilmiş
Ck 45	707	Su verilmiş ve 200 C°’ de 1 saat tavlınmış
Ck 45	590	Su verilmiş ve 250° C de 1 saat tavlınmış
St 37	510	Su verilmiş
Ck 45	400	Su verilmiş ve 500 C’de 1 saat tavlınmış
Ck 45	298	Isıl işlem görmemiş
St 37	245	Isıl işlem görmemiş
C 15	185	Isıl işlem görmemiş

Çelik numunelere su verilerek farklı sıcaklıklarda 1 saat süreyle tavlınmışlar ve farklı sertlikler elde edilmiştir. Dönme hızı 700 d/d’da sabit tutulmuştur. Kum-su karışımı ağırlıkça % 20 kum olacak şekilde sabit tutulmuştur. Aşındırıcı kum tanecik

Çapları değiştirilerek malzeme sertliğinin ve kum çapının erozif-abrazif aşınma direncine etkisi incelenmiştir.

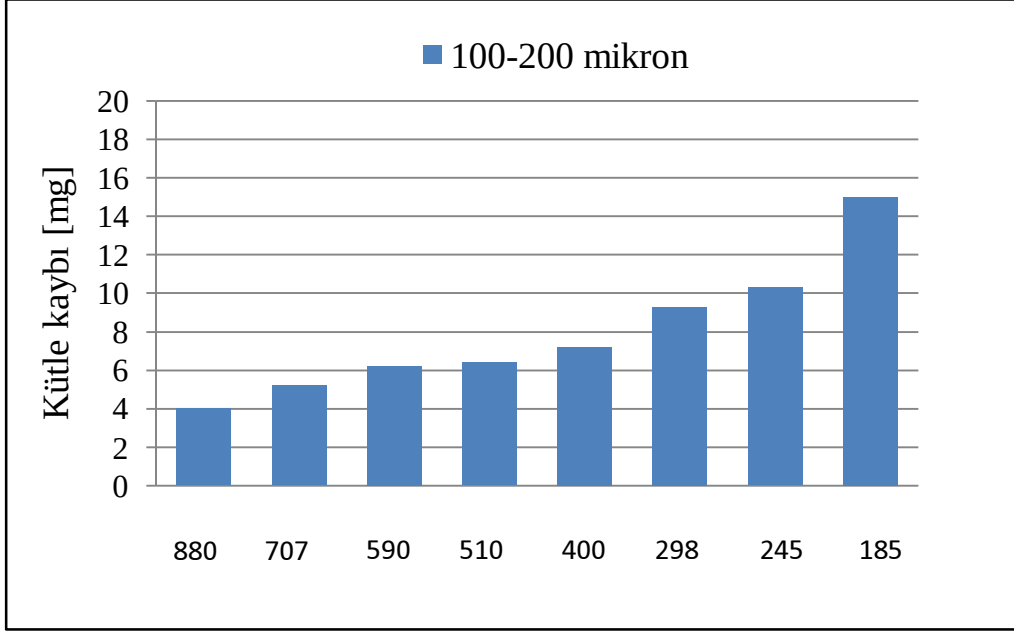
Aşınma Direnci (5.1) denklemiyle şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\text{Aşınma Direnci, A.D. [1/gr]} = 1/(\text{ktle kaybı}) \quad (5.1)$$

4 saatlik deneyler sonucunda erozif-abrazif aşınma nedeniyle meydana gelen ktle kayıpları farklı aşındırıcı kuvarz kum çaplarında şekil 5.11, şekil 5.12, şekil 5.13, şekil 5.14, şekil 5.15, şekil 5.16'te gösterilmiştir. Farklı sertlikteki malzemelerin farklı kum çapları için aşınma dirençleri izelge 5.7, izelge 5.8, izelge 5.9, izelge 5.10, izelge 5.11 ve izelge 5.12 verilmiştir.

Çizelge 5.8 : 100-200 m aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında ısıt ışlem görmüş ve ısıt ışlem görmemiş farklı sertlikteki elik numunelerdeki aşınma direnci.

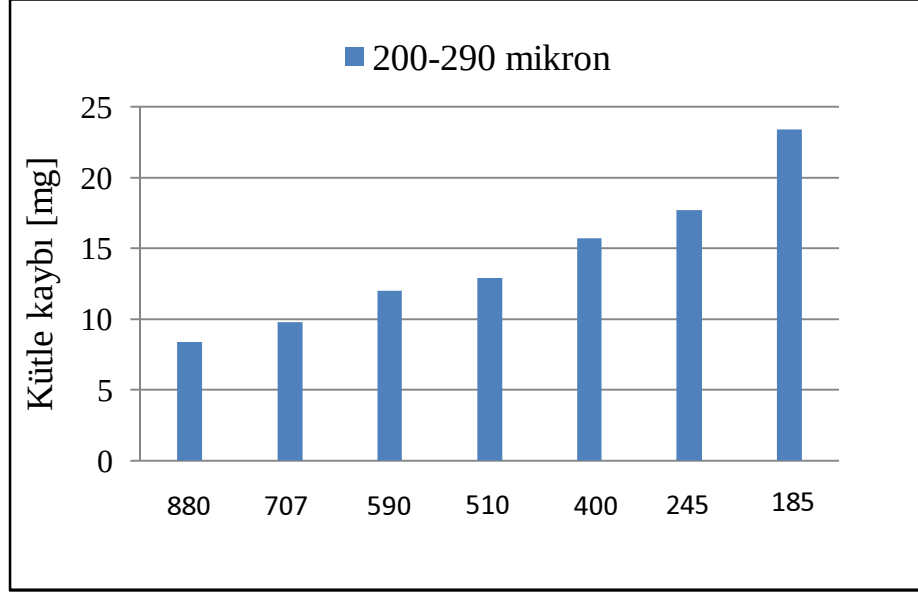
Sertlik [HVN]	Malzeme	Ktle kaybı[gr]	Aşınma Direnci[1/gr]
880	Ck 45 q	0,0040	250,00
707	Ck 45 200 ht	0,0052	192,31
590	Ck 45 250 ht	0,0062	161,29
510	St 37 q	0,0064	156,25
400	Ck 45 500 ht	0,0072	138,89
298	Ck 45	0,0093	107,53
245	St 37	0,0103	97,09
185	C15	0,0150	66,67



Şekil 5.11 : 100-200 μm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında farklı sertlikteki çelik numunelerdeki kütle kaybı.

Çizelge 5.9 : 200-290 μm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında ısıtılmış ve ısıtılmamış farklı sertlikteki çelik numunelerdeki aşınma direnci.

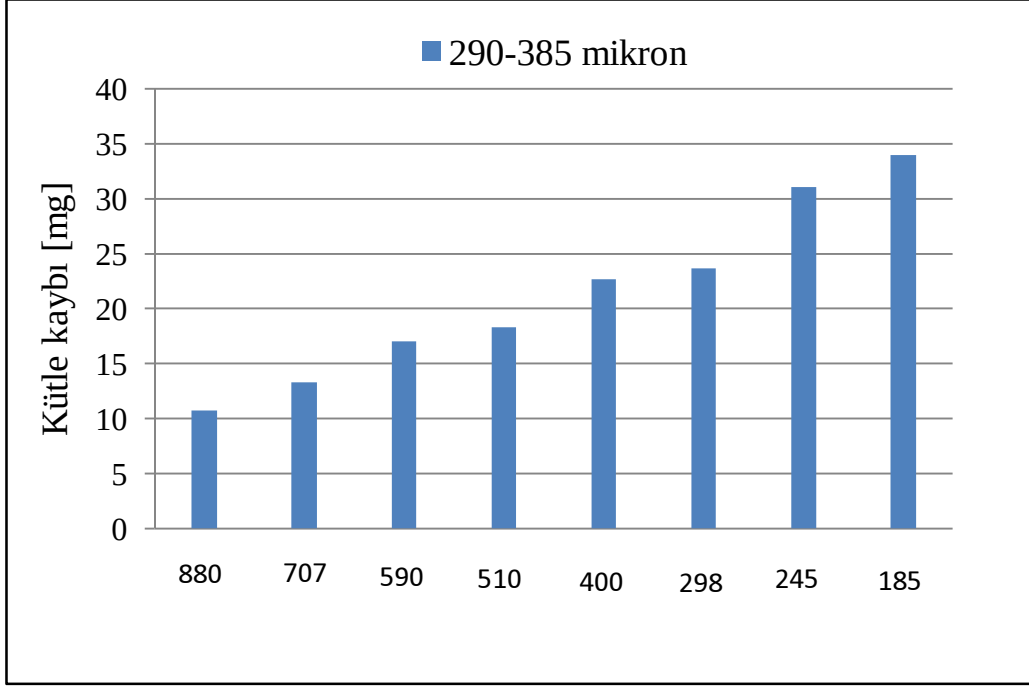
Sertlik [HV]	Malzeme	Kütle kaybı[gr]	Aşınma Direnci[1/gr]
880	Ck 45 q	0,0084	119,05
707	Ck 45 200 ht	0,0098	102,04
590	Ck 45 250 ht	0,0120	83,33
510	St 37 q	0,0129	77,52
400	Ck 45 500 ht	0,0157	63,69
245	St 37	0,0177	56,50
185	C15	0,0234	42,74



Şekil 5.12 : 200-290 μm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında farklı sertlikteki $\text{çelik numunelerdeki}$ kütle kaybı.

Çizelge 5.10 : 290-385 μm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında ısıtılmış ve ısıtılmamış farklı sertlikteki $\text{çelik numunelerdeki}$ aşınma direnci.

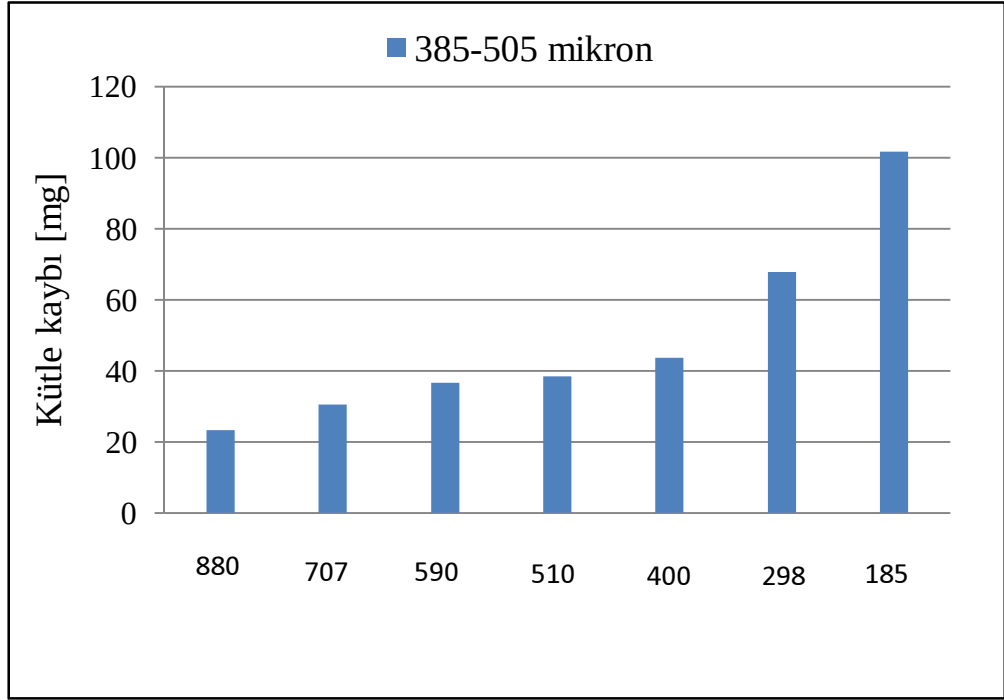
Sertlik [HVN]	Malzeme	Kütle kaybı[gr]	Aşınma Direnci[1/gr]
880	Ck 45 q	0,0107	93,46
707	Ck 45 200 ht	0,0133	75,19
590	Ck 45 250 ht	0,0170	58,82
510	St 37 q	0,0183	54,64
400	Ck 45 500 ht	0,0227	44,05
298	Ck 45	0,0237	42,19
245	St 37	0,0311	32,15
185	C15	0,0340	29,41



Şekil 5.13 : 290-385 μm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında farklı sertlikteki çelik numunelerdeki kütle kaybı.

Çizelge 5.11 : 385-505 μm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında ısıt işlem görmüş ve ısıt işlem görmemiş farklı sertlikteki çelik numunelerdeki aşınma direnci.

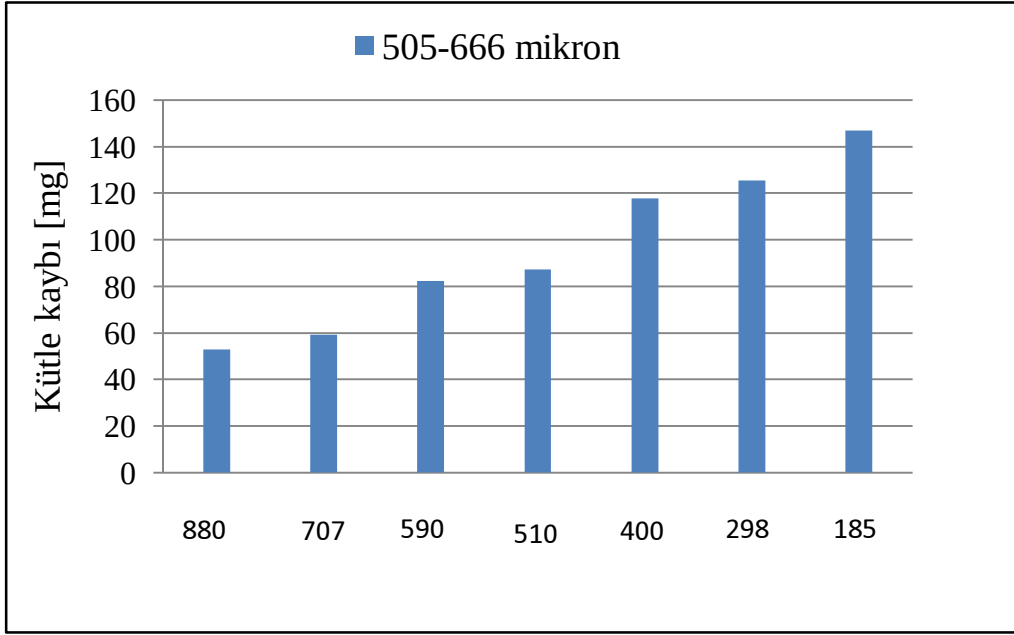
Sertlik [HV]	Malzeme	Kütle kaybı[gr]	Aşınma Direnci[1/gr]
880	Ck 45 860	0,0232	43,10
707	Ck 45 200 ht	0,0305	32,79
590	Ck 45 250 ht	0,0366	27,32
510	St 37 q	0,0383	26,11
400	Ck 45 500 ht	0,0436	22,94
298	Ck 45	0,0677	14,77
185	C15	0,1017	9,83



Şekil 5.14 : 385-505 μm aşındırıcı kum tanecik ϕ apının etkisi altında farklı sertlikteki ϕ elik numunelerdeki kütle kaybı.

Çizelge 5.12 : 505-666 μm aşındırıcı kum tanecik ϕ apının etkisi altında ısıt işlem görmüş ve ısıt işlem görmemiş farklı sertlikteki ϕ elik numunelerdeki aşınma direnci.

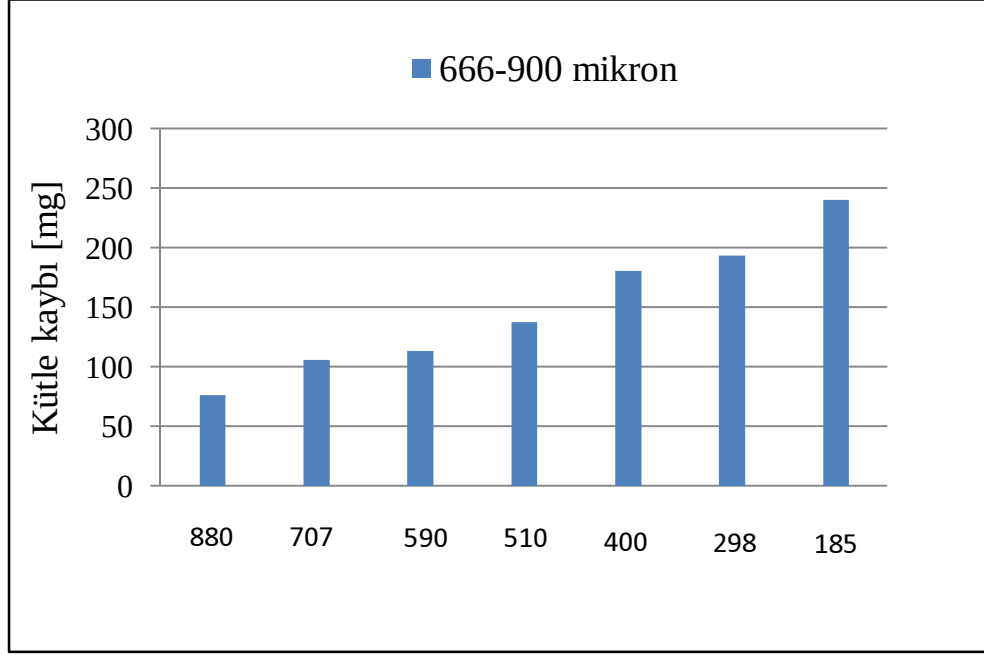
Sertlik [HVN]	Malzeme	Kütle kaybı[gr]	Aşınma Direnci[1/gr]
880	Ck 45 q	0,0529	18,90
707	Ck 45 200 ht	0,0593	16,86
590	Ck 45 250 ht	0,0823	12,15
510	St 37 q	0,0873	11,45
400	Ck 45 500 ht	0,1178	8,49
298	Ck 45	0,1256	7,96
185	C15	0,1471	6,80



Şekil 5.15 : 505-666 μm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında farklı sertlikteki çelik numunelerdeki kütle kaybı.

Çizelge 5.13 : 666-900 μm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında ısıtılmış ve ısıtılmamış farklı sertlikteki çelik numunelerdeki aşınma direnci

Sertlik [HV]	Malzeme	Kütle kaybı[gr]	Aşınma Direnci[1/gr]
880	Ck 45 q	0,0763	13,11
707	Ck 45 q 200ht	0,1059	9,44
590	Ck 45 250 ht	0,1130	8,85
510	St 37 q	0,1373	7,28
400	Ck 45 500 ht	0,1804	5,54
298	Ck 45	0,1931	5,18
185	C15	0,2401	4,16

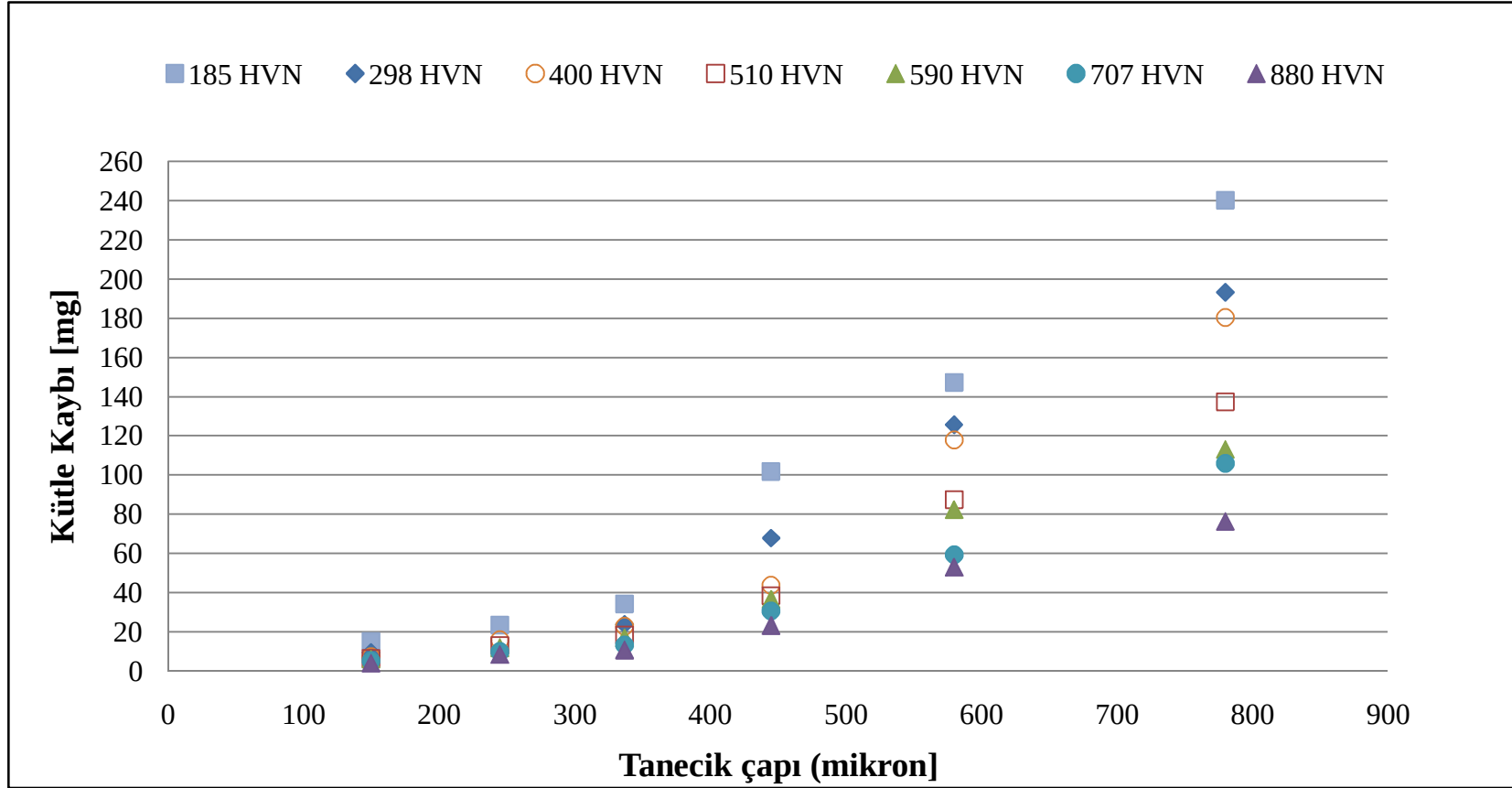


Şekil 5.16 : 666-900 μm aşındırıcı kum tanecik çapının etkisi altında farklı sertlikteki çelik numunelerdeki kütle kaybı.

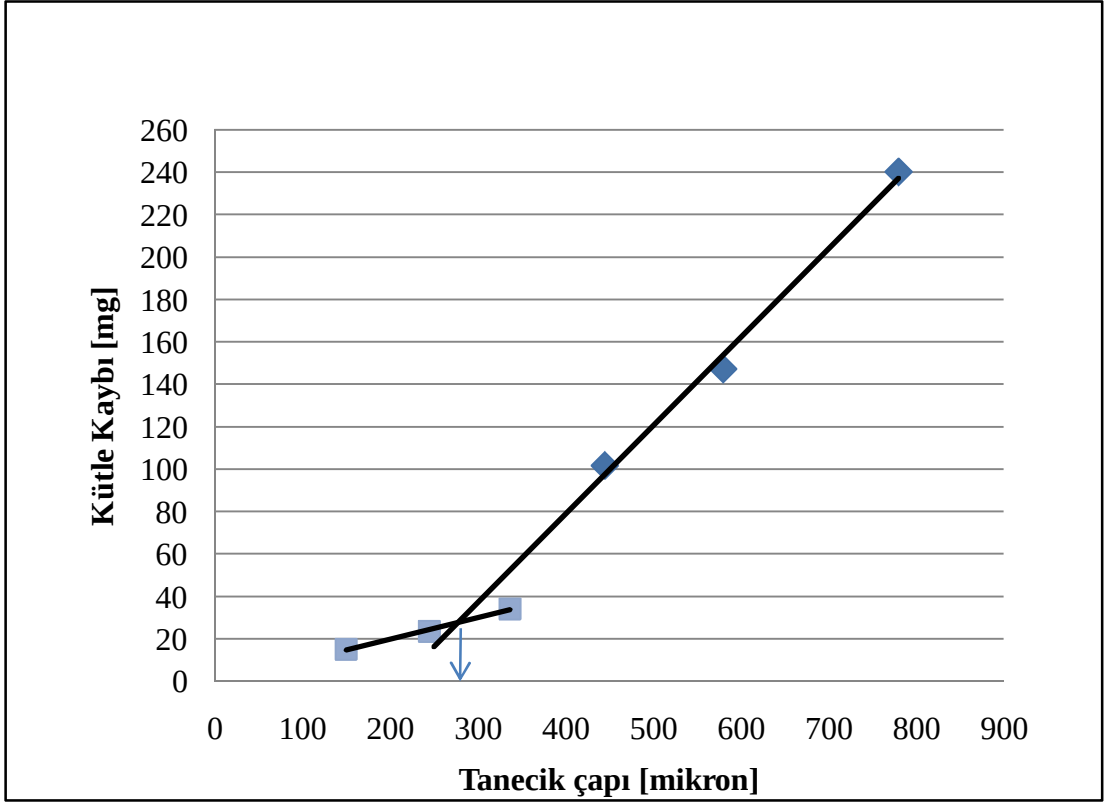
Sertliğin aşınma direncine etkisi şekil 5.16’da gösterilmiştir. Sertlik arttıkça, aşınma direnci çelik numunelerde lineer olarak artmaktadır. Tüm tanecik çaplarında da bu lineer değişim gözlemlenmiştir. Yüksek aşındırıcı tanecik çaplarında aşınma direnci daha düşük olup küçük aşındırıcı tanecik çaplarında aşınma direnci daha olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 5.17’de ise aşındırıcı tanecik çapına göre kütle kaybının değişimi gösterilmektedir. Kütle kaybındaki eğilim kritik bir tanecik çapından sonra değişmektedir. Bu çelik numunelerde 340 mikron mertebelerinde gerçekleşmektedir.

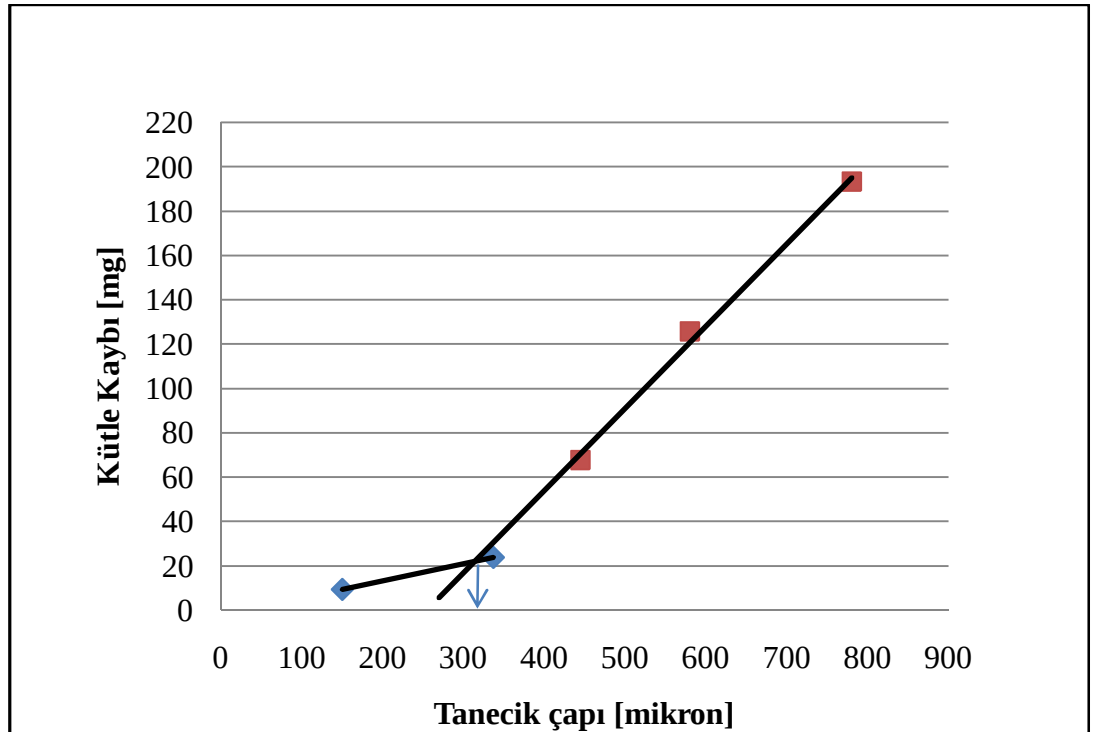
Şekil 5.18-5.24 arasında ısıtılmış ve ısıtılmamış farklı sertlikteki çelik numunelerde aşındırıcı tanecik çapına bağlı olarak kütle kaybı değişimi gösterilmektedir. Farklı her sertlikte, kritik bir aşındırıcı tanecik çapı değerinden sonra aşınma miktarı artmaktadır. Malzeme sertliği arttıkça, kritik tanecik çapı da artmaktadır. Tanecik çapının artması, çarpma enerjisini artırmaktadır. Kritik tanecik çapı değerinden sonra erozif aşınma miktarı artmaktadır. Bu kritik değerden sonra aşınma mekanizması değişmekte olup erozyon mekanizmasından 3 cisimli abrazyon aşınma mekanizmasına geçmektedir. Daha sert malzemelerde bu aşındırıcı çapı kritik değeri artmakta ve daha yüksek çarpma enerjisi gerektirmektedir. Çarpma tanecikleri belli bir çarpma enerjisi değerinin altında yüzeyden kaçamazlar ve tutsaklanır.



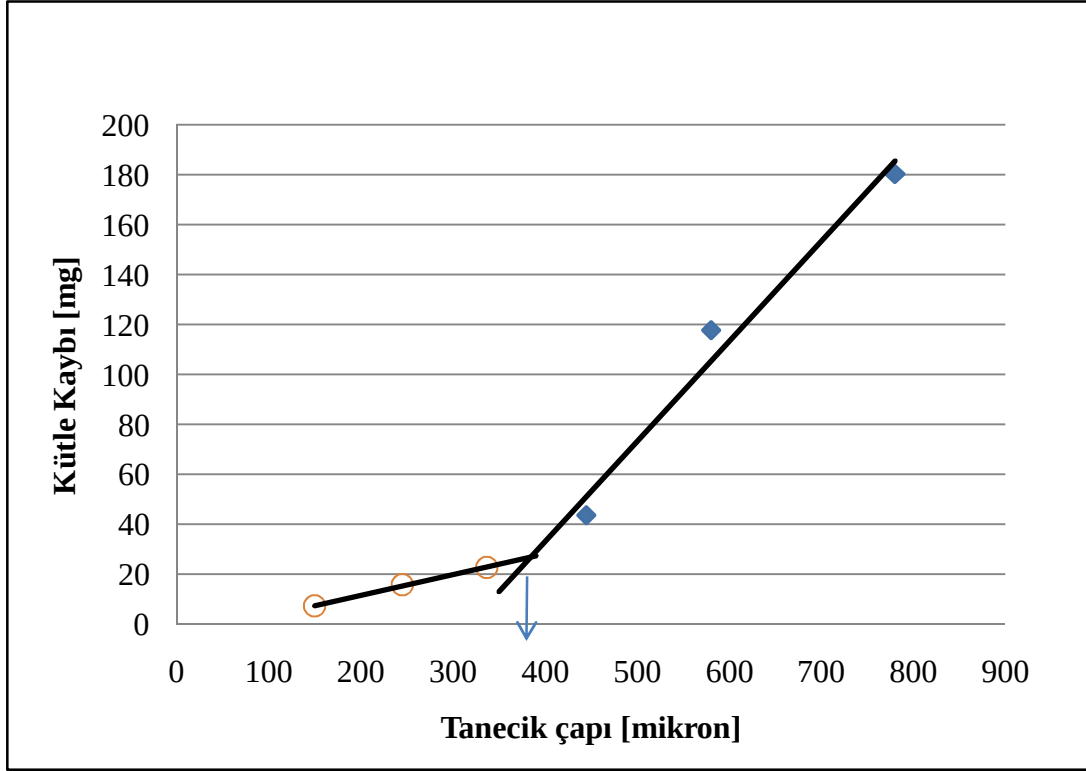
Şekil 5.17 : Isıl işlem görmüş ve ısıt işlem görmemiş farklı sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı.



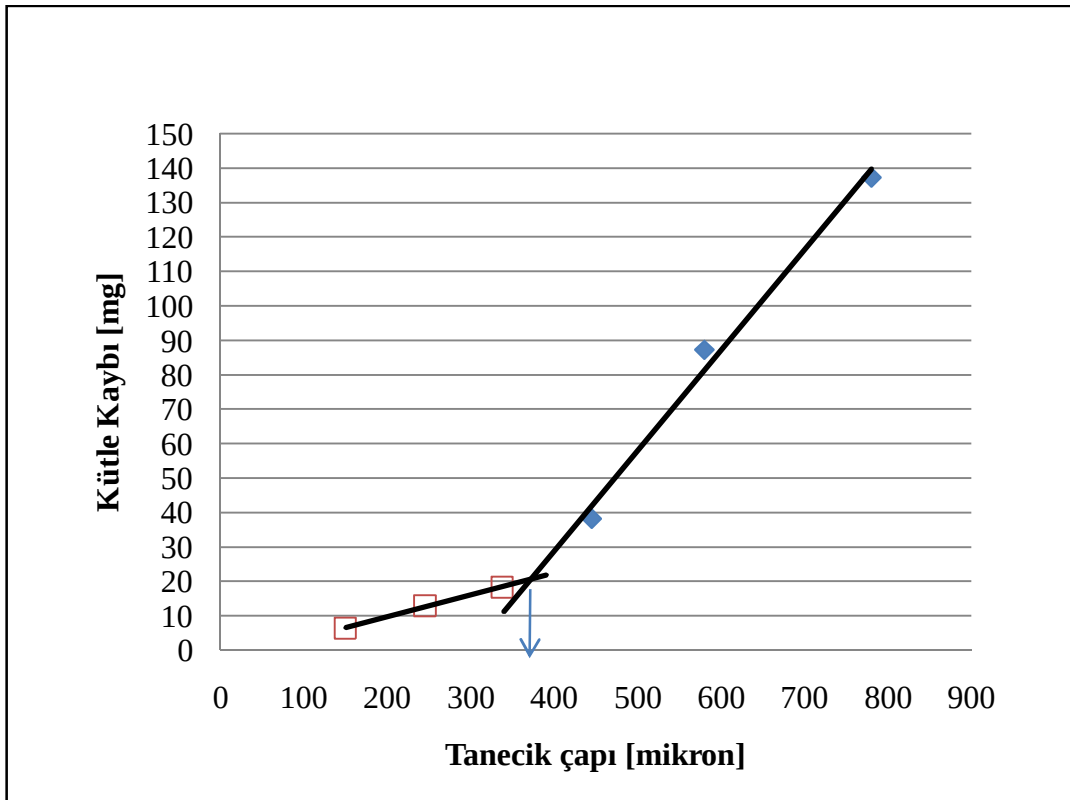
Şekil 5.18 : 185 HVN sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı.



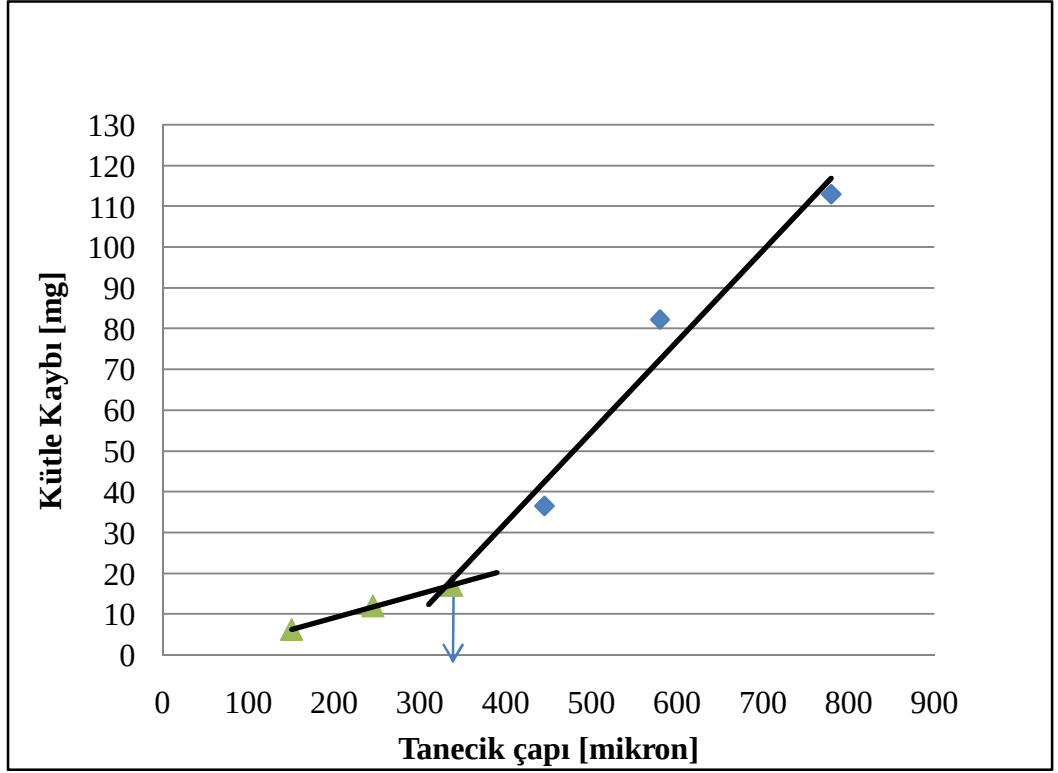
Şekil 5.19 : 298 HVN sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı.



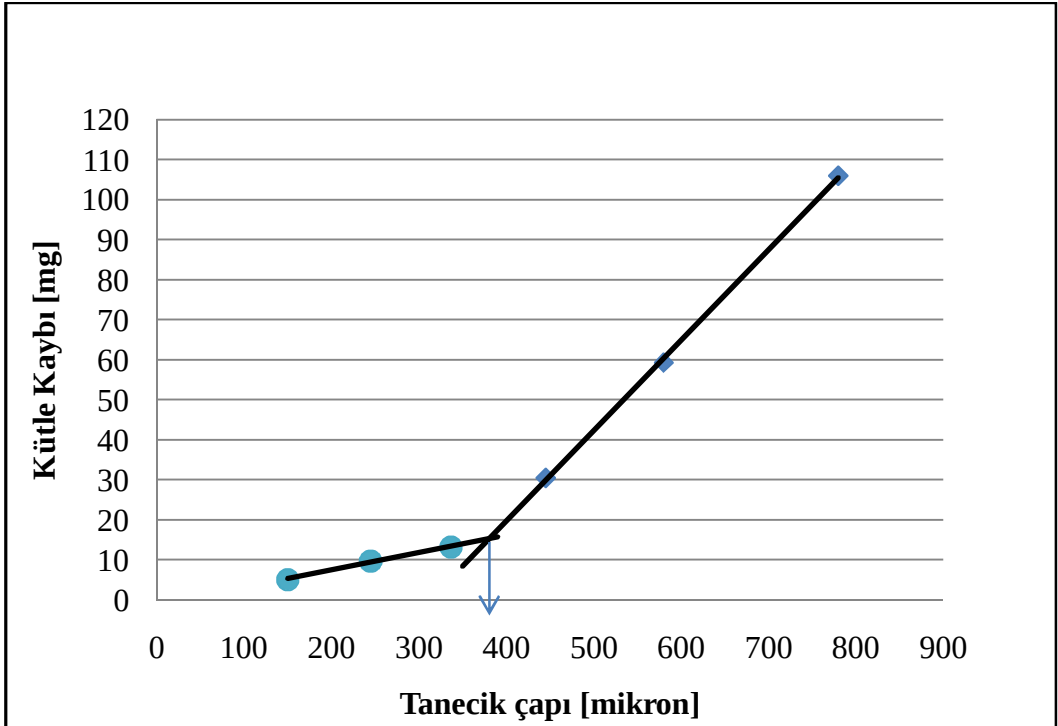
Şekil 5.20 : 400 HVN sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı.



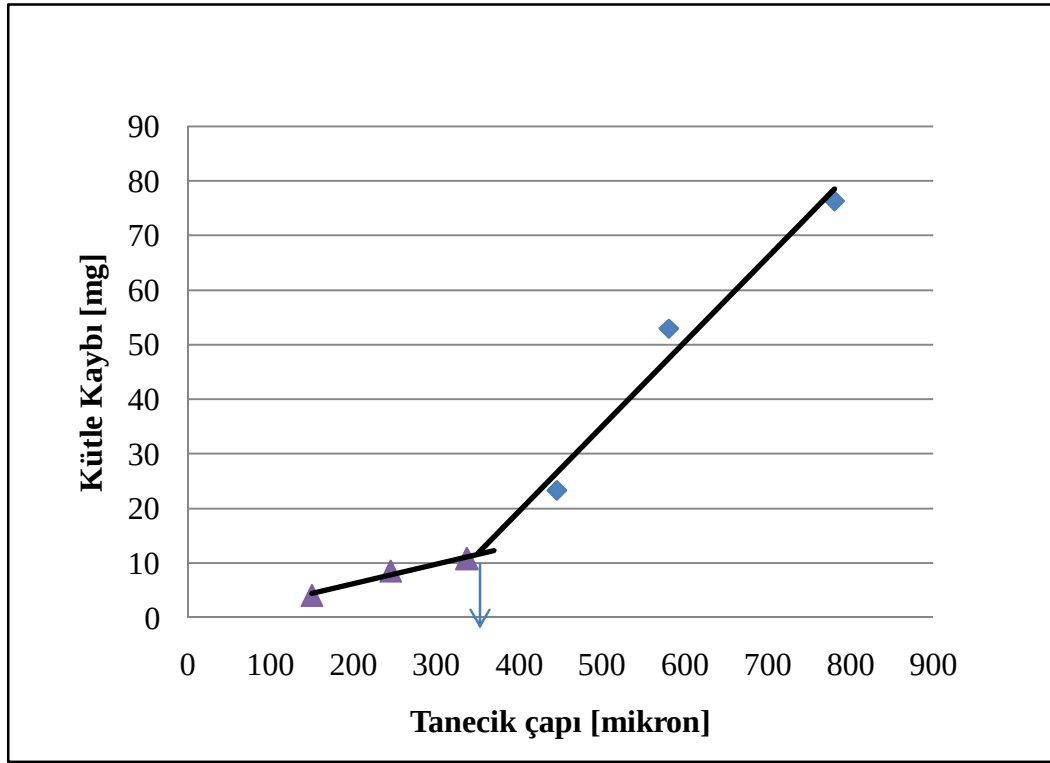
Şekil 5.21 : 510 HVN sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı.



Şekil 5.22 : 590 HVN sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı.



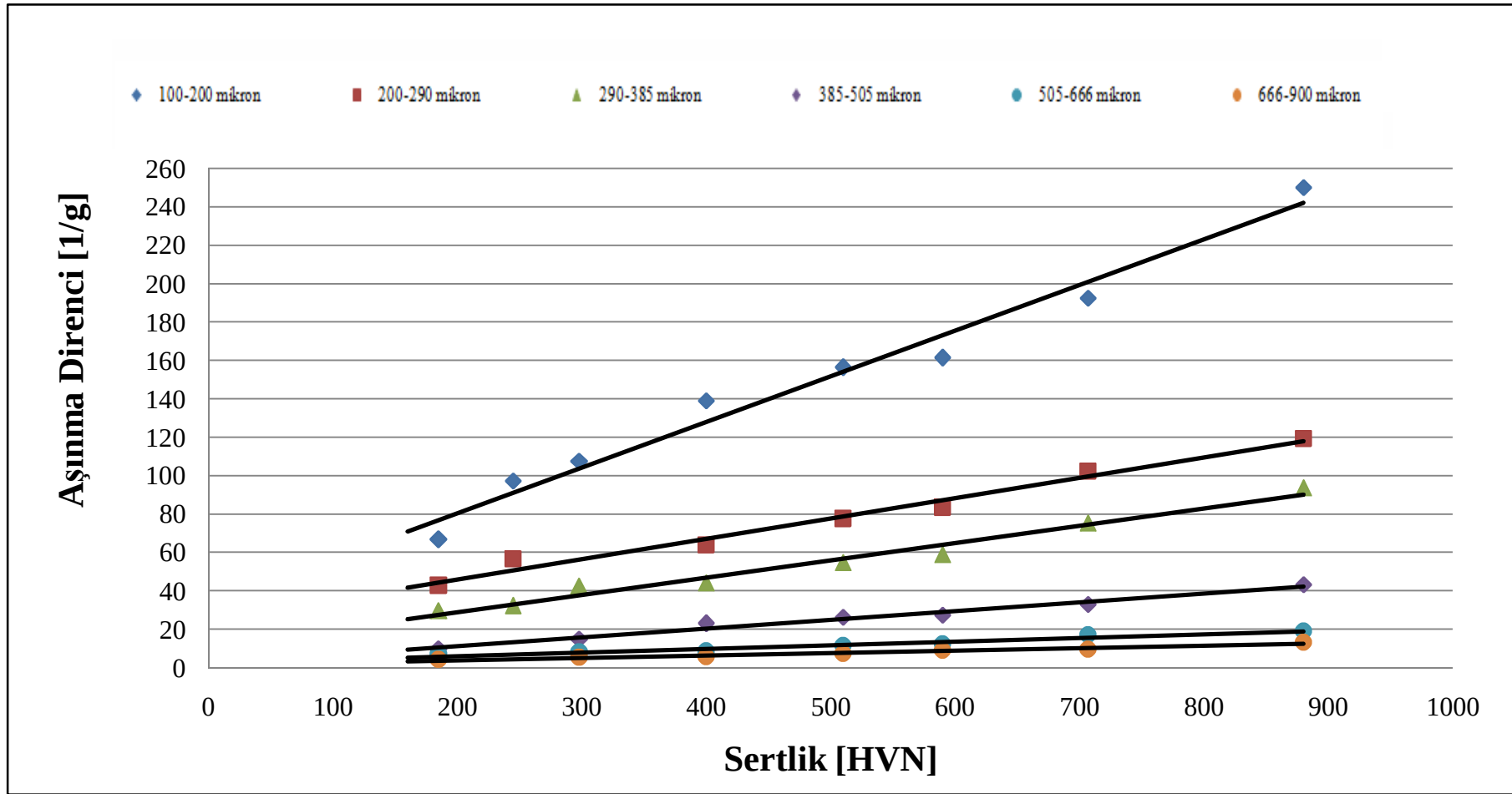
Şekil 5.23 : 707 HVN sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı.



Şekil 5.24 : 880 HVN sertliklerdeki çelik numunelerde tanecik çapına göre kütle kaybı miktarı.

Çizelge 5.14 : Sertliğin göre kritik tanecik çapı değişimi

Sertlik [HVN]	d_{kr} [mikron]
880	355
707	381
590	328
510	371
400	382
298	314
185	280



Şekil 5.25 : Isıl işlem görmüş ve ısıt işlem görmemiş çelik numunelerde farklı aşındırıcı çaplarında sertliğin değişiminin aşınma direncine etkisi.

5.4 Eroziyon-Abrazif Aşınmanın Matematiksel Modeli

5.4.1 Çarpma hızının ve malzeme sertliğinin aşınma direncine etkisinin matematiksel modelinin oluşturulması

Malzeme sertliğini ve aşındırıcı tanecik çarpma hızını dikkate alarak aşınma direncinin bu parametreler yardımıyla ifade edilmesine çalışılmıştır.

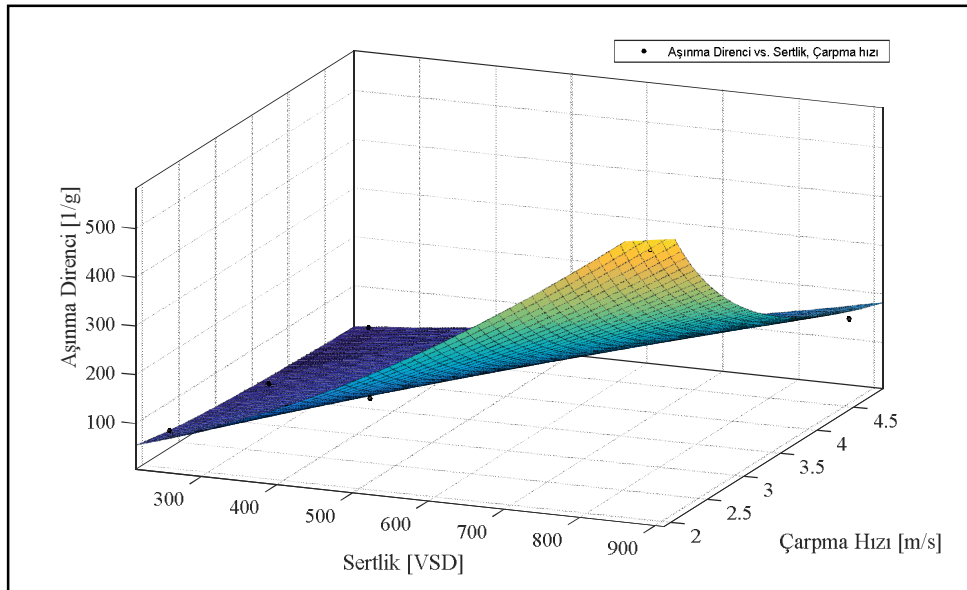
Mathematical denklem (5.2)'deki gibi tanımlanmıştır;

$$AD(H,v)=a \cdot H^n \cdot v^k \quad (5.2)$$

a, n and k katsayıları MATLAB® eğri uydurma programı yardımıyla hesaplanmıştır. Katsayılar % 95 güvenilirlik aralığında verilmiştir, residual değeri ise 0.986'dır.

Deneyde elde edilen 300-505 aşındırıcı tanecik boyutunda ve farklı dönme hızlarında sırasıyla 300d/d, 500d/d ve 700 d/d elde edilen kütle kayıpları kullanılarak (5.3)'teki gibi matematiksel bir denklem elde edilmiştir.

$$AD(H,v)=0.0158 \cdot H^{1.608} \cdot v^{-1.334} \quad (5.3)$$



Şekil 5.26 : Çarpma hızı ve sertliğin aşınma direncine etkisi.

Şekil 5.26'da aşınma direncinin sertliğin ve tanecik çarpma hızına göre değişimi yüzey eğrisi olarak oluşturulmuştur. Yüksek aşındırıcı kum taneciğinin çarpma hızında ve düşük malzeme sertliklerinde kütle kaybı en fazla olmaktadır.

5.4.2 Malzemenin sertliğinin ve aşındırıcı tane büyüklüğünün aşınma direncine etkisinin matematiksel modelinin oluşturulması

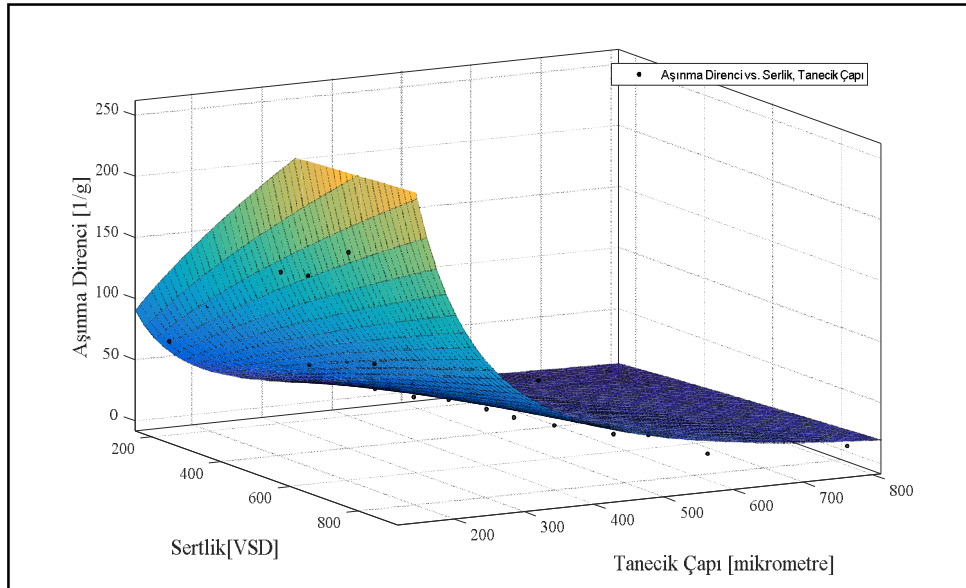
Malzeme sertliğini ve aşındırıcı tanecik çapına bağlı olarak aşınma direncinin matematiksel modeli oluşturulmuştur.

Mathematical denklem (5.4)'deki gibi tanımlanmıştır;

$$AD(H,v)=b \cdot H^m \cdot d^l \quad (5.4)$$

a, n and k katsayıları MATLAB® eğri uydurma programı yardımıyla hesaplanmıştır. Katsayılar % 95 güvenilirlik aralığında verilmiştir, residual değeri ise 0.978'dir.

Deneyde dönme hızı 700 d/d ve aşındırıcı kum çapları 100 mikron'dan 900 mikron'a kadar değişmektedir. Kütle kayıpları kullanılarak (4)'deki gibi matematiksel bir denklem elde edilmiştir. Şekil 5.27'de aşınma direncinin, malzeme sertliğine ve tanecik çapına göre değişimini veren yüzey eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 5.27 : Aşındırıcı tanecik çapı ve sertliğin aşınma direncine etkisi

Deneyde farklı aşındırıcı taneci çapında ve farklı sertliklerdeki çelik numuneler kullanılarak elde edilen kütle kayıpları yardımıyla aşınma direnci tanımlanmış ve (5.5)'deki gibi matematiksel bir denklem elde edilmiştir.

$$AD(H,d)=2683*H^{0.7543}*d^{-1.502} \quad (5.5)$$

Denklem (5.3)'te kullanılan hız ve sertlik değerleri ile denklem (5.5)'de kullanılan sertlik ve tanecik çapı verileri birleştirilerek aşınma direncinin tanecik çapı, çarpma hızı ve malzeme sertliğine bağlı olarak matematiksel modeli minitab yardımıyla ve (5.6)'deki denklem ile elde edilmiştir.

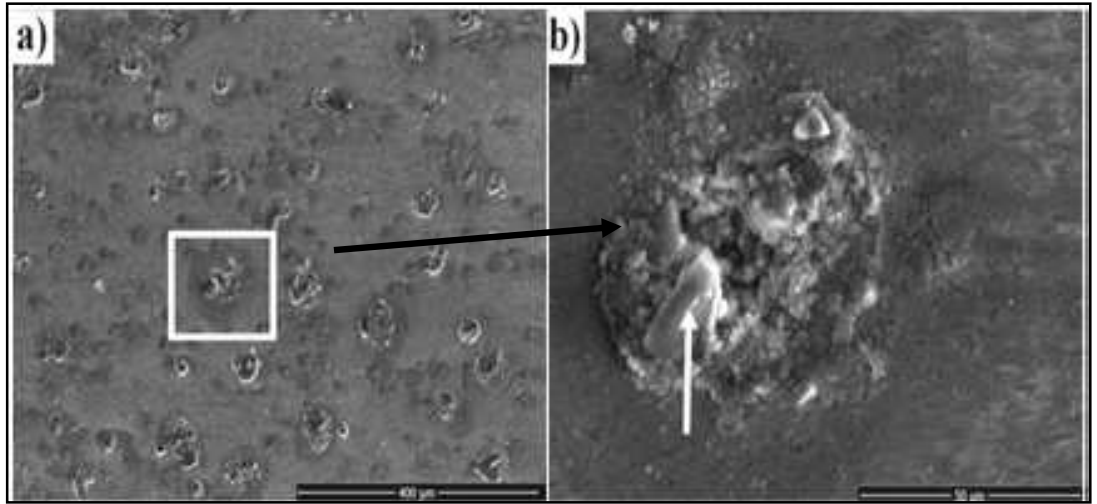
$$AD(H,d)=270.685*V^{-1.161}*d^{-2.097}*H^{1.347} \quad (5.6)$$

6. EROZİF ABRAZİF AŞINMA DENEY SONRASI YÜZEYLERİN ANALİZİ VE YORUMLANMASI

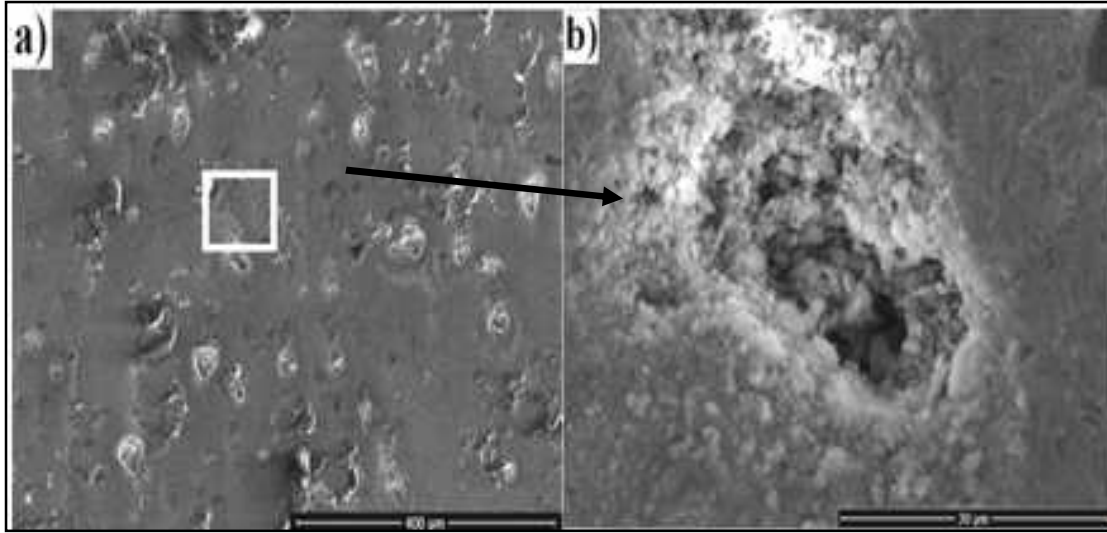
6.1 Farklı Çarpma Açılarında Aşınan Çelik Numunelerin SEM’de Morfolojik Yapılarının İncelenmesi

Çalışmada, aşınan yüzeyler SEM (tarayıcı electron mikroskobu)’de incelenmiş, Erozi-abrazif aşınma deney testinden çıkarılan 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° çarpma açısı ile duran numune yüzeyinin şekil 6.2’ de SEM (tarayıcı elektron mikroskobu) altında erozi aşınma bölgeleri gösterilmiştir.

Şekil 6.2’ de gevrek malzemedeki deformasyon aşınması malzemenin yüzeyden kaybında etkili olmuştur. Tekrarlı bir şekilde aşındırıcı parçacıkların çarpmasıyla yüzeyde malzeme kaybına sebep olmuştur. Çatlak mekanizması ve iz oluşumu yüzeye dik çarpma açısında etkili olmaktadır.



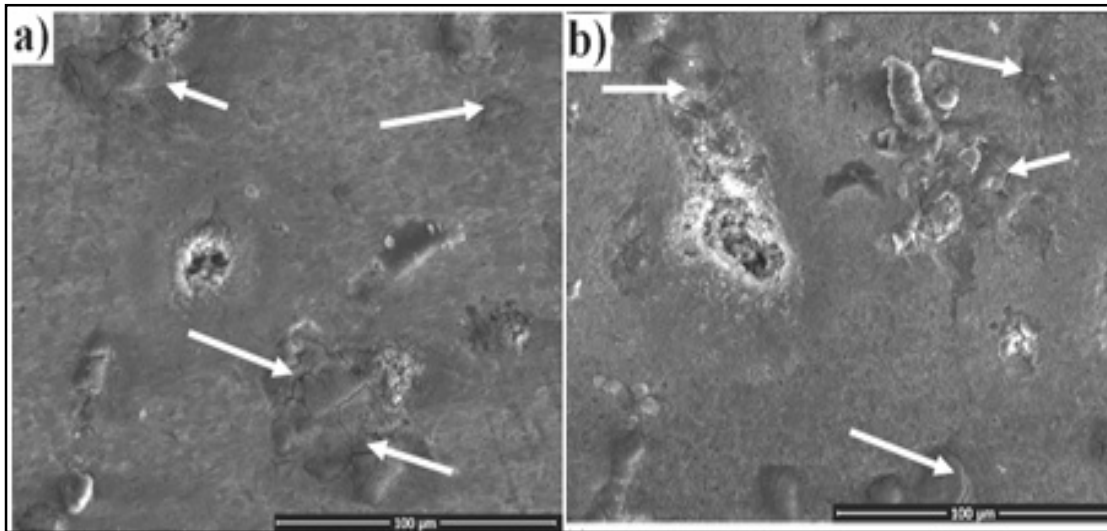
Şekil 6.1 : Isıl işlem uygulanmamış, 30° çarpma açısında St 37 numunesinin SEM görüntüsü (a) x400, (b) x3000 büyütme.



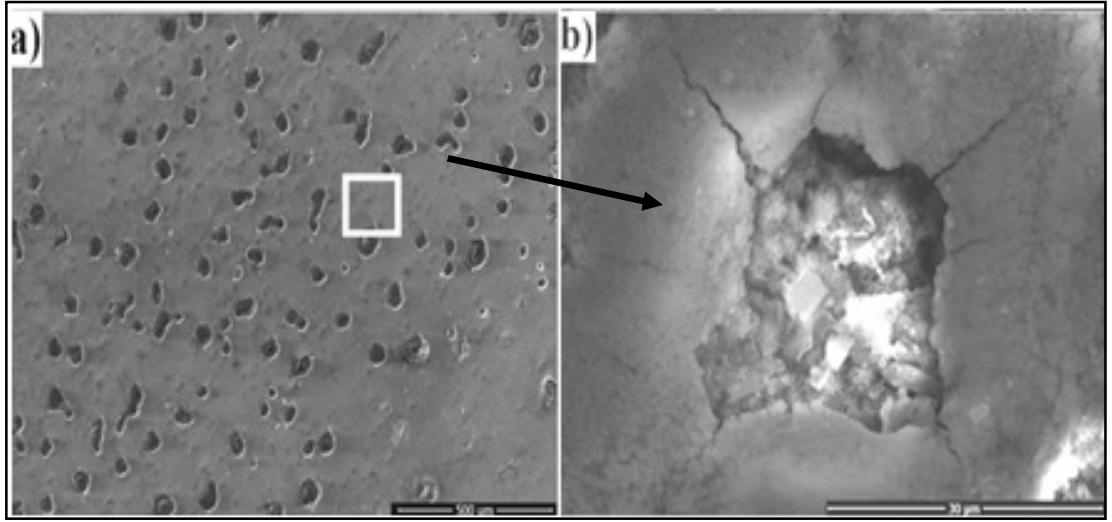
Şekil 6.2 : Isıl işlem uygulanmamış, 75° çarpma açısında St 37 numunesinin SEM görüntüsü a) x400, b) x6000 büyütme.

Şekil 6.1’de mikro çatlak oluşumu beyaz ok ile gösterilmiştir. Düşük açılarda sünek malzemelerde oluşan karakteristik aşınma mekanizmasıdır. Mikro çatlaklar ısıtılmış St 37 malzemesinde şekil 6.3 ‘de görülmektedir. Bu çatlaklar, krater oluşumunun çekirdeklendiği bölgelerdir.

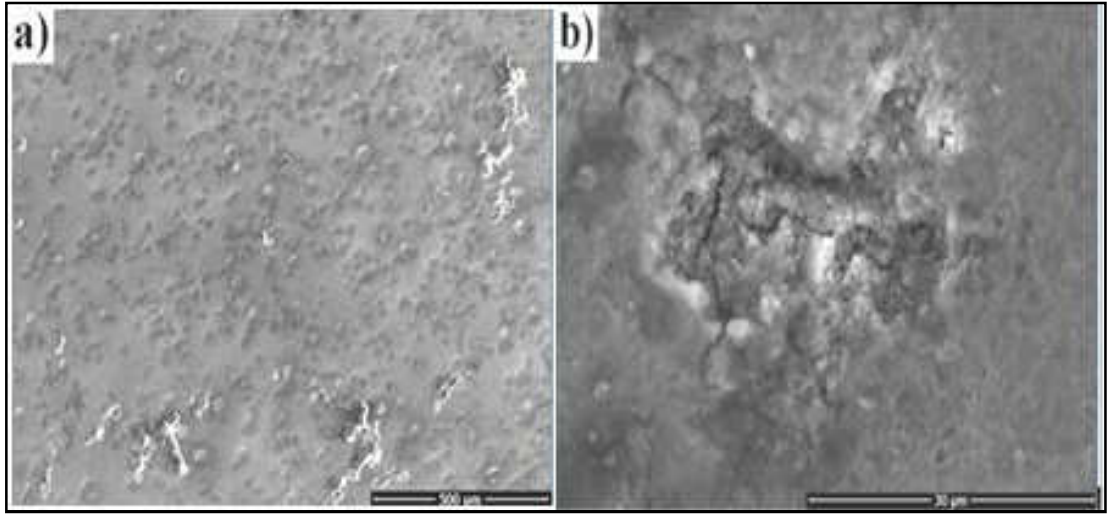
Şekil 6.4 ve 6.5’de mikro çukurcuklar görülmektedir. Gevrek malzemede çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Gevrek malzemede yüksek çarpma açısı 75°’ de deformasyon mekanizma gözlenmiştir.



Şekil 6.3 : Isıl işlem uygulanmamış St 37 numunesinin SEM görüntüsü (a) 30° x1600 büyütme) ve (b) 75° çarpma açıları (x1500 büyütme).



Şekil 6.4 : Su verilmiş St 37 numunesinin 45 °çarpma açısında SEM görüntüsü a) x200, b) x6000 büyütme.

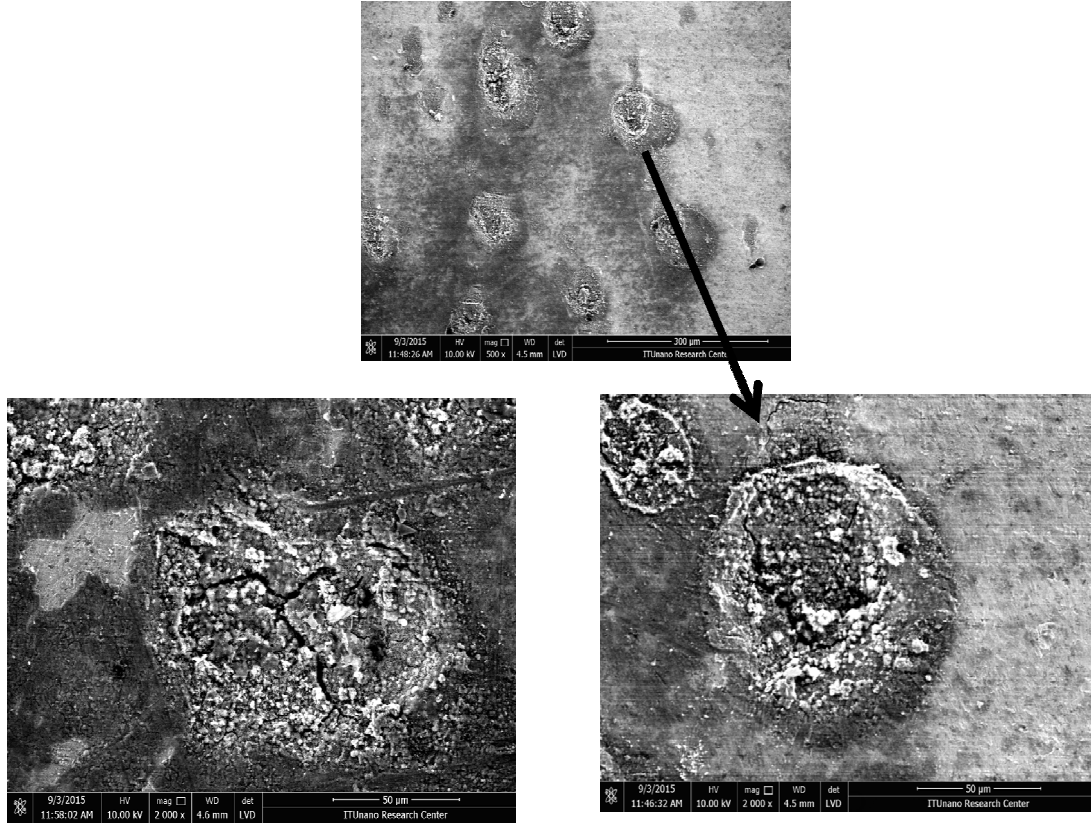


Şekil 6.5 : Su verilmiş St 37 numunesinin 75 °çarpma açısında SEM görüntüsü a) x200, b) x6000 büyütme.

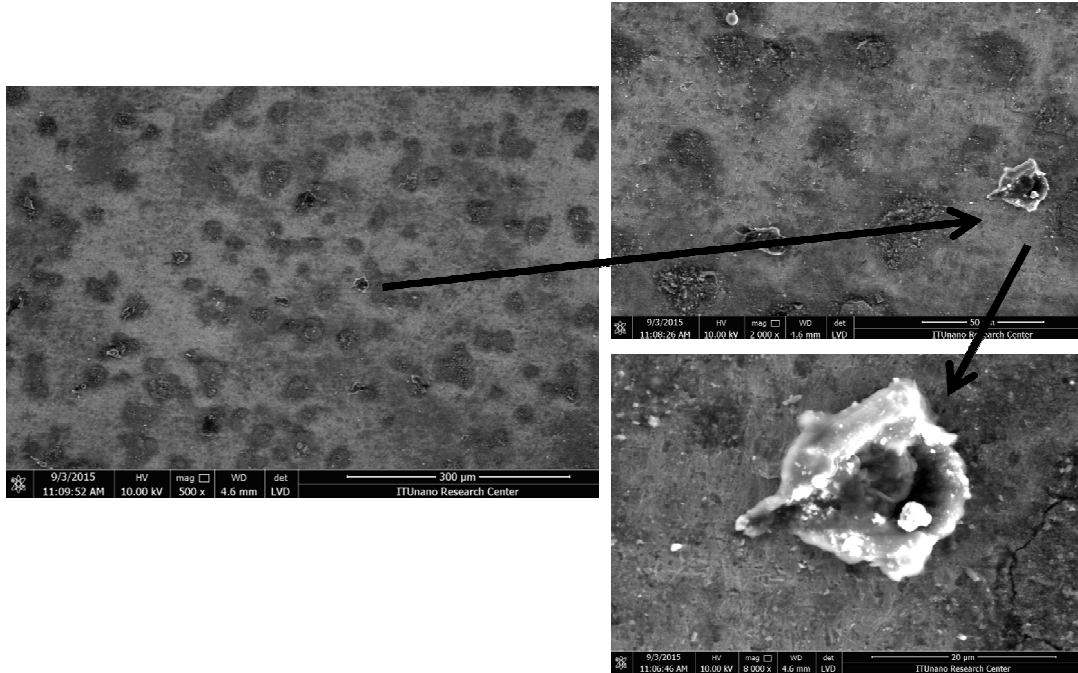
6.2 4,76 m/s Çarpma Hızında Ve Farklı Sertlikte Aşınan Çelik Numunelerin SEM’de Morfolojik Yapılarının İncelenmesi

300-505 mikron aşındırıcı tanecik boyutu ve 4,76 m/s çarpma hızının etkisi altında ve farklı sertlikte aşınan yüzeyler SEM (tarayıcı electron mikroskobu)’de incelenmiş, Eroziyon-abrazif aşınma deney testinden çıkarılan 90 ° çarpma açısı ile duran numune yüzeyinin şekil 6.6, şekil 6.7 ve şekil 6.8’ de SEM (tarayıcı elektron mikroskobu) altında eroziyon aşınma bölgeleri gösterilmiştir. Deformasyon aşınması gevrek su verilmiş Ck 45 malzemesi yüzeyinden kütle kaybında etkili olmuştur. Tekrarlı bir şekilde aşındırıcı parçacıkların çarpmasıyla yüzeyde malzeme kaybına sebep

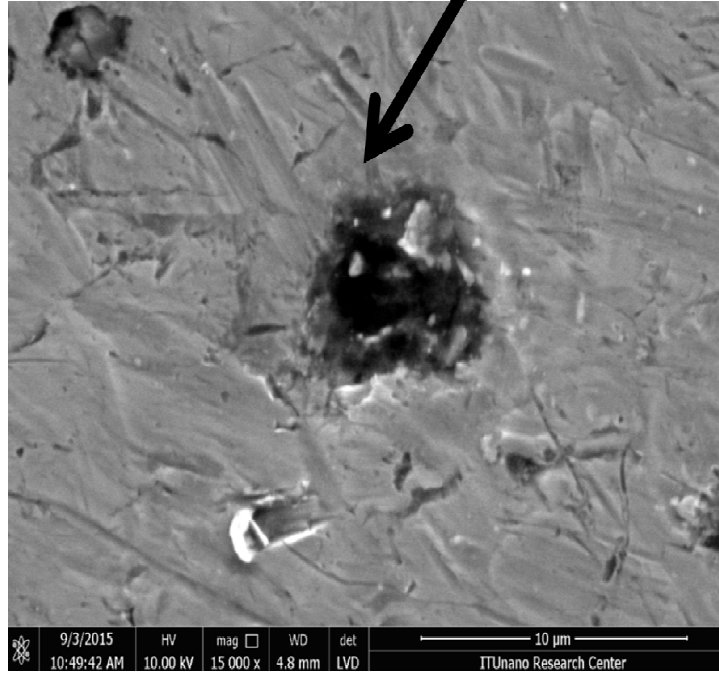
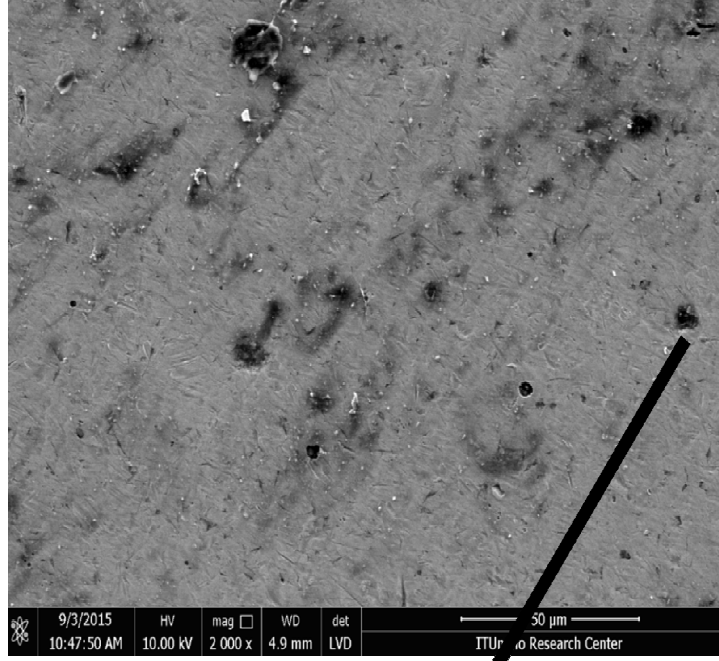
olmuştur. Çatlak mekanizması ve iz oluşumu ısıt işlem görmemiş sünek St 37 malzemesi yüzeyinde dik çarpma açısında etkili olmuştur.



Şekil 6.6 : Isıl işlem görmemiş St 37 (245 HVN) numunesinin SEM görüntüsü.



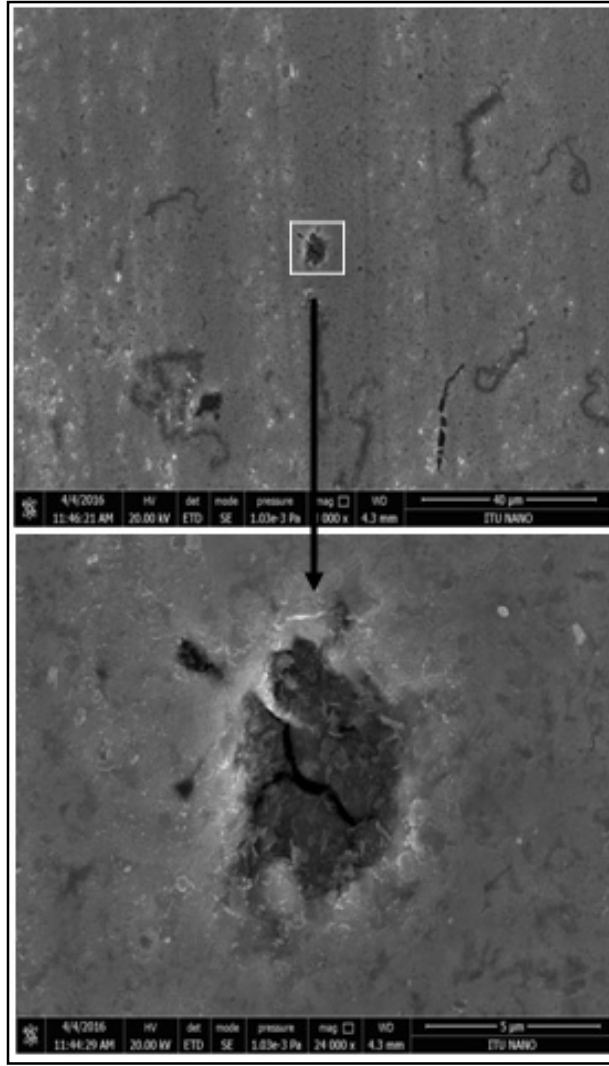
Şekil 6.7 : Su verilmiş St 37 (510 HVN) numunesinin SEM görüntüsü.



Şekil 6.8 : Su verilmiş Ck 45(880 HVN) numunesinin SEM görüntüsü.

6.3 Farklı Aşındırıcı Tanecik Boyutu Etkisinde ve Farklı Sertlikteki Aşınan Çelik Numunelerin SEM’de Morfolojik Yapılarının İncelenmesi

Farklı sertliğe sahip çelik numunelerin farklı aşındırıcı kuvarz kum tanecik çapı etkisi altında aşınan yüzeylerdeki yüzey morfolojisi incelenmiştir. Dönme hızı tüm çelik numunelerde 700 d/d’dır.

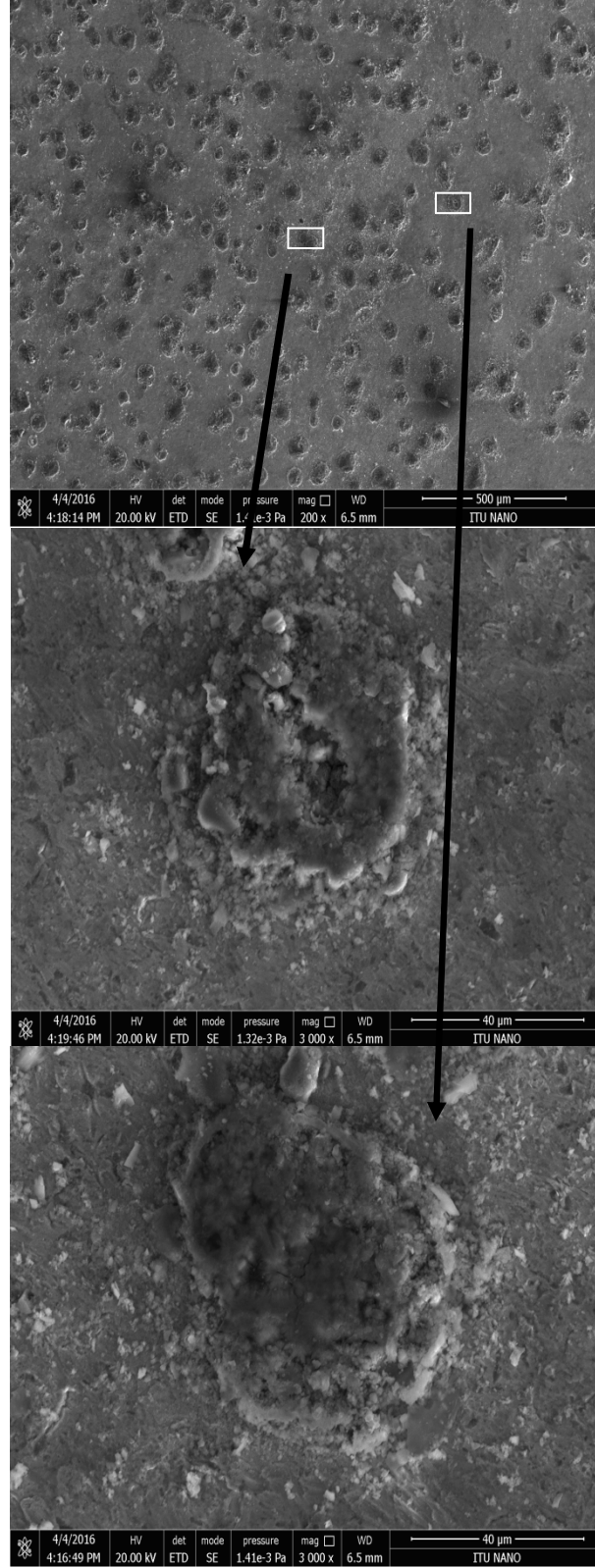


Şekil 6.9 : 100-200 mikron aşındırıcı tanecik çapı etkisinde 880 HVN çelik numunenin SEM görüntüsü.

şekil 6.9’da görüldüğü gibi 100-200 mikron aşındırıcı tanecik çapı etkisinde 880 HVN çelik numunede yüzeydeki çukurcuk çapları 3-8 mikron arasında değişmektedir. Aşınma yüzeyindeki oluşan mikro çukurcuklar seyrek ve çok az miktarlardadır.

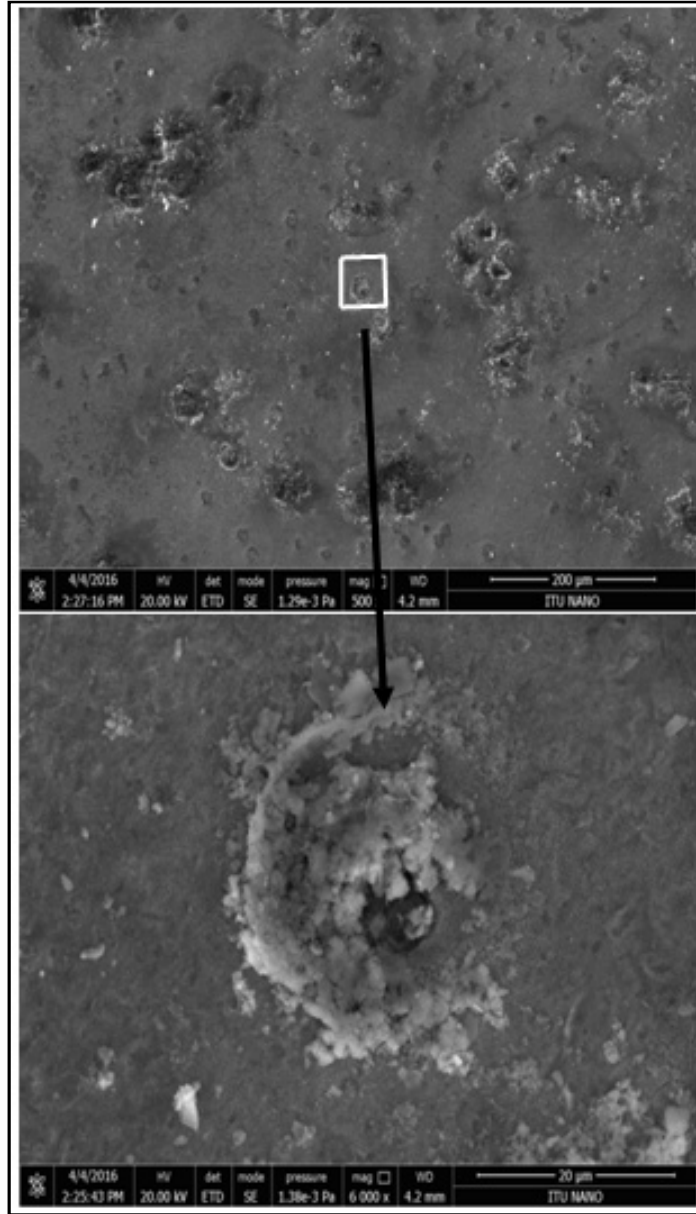
Mikro oyuk, mikro çukurcuk mekanizması daha sünek olan C15 numunelerin yüzeyinde görülmüştür.

Çukurcuk boyutları, 880 HVN Ck 45 çelik numunede 3-8 mikrondan, 185 HVN C15 çelik numunesinde 120-140 mikrona kadar artış gözlenmiştir. Aşındırıcı tanecik çapı artıka ortalama krater boyutu da artma eğilimi göstermektedir. Mikro çatlak mekanizması 880 HVN daha gevrek çelik numunelere rastlanmıştır.



Şekil 6.10 : 505-666 mikron aşındırıcı tanecik çapı etkisinde 185 HVN çelik numunenin SEM görüntüsü.

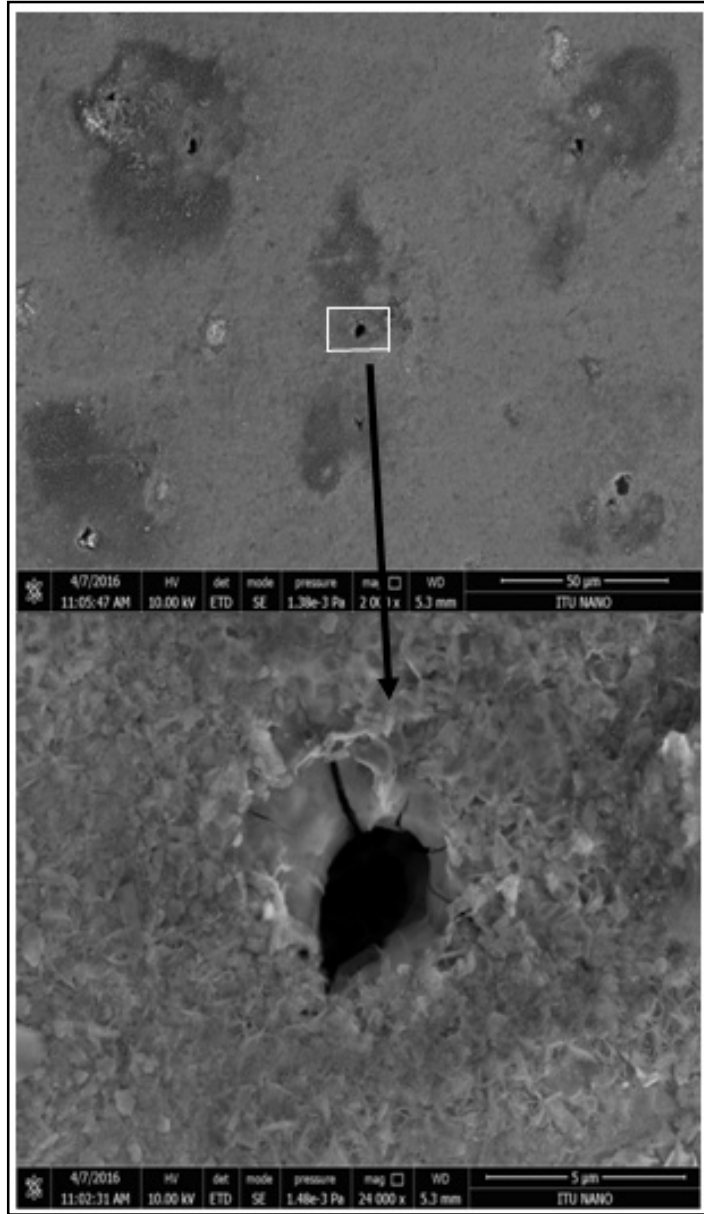
şekil 6.10 'da görüldüğü gibi 185 HVN sertlik değerine sahip çelik numune yüzeylerinde 505-666 mikron arasında aşındırıcı tanecik çapının etkisi altında 50-75 mikro metre mertebelerinde çukurcuklar oluşmuştur.



Şekil 6.11 : 100-200 mikron aşındırıcı tanecik çapı etkisinde 185 HVN çelik numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 6.11’de 185 HVN sertlik değerine sahip çelik numunenin SEM altında yüzey morfolojisi görülmektedir. Aşınma yüzeyinde meydana gelen mikro krater sayısı, şekil 6.10’daki daha yüksek aşındırıcı tane etkisinde aşınan numune yüzeyindeki mikro krater sayısından daha seyrek.

Şekil 6.12’ de 200-290 mikron aşındırıcı tanecik çapının etkisindeki 880 HVN sertliğindeki çelik numune yüzey morfolojisi gösterilmektedir. Yüzey çok sayıda küçük mikro kraterler gözlemlenmiştir.



Şekil 6.12 : 200-290 mikron aşındırıcı tanecik çapı etkisinde 880 HVN çelik numunenin SEM görüntüsü.

Aşındırıcı tanecik çapı artıkça aynı sertlikteki çelik numunelerdeki çukurcuk boyutları artma eğilimi göstermektedir. Yine yüksek sertlikteki çelik numunelerdeki mikro krater boyutları, daha düşük sertlikteki çelik numunelerde oluşan çukurcuklardan küçüktür.

Tüm aşındırıcı tanecik sınıfları için geçerli olmak üzere aşındırıcı tanecik çapı artıkça çelik numunelerin yüzeylerdeki çukurcuk sayıları da artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada, ortam parametreleri parçacık çarpma hız, parçacık çarpma açısı, aşındırıcı parçacık çapı ve malzeme özelliği olan malzeme sertliğinin erozif aşınmaya etkisi incelenmiştir.

Deneyler sonucunda çarpma açısının etkisi incelendiğinde; sünek malzeme için maksimum aşınma miktarı 30° çarpma açısında elde edilmiştir. Malzemenin sertliği 510 HVN olduğunda ise maksimum aşınma miktarı 45° çarpma açısında gözlenmiştir. Sertlik arttıkça aşınma miktarının pik yaptığı açı 90° ye doğru kayma eğilimi göstermektedir.

Erozif-abrazif aşınmayı etkileyen diğer bir parametre ise aşındırıcı tanecik çapıdır. Bu nedenle, deneylerde kullanılan kuvarz kum tanecik çap aralıkları $100\ \mu\text{m}$ - $200\ \mu\text{m}$, $200\ \mu\text{m}$ - $290\ \mu\text{m}$, $290\ \mu\text{m}$ - $385\ \mu\text{m}$, $385\ \mu\text{m}$ - $505\ \mu\text{m}$, $505\ \mu\text{m}$ - $666\ \mu\text{m}$, $666\ \mu\text{m}$ - $900\ \mu\text{m}$ boyutlarında sınıflandırılarak tanecik çapının erozif aşınmaya etkisinin gözlenmesi sağlanmıştır. Deneyler sonucunda, aşındırıcı kuvarz kum çapı arttıkça, çelik numunelerdeki kütle kaybının da arttığı görülmüştür.

Malzeme parametresi olarak ise malzeme sertliğinin etkisi incelenmiştir. Kullanılan çelik numuneler C15, Ck 45 ve St 37'dir. Ck 45 ve St 37 çelik numunelere su verilerek ve farklı sıcaklıklarda tavlansarak sertlikleri değiştirilmiştir. Sertlik değeri 185 HVN ile 880 HVN arasında değiştirilerek sertliğin, aşınma direncine etkisi incelenmiş ve deney sonucundaki kütle kayıpları bulunarak sertliğin ve aşındırıcı tanecik çapının aşınma direncine etkisini veren matematiksel bir model oluşturulmuştur.

Aynı aşındırıcı kuvarz kum tanecik çapında farklı sertlikteki çeliklerde erozif aşınma direnci doğrusal olarak sertlik arttıkça arttığı gözlemlenmiştir ve abrazif aşınma karakteristiğinden farklı olarak tek bir lineer eğri ile temsil edilebilmektedir.

Kum tanecik çapı arttıkça doğrunun eğimi azalmaktadır. Taneciğin çarpma enerjisi erozif aşınma karakteristiğini etkilemektedir. Yüksek tanecik çapı, yüksek çarpma

enerjisi sağlamak ve çelik malzemenin aşınma direncini azaltmaktadır. Sertliğin, erozif aşınma direncine etkisi düşük aşındırıcı tanecik boyutlarında daha fazladır.

Aşınma direncinin, tanecik çapına göre değişimi ise 2 bölgeyle temsil edilebilmektedir. Aşınma direnci eğilimi, kritik aşındırıcı tanecik çapından sonra değişim göstermektedir. Bu kritik çap, çelik numuneler için 310-390 μm arasındadır. Literatürde alüminyum malzemeler için de aynı şekilde belli bir tane boyutundan sonra sıçrama gözlenmektedir. Bu, alüminyum malzemeler için 256 μm 'dir.

Çelik numunelerdeki aşınma direncindeki bu değişim belli bir çarpma enerjisinde meydana gelmektedir. Çarpma enerjisi düşük aşındırıcı parçacık boyutlarında daha düşüktür, düşük aşındırıcı tanecik çapında çelik numunenin yüzeyine yakın bölgede sınır tabakada tutsaklanırlar ve aşınma mekanizması, erozyon mekanizmasından 3 cisimli abrazif aşınma mekanizmasına dönmesiyle açıklanmaktadır.

Deneyde kullanılan çelik numuneler 6 farklı sınıf kum aşındırıcı tane boyutunda aşınma miktarları incelenmiş ve tüm tanecik çaplarında bu değişim gözlenmiştir.

Diğer taraftan abrazif aşınma direnci, sertliğe göre değişimi literatürde 2 bölgeye ayrılarak tanımlanmıştır. Sadece abrazif aşınmada yüksek sertlikteki çelik numunelerde, kesme ile birlikte çatlama olaylarının da rol aldığı ve abrazif aşınma direncine sertlikle birlikte kırılma tokluğunun da etkisi gözlenmiştir. Bu nedenle abrazif aşınma direnci karakteristiği, belli bir sertlik değerinden sonra değişmekte olduğu belirtilmiştir.

Yapılan erozif aşınma deneyleri sonucunda ise aşınma direnci karakteristiği tek bölgede tanımlanabilmektedir. Deneysel sonuçlardaki veriler doğrultusunda kütle kayıplarına göre erozif aşınma dirençleri elde edilmiştir. Erozif aşınma direncinin, sertliğin artmasına göre doğrusal olarak artma eğiliminde olduğu bulunmuştur. Bu durum, erozif aşınma karakteristiği daha çok tekrarlı çarpmalar etkisi altında yüzeyde çekirdeklenme, çatlak oluşumu ve malzeme yüzeyinden malzeme kopması şeklinde meydana geldiğinden dolayı yorulma mekanizmasına daha çok benzemektedir.

Düşük aşındırıcı tanecik boyutlarında belli bir çarpma enerjisi ile gelen tanecik, tekrarlı çarpmalarla gevrek malzemedede daha çok çekirdeklenme evresini tamamlamasına yeterli olmaktadır ancak malzeme yüzeyinden parçacık kopması için yeterli değildir. Bundan dolayı yüksek sertlikteki çelik malzemedede daha yüksek erozif aşınma direnci görülmektedir.

Bu çalışma, pompa gövdelerinde, pervanelerde, borularda, nozullarda, fanlarda, akışkanın yer değiştirdiği durumlarda önem arz eden erozif aşınmanın kum parçaçık boyutuna, malzemenin sertliğine, çarpma hızına göre hangi mertebelere ulaştığının ve bu tip uygulama alanlarında kullanılan malzemelerin belirlemesinde ve hangi ortam koşullarının erozif aşınmayı nasıl değiştirdiğinin matematiksel olarak modelinin çıkartılması, erozif aşınmanın bu tür uygulama alanlarında en az mertebelere indirilmesi için bir ışık tutacaktır. Endüstride kullanılan ve erozif aşınmaya maruz kalan pompa ve fan sistemleri için de fayda sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Finnie, I.** (1960). "Erosion of surfaces by solid particles," *Wear*, vol. 3, pp. 87-103.
- [2] **Bitter, J.G.A.** (1963). "A study of erosion phenomena—Parts I," *Wear*, vol. 6, , pp. 5-21.
- [3] **Bitter, J.G.A.** (1963). "A study of erosion phenomena—Parts II," *Wear*, vol. 6, pp. 169-190.
- [4] **Dorfman, M.** (2002). "Wear-Resistant Thermal Spray Coatings", *Sulzer Technical Review*, vol. 2, pp. 14-17.
- [5] **Tabakoff, W.** (1999). "Erosion resistance of superalloys and different coatings exposed to particulate flows at high temperature," *Surface and Coatings Technology*, vol. 120–121, pp. 542–547.
- [6] **Hejwowski, T.** (2009). Erosive and abrasive wear resistance of overlay coatings, *Vacuum*, 83, pp.166–170.
- [7] **Zikin, A., ntonov, M., Hussainova, I., Katona, L. & Gavrilovic', A.** (2013). High temperature wear of cermet particle reinforced NiCrBSi hardfacings, *Tribology International*, 68, pp. 45-55.
- [8] **Katsich, C., Badisch, E., Roy, M., Health, G.R. & Franek, F.** (2009). "Erosive wear of hardfaced Fe–Cr–C alloys at elevated temperature," *Wear*, vol. 267, pp. 1856–1864.
- [9] **Zhang, A. F., Wang, Y.Y. & Li, C. J.** (2008). Effects of Erosion Rate on the Erosion-Corrosion Synergism of High Velocity Oxy-fuel Sprayed Ni-Based Coatings, *Key Engineering Materials*, 373-374, pp 585-588.
- [10] **Chang, S. H., Lin, Y. K. & Huang, K. T.** (2012). Study on the thermal erosion, wear and corrosion behaviors of TiAlN/oxynitriding duplex-treated AISI H13 alloy steel, *Surface & Coatings Technology*, 207, pp. 571–578.
- [11] **Lopez, D., Congote, J. P., Can, J. R., Toro, A. & Tschiptschin, A. P.** (2005). Effect of particle velocity and impact angle on the corrosion–erosion of AISI 304, AISI 420 stainless steels," *Wear*, vol. 259, pp. 118-124.
- [12] **Guanghong, Z., Hongyan, D., Yue Z. & Nianlian, L.** (2010). Corrosion–erosion wear behaviors of 13Cr24Mn0.44N stainless steel in saline–sand slurry, *Tribology International*, 43, pp. 891–896.
- [13] **Sharma, S. C., Krishna, M., Nasimha Murthy, H. N., Tarachandra, R., Satyamoorthy, M. & Bhattacharyya, D.** (2006). Study of corrosive–erosive wear behaviour of Al6061/albite composites, *Materials Science and Engineering, A* 425, pp. 305–311.

- [14] **Saraswathi, Y. L., Das, S. & Mondal, D. P.** (2006). Influence of microstructure and experimental parameters on the erosion–corrosion behavior of Al alloy composites, *Materials Science and Engineering, A* 425, pp. 244–254.
- [15] **Sevim, İ.** (1998). Çeliklerin Abrasiv Aşınmasında Aşındırıcı Tane Büyüklüğünün Aşınma Direncine Etkisi, (*Doktora Tezi*). İTÜ.
- [16] **Levy, A.** (1997). Solid Particle Erosion and Erosion-corrosion of Materials, *ASM International*.
- [17] **Van Riemsdijk, A. J. & Bitter, J. G. A.** (1959). “Erosion in gas-solid systems”, *5th World Petroleum Congress*, New York, pp. 43-57
- [18] **Hejwowski, T.** (2009). Erosive and abrasive wear resistance of overlay coatings, *Vacuum*, vol. 83, pp. 166–170.
- [19] **Sevim, I. & Eryurek, I.** (2006). Effect of fracture toughness on abrasive wear resistance of steels, *Materials and Design*, 27, pp. 911–919.
- [20] **Finnie, I.** (1995). Some reflections on the past and future of erosion, *Wear*, Vol. 186-187, pp. 1-10.
- [21] **Finnie, I.** (1972). “Some observations on the erosion of ductile metals,” *Wear*, vol. 19, pp. 81-90.
- [22] **Clark, H. M. & Hartwich, R. B.** (2001). “A re-examination of the ‘particle size effect’ in slurry erosion”, *Wear*, vol. 248, pp. 147–161.
- [23] **Williams, J. A.** (2005) Wear and Wear Particles—Some Fundamentals, *Tribology International*, 38, pp. 863–870.
- [24] **Stachowiak, G. W. & Batchelor, A. W.** (2005). *Engineering Tribology*, 3th edition.
- [25] **Karl-Heinz Z. G., John A. Williams.** (1987). Microstructure and Wear of Materials, *Tribology Series*, 10.
- [26] **Adamiak, M.** (2012). “Effect of Abrasive Size on Wear, Abrasion Resistance of Materials”, *InTech*, pp. 167-184.
- [27] **Url-1** <<http://jpkc.fudan.edu.cn/picture/article/348/1b/ee/6dce0ae740cf8673b53e4e96abb8/ab452849-53dd-461c-ad71-e0be2a004c7a.pdf>>, erişim tarihi 01.12.2015.
- [28] **A. K. Jha, R. Batham, M. Ahmed, A. K. Majumder, O. P. Modi, S. Chaturvedi, A. K. Gupta.** (2011). Effect of impinging angle and rotating speed on erosion behavior of aluminum, *Trans. Nonferrous Met. Soc., China*, 21, pp. 32-38.
- [29] **Gandhi, B. K. & Satish, V. B.** (2004). Nominal particle size of multi-sized particulate slurries for evaluation of erosion wear and effect of fine particles, *Wear*, Vol. 257, pp. 73–79.
- [30] **Girish, R. D. & Gandhi, B. K.** (2005). S.C. Jain, Improvement in the design of a pot tester to simulate erosion wear due to solid–liquid mixture, *Wear*, Vol. 259, pp. 196–202.

- [31] **Gandhi, B. K., Singh, S. N. & Seshadri, V.** (2003). A study on the effect of surface orientation on erosion wear of flat specimens moving in a solid–liquid suspension, *Wear*, Vol. 254, pp. 1233–1238.
- [32] **Desale, G. R., Gandhi, B. K. & Jain, S. C.** (2009). Particle size effects on the slurry erosion of aluminium alloy (AA 6063), *Wear*, 266, pp. 1066–1071.
- [33] **Patil, M. S., Deore, E. R., Jahagirdar, R. S. & Patil, S. V.** (2011). Study of the Parameters Affecting Erosion Wear of Ductile Material in Solid- Liquid Mixture, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, Vol. III.
- [34] **Jones, L. C.** (2011), Low angle scouring erosion behaviour of elastomeric materials, *Wear*, Vol. 271, pp. 1411– 1417.
- [35] **Tian, H. H., Addie, G. R. & Barsh, E. P.** (2007). A new impact erosion testing setup through Coriolis approach, *Wear*, 263, pp. 289–294.
- [36] **Yıldızlı, K., Eroğlu, M. & Karamış, M.B.** (2005). Erosive Wear Behaviour of Hardfacing Austenitic Manganese Deposit, *Tribology in industry*, Vol. 27, No. 3&4.
- [37] **Divakar, M., Agarwal, V. K. & Singh, S. N.** (2005). Effect of the material surface hardness on the erosion of AISI316, *Wear*, 259, pp. 110–117.
- [38] **Wang, Y. F. & Yang, Z. G.** (2008). Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials, *Wear*, Vol. 265, pp. 871–878.
- [39] **Desale, G. R., Gandhi, B. K. & Jain, S.C.** (2008). Slurry erosion of ductile materials under normal impact condition, *Wear*, Vol. 264, pp. 322–330.
- [40] **Url-2**<http://www.lucefin.com/wp-content/files_mf/s235j2en.pdf>, erişim tarihi 01.02.2016.
- [41] **Url-3**<<http://www.steelforge.com/aisi-1045/>>, erişim tarihi 12.12.2015.
- [42] **Tamburini, A., Cipollina, A., Micale, G., Brucato A. & Ciofalo, M.** (2013). CFD simulations of dense solid–liquid suspensions in baffled stirred tanks: Prediction of solid particle distribution, *Chemical Engineering Journal*, 223, pp. 875–890.
- [43] **Tamburini, A., Cipollina, A., Micale, G., Brucato A. & Ciofalo, M.** (2012). CFD simulations of dense solid–liquid suspensions in baffled stirred tanks: Prediction of the minimum impeller speed for complete suspension, *Chemical Engineering Journal*, 193–194, pp. 234–255.
- [44] **Bittorf, K. J. & Kresta, S. M.** (2000). Active volume of mean circulation for stirred tanks agitated, *Chemical Engineering Science*, Vol. 55.
- [45] **Khazam, O. & Kresta, S. M.** (2009). A novel geometry for solids drawdown in stirred tanks, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 87, pp. 280– 290.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad :Ergin KOSA
Doğum Tarihi ve Yeri : 02.08.1984, İSTANBUL
E-posta :erginkosa@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2008, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği
2008, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yüksek lisans** : 2010, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği, Malzeme ve İmalat Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2010 yılından beri İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesinde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

YAYIN LİSTESİ:

- Growth of ZnO Nanostructures on Biopolymer Films, Kılıc B., Omay D., **Kosa E.**, Kızıl H., Trabzon L., *Journal of Materials Science and Engineering A*, Vol.2, pp.761-768 December, 2012.
- Dynamic and Quasi-Static Simulation of A Novel Compliant MEMS Force Amplifier by MATLAB/SIMULINK, **Ergin KOSA**, Levent TRABZON, Umit SONMEZ, Huseyin KIZIL, *Matlab Book Chapter, A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications*, INTECH, Vol. 1, September 2012.

- Noval Solar Cell Based on Biopolymer, Kılıc B., Omay D., **Kosa E.**, Kızıl H., Trabzon L., *4th Hybrid and Organic Photovoltaic Conference*, Uppsala/Sweden, 2012.
- Dynamic Behavior of a Novel Compliant MEMS Force Amplifier by Matlab & Simulink, **Kosa E.**, Trabzon L., Sonmez U., *Journal of Advanced Materials Research*, Vol. 468-471, pp. 1541-1547, 2012.
- The Design and Analysis of a Novel MEMS Force Amplifier, **Kosa E.**, Sonmez U., Kızıl H., Trabzon L., *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 34, pp.253-259, 2010.
- The Design and Analysis of a Novel MEMS Force Amplifier, **E. Kosa**, U. Sonmez, L. Trabzon, H. Kızıl, *published in the Proceedings of 6th Nanoscience and Nanotechnology Conference*, Izmir, 15 – 18 June 2010.

Recognition:

- Handbook of Compliant Mechanisms, Larry L. Howell, Spencer P. Magleby, Brian M. Olsen, (**Ergin Kosa** as a student contributor to the book), ISBN: 978-1-119-95345-6, John Wiley & Sons Ltd, 2013.
- A Novel Micro Compliant Force Amplifier with Different Elastic Link Geometries on a Micro Chip, L.Trabzon, **E. Kosa**, first study from Turkey published in Europractice Annual Report New Designs, 2010.

DOKTORA TEZİ ÇALIŞMASI SIRASINDA YAPILAN YAYINLAR:

- Effect of Impact Angle on Erosive Abrasive Wear of Ductile and Brittle Materials, **Ergin Kosa**, Ali Göksenli, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, pp. 536-540 Vol:9 No:9, 2015.
- Effect of Impact Angle on Erosive Abrasive Wear of Ductile and Brittle Materials, ICEEWM 2015, 17th International Conference on Environment, Energy and Waste Management, **Ergin Kosa**, Ali Göksenli, Paris, 21-22 September, 2015.
- Effect of Particle Impact Energy on Erosive Abrasive Wear, **Ergin Kosa**, Ali Göksenli, *International Congress on Natural and Engineering Sciences*, Bosnia Herzegovina, Sarajevo, 9-13 September, 2015.
- Analysis and Optimization of Erosion Wear Tester Design Parameters, **Ergin Kosa**, Ali Göksenli, “*Journal of Applied Mechanics and Materials*”, Manufacturing Science and Technology VI, Trans Tech Publications, July, 2015.
- Analysis and Optimization of Erosion Wear Tester Design Parameters, Authors; **Ergin Kosa**, Ali Göksenli, CMECE 2015 2nd International Conference on Mechanical, Electronics and Computer Engineering, January 2015.