

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DUAL FAZLI ÇELİKLERİN EROZİYON AŞINMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

İREM ÖZGE AKPINAR

KOCAELİ 2022

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DUAL FAZLI ÇELİKLERİN EROZİF AŞINMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

İREM ÖZGE AKPINAR

Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Prof. Dr. Adalet ZEREN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ARMAĞAN
Jüri Üyesi, İstanbul Medeniyet Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 21.06.2022

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İrem Özge AKPINAR

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

İrem Özge AKPINAR

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Özellikle havacılık ve otomotiv endüstrisinde yüksek hızlı hava akımıyla etkileşimde olan aşındırıcı katı partiküllerin malzeme yüzeylerine çarpmasıyla katı partikül erozyonu meydana gelerek hasara sebep olmaktadır. Malzemelerin hasarlanmasıyla çalışma performansları ve kullanım ömürleri azalmakta, bu malzemelerin bakımı veya değişimi için gereken maliyetler artmakta, hatta yolcu güvenliği olumsuz etkilenmektedir. Malzemelerde meydana gelen ve karmaşık bir süreç olan erozyon hasarının önceden doğru bir şekilde anlaşılması tüm bu olumsuzlukların aşılması açısından önem taşır. Bu nedenle bu çalışmada katı partikül erozyonu parametrelerinin, dual fazlı çeliklerin erozif aşınma davranışına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında bilgi birikimi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, her türlü imkanı sağlayarak desteğini hiç esirgemeyen, bana güvenen ve cesaretlendiren, örnek edindiğim değerli danışman hocam Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deney çalışmamda yardımlarından dolayı Orkan Baran KORKUSUZ'a ve Pelin ÖZZAİM'e teşekkür ederim. Ayrıca bugüne kadar gelmemde büyük emek sahibi olup beni hep destekleyen anneme ve babama, her konuda yanımda olarak destek ve yardımlarını esirgemeyip bana güvenerek cesaretlendiren canım kardeşim Seden Ezgi AKPINAR'a çok teşekkür ederim.

Haziran – 2022

İrem Özge AKPINAR

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLOLAR DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
ÖZET	xvii
ABSTRACT	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KATI PARTİKÜL EROZYONU	3
2.1. Sünek ve Gevrek Malzemelerin Katı Partikül Erozyonu.....	8
2.2. Katı Partikül Erozyonuna Etki Eden Faktörler	15
2.2.1. Parçacık Şekli	16
2.2.2. Parçacık Çarpma Açısı	23
2.2.3. Parçacık Boyutu.....	29
2.2.4. Parçacıkların Kırılma Olasılığı	31
2.2.5. Parçacık Çarpma Hızı	37
2.2.5.1. Çift Disk Metoduyla Aşındırıcı Partiküllerin Çarpma Hızlarının Ölçülmesi	39
2.2.6. Parçacık Sertliği.....	41
2.2.7. Parçacıkların Kütlesel Debisi	43
2.2.8. Maruz Kalma Süresi	46
2.2.9. Hedef Malzeme Özellikleri.....	48
3. BİRİNCİ NESİL ULTRA YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER (UHSS/AHSS).....	52
3.1. Kompleks Fazlı Çelikler (CP).....	59
3.2. TRIP Çelikler.....	60
3.3. Martenzitik Çelikler (MART).....	60
3.4. Dual Fazlı Çelikler.....	62
3.4.1. Dual Fazlı Çeliklerin Mikroyapı Bileşenlerinin Mekanik Özelliklere Etkisi	67
3.4.1.1. Martenzitin Etkisi.....	68
3.4.1.2. Ferritin Etkisi.....	69
3.4.1.3. Östenitin Etkisi.....	69
3.4.2. Dual Fazlı Çeliklerin Mekanik Özellikleri	70
3.4.2.1. Akma Mukavemeti.....	70
3.4.2.2. Süneklik.....	71
3.4.2.3. Pekleşme (Deformasyon Sertleşmesi) Davranışı	72
3.4.2.4. Çekme Mukavemeti	75
3.4.2.5. Kopma Mukavemeti.....	76
3.4.2.6. Kırılma Davranışı.....	76
3.4.3. Dual Fazlı Çeliklerin Literatür İncelemesi	78
3.4.3.1. Dual Fazlı Çeliklerin Erozyon Aşınma Davranışının Literatür İncelemesi	83
4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK DEĞERLERİ.....	93

5. MALZEME VE YÖNTEM	99
5.1. Malzeme Seçimi	99
5.2. Uygulanan Deneysel Yöntem	101
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	105
6.1. Aşındırıcı Parçacıkların Kütlesel Debilerinin Hesaplanması	105
6.2. Aşınan Malzemelerin Erozyon Oranlarının Hesaplanması	106
6.3. Katı Partikül Erozyonunun Partikül Çarpma Açısına Bağlı Değişimi	107
6.4. Katı Partikül Erozyonunun Püskürtme Basıncına Bağlı Değişimi	114
6.5. Katı Partikül Erozyonunun Numunelerin Mekanik Özelliklerine Bağlı Değişimi	121
6.6. Katı Partikül Erozyonunun Maruz Kalma Süresine Bağlı Değişimi	123
6.7. Numunelerin Yüzey Topografyaları	127
6.8. Numunelerin Pürüzlülük Değerleri.....	128
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	135
KAYNAKLAR.....	136
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	144
ÖZGEÇMİŞ.....	145

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Katı partikül erozyonunun şematik gösterimi	3
Şekil 2.2.	Çölde katı partiküllere maruz kalan bir araba	4
Şekil 2.3.	Royal Air Force (RAF) Merlin helikopterinin Afganistan'da toz bulutu oluşturmaları	5
Şekil 2.4.	Katı partiküllerin motora girişi	5
Şekil 2.5.	Ticari bir uçakta katı partiküllerin etkisiyle gövdesindeki hasar oranının dağılımı	6
Şekil 2.6.	Katı parçacıkların temel turboşaft motor bileşenleri üzerindeki etkileri: (a) kompresör kanat yüzeylerinde erozyon, (b) kompresör kanatlarının ön ve arka kenarlarında erozyon, (c) türbin kanatlarında erozyon, (d) türbin kanatları üzerinde erimiş tortuların birikmesi	7
Şekil 2.7.	Kaplamalı (ZrN, Cr ₃ C ₂ , WC-Co, TiN, TiN/Ti, TiN/CrN kaplama kullanılabılır) ve kaplamasız kompresör kanatları	7
Şekil 2.8.	Gaz türbinli motorlardaki kompresör kanatları: a) yeni bir kompresör kanadı, b) katı partikül erozyonu sonrası kompresör kanadı	8
Şekil 2.9.	Sünek ve gevrek malzemelerde çarpma süresi ve açısının ağırlık kaybı ile ilişkisi	9
Şekil 2.10.	90° çarpma açısı ve 45 m/s hızda bir DP çeliğinin (dual fazlı çelik) yüzeyine parçacıkların gömüldüğünü gösteren SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüsü	9
Şekil 2.11.	Erozyon süreci: (a) sünek malzeme, (b) gevrek malzeme	10
Şekil 2.12.	Erozyon mekanizmalarının şematik gösterimi: a) mikrosürme ve b) mikro kesme	11
Şekil 2.13.	Alüminyum oksit parçacıklar ile yapılan katı partikül erozyonunda erozyon izinin kesit katmanlarının SEM mikrografı: (a) aşınmış ve deforme olmuş tabaka, (b) yüzey altı çatlak ilerlemesi, (c) deforme olmuş tabakanın kırılması	12
Şekil 2.14.	Katı parçacık erozyonunun olası mekanizmaları; (a) düşük çarpma açılarında abrazyon aşınması, (b) düşük hız ve yüksek çarpma açısı sırasında yüzey yorulması, (c) orta hız ve yüksek çarpma açısı sırasında çoklu plastik deformasyon veya gevrek kırılma, (d) yüksek çarpma hızlarında yüzey erimesi, (e) ikincil etkileri olan makroskobik erozyon	15
Şekil 2.15.	Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler	16
Şekil 2.16.	Aşındırıcı parçacıkların şekil parametreleri	17
Şekil 2.17.	Farklı aşındırıcıların geometri ve boyutları: a) alümina, b) silisyum karbür, c) kuvars, d) cam boncuk, e) yuvarlak çelik kum, f) tungsten karbür	17
Şekil 2.18.	Parçacık şekli: a) keskin köşeli, b) keskin köşeli olmayan (yuvarlak)	18
Şekil 2.19.	Ağırlık kaybı- zaman grafikleri: a) 30° çarpma açısı, b) 90° çarpma açısı	19
Şekil 2.20.	Farklı çarpma açılarında erozyon oranlarının karşılaştırması	19

Şekil 2.21.	Çarpma açısına bağlı olarak küresel ve açısal parçacıkların erozyon oranı üzerindeki etkisi	20
Şekil 2.22.	Parçacık şeklinin ve malzeme sertliğinin çelik hedef malzemelerin özgül hacim kaybı üzerindeki etkisi.....	20
Şekil 2.23.	Açısal ve küresel aşındırıcılar ile malzeme kaldırmanın erozyon oranı analizi: a) Ti-6Al-4V hedef malzeme ve b) TiN kaplanmış Ti-6Al-4V hedef malzeme	21
Şekil 2.24.	Küresel ve açısal (köşeli) aşındırıcılar ile çeşitli aralıklarla erozyondan sonra TiN kaplamaların makrografik görüntüleri.....	22
Şekil 2.25.	Ti-6Al-4V malzeme kaldırma fenomeninin mikroskobik analizi: a) Ti-6Al-4V malzemesinin köşeli partiküller ile erozyonu sonrası dudak oluşumu, b) Ti-6Al-4V malzemesinin küresel partiküller ile erozyonu sonrası trombosit (pelet, yassı tanecik) oluşumu, c) TiN kaplamanın köşeli partiküller ile erozyonu sonrası alt tabakanın ve kaplamanın erozyonu, d) TiN kaplamanın küresel partiküller ile erozyonu sonrası halka çatlakları oluşumu	23
Şekil 2.26.	Yüzeyde aşınmaya neden olan bir parçacığın çarpma açısı	23
Şekil 2.27.	Çarpma açısının sünek ve gevrek (kırılğan) malzemelerin aşınma oranları üzerindeki etkisi.....	24
Şekil 2.28.	30 aşındırıcı parçacığın çarpması sonrası sünek malzemenin yüzey morfolojisinin şematik gösterimi: a) 30° çarpma açısı, b) 90° çarpma açısı.....	25
Şekil 2.29.	20 aşındırıcı parçacığın çarpması sonrası gevrek malzemenin yüzey morfolojisinin şematik gösterimi: a) 30° çarpma açısı ve b) 90° çarpma açısı.....	25
Şekil 2.30.	a) 7°, b) 15°, c) 30°, d) 45°, e) 60°, f) 75° ve g) 90° çarpma açısı için 30 dakika süreyle aşınmış kraterler	27
Şekil 2.31.	Test edilen malzemelerde erozyon hasarı	28
Şekil 2.32.	Darbe geometrisi: a) 45°'den küçük açılar, b) 90°'ye yakın veya 90° açılar	28
Şekil 2.33.	Çarpma açısı- toplam erozyon oranı grafiği.....	29
Şekil 2.34.	Aşındırıcı tane çapının ve temas basıncının bir polimer (PMMA, polimetilmetakrilat), Ni ve AISI 1095 çeliğinin aşınma oranına etkisi	30
Şekil 2.35.	Farklı parçacık boyutlarındaki cam boncukların kinetik enerjisi.....	30
Şekil 2.36.	Farklı parçacık boyutları için saniyede hedef yüzeye çarpan parçacık sayısı	31
Şekil 2.37.	Hedef malzemeye çarpan bir aşındırıcı parçacığın kırılma yapısı	32
Şekil 2.38.	Köşeli aşındırıcı parçacığın gevrekliğinin ve tokluğunun aşındırma verimliliğine etkisi.....	32
Şekil 2.39.	Kuvars parçacıkların çarpma hızına ve çarpma açısına bağlı olarak kırılma olasılığı	33
Şekil 2.40.	Kuvars parçacıklarının kırılma olasılığına çarpma hızı ve parçacık çapının etkileri.....	34
Şekil 2.41.	Ti-6Al-4V alaşımı ile erozyon sonrası parçalanma: (a) SiO ₂ küresel parçacık, (b) SiO ₂ köşeli parçacık	35

Şekil 2.42.	Test edilen tüm kombinasyonlar için partikülün sertliğinin hedef malzeme sertliğine (H_p/H_t) oranına karşı 60 m/s çarpma hızındaki erozyon oranı.....	36
Şekil 2.43.	Üç farklı boyuttaki aşındırıcı parçacığın parçacık hızına göre ağırlık kaybı değişimi.....	38
Şekil 2.44.	Yüzey pürüzlülüğünün parçacık hızına ve boyutuna bağlı değişimi	39
Şekil 2.45.	Çift disk metodu deney sistemi	40
Şekil 2.46.	a) Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler ve b) aşındırıcı çarpması sonrası alt diskin görünümü	40
Şekil 2.47	Girinti sertlik ölçüm yöntemleri.....	42
Şekil 2.48.	Silisyum karbür (SiC), alümina (Al_2O_3) ve silika (SiO_2) aşındırıcılarla çarpma hızına bağlı olarak alümina malzemesinin erozyon oranı.....	43
Şekil 2.49.	30° çarpma açısında farklı maruz kalma süresi ile kraterlerin gelişimi: a) 10 dakika, b) 30 dakika ve c) 100 dakika	46
Şekil 2.50.	15° çarpma açısında farklı maruz kalma süresi ile kraterlerin gelişimi: a) 30 dakika, b) 90 dakika	47
Şekil 2.51.	Farklı çarpma açıları için maruz kalma süresinin bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybı	47
Şekil 2.52.	Çarpma açısının bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybı	48
Şekil 2.53.	75 m/s hızda ve 20° çarpma açısında 60 mesh SiC partikülü tarafından aşındığında bakır ve alüminyum için başlangıç sertliğinin bir fonksiyonu olarak kesme derinliği	50
Şekil 2.54.	Tavlanmış yüzeyin ve erozyon sonrası tamamen aşınmış yüzeyin Vickers sertliğinin bir fonksiyonu olarak bir dizi metal için hacim erozyonu	51
Şekil 3.1.	Entegre bir çelik fabrikasının akış şeması: 1) hammadde teslimatı, 2) sinter tesisi, 3) kok fabrikası (kömürden kok yapımı), 4) yüksek fırın (cevher indirgeme ile sıcak metal üretimi), 5) sıcak metal kükürt giderme, 6) dönüştürücü (sıcak metalin çeliğe dönüşümü), 7) elektrik ark ocağı (hurda çeliğin eritilmesi), 8) ikincil veya pota metalürjisi, 9) sürekli döküm (sıvının katı çeliğe dönüşümü), 10) sıcak haddeleme	53
Şekil 3.2.	Bir aracın başlıca çarpışma yönetimi bölgeleri.....	54
Şekil 3.3.	Farklı çelik türleri için gerilme- % uzama eğrileri ve gövde yapısındaki uygulamaları	55
Şekil 3.4.	Ducker Worldwide verilerine göre 2007 ve 2015 model ortalama araç gövdesi bileşenleri	55
Şekil 3.5.	FSV (Geleceğin Çelik Aracı) BEV (Akülü Elektrikli Araç) aracının gövde yapısındaki malzeme kullanım oranları.....	56
Şekil 3.6.	Farklı çeliklerin çekme mukavemeti ve uzama değerleri	59
Şekil 3.7.	DP, TRIP ve HSLA çeliklerinde gerilme – birim şekil değişimi grafiği	59
Şekil 3.8.	TRIP çeliğinin mikroyapısı	60
Şekil 3.9.	Martenzitik çeliğin SEM görüntüsü	61
Şekil 3.10.	Rulo şekillendirme işlemi: a) şematik gösterimi, b) rulo şekillendirme makinesi.....	61

Şekil 3.11.	Dual fazlı çeliğin mikroyapısı: a) şematik gösterim, b) taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü.....	63
Şekil 3.12.	Dual fazlı çeliklerin mikroyapısının SEM görüntüsü	63
Şekil 3.13.	Ara su verme ısıtma işlemiyle dual fazlı çelik üretimi	64
Şekil 3.14.	Kritik sıcaklıklar arası bölgede tavlama ile dual fazlı çelik üretimi	65
Şekil 3.15.	Kademeli su verme ısıtma işlemiyle dual fazlı çelik üretimi.....	65
Şekil 3.16.	Farklı ısıtma yöntemlerinin oluşturduğu mikroyapılar: a) ara su verme, b) kritik sıcaklıklar arası tavlama, c) kademeli su verme.....	66
Şekil 3.17.	Zaman sıcaklık dönüşüm (TTT) diyagramı	68
Şekil 3.18.	Sade karbonlu, HSLA (SAE 950X, SAE 980X) ve dual fazlı (GM 980X) çelikler için gerilme- gerinim grafiği.....	71
Şekil 3.19.	Pekleşme üssü (n) ile gerçek gerilme-gerinim eğrisinin logaritmik gösterimi.....	73
Şekil 3.20.	Elastik- plastik malzemeleri sertleştiren kuvvet yasasının kurucu yasası	74
Şekil 3.21.	Farklı karbon konsantrasyonlarına ve martensit içeriğine sahip %1,5 Mn dual fazlı çeliklerin, ferritik çeliğe kıyasla 760°C’de kritik olarak tavllanmış gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrileri.....	75
Şekil 3.22.	Martenzit hacim oranının çekme mukavemetiyle ilişkisi	75
Şekil 3.23.	SAAB (Svenska Aeroplan AktieBolaget) otomotiv şirketinde çeşitli DP çelik derecelerinden üretilen otomobil parçaları	77
Şekil 3.24.	Kalınlığı 1,35 mm olan DP1180 çeliğinin tamponda uygulanması	77
Şekil 3.25.	DP980 çeliğinin B sütunu desteğinde uygulaması.....	78
Şekil 3.26.	Farklı ısıtma hızlarıyla elde edilen farklı martensit içeriğine sahip DP çeliklerinin mühendislik gerilme- gerinim eğrileri: a) düşük ısıtma hızı ve b) yüksek ısıtma hızı.....	79
Şekil 3.27.	DP çeliklerde ferrit hacim oranının bir fonksiyonu olarak mukavemet ve % uzama.....	81
Şekil 3.28.	Martenzit hacim oranı 0,25 olan çeliklerin mikroyapısı: (a) ağıl martenzit, (b) lifli martenzit (beyaz)	82
Şekil 3.29.	Farklı sıcaklıklarda: a) 0,25 hacim oranında ağıl martenziti olan çelikte akma gerilimi ve nihai çekme mukavemeti, b) ağıl martenzit hacim oranının akma gerilimiyle ilişkisi, c) ağıl martenzit hacim oranının nihai çekme mukavemetiyle ilişkisi.....	83
Şekil 3.30.	Martensit morfolojisinin farklı sıcaklıklarda: a) akma gerilimi ve b) nihai çekme mukavemeti üzerindeki etkisi.....	83
Şekil 3.31.	780°C kritik sıcaklıklar arası tavlama tavlama süresi ile martensit hacim fraksiyonunun (% MVF) değişimi.....	84
Şekil 3.32.	Bulamaç erozyonu testi için test cihazının şematik çizimi	86
Şekil 3.33.	Sertliğin erozyon oranına etkisi	87
Şekil 3.34.	Çelik numunelerin belirli çarpma hızlarında çeşitli çarpma açılarına göre kararlı durum erozyon oranının değişimi: a) 45 m/s, b) 72 m/s, c) 95 m/s.....	89
Şekil 3.35.	90° darbe açısı ve 45 m/s darbe hızında test edilen dual fazlı çeliklerin x2000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskopi (a) NS, (b) DP2, (c) DP4, (d) DP5	89
Şekil 3.36.	İşlem uygulanmamış DP980 ve ısıtma işlemi uygulanmış numuneler	91

Şekil 3.37.	Numunelerin bulamaç erozyonunda: a) çarpma açısına bağlı kümülatif hacim kaybı, b) çarpma hızına bağlı kümülatif hacim kaybı.....	92
Şekil 4.1.	Bir yüzeyin 3 boyutlu pürüzlülük parametreleriyle izometrik görünümü	93
Şekil 4.2.	a) Yüzey dokusu parametreleri, b) yüzey dokusundaki pürüzlülük ve dalgalılığın şematik gösterimi	94
Şekil 4.3.	Dalgalılık ve pürüzlülük profilleri arasındaki fark.....	94
Şekil 4.4.	Pürüzlülük profili üzerinde pürüzlülük değerlerinin gösterimi: a) Rp ve b) Rv	95
Şekil 4.5.	Aynı Ra değerine sahip çeşitli yüzey profilleri.....	96
Şekil 4.6.	Pürüzlülük profili üzerinde Ra parametresinin şematik gösterimi.....	96
Şekil 4.7.	Pürüzlülük profili üzerinde Rp, Rv ve Rt parametrelerinin şematik gösterimi	96
Şekil 4.8.	Pürüzlülük profili üzerinde Rz değerlerinin şematik gösterimi	97
Şekil 4.9.	Çeşitli parametreler altında katı partikül erozyonuna maruz bırakılan numunenin Pt pürüzlülük değeri	98
Şekil 5.1.	Deneylerde kullanılan numuneler: a) derin çekmede kullanılan Ereğli Demir ve Çelik Fabrikası'nın 6224 kodlu sacı, b) DP980 ve DP1180 çelikleri, c) numune boyutları	100
Şekil 5.2.	120 mesh partikül boyutuna sahip (90-125 µm boyutunda) alüminyum oksit aşındırıcıların büyütülmüş SEM fotoğrafı	100
Şekil 5.3.	Erozif aşınma test düzeneğinin şematik görüntüsü: a) izometrik, b) ön görünüş	101
Şekil 5.4.	Erozif aşınma test düzeneğindeki kabinin dışı.....	103
Şekil 5.5.	Erozif aşınma test düzeneğindeki kabinin içi.....	103
Şekil 5.6.	Numune tutucu	104
Şekil 5.7.	Deneylerde kullanılan temassız 3 boyutlu (3D) optik profilometre (Nanovea PS50, USA).....	104
Şekil 6.1.	Deneylerde kullanılan 0,1 mg hassasiyetteki elektronik terazi (Shimadzu Atx-224, Japan).....	106
Şekil 6.2.	Çeşitli parametrelerde aşındırılmış numuneler	107
Şekil 6.3.	2 bar basınçta ve 20 s maruz kalma süresinde numunelerin erozyon oranları: a) 6224, b) DP980, c) DP1180	112
Şekil 6.4.	Numunelerin çeşitli basınç ve maruz kalma sürelerinde çarpma açısına bağlı erozyon oranı değişimleri: a) 1 bar 10 s, b) 1 bar 20 s, c) 1 bar 30 s, d) 2 bar 10 s, e) 2 bar 20 s, f) 2 bar 30 s.....	113
Şekil 6.5.	Numunelerin 20 s maruz kalma süresinde ve 30° çarpma açısında basınca bağlı erozyon oranı değerleri: a) 6224, b) DP980, c) DP1080	115
Şekil 6.6.	Numunelerin 10 s maruz kalma süresinde ve çeşitli partikül çarpma açılarındaki basınca bağlı erozyon oranı değerleri: a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75°, f) 90°	116
Şekil 6.7.	Numunelerin 20 s maruz kalma süresinde çeşitli partikül çarpma açılarındaki basınca bağlı erozyon oranı değerleri: a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75°, f) 90°	117

Şekil 6.8.	6224 numunesinin çeşitli maruz kalma sürelerinde, basınca ve partikül çarpma açılarına göre erozyon oranı değerleri: a) 10 s, b) 20 s, c) 30 s	118
Şekil 6.9.	DP980 numunesinin çeşitli maruz kalma sürelerinde, basınca ve partikül çarpma açılarına göre erozyon oranı değerleri: a) 10 s, b) 20 s, c) 30 s	119
Şekil 6.10.	DP1180 numunesinin çeşitli maruz kalma sürelerinde, basınca ve partikül çarpma açılarına göre erozyon oranı değerleri: a) 10 s, b) 20 s, c) 30 s	120
Şekil 6.11.	DP çeliklerin çeşitli yönlerdeki gerilme-gerinim eğrileri: a) haddeleme yönü (RD), b) enine yön (TD)	122
Şekil 6.12.	2 bar basınçta ve 30° çarpma açısında numunelerin maruz kalma süresine bağlı erozyon oranları: a) 6224, b) DP980, c) DP1180	124
Şekil 6.13.	Numunelerin 1 bar basınçta, çeşitli partikül çarpma açılarında, maruz kalma süresine bağlı erozyon oranı değerleri: a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75°, f) 90°	125
Şekil 6.14.	Numunelerin 2 bar basınçta, çeşitli partikül çarpma açılarında, maruz kalma süresine bağlı erozyon oranı değerleri: a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75°, f) 90°	126
Şekil 6.15.	6224 sac malzemesinin 2 bar püskürtme basıncında ve 20 s maruz kalma süresinde aşınmış yüzeylerinin topografyası: a) 30°, b) 90°	128
Şekil 6.16.	DP980 çeliğinin 2 bar püskürtme basıncında ve 20 s maruz kalma süresinde aşınmış yüzeylerinin topografyası: a) 30°, b) 90°	128
Şekil 6.17.	DP1180 çeliğinin 2 bar püskürtme basıncında ve 20 s maruz kalma süresinde aşınmış yüzeylerinin topografyası: a) 30°, b) 90°	128
Şekil 6.18.	6224 sac malzemesinin 2 bar, 20 s, 30°'de pürüzlülükleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi	129
Şekil 6.19.	6224 sac malzemesinin 2 bar, 20 s, 90°'de pürüzlülükleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi	130
Şekil 6.20.	DP980 çeliğinin 2 bar, 20 s, 30°'de pürüzlülükleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi	131
Şekil 6.21.	DP980 çeliğinin 2 bar, 20 s, 90°'de pürüzlülükleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi	131
Şekil 6.22.	DP1180 çeliğinin 2 bar, 20 s, 30°'de pürüzlülükleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi	132
Şekil 6.23.	DP1180 çeliğinin malzemesinin 2 bar, 20 s, 90°'de pürüzlülükleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi	132
Şekil 6.24.	2 bar 20 s'de numunelerin Ra pürüzlülük değerleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi	132
Şekil 6.25.	2 bar 20 s'de numunelerin Rt pürüzlülük değerleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi	133
Şekil 6.26.	2 bar 20 s'de numunelerin yatay ve dikey profil çizgilerindeki Sa pürüzlülük değerleri	133
Şekil 6.27.	2 bar 20 s'de numunelerin yatay ve dikey profil çizgilerindeki Sq pürüzlülük değerleri	134
Şekil 6.28.	2 bar 20 s'de numunelerin Pt pürüzlülük değerleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi	134

Şekil 6.29. DP980 numunesinin çeşitli partikül çarpma açılarında 2 bar 20 s’de yatay profil çizgilerindeki Pt pürüzlülük değerleri: a) 30°, b) 90°	134
--	-----



TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Malzemelerin erozyon davranışları.....	12
Tablo 2.2.	Hedef malzeme sertliğinin 700 µm boyuttaki cam boncukların eşik hızı üzerindeki etkisi.....	33
Tablo 2.3.	Hedef malzemelerin sertlik ve tokluk değerleri (4,9 N yükte Vickers mikro indentasyon testi)	35
Tablo 2.4.	Aşındırıcı malzemelerin sertlik ve tokluk değerleri (1,97 N yükte Vickers mikro indentasyon testi).....	36
Tablo 2.5.	Mohs Ölçeği.....	42
Tablo 2.6.	Aşındırıcı malzemelerin sertlik değerleri (1,97 N yükte Vickers mikro indentasyon testi).....	43
Tablo 2.7.	Parçacık şeklinin ağırlık kaybına etkisi	45
Tablo 2.8.	Parçacıklar arasındaki ortalama mesafe	45
Tablo 3.1.	Araç yapılarının farklı güvenlik gereksinimleri.....	54
Tablo 3.2.	FSV- BEV ve 2010 VW Polo araçların karşılaştırması	56
Tablo 3.3.	Dual fazlı çelik kalitelerinin mekanik özellikleri.....	77
Tablo 3.4.	DP çelik numunelere uygulanan ısıtma işlem parametreleri ve martenzit içerikleri	79
Tablo 3.5.	Farklı DP çeliklerin çekme özellikleri	80
Tablo 3.6.	Farklı DP çelik numunelerinde martenzit plastik gerinimi ve karbon içeriği	80
Tablo 3.7.	Kritik sıcaklıklar arası tavlama süresine bağlı olarak erozyon testinde meydana gelen ağırlık kaybı	84
Tablo 3.8.	Çelik numunelerin mekanik özellikleri.....	88
Tablo 3.9.	Numunelere uygulanan ısıtma işlemleri	90
Tablo 5.1.	DP980 ve DP1180 çeliklerinin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça)	99
Tablo 5.2.	6224 sac malzemesinin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça)	99
Tablo 5.3.	Katı partikül erozyonu deneylerinde kullanılan parametreler.....	101
Tablo 5.4.	Katı partikül erozyonu deneylerinin bilgileri	102
Tablo 6.1.	120 mesh alüminyum oksit in farklı gönderilme basınçlarındaki kütleli debisinin hesaplanması için gerçekleştirilen deneylerin sonuçları	105
Tablo 6.2.	6224 sac malzemesinin farklı basınç ve sürelerdeki deneysel verileri	107
Tablo 6.3.	6224 sac malzemesiyle yapılan deneylerin sonuçları	107
Tablo 6.4.	DP980 çeliğiyle yapılan deneylerin sonuçları	108
Tablo 6.5.	DP1180 çeliğiyle yapılan deneylerin sonuçları	110
Tablo 6.6.	DP980 ve DP1180 çeliklerinin haddeleme yönündeki ve enine yöndeki mekanik özellikleri	121
Tablo 6.7.	6224 sac malzemesinin mekanik özellikleri	122
Tablo 6.8.	DP980 ve DP1180 çeliklerinin mekanik özellikleri	122

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit, alümina
B	: Bor
C	: Karbon
CO	: Karbonmonoksit
CO ₂	: Karbondioksit
Cu	: Bakır
dk.	: Dakika
Fe	: Demir
g.	: Gram
H _p	: Aşındırıcı partikülün sertliği
H _t	: Hedef malzemenin sertliği
k	: Malzemenin dayanım sabiti
Kc	: Tokluk (MPa.m ^{1/2})
kg.	: Kilogram
L	: Mesafe (m)
m.	: Metre
m	: Kütle
Mf	: Martenzit bitiş sıcaklığı (°C)
Mg	: Magnezyum
mg.	: Miligram
mm	: Milimetre
MN	: Meganewton
Mn	: Mangan
MPa	: Megapaskal
Ms	: Martenzit başlangıç sıcaklığı (°C)
N	: Newton
n	: Devir hızı (d/dk)
n	: Pekleşme üssü
Na	: Sodyum
Ni	: Nikel
NO _x	: Nitrit oksit
O	: Oksijen
PMMA	: Polimetil metakrilat
Pt	: Aşınan malzemede oluşan çukurun dibi ile malzemenin üst yüzeyi arasındaki mesafe (µm)
R	: Profil pürüzlülük parametresi (µm)
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (µm)
Rp	: Maksimum tepe yüksekliği (µm)
Rt	: Maksimum tepe yüksekliği ve maksimum vadi derinliği arasındaki dikey mesafe (µm)
Rv	: Maksimum vadi derinliği (µm)
Rz	: Ortalama pürüzlülük derinliği (µm)
S	: Alansal pürüzlülük parametresi (µm)
s.	: Saniye

Sa	: Alansal ölçümde tüm tepe yüksekliklerinin ve vadilerin derinliklerinin aritmetik ortalaması (μm)
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum karbür
SiO ₂	: Silisyum dioksit, silika, silis kumu
Sku	: Alansal ölçümde yüzey topografyasındaki yükseklik dağılımının yayılımı (μm)
Ssk	: Alansal ölçümde yüzey topografyasındaki yüzey çizgilerinin ortalama çizgiye göre simetrikliğinin derecesi (μm)
St	: Alansal ölçümde maksimum tepe yüksekliğinden maksimum vadi derinliğine olan uzunluk (μm)
Sq	: Alansal ölçümde pürüzlülük yüksekliklerin karelerinin toplamının karekök ortalaması (μm)
T	: Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
t.	: Süre (s)
Ti	: Titanyum
TiN	: Titanyum nitrür
T _m	: Mutlak Ergime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
V	: Vanadyum
v	: Hız (m/s)
V _p	: Aşındırıcı partiküllerin çarpma hızı (m/s)
α	: Açık ($^{\circ}$)
α	: Ferrit fazı
γ	: Östenit fazı
θ	: Açık ($^{\circ}$)
σ	: Gerilme (N/mm^2)
$^{\circ}\text{K}$	: Kelvin
($^{\circ}$)	: Derece
μm	: Mikrometre
ϵ	: Gerinim, birim şekil değişimi

Kısaltmalar

AHSS	: Advanced High Strength Steel (Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelik)
AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
Ar-Ge	: Araştırma ve Geliştirme
ASTM	: American Society for Testing Materials (Amerika Test Etme ve Malzeme Topluluğu)
BCC	: Body Centered Cubic (Hacim Merkezli Kübik)
BEV	: Battery Electric Vehicle (Akülü Elektrikli Araç)
BH	: Bake Hardenable Steel (Fırında Sertleştirilebilir Çelik)
CP	: Complex Phase Steel (Kompleks Fazlı Çelik)
DP	: Dual Phase Steel (Dual Fazlı Çelik)
ER	: Erosion Rate (Erozyon Oranı)
FCC	: Face Centered Cubic (Yüzey Merkezli Kübik)
FP	: Federation of European Producers of Abrasives (Avrupa Aşındırıcı Üreticileri Federasyonu)
FSV	: Future Steel Vehicle (Geleceğin Çelik Aracı)

HSLA	: High Strength Low Alloy (Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Çelik)
HSS	: High Strength Steel (Yüksek Mukavemetli Çelik)
HV	: Vickers Hardness (Vickers Sertliği)
ICA	: Intercritical Annealing (Kritik Sıcaklıklar Arası Tavlama)
IF	: Interstitial Free Steel (Arayer Atomsuz Çelik)
IF- HS	: Interstitial Free High Strength Steel (Yüksek Mukavemetli Arayer Atomsuz Çelik)
LSS	: Low Strength Steel (Düşük Mukavemetli Çelik)
MART	: Martensitic Steel (Martenzitik Çelik)
MVF	: Martensite Volume Fraction (Martenzit Hacim Fraksiyonu)
NS	: Normalized Steel (Normalize Çelik)
RD	: Rolling Direction (Haddeleme Yönü)
RMS	: Root Mean Square (Ortalama Karekök Yüksekliği)
SAE	: Society of Automotive Engineers (Otomotiv Mühendisleri Topluluğu)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TD	: Transverse Direction (Enine Yön)
TEL	: Total Elongation (Toplam Uzama)
TRIP	: Transformation Induced Plasticity Steel (Dönüşüm Kaynaklı Plastisite Çelik)
TTT	: Time Temperature Transformation (Zaman Sıcaklık Dönüşüm)
UEL	: Uniform Elongation (Düzgün Uzama)
UHSS	: Ultra High Strength Steel (Ultra Yüksek Mukavemetli Çelik)
UTS	: Ultimate Tensile Strength (Maksimum Çekme Mukavemeti)
WQ	: Water Quenching (Su Verme)
YS	: Yield Strength (Akma Mukavemeti)

DUAL FAZLI ÇELİKLERİN EROZİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Katı partikül erozyonu, basınçlı hava yardımıyla hızlandırılan aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyine uyguladığı tekrarlı darbeyle yüzeyde önemli derecede malzeme kaybına sebep olan bir hasar sürecidir.

Bu çalışmada dayanım değerleri farklı olan DP980 ve DP1180 dual fazlı çeliklerin erozif aşınma miktarına, farklı erozyon parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Ayrıca Ereğli Demir ve Çelik Fabrikası'nın derin çekmede kullanılan 6224 kodlu sac malzemesi de aynı parametreler altında test edilerek farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerin mekanik özelliklerinin erozif aşınma üzerindeki etkisi de deneysel olarak incelenmiştir. Erozif aşınma testleri Reflot FP 120 (Fepa standartı= 90- 125 μm) beyaz kaynaşmış Al_2O_3 aşındırıcı kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup erozyon parametrelerinin etkisini incelemek için farklı basınçlarda (1 bar, 2 bar), farklı partikül çarpma açılarında (15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°), farklı maruz kalma sürelerinde (10 s, 20 s, 30 s), nozul ile hedef malzeme arasındaki mesafe 20 mm olarak sabit tutularak ASTM G76 standartına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin aşındırılmadan önceki ve aşındırıldıktan sonraki ağırlıkları ölçülüp meydana gelen ağırlık kaybının, gönderilen aşındırıcının ağırlığına oranıyla erozyon oranı elde edilmiştir.

Deney sonuçlarına göre 6224, DP980 ve DP1180 çeliklerinin genellikle 15° - 30° 'de maksimum erozyona uğraması dolayısıyla tüm malzemelerin sünek aşınma davranışı sergilediğine ve genel olarak basıncın artmasıyla erozyon oranı artarken maruz kalma süresinin artmasıyla aşınmanın ve gönderilen toplam aşındırıcı miktarının artmaya devam etmesi sebebiyle erozyon oranı değerinin sabit kaldığına ulaşılmıştır. Mekanik özellikleri $\text{DP1180} > \text{DP980} > 6224$ şeklinde sıralanan çeliklerin erozyon oranları $\text{ER}_{\text{DP980}} > \text{ER}_{6224} > \text{ER}_{\text{DP1180}}$ şeklinde olup 6224 malzemesi en düşük mukavemet değerlerine sahip olmasına rağmen dual fazlı çeliklerin arasında bir erozyon oranı sergilediği için erozif aşınmanın malzemelerin mekanik özelliklerinden bağımsız olduğuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Erozif Aşınma, Dual Fazlı Çelik, Katı Partikül Erozyonu, Yüzey Topografyası.

INVESTIGATION OF EROSION WEAR BEHAVIOR OF DUAL PHASE STEELS

ABSTRACT

Solid particle erosion is a damage process that causes significant mass loss on the surface with the repeated impact of abrasive particles accelerated by compressed air to the target material surface.

In this study, the effects of different erosion parameters on the amount of erosive wear of DP980 and DP1180 dual-phase steels with different strength values were investigated. In addition, the 6224 coded sheet material used in deep drawing of Ereğli Iron and Steel Factory was also tested under the same parameters and the effect of mechanical properties of materials with different mechanical properties on erosive wear was investigated experimentally. The erosive wear tests were carried out at room temperature using Reflot FP 120 (Fepa standard= 90- 125 μm) white molten Al_2O_3 abrasive at different pressures (1 bar, 2 bar), different particle impact angles (15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°), at different exposure times (10 s, 20 s, 30 s), keeping the distance between the nozzle and the target material constant as 20 mm, in accordance with the ASTM G76 standard. Erosion rate was obtained by measuring the masses of the materials before and after being eroded and the ratio of the resulting mass loss to the mass of the abrasive sent.

According to the test results, 6224, DP980 and DP1180 steels generally show ductile wear behavior due to maximum erosion at 15° - 30° . In general the erosion rate increases with increasing pressure. The wear and the total amount of sent abrasive continued to increase with increasing exposure time. For this reason, it was found that the erosion rate value remained constant. Mechanical properties of steels listed as DP1180>DP980>6224, the erosion rates are $ER_{DP980} > ER_{6224} > ER_{DP1180}$, and it has been found that erosive wear is independent of the mechanical properties of the materials, because 6224 material has the lowest strength values but exhibits an erosion rate among dual-phase steels.

Keywords: Erosive Wear, Dual Phase Steel, Solid Particle Erosion, Surface Topography.

1. GİRİŞ

Birçok sektörde sürdürülebilirlik açısından doğal kaynaklarımızın ve çevrenin korunması, malzemelerin geri dönüştürülebilirliği, doğru malzeme seçimiyle araçların hafifletilerek yakıt sarfiyatının azaltılması, egzoz emisyonlarının (CO_2 , NO_x vb.) azaltılması, kullanımın rahat ve güvenli olması, kalitenin yanında hammadde ile üretim maliyetlerinin düşük olması, bakım maliyetlerinin düşük olması, malzemelerin mukavemeti ve sağlamlığı istenen özellikler arasındadır. Bu durum malzeme seçiminin önem kazanmasına yol açtığı için mukavemetli, kullanım ömrü uzun, şekillendirilebilirliği yüksek ve hafif malzemelere yönelim artmış, halihazırda kullanımı olan malzemelerin iyileştirilmesi ve bunlara alternatif olabilecek malzemelerin geliştirilmesi amacıyla yapılan araştırmalar hız kazanarak kullanımları günden güne artmaya başlamıştır (Köse, 2015).

Dual fazlı çelikler mukavemet/ağırlık oranları yüksek, akma dayanımları düşük, çekme dayanımları yüksek ve aynı mukavemetteki HSLA (Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı Çelik) çeliklerinden daha yüksek şekillendirilebilme özelliğine sahip, üniform uzama gösteren ve pekleşme oranları yüksek olan malzemelerdir. Dual fazlı çelikler mikroyapılarında ferrit matrisi içerisinde adacıklar şeklinde martenzit içeren düşük karbona sahip düşük alaşımlı veya alaşımsız yüksek mukavemetli çeliklerdir. Yüksek miktarda enerji absorbe edebildikleri için araçların çarpışma kısımlarında kullanılabilirken dayanımı 980 MPa'ın üzerindeki dual fazlı çelikler yüksek dayanım ve rijitliğe sahip olduğu için araç yolcu kabiniinde kullanılır.

Katı partikül erozyonunda aşındırıcı partiküller, çarptıkları yüzeylerde malzeme kaybına neden olarak erozyon hasarına yol açmaktadır. Özellikle havacılık ve otomotiv endüstrisinde kullanılan mühendislik malzemelerinin yüksek hızlı hava akımıyla etkileşimde olmasıyla hava akımının taşıdığı aşındırıcı katı partiküller çarptıkları yüzeylerde malzeme kaybına neden olarak erozyon hasarına yol açmaktadır. Bu nedenle parçaların çalışma performansı düşmekte, kullanım ömürleri azalmakta, parça güvenliği olumsuz etkilenmekte, dolayısıyla bakım ve parça değişimi maliyetleri artmaktadır. Katı partikül erozyonu, birçok parametreden etkilenen karmaşık bir süreçtir. Ancak malzemelerde meydana gelen katı partikül erozyonunun önceden doğru bir şekilde tahmin edilmesi; kullanılan mühendislik malzemesinin çalışma performansını

iyileştirdiği, kullanım ömrünün azalmasını engellediği, bakım ve parça maliyetlerini düşürdüğü için büyük önem taşımaktadır.

Literatür incelendiğinde çoğunlukla dual fazlı çeliklerin ısııl işlemlele elde edilmesi, çeşitli ısııl işlem koşullarıyla elde edilen mikroyapıların morfolojilerine etkisi, ısııl işlemlerin mikroyapıdaki fazların hacim oranlarına etkisi, bu faz miktarlarının çeliğin mekanik özelliklerine etkisi üzerinde yoğunlaşılmıştır. Ayrıca dual fazlı çeliklerin katı partikül erozyonu davranışıyla ilgili çalışmalar bulunmaktadır ancak yine uygulanan ısııl işlemlerin erozif aşınmaya etkileri incelenmiştir. Dolayısıyla katı partikül erozyonu parametrelerinin, bu malzemelerin erozif aşınma davranışı üzerindeki etkisi incelenmediği için literatürdeki bu konu ile ilgili boşluk doldurulmaya çalışılmıştır.

Gerçek alışma koşullarında malzemelerin maruz kaldıkları etkilere karşı performanslarını ve o koşullarda kullanabilirliğini değerlendirmek için olabildiğince yakın şartlarda deneylerin gerçekleştirilmesi gerekir. Bu nedenle bu çalışmada erozif aşınma direncini belirlemek amacıyla aşındırıcı akışın sağlandığı deney düzeneği kullanılmıştır (Evstifeev ve diğ., 2018).

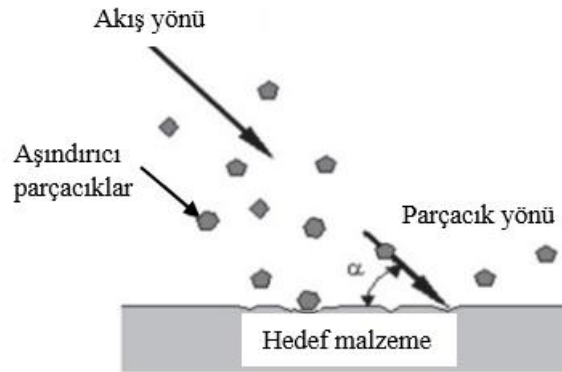
Bu tez çalışması kapsamında deneysel olarak dual fazlı çeliklerin erozif aşınmasına farklı erozyon parametrelerinin (arpma açısı, püskürtme basıncı, maruz kalma süresi) etkisi incelenmiştir. Ayrıca malzemelerin mukavemet değerlerinin; erozif aşınmaya etkisini incelemek amacıyla farklı çekme dayanımlarına sahip iki dual fazlı çeliğe uygulanan deney parametreleri, derin çekmede kullanılan bir malzemeye de uygulanmıştır. Katı partikül erozyonu testleri sonrasında numunelerin erozyon oranları hesaplanmış, aşınan yüzeyleri temassız bir optik profilometre yardımıyla taranarak yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiş ve yüzey topografyaları incelenmiştir.

2. KATI PARTİKÜL EROZYONU

Aşınma, malzemelerin yüzeyinde mekanik bir etki ve izafi bir hareketle meydana gelen malzeme kaybıdır. Yani aşınmadan bahsedebilmek için ortamda hız ve hareket olmalıdır (Arslan, 2017).

Aşınma bilimsel çalışmalara kapsamlı olarak konu olmasına rağmen 21. yüzyıldaki endüstriyel uygulamalarda hala bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu da aşınma sürecinin karmaşık bir durum olduğunu göstermektedir (Patnaik ve diğ., 2010).

Erozif aşınma, sıvı ya da gaz akımıyla hareketlendirilerek belirli bir hıza sahip olan farklı geometrik boyut ve yapıdaki partiküllerin hedef malzeme yüzeyine sürekli darbe etkisi yapmasıyla oluşan hasar sürecidir. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi sert partiküllerin belirli bir açıda ve hızda hedef malzeme yüzeyine çarpmasıyla çarptığı yüzeyde malzeme kaybı gerçekleşir, böylece katı partikül erozyonu meydana gelir (Yıldiran, 2013). Katı partikül erozyonunda sert partiküllerin hedef malzeme yüzeyi ile teması kısa süreli olduğundan kayma aşınması, abrazyon aşınması, talaşlı imalat gibi sürekli temasın olduğu süreçlerden farklıdır (Sundararajan ve Roy, 1997).



Şekil 2.1. Katı partikül erozyonunun şematik gösterimi (Javaheri, 2019)

Malzeme yüzeyinde yapısal hasarın oluşması için bu parçacıkların kinetik enerjisinin yeterince yüksek olması gerekmektedir. Bu duruma, 10 μm 'den küçük partiküllerin kinetik enerjisinin yeterli olmamasından dolayı genellikle türbin veya kompresör kanatlarını aşındıramayacağı örnek olarak gösterilebilir (Alqallaf ve diğ., 2020). Yüzeyde malzeme kaybının devam etmesi durumunda ciddi mekanik olumsuzluklar oluşabildiğinden erozif ortamlarda çalışan makine elemanlarının performansları,

verimlilikleri ve çalışma ömürleri azalmaktadır. Bu hasar türüne uçak motorları, buhar kazanları, sondaj cihazları gibi endüstriyel alanlarda daha çok rastlanmaktadır (Yavuz, 2018).

Otomotiv, havacılık ve uzay endüstrisinde yüksek hızlı hava akımı ile etkileşim halinde olan makine parçalarının yüzeylerine havanın içerisinde taşıdığı katı partiküllerin çarpmasıyla oluşan erozyon hasarı parçaların performansını, ömürlerini azaltmakta ve malzeme kaybına neden olmaktadır (Gedikli ve Özen, 2020). Şekil 2.2’de çöl ortamında katı partikül erozyonuna maruz kalan bir araç görülmektedir.



Şekil 2.2. Çölde katı partiküllere maruz kalan bir araba (Friedrich, 2015)

Katı partikül erozyonu, genellikle istenmeyen bir durum olarak düşünülse de döküm parçaların kumlanması; yüzey temizleme, yüzey parlatma işlemleri; boyama, kaplama, yapıştırma öncesi pasın veya eski boyanın temizlenmesi için yüzey hazırlama işlemleri; yüzeylerin pürüzlendirilmesi; sert ve kırılgan malzemelerin aşındırıcı jet ile kesilmesi gibi birçok uygulamada avantaj sağlamaktadır. Dolayısıyla erozyon teknolojik ve ticari açıdan büyük önem taşımaktadır (Sundararajan ve Roy, 1997).

Ancak aşınmanın istenmediği durumlarda endüstriler erozyon ile ekipmanların hasar görmesi nedeniyle bakımları veya değiştirilmeleri için her yıl çok fazla para harcar, aniden üretim sürecinin durmasıyla da getiri kaybeder (Ricardo ve Sommerfeld, 2020). Aşındırıcı katı partiküllerin yüzeylere çarpmasıyla kum taşıyan boru bağlantılarında, boru dirseklerinde, petrol rafinerisindeki çamur taşıma hatlarında şiddetli aşınmalar meydana gelir (Avcu, 2011). Tehlikeli kimyasal taşıyan boru ve ekipmanların hasar alması durumunda sızıntı meydana gelebileceğinden çevre sağlığı ve güvenliği tehdit edilebilir (Ricardo ve Sommerfeld, 2020). Aşınmanın doğrudan olan negatif sonuçlarının parçanın ömrünü kısalttığı için parça değişimi gerektirdiği, enerji kaybı, iş ve zaman kaybı olduğu;

dolaylı olan negatif sonucunun ise insan ve canlı hayatını tehdit edebilecek problemler meydana getirebileceği söylenebilir (Arslan, 2017).

Havacılık uygulamalarına baktığımızda yağmur, dolu ve buzun yanında atmosferdeki kalıntılardan kaynaklanan kum, volkanik kül ve toz gibi aşındırıcı partiküllerle etkileşimin olduğu ortamlarda sefer yapan uçakların yüksek irtifalarda uçarken veya özellikle bir çölden kalkışı ve inişi sırasında gövdesinde, jet motorlarında, helikopter rotor pallerinde, türbin ve kompresör bıçaklarında aşındırıcı katı partiküllerin yüzeye çarpması ile malzeme kaybı sonucu erozyon meydana gelir (Avcu ve diğ., 2012; Gohardani, 2011).

Modern rotorlu helikopterlerin genellikle hazırlıksız iniş sahalarında çalışması gerekir. İniş ve kalkış esnasında helikopter ana rotor palinin yüksek hızda (230 m/s) dönmesiyle katı partiküllerin pal yüzeyine çarpması söz konusudur (Gedikli ve Özen, 2020; Bojdo ve Filippone, 2014). Şekil 2.3'te görüldüğü gibi çöl ortamlarında sefer yapılması durumunda helikopterin etrafını kısa sürede saran toz bulutu oluşur, katı partiküller helikopter yüzeyiyle temas eder ve Şekil 2.4'teki gibi motor girişlerinden içeri çekilerek yutulur (Bojdo ve Filippone, 2014).



Şekil 2.3. Royal Air Force (RAF) Merlin helikopterinin Afganistan'da toz bulutu oluşturması (Bojdo ve Filippone, 2014)



Şekil 2.4. Katı partiküllerin motora girişi (He ve diğ., 2019)

Uçaklarda kullanılan fiber takviyeli termoplastik matris kompozit yapısal parçalar, volkanik uçucu kül gibi tozlu çevre koşullarında katı partikül erozyonuna şiddetli bir şekilde maruz kalmaktadır. Şekil 2.5'te katı partikül etkisi nedeniyle ticari bir uçağın gövdesi üzerindeki hasar oranının dağılımı gösterilmektedir. Burada büyük noktalar orta hızdaki nesneler için, daha küçük noktalar daha düşük hızlı nesneler için çarpma bölgelerine karşılık gelir. Taranmış bölge ise yüksek hızlı çarpmaların sıklıkla meydana geldiği çarpma bölgesini gösterir çünkü karşıdan gelen hava akımıyla direkt olarak karşılaşan bölgelerde çarpma hızı yüksek olduğundan hasar oranı yüksektir (Avcu ve diğ., 2012).



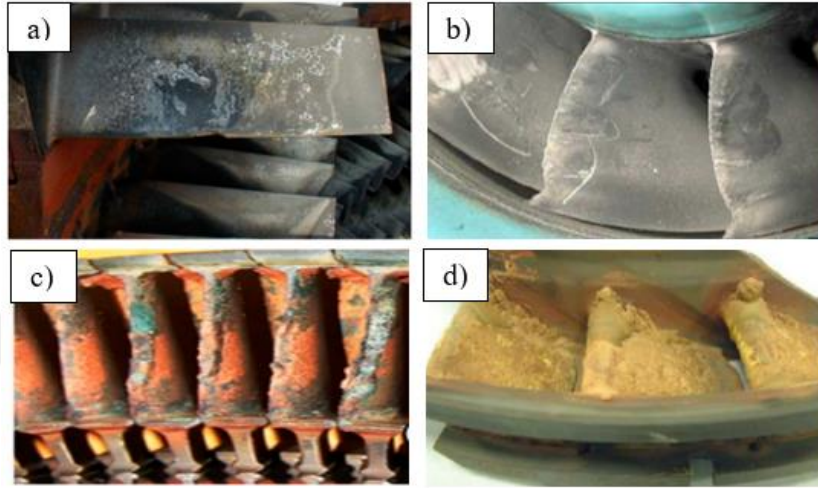
Şekil 2.5. Ticari bir uçakta katı partiküllerin etkisiyle gövdesindeki hasar oranının dağılımı (Gohardani, 2011)

Uçağın gövde bölgeleri katı partikül erozyonu nedeniyle ciddi şekilde hasar görebileceğinden yapısı olumsuz etkilenebilir ve bileşenlerin yaşam döngüsü önemli ölçüde azalabilir (Gohardani, 2011).

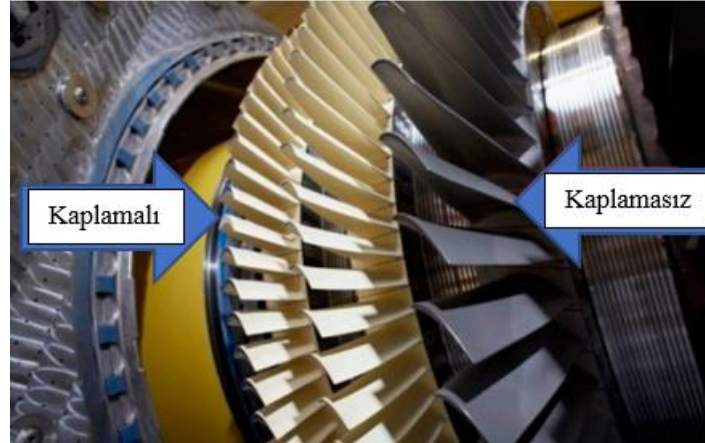
Gaz türbinli motorlar tozlu bir atmosferde çalıştığı için çeşitli parçacıklarla sürekli etkileşim halinde olduğundan kompresör kanatlarının katı partikül erozyonu sorunuyla yaygın olarak karşılaşmaktadır. Bu parçacıklar malzeme yüzeyine hızlı çarptıkları için küçük olsalar bile önemli hasarlara sebep olabilirler. Bu da kompresör kanadının güvenilirliğini azaltmaktadır (Evstifeev ve diğ., 2018).

Şekil 2.6'da kompresör ve türbin kanatlarında katı partikül erozyonu sonucunda meydana gelen aşınmalar ve türbin kanatlarında volkanik kül parçacıklarının birikmesi gösterilmektedir. Volkanik kül veya toz, motordan geçerken eriyebilir. Volkanik küldeki silikat içeriğine bağlı olarak erime noktası, 960 °C kadar düşük olabilir ama genellikle

1100 °C civarındadır. Böylece yüksek sıcaklıklarda çalışan gaz türbini bileşenlerine yapışma potansiyeli oluşacağından türbin kanatlarında volkanik kül parçacıkları birikebilir (Bojdo ve Filippone, 2014). Erozyondan kaçınmak amacıyla bu malzemelerin erozyon direncinin iyi olması beklenir veya bu malzemelere Şekil 2.7'deki gibi koruyucu kaplama yapılması gerekir (Bircan, 2014).



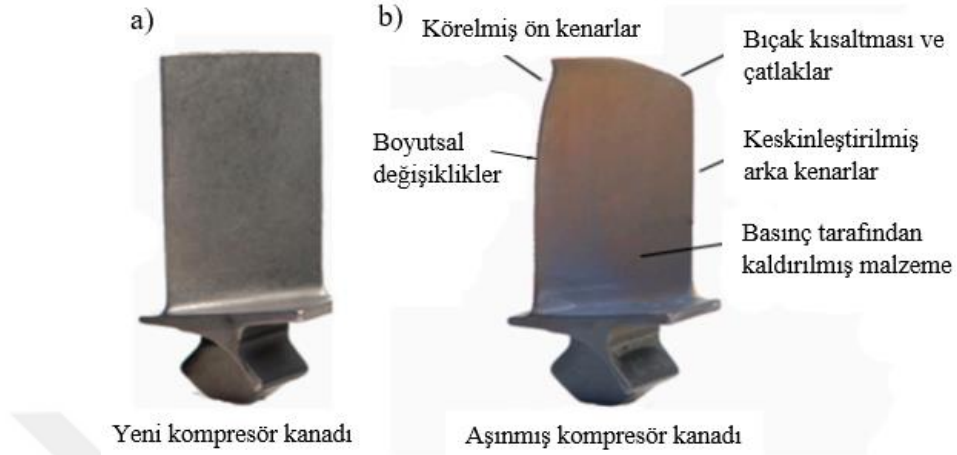
Şekil 2.6. Katı parçacıkların temel turboşaft motor bileşenleri üzerindeki etkileri: (a) kompresör kanat yüzeylerinde erozyon, (b) kompresör kanatlarının ön ve arka kenarlarında erozyon, (c) türbin kanatlarında erozyon, (d) türbin kanatları üzerinde erimiş tortuların birikmesi (Alqallaf ve diğ., 2020; Bojdo ve Filippone, 2014)



Şekil 2.7. Kaplamalı (ZrN , Cr_3C_2 , $WC-Co$, TiN , TiN/Ti , TiN/CrN kaplama kullanılabilir) ve kaplamasız kompresör kanatları (Alqallaf ve diğ., 2020)

Şekil 2.8'den görüldüğü gibi gaz türbinli motorda kompresör kanadının katı partikül erozyonuna maruz kalmasıyla yüzeylerinin pürüzlülüğü artmış, kanat genişliği azalmış, arka kenarlarının keskinliği artmış ve dolayısıyla çeşitli geometrik modifikasyonlara

maruz kalmıştır. Bu durum kompresörde performans kaybına neden olabilmektedir (Alqallaf ve diğ., 2020).



Şekil 2.8. Gaz türbinli motorlardaki kompresör kanatları: a) yeni bir kompresör kanadı, b) katı partikül erozyonu sonrası kompresör kanadı (Alqallaf ve diğ., 2020)

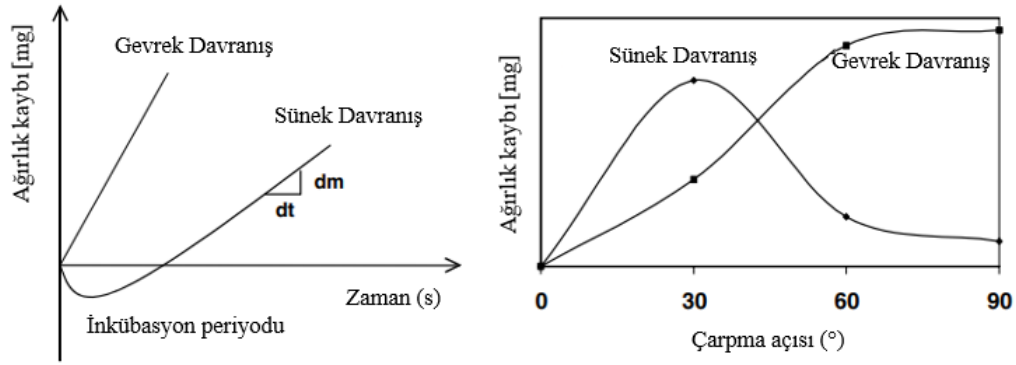
Dolayısıyla önceden katı partikül erozyonunu doğru bir şekilde tahmin etmek makine elemanlarının bakımı için harcanan maliyetlerin azaltılmasının yanı sıra performans ve ömürleri açısından önemlidir (Gedikli ve Özen, 2020). İşletme ve bakım maliyetlerinden kaçınmak için malzeme kaybı mekanizmalarının daha derinden anlaşılması gerekmektedir (Alqallaf ve diğ., 2020).

2.1. Sünek ve Gevrek Malzemelerin Katı Partikül Erozyonu

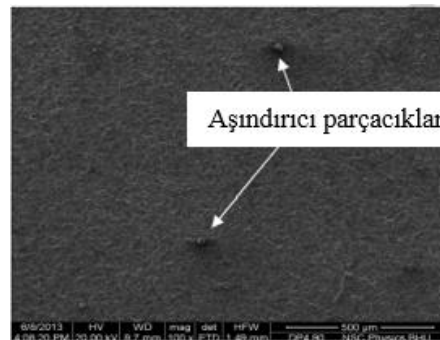
Katı partikül erozyonu ile hedef yüzeyden kaldırılan malzeme miktarını tahmin etmek amacıyla yapılan çalışmalarda, tüm malzemeler için tek bir malzeme kaldırma mekanizmasının olmadığını görürüz.

Finnie, hedef malzeme yüzeyine çarpan aşındırıcıların akış özelliklerine ve malzeme kaldırma mekanizmasına bağlı olarak erozyon oranının etkilendiğinden bahsetmiştir. Ayrıca kesme ile sürme mekanizmasıyla sünek aşınma, yüzeyde mikro çatlak oluşumuyla gevrek aşınma davranışının olduğundan bahsetmiştir (Finnie, 1960). Bu nedenle erozyon mekanizmalarının görüldüğü malzemeleri, geleneksel malzeme gruplandırmasıyla doğrudan uyuşmayacak şekilde sünek ve gevrek malzemeler olmak üzere iki ana malzeme davranışı olarak sınıflandırabiliriz.

Şekil 2.9'dan da görüldüğü gibi sünek ve gevrek malzemeler, katı partiküllerin çarpma süresine ve çarpma açısına bağlı olarak farklı erozyon oranına sahiptir. İlk durumda gevrek malzemelerde ağırlık kaybı lineer bir şekilde artarken sünek malzemelerde inkübasyon periyodu (gelişim safhası) gözlenir. İnkübasyon periyodu, grafikte ağırlık kaybının eksi (-) bölgesinde yer almaktadır çünkü burada normal veya normale yakın açılarda (90°) gelen aşındırıcı partiküllerin Şekil 2.10'da görüldüğü gibi hedef malzeme yüzeyine gömülmesi nedeniyle ağırlık artışı meydana gelir. İnkübasyon periyodu sonrasında gömülü partiküller malzeme yüzeyine yeni gelen partiküllerin çarpmasıyla yerinden çıkarılır, sonrasında yüzeyden malzeme koparılacağı için gevrek malzemelerdeki gibi lineer bir ağırlık kaybı artışı gözlenerek kararlı duruma ulaşılır (Arslan, 2017) (Yıldıran, 2013).



Şekil 2.9. Sünek ve gevrek malzemelerde çarpma süresi ve açısının ağırlık kaybı ile ilişkisi (Barkoula ve Kocsis, 2002)



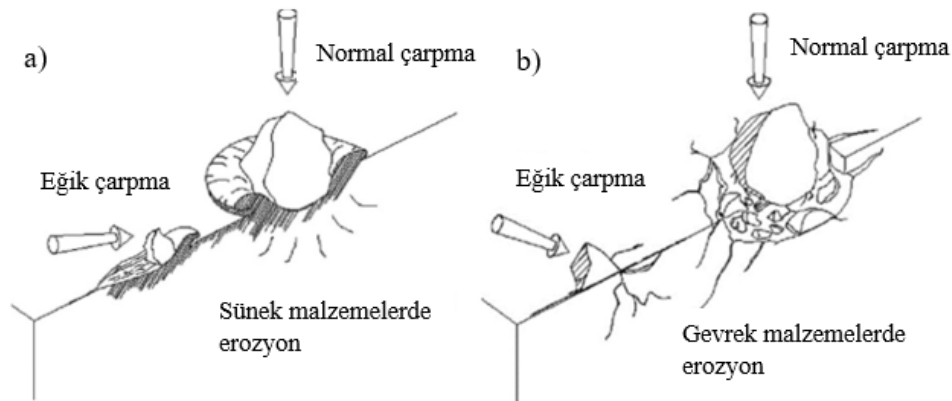
Şekil 2.10. 90° çarpma açısı ve 45 m/s hızda bir DP çeliğinin (dual fazlı çelik) yüzeyine parçacıkların gömüldüğünü gösteren SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüsü (Sharma ve diğ., 2015)

Aşınan malzeme yüzeyinin yüzey morfolojisini incelediğimizde aşınmanın sünek ve gevrek malzeme erozyon mekanizmalarından hangisiyle meydana geldiğini anlayabiliriz (Avcu ve diğ., 2012). Aşındırıcı katı partikül, düşük çarpma açılarında etkileşim süresince

hedef malzeme yüzeyi boyunca bir yol izler. Bu durumda baskın olan mikrosürme ve mikro kesme mekanizmaları ile yoğun miktarda aşınma gerçekleşir. Yüksek çarpma açılarında ise deformasyon mekanizmasının baskın olmasıyla malzeme yüzeyinde mikro çatlaklar oluşturularak aşınma meydana gelir (Yıldırım, 2013) (Avcu, 2011).

Şekil 2.11’de sünek ve gevrek malzemelerin erozyon süreci gösterilmiştir. Şekil 2.11 (a)’dan sünek malzemelerin erozif aşınmasının daha çok düşük açılarda ve mikro kesme ile mikrosürme mekanizmalarıyla meydana gelirken yüksek açılarda krater oluşarak parçacıkların yüzeye gömüldüğü görülmektedir (Finnie, 1960). Dolayısıyla mikro kesme ve mikrosürme erozyon mekanizmaları sünek malzemeleri düşük açılarda (15° - 30°) aşındırır (Avcu ve diğ., 2012). Şekil 2.11 (b)’den gevrek malzemelerin erozif aşınmasında düşük açılarda malzeme kaldırmaya yeterli olmadığı, erozif aşınmanın daha çok yüksek açılarda ve aşındırıcı parçacıkların çarptığı yerlerde yayılan yüzey altı mikro çatlakların keşişmesiyle meydana geldiği görülmektedir (Finnie, 1960). Gevrek malzemelerin dayanımları yüksek olduğundan çatlak oluşturarak malzeme kaldırmak için yeterli kinetik enerjiye dik açılarda ulaşılır. Düşük açılarda normal (dikey) bileşeni, çatlak oluşturarak malzeme kaldırmak için yeterli kinetik enerjiye sahip değildir. Dolayısıyla gevrek malzemelerde düşük açılarda erozyon oranı düşüktür (Javaheria ve diğ., 2018).

Sünek malzemelerde düşük çarpma açılarında kesme ve sürme mekanizmaları baskınken yüksek çarpma açılarında deformasyon mekanizması baskındır (Ediriweera ve diğ., 2019). Dolayısıyla sünek malzemelerde erozyon, kesme ve sürme şeklinde meydana gelirken gevrek malzemelerde çatlak oluşumuyla meydana gelir (Gedikli ve Özen, 2020).

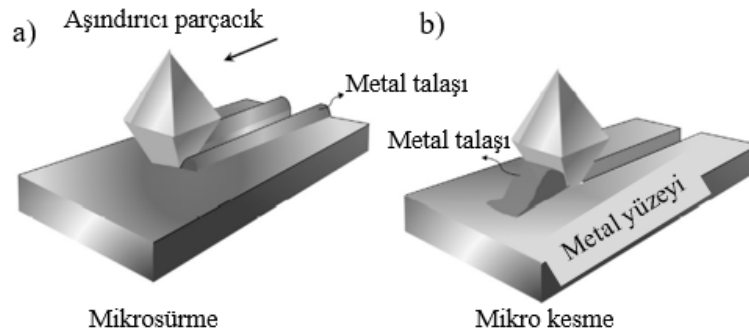


Şekil 2.11. Erozyon süreci: (a) sünek malzeme, (b) gevrek malzeme (Natarajan ve diğ., 2020)

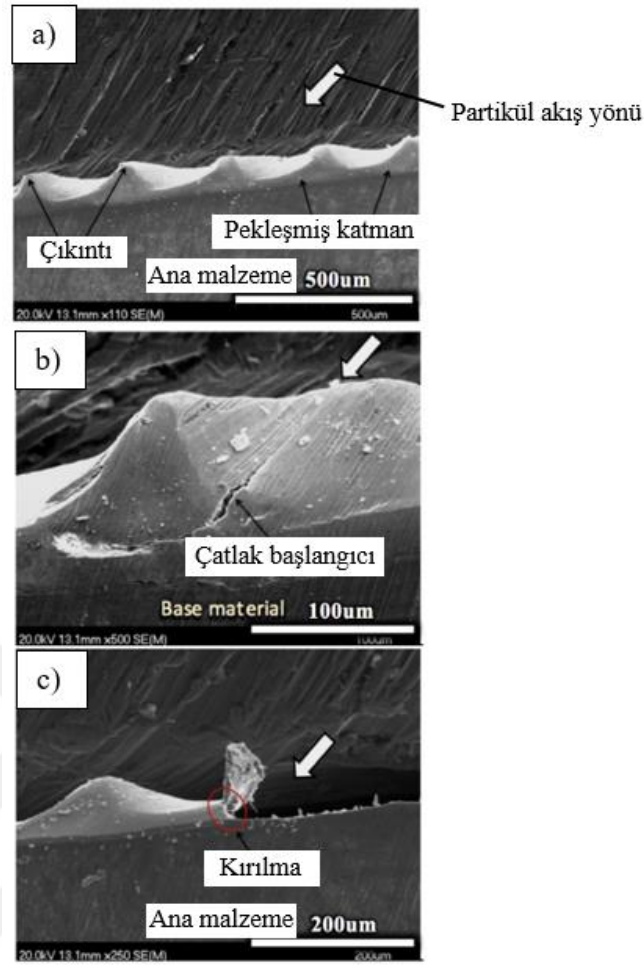
Sürme mekanizması düşük çarpma açısı ve düşük parçacık hızında baskın mekanizmadır. Bu durumda parçacıklar malzeme yüzeyinde kayma hareketi yaptığı için metali yan ve ön taraflara doğru sıkıştırarak çıkıntılar oluşturur. Şekil 2.12 (a)'da gösterildiği gibi sürme mekanizmasında, malzeme yüzeyden ayrılmaz sadece erozyon oluğunun yan tarafına kayar (Javaheria ve diğ., 2018).

Kesme mekanizması ise düşük çarpma açısı ve yüksek parçacık hızında baskın mekanizmadır. Bu durumda Şekil 2.12 (b)'de gösterildiği gibi aşındırıcı parçacığın önünde kalıntı oluşur ve aşınma oluğunun hacmine eşit bir malzeme hacmi yüzeyden uzaklaştırılır. Parçacıkların tekrarlı darbesinin etkisiyle pekleşen yüzey kısmen kırılanlaşarak Şekil 2.13'te gösterildiği gibi çatlamaya ve kırılmaya hazır hale gelir. Erozyon sürecinin devam etmesiyle önceden oluşmuş olan çıkıntılar kırılır ve malzeme kaldırılır (Javaheria ve diğ., 2018). Yani sürme esnasında yüzeyden malzeme uzaklaştırılmayıp sadece yer değiştirirken kesme esnasında yüzeyden aşınma oluğuna eşit hacimde malzeme uzaklaştırılır. Kesme mekanizması yeterli enerjiye sahip parçacığın eğik bir açıda yüzeyden malzeme kaldırmasından kaynaklanırken deformasyon mekanizması, dik açılarda gelen parçacıkların plastik deformasyon veya yüzey altı çatlak oluşturmasıyla ilişkilidir (Javaheri, 2019).

Tablo 2.1.'den görüldüğü gibi farklı malzeme türlerinde farklı erozyon mekanizmaları gözlenmektedir. Kauçuklarda yırtılma ve yorulma; sünek metaller ve polimerler gibi sünek malzemelerde kesme ve sürme; seramik, cam ve gevrek polimerler gibi gevrek malzemelerde yüzey altı mikro çatlakların oluşumu ve gevrek kırılma mekanizmalarıyla malzeme kaldırılır (Avcu, 2011).



Şekil 2.12. Erozyon mekanizmalarının şematik gösterimi: a) mikrosürme ve b) mikro kesme (Javaheria ve diğ., 2018)



Şekil 2.13. Alüminyum oksit parçacıklar ile yapılan katı partikül erozyonunda erozyon izinin kesit katmanlarının SEM mikrografı: (a) aşınmış ve deforme olmuş tabaka, (b) yüzey altı çatlak ilerlemesi, (c) deforme olmuş tabakanın kırılması (Javaheria ve diğ., 2018)

Tablo 2.1. Malzemelerin erozyon davranışları (Avcu, 2011)

Malzeme Türü	Erozyon Davranışı
Cam, seramik, gevrek polimer	Çatlak oluşumu, gevrek kırılma
Polimer, sünek metaller, fiber takviyeli polimerler	Kesme ve sürme
Kauçuk, plastik esaslı	Yorulma, yırtılma

Polimerik kompozitlerde erozyon mekanizmaları polimer ve takviye malzemenin sünekliğine ve gevrekliğine göre değişmektedir. Elastomerler sünek malzemeler gibi düşük çarpma açılarında maksimum erozyona ulaşırlar ama bu aşınma miktarı sünek termoplastiklerinkinden daha düşük olmaktadır. Dik çarpma açılarında bu malzemelerin erozyon davranışı kararlı olmayabilir ve elastomer yüzeyine partikül çarptıktan sonra

yırtılan veya kopan parçaların malzeme yüzeyiyle hala bağlı olması durumunda yerinden ayrılmayabilir dolayısıyla ağırlığı aşınmadan dolayı azalmasa bile bozulma devam edebilir (Fidan ve Sınmazçelik, 2006).

Parçacıklar çarpma sırasında malzeme yüzeyine darbe kuvvetleri uygular ve çarpmadan önceki kinetik enerjileri çarpışma boyunca farklı enerjilere dönüşür (Barkoula ve Kocsis, 2002). Katı partikül erozyonu sırasındaki süreçler aşağıdaki gibidir:

1- Dik açılı (normal), elastik çarpma:

Parçacığın çarpmadan önceki kinetik enerjisi, çarpışma anında malzeme içerisinde elastik deformasyonlar oluşturacak olan elastik enerjiye dönüşür. Geri sekme durumunda ise yine partikül kinetik enerjisine dönüşür. Keskin köşeli parçacıkların malzeme yüzeyine darbesiyle kesme/yırtılma ve malzeme kopması meydana gelir. Hızı ve/veya kütlesi düşük olduğu için düşük darbe enerjisine sahip parçacıklar, yüksek mukavemetli sert malzemelere çarptığında hemen hemen elastik darbe etkisi baskın olur.

Bazı kauçuklar dik çarpma açılarındaki erozyonun gözlemlenmediği bu tür davranışı gösterir. Bu durumda elastomerlerde partikül erozyonu ancak termal bozulmanın meydana geldiği uzun erozyon süreçlerinden sonra gerçekleşir (Barkoula ve Kocsis, 2002; Fidan ve Sınmazçelik; 2006).

2- Dik açılı (normal), plastik çarpma:

Metal ve seramik esaslı malzemelerde çarpma sırasında parçacıkların tüm enerjisi, kırılma başlangıcı olmadan plastik deformasyona neredeyse hiç dönüştürülemeyeceğinden çok yaygın olmayan bir durumdur. Polimer esaslı malzemelerde ise yüksek enerjili partiküller malzeme içerisine nüfuz ederek plastik deformasyonlara yol açabilmektedir. Bu yüzden polimer esaslı malzemelerin erozyon başlangıcında aşındırıcı parçacıklar yüzeye saplandığı için malzemenin ağırlaşmasına neden olacak bir etki gösterirler (Barkoula ve Kocsis, 2002; Fidan ve Sınmazçelik; 2006).

3- Dik açılı (normal), elastik / plastik çarpma:

En sık görülen bu çarpma türünde parçacığın çarpma öncesi enerjisinin çoğu iç sürtünme ile ısı enerjisine dönüşürken geri kalan enerji plastik deformasyonlar için kullanılır.

Dolayısıyla parçacığın geri sekme durumundaki kinetik enerjisi göreceli olarak azalır. Tek bir çarpma etkisi malzemede genel olarak kırılma ve deformasyona yol açamazken aynı darbe alanındaki tekrarlı darbeler ile malzeme yerinden çıkarılarak aşınma gerçekleşir. Genel olarak oluşturulan deformasyondan sonra malzeme mukavemeti aşılır ve küçük mikro çatlakların oluşmasıyla malzeme yerinden çıkarılır (Barkoula ve Kocsis, 2002; Fidan ve Sınmazçelik; 2006).

Parçacıkların ve hedef malzemenin sünekliği az olduğunda daha fazla enerji kırılmaya dolayısıyla da erozyona sebep olur. Süneklik fazla olduğunda darbe kuvveti ve malzemede oluşan gerilmeler küçüktür, kırılma malzemelerde ise parçacık enerjisi malzemenin mukavemetini aşabilen gerilmeler oluşturduğunda daha fazla erozif aşınma gerçekleşir (Barkoula ve Kocsis, 2002; Fidan ve Sınmazçelik; 2006).

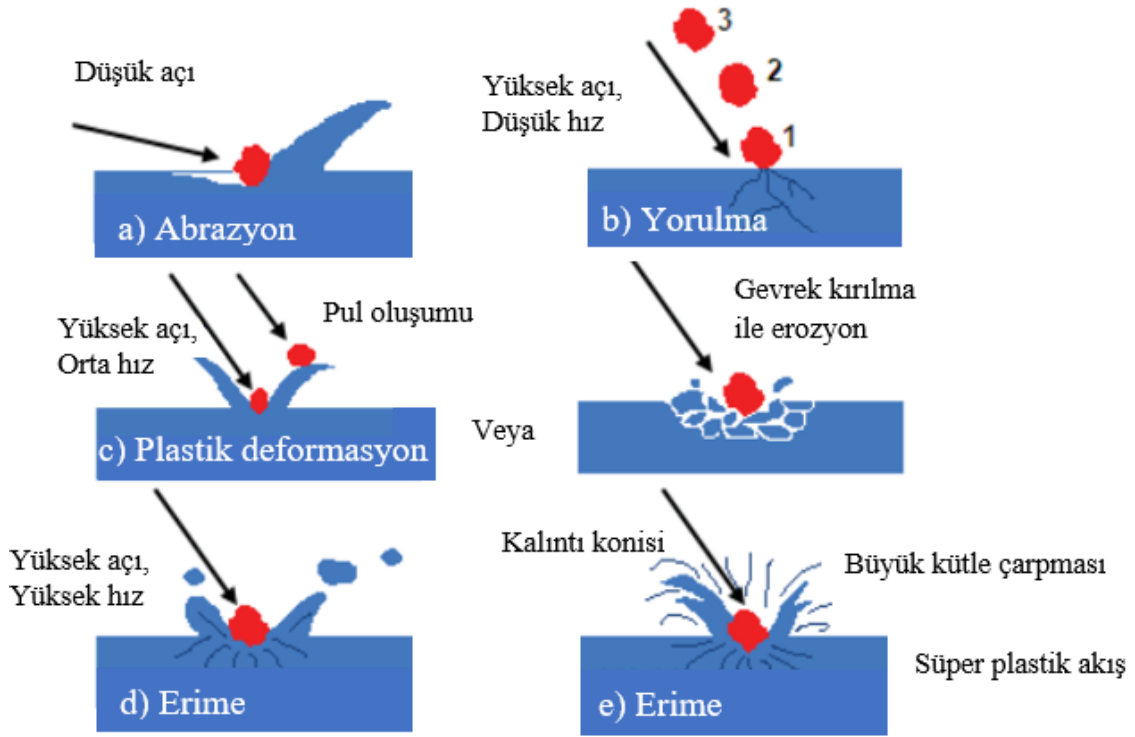
4- Eğik (küçük açılı), elastik / plastik çarpma:

En genel etki türüdür. Malzeme dik açılı çarpma durumundakine benzer şekilde deforme olur ama bu durumda malzeme özellikle keskin kenarlı aşındırıcılar tarafından kesilir ve sürülür. Dolayısıyla mikro kesme ve mikrosürme mekanizmaları baskındır ve dik açı ile çarpma durumundan farklıdır (Barkoula ve Kocsis, 2002).

Kırılma malzemelerin yüzeylerinde katı partiküllerin etkisiyle kesme gibi bir deformasyon pek beklenmez. Aşındırıcı partiküller ile hedef malzeme yüzeyi arasındaki etkileşim ve enerji transferi sünek malzemelere göre düşüktür. Partikül ile hedef yüzeyin sürtünme katsayısı yüksek olduğunda malzemeye daha fazla enerji transferi gerçekleşir. Orta büyüklükteki açılardan daha büyük çarpma açılarına doğru iç gerilmeler arttığı için maksimum erozyon yüksek açılarda olur (Fidan ve Sınmazçelik, 2006).

Şekil 2.14'te katı partikül erozyonunun olası mekanizmaları şematik olarak özetlenmiştir.

Aşındırıcı partikülün hedef malzeme yüzeyine çarpma hızı düşük olduğunda çarpışma esnasında oluşan gerilmeler malzemede plastik deformasyon oluşturamaz ve yüzey yorulmasıyla aşınma gerçekleşir. Partikülün çarpma hızının artmasıyla hedef malzemede plastik deformasyon meydana gelebilir ve tekrarlı plastik deformasyon sonucu aşınma meydana gelir. Partikül hızının çok yüksek olmasıyla hedef malzeme yüzeyinde lokal olarak ergime oluşabilir (Bircan, 2014).



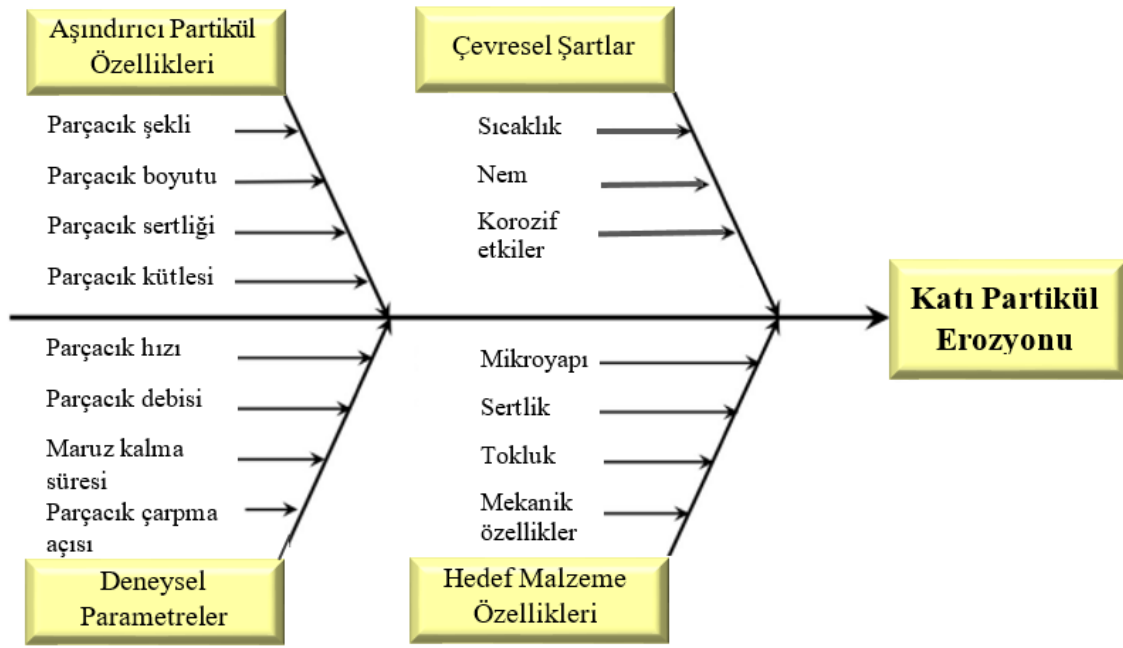
Şekil 2.14. Katı parçacık erozyonunun olası mekanizmaları; (a) düşük çarpma açılarında abrazyon aşınması, (b) düşük hız ve yüksek çarpma açısı sırasında yüzey yorulması, (c) orta hız ve yüksek çarpma açısı sırasında çoklu plastik deformasyon veya gevrek kırılma, (d) yüksek çarpma hızlarında yüzey erimesi, (e) ikincil etkileri olan makroskobik erozyon (Abbasi, 2011)

2.2. Katı Partikül Erozyonuna Etki Eden Faktörler

Aşındırıcı ortamlara maruz kalan mekanik bileşenlerin ömrünü arttırmak ve meydana gelen hasarı azaltmak amacıyla katı partikül erozyonunun anlaşılması gerekmektedir. Bunun için erozyonu etkileyen parametrelerin anlaşılması ve bu doğrultuda katı partikül erozyonuna karşı direnç geliştirilmesi gerekir (Alqallaf ve diğ., 2020).

Finnie, aşındırıcıların hedef malzeme yüzeylerine çarparak meydana getirdiği erozyon hasarının aşındırıcı ve hedef yüzey özelliklerine bağlı olduğundan bahsetmiştir (Finnie, 1960).

Şekil 2.15'te katı partikül erozyonunu etkileyen; aşındırıcı partikül özellikleri, çevresel şartlar, deneysel parametreler, hedef malzeme özellikleri gibi çok sayıda parametre balık kılçığında gösterilmektedir.

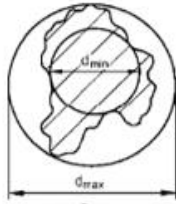
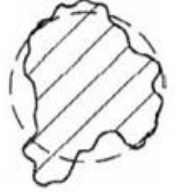
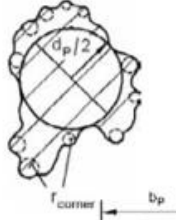
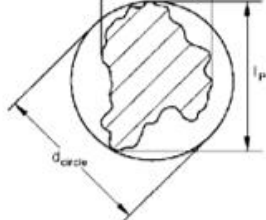
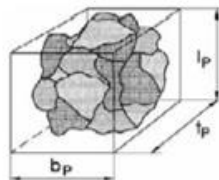


Şekil 2.15. Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler (Javaheria ve diğ., 2018)

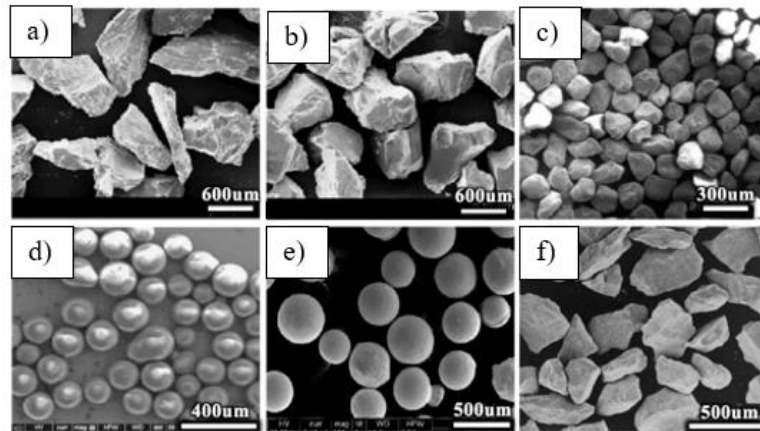
2.2.1. Parçacık Şekli

Parçacıkların geometrisi, onun ideal geometrik forma (küp, küre gibi) yaklaşma derecesini gösteren bir faktördür. Aşındırıcı parçacıkların küreden ne kadar farklı olduğunu tanımlamak için Şekil 2.16'da gösterilen şekil parametreleri ve formülleri kullanılmaktadır. Şekil 2.17'de farklı malzemelerdeki katı parçacıkların geometrileri ve boyutları gösterilmektedir. Buradaki küresel şekle sahip parçacıklarda keskin kenarlar veya kırılmış bölgeler bulunmaz. Köşeli parçacıklarda ise keskin kenarlar ve kırık bölgeler bulunmaktadır (Momber, 2008).

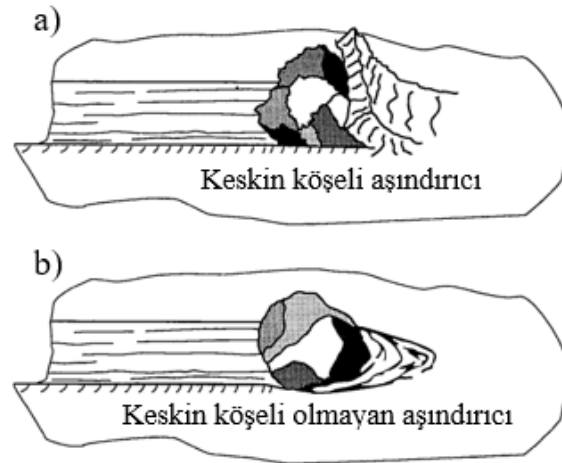
Sünek malzemelerde küresel parçacıklar ve gevrek malzemelerde köşeli parçacıklar malzeme kaldırma oranının düşük olmasına sebep olur (Naveed, 2017). Küresel parçacıklar daha çok plastik deformasyona neden olurken keskin köşeli parçacıklar kesme, kırılma ve parçalanmaya neden olur (Fidan ve Sınmazçelik, 2006). Şekil 2.18'de gösterildiği gibi katı partikül yeterince küt (keskin köşesi olmayan) ise malzeme yüzeyi aşınma kalıntısı oluşturulmadan deforme edilir (Stachowiak, 2006). Ayrıca köşeli partiküller yuvarlak partiküllere göre hedef malzeme yüzeyine daha fazla nüfuz edebilirler, bu da erozyon oranını artırır (Liebhard ve Levy, 1991).

Parametre ve tanım	Grafiksel ifadesi
Şekil faktörü	
$F_{shape} = \frac{d_{min}}{d_{max}}$	
Dairesellik faktörü	
$F_0 = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_p}{Perimeter^2}$	
Yuvarlaklık	
$S_R = \frac{\sum \left(\frac{r_{corner}}{d_p} \right)}{N_{corner}}$	
Küresellik	
$S_p = \frac{\sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot b_p \cdot l_p}}{d_{circle}}$	
Uzama oranı	
$r_E = \frac{l_p}{b_p}$	
Düzlük oranı	
$r_F = \frac{l_p}{l_p}$	

Şekil 2.16. Aşındırıcı parçacıkların şekil parametreleri (Momber, 2008)



Şekil 2.17. Farklı aşındırıcıların geometri ve boyutları: a) alümina, b) silisyum karbür, c) kuvars, d) cam boncuk, e) yuvarlak çelik kum, f) tungsten karbür (Alqallaf ve diğ., 2020)

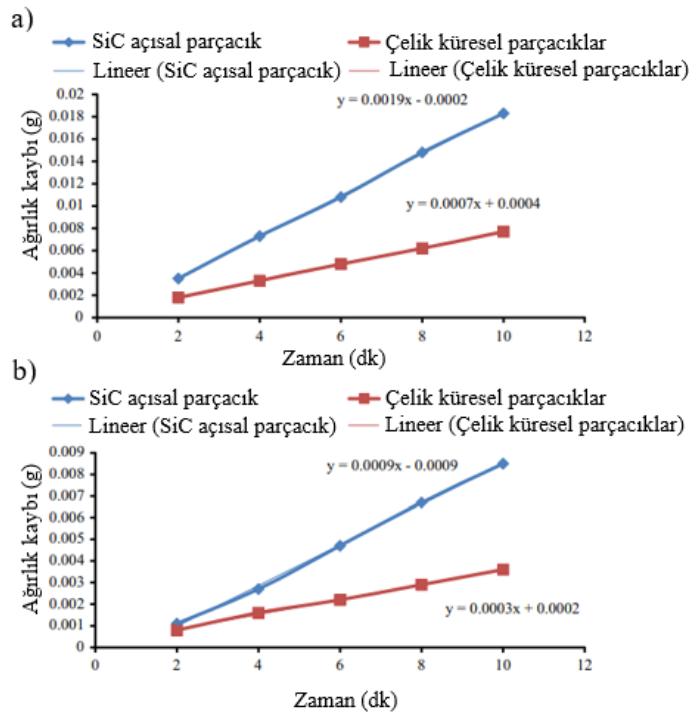


Şekil 2.18. Parçacık şekli: a) keskin köşeli, b) keskin köşeli olmayan (yuvarlak) (Stachowiak, 2006)

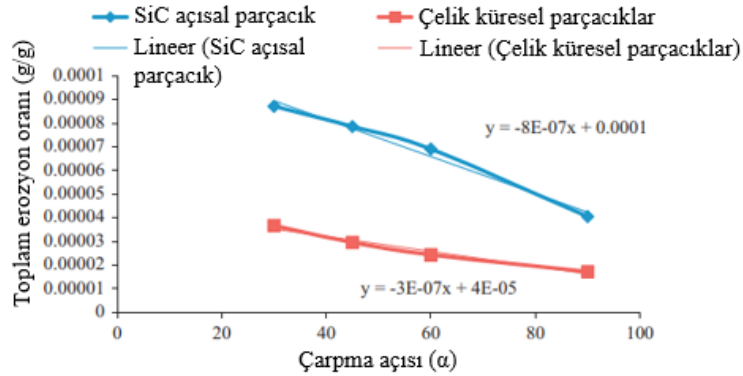
M. V. Torres ve arkadaşları, AISI (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü) 420 paslanmaz çeliğe 30° , 45° , 60° , 90° olmak üzere 4 farklı çarpma açısında her ikisi de $400\text{--}420\text{ }\mu\text{m}$ (60 mesh) parçacık boyutuna sahip köşeli silisyum karbür (SiC) ve küresel çelik parçacık göndererek performansını analiz etmişlerdir. Şekil 2.19’da gösterildiği gibi köşeli silisyum karbür parçacıkların küresel çelik parçacıklara kıyasla AISI 420 paslanmaz çeliğini yüksek miktarda aşındırarak daha fazla erozyon oranı meydana getirdiği sonucuna ulaşmışlardır. Hedef malzemenin köşeli silisyum karbür ile 30° çarpma açısıyla aşındırıldığı durumda aşınma mekanizması düşük darbe açısından dolayı kesme mekanizmasıdır ve yüzeyde çiziklerle birlikte sürme hareketini gözlemlemiştir. Yuvarlak çelik parçacıklar kullanıldığında ise parçacıkların yüzeyle kayan teması sonucu yüzeyden malzeme ayrılmadığı ama yer değiştirdiğine ulaşmışlardır. Şekil 2.20’den de görüldüğü gibi köşeli silisyum karbürün tüm çarpma açılarında küresel parçacıklardan yaklaşık iki kat daha fazla erozyona sebep olduğu ve her iki parçacık için de çarpma açısı azaldığında erozyon oranının arttığı yani 30° çarpma açısında diğer açılara göre en yüksek erozyonun meydana geldiği sonucuna ulaşmışlardır. Bu davranış diğer erozyon çalışmalarıyla örtüşmektedir. Dolayısıyla erozyon literatürü göz önünde bulundurulduğunda AISI 420 paslanmaz çeliğinin sünek davranış sergilediği anlaşılmaktadır (Vite-Torres ve diğ., 2013).

Birçok araştırmacı köşeli parçacıklarla erozyonda küresel parçacıklara göre çoğu metalik malzemede daha yüksek erozyon oranı gözlemlemiştir. A. V. Redy ve G. Sundararajan yaptıkları çalışmada Cu ve Cu esaslı sünek malzemeleri çeşitli açılarda gevrek olmayan

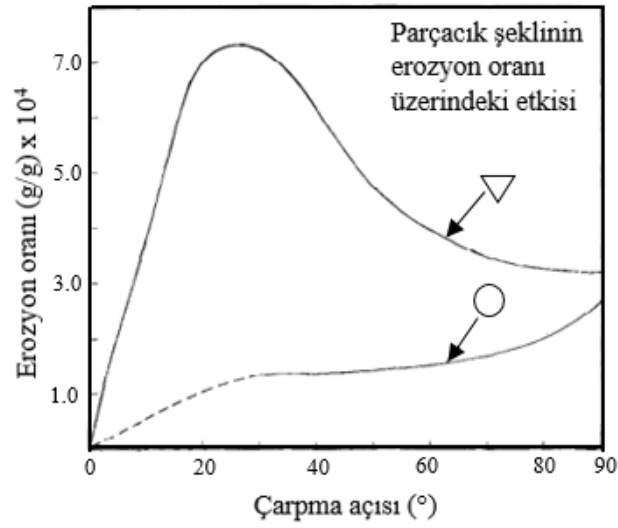
küresel çelik bilyalar ve köşeli SiC parçacıklarla katı partikül erozyonuna maruz bırakmışlar ve Şekil 2.21’de gösterilen erozyon oranını gözlemlemişlerdir. Aşındırıcı olarak köşeli SiC parçacıklar kullanıldığında erozyon oranının küresel çelik bilyalara göre daha fazla olduğuna ve SiC parçacıklar kullanıldığında malzemenin sünek davranış sergileyerek düşük açılarda maksimum erozyona ulaştığını gözlemlemişlerdir. Yani parçacıkların açısallığı arttığında erozyon oranı da artmakta ve Şekil 2.21’deki erozyon oranı- çarpma açısı grafiğinden görüldüğü gibi daha çok sünek davranış göstermektedir (Sundararajan ve Roy, 1997).



Şekil 2.19. Ağırlık kaybı- zaman grafikleri: a) 30° çarpma açısı, b) 90° çarpma açısı (Vite-Torres ve diğ., 2013)

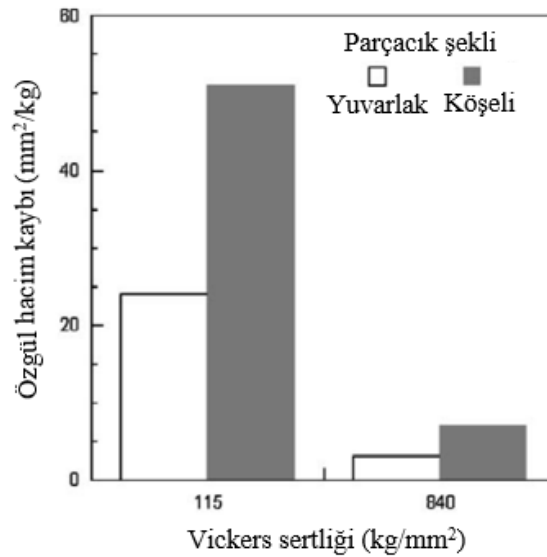


Şekil 2.20. Farklı çarpma açılarında erozyon oranlarının karşılaştırması (Vite-Torres ve diğ., 2013)



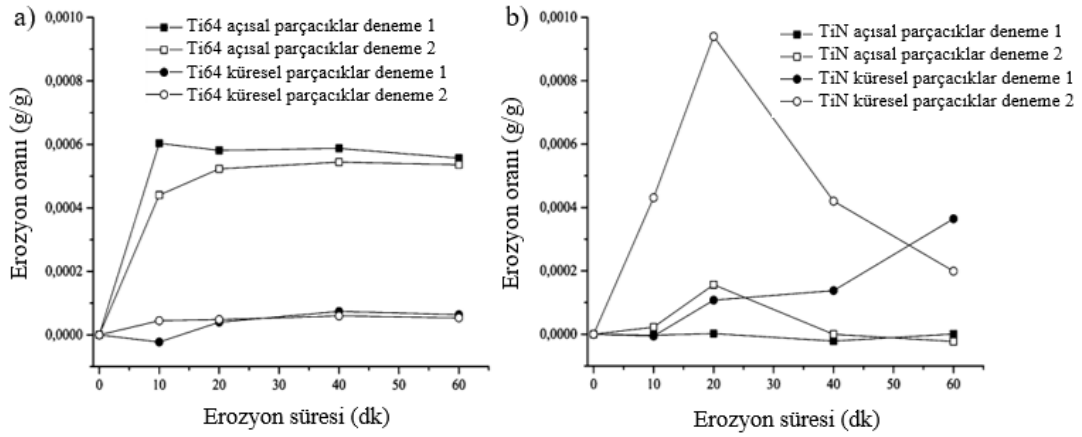
Şekil 2.21. Çarpma açısına bağlı olarak küresel ve açısall parçacıkların erozyon oranı üzerindeki etkisi (Sundararajan ve Roy, 1997)

Şekil 2.22’de parçacık şekillerinin ve hedef malzeme sertliğinin özgül hacim kaybına etkisi gösterilmektedir. Burada köşeli katı parçacıkların her iki hedef malzeme sertliğinde de küresel katı parçacıklara göre daha yüksek erozyona sebep olduğu görülmektedir. Yani köşeli parçacıklar, malzeme kaldırmak için daha etkili olmaktadır. Hedef malzeme sertliği arttıkça erozyon oranı azalmıştır. Ayrıca hedef malzeme sertliği düşük olduğunda aşındırıcı parçacığın şeklinin erozyon üzerindeki etkisi daha belirgindir, hedef malzeme sertliği arttıkça etkisi azalmaktadır (Momber, 2008).



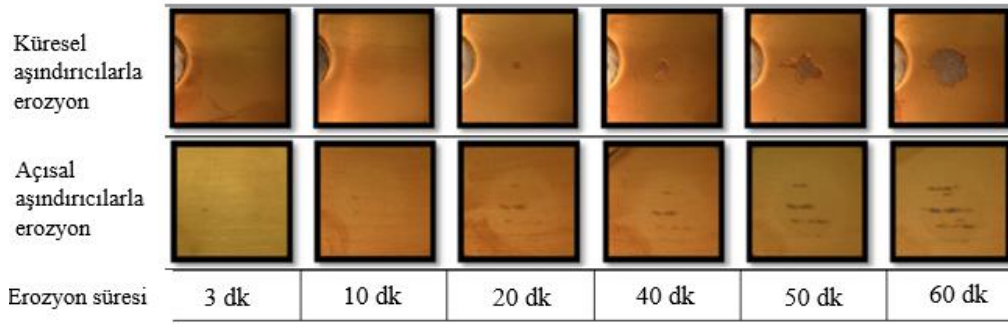
Şekil 2.22. Parçacık şeklinin ve malzeme sertliğinin çelik hedef malzemelerin özgül hacim kaybı üzerindeki etkisi (Momber, 2008)

M. Naveed ve arkadaşları yaptıkları çalışmada aşındırıcı şeklinin erozyon davranışı üzerindeki etkisi ile normal çarpma açılarında sünek ve kırılgen malzemelerin katı partikül erozyonu davranışını araştırmışlardır. Bu nedenle sünek Ti-6Al-4V alaşımına ve seramik titanyum nitrür (TiN) gevrek koruyucu kaplama ile kaplanmış Ti-6Al-4V alaşımına 90° çarpma açısında benzer boyutta küresel ve açısıl SiO₂ (Silisyum dioksit, silika) aşındırıcı parçacıklarla (küresel parçacıklar 300-400 µm, köşeli parçacıklar 350-420 µm boyutunda) erozyon testi uygulamışlardır. En yüksek darbe kuvvetini gerçekleştirilebilmek için 90° çarpma açısını seçmişlerdir. Şekil 2.23 (a)'dan Ti-6Al-4V malzemesinin açısıl parçacıklarla erozyonunun küresel parçacıklara kıyasla 10 kat daha fazla olduğunu ve Şekil 2.23 (b)'den TiN kaplamalı yüzeylerde açısıl parçacıkların küresel olanlara göre daha düşük erozyon oranlarına ulaştıklarını gözlemlemişlerdir. Şekil 2.23 (b)'deki TiN kaplanmış yüzeyin küresel parçacıklarla erozyonunda erozyon oranı belirli bir süreye kadar artarken sonrasında hızla azabilmektedir. TiN kaplamanın bu davranışını alt tabaka yüzeyinden malzeme kaldırılmaya başlandığında erozyon oranının azalabileceğiyle ilişkilendirmişlerdir. Dolayısıyla sünek malzemelerde erozyon oranının, gevrek malzemelere kıyasla köşeli parçacıklarla daha yüksek miktarda meydana geldiğine, küresel parçacıklarla ise daha düşük olduğuna ulaşmışlardır (Naveed, 2017).



Şekil 2.23. Açısıl ve küresel aşındırıcılar ile malzeme kaldırmanın erozyon oranı analizi: a) Ti-6Al-4V hedef malzeme ve b) TiN kaplanmış Ti-6Al-4V hedef malzeme (Naveed, 2017)

Şekil 2.24'teki TiN kaplamanın erozyondan sonraki makroskobik görüntülerinden köşeli aşındırıcıların, 60 dakika sonunda bile malzeme parçalanmasına neden olmadığına dolayısıyla gevrek malzemelerde erozyon için çok etkili olmadıklarına ulaşmışlardır (Naveed, 2017).



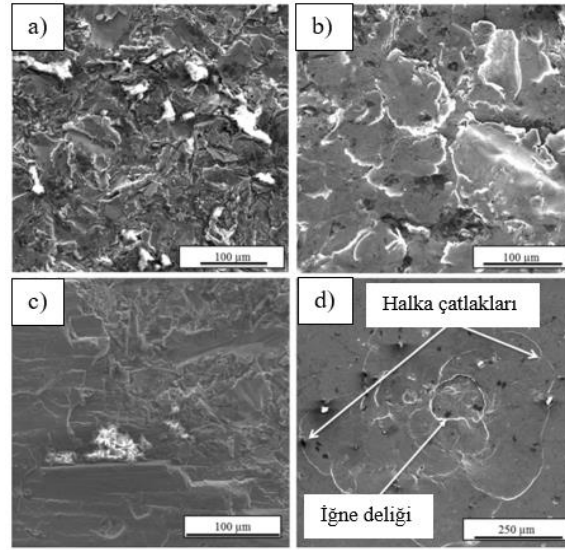
Şekil 2.24. Küresel ve açısal (köşeli) aşındırıcılar ile çeşitli aralıklarla erozyondan sonra TiN kaplamaların makrografik görüntüleri (Naveed, 2017)

Şekil 2.25'te verilen malzeme kaldırma mekanizmaları incelendiğinde Şekil 2.25 (a)'dan köşeli parçacıkların normal çarpma açısında sünek Ti-6Al-4V malzemesinin yüzeyinde aşınma izleriyle birlikte şiddetli yüzey deformasyonuna ve darbe alanının altındaki lokal plastik bölgenin sonucu olarak dudak oluşumuna neden olduğuna ve bu plastik bölgedeki gerinim, malzemenin kritik gerinimini aşarsa dudaklar yüzeyden ayrılarak malzeme kaldırılacağına ulaşmışlardır (Naveed, 2017).

Şekil 2.25 (b)'den sünek Ti-6Al-4V malzemesinin küresel parçacıklarla normal çarpma açısındaki erozyonunda yüzeyde düşük kesme ve trombosit (pelet, yassı tanecik) oluşumunu gözlemlemişlerdir (Naveed, 2017).

Şekil 2.25 (c)'den gevrek TiN kaplamada normal açıda köşeli aşındırıcıların tekrarlı darbesiyle alt tabaka ile kaplama ara yüzünde genişleyen dikey çatlakların meydana geldiğine ve bu çatlakların alt tabaka ile kaplamadaki yanal çatlaklarla birleşmesiyle malzemenin çıkarıldığına ulaşmışlardır (Naveed, 2017).

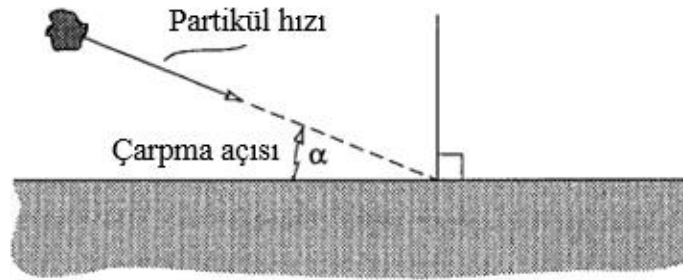
Şekil 2.25 (d)'den gevrek TiN kaplamanın küresel parçacıklarla erozyonunda yüzeyde halka çatlaklarının oluştuğuna ve tekrarlayan darbe etkileriyle kaplama yüzeylerinde çekme gerilmelerinin konsantrasyonu meydana gelerek iğne delikleri şeklinde malzeme çıkarıldığına ulaşmışlardır (Naveed, 2017). Dolayısıyla aşındırıcı şeklinin sünek ve kırılgan malzemelerdeki aşınma mekanizmalarını güçlü bir şekilde etkilediği, aktif aşınma mekanizmalarının sünek malzemelerde kesme ve dudak oluşumu olduğu, gevrek malzemelerde ise radyal ve yanal çatlama olduğu sonucuna varmışlardır (Naveed, 2017).



Şekil 2.25. Ti-6Al-4V malzeme kaldırma fenomeninin mikroskopik analizi: a) Ti-6Al-4V malzemesinin köşeli partiküller ile erozyonu sonrası dudak oluşumu, b) Ti-6Al-4V malzemesinin küresel partiküller ile erozyonu sonrası trombosit (pelet, yassı tanecik) oluşumu, c) TiN kaplamanın köşeli partiküller ile erozyonu sonrası alt tabakanın ve kaplamanın erozyonu, d) TiN kaplamanın küresel partiküller ile erozyonu sonrası halka çatlakları oluşumu (Naveed, 2017)

2.2.2. Parçacık Çarpma Açısı

Çarpma açısı, Şekil 2.26'daki gibi hedef malzeme yüzeyi ile katı partikülün çarpma öncesi yörüngesi arasındaki açıdır.



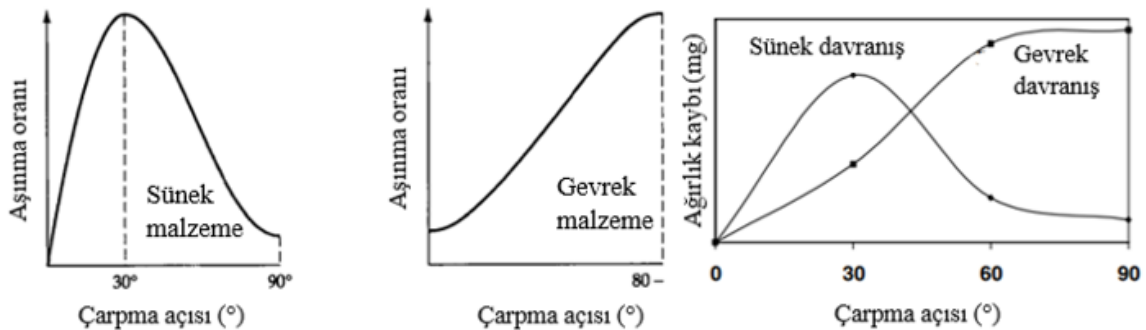
Şekil 2.26. Yüzeyde aşınmaya neden olan bir parçacığın çarpma açısı (Stachowiak, 2006)

Literatürde katı partikül erozyonundaki çarpma açısı iki durumda incelenmektedir. Bunlar;

- normal çarpma açılarında gerçekleşen erozyon ($\alpha \approx 90^\circ$)
- eğik çarpma açılarında gerçekleşen erozyon ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) (Barkoula ve Kocsis, 2002).

Çarpma açısı 0° ile 90° arasında değişebilir ancak 0° çarpma açılarında parçacık yüzeye çarpmadığından ihmal edilebilir bir aşınma mevcuttur. 20° gibi düşük çarpma açılarında parçacıkların sert, yüzeyin yumuşak olduğu durumlarda ciddi aşınmalar meydana gelebilir. Çarpma açısı düştükçe çarpışma sonrası katı partikül, hedef malzeme yüzeyi boyunca ilerleme eğilimi göstereceğinden abrazif aşınmaya benzer aşınma süreçleri desteklenir ve mikroskobik ölçüde çizerek talaş kaldırmaya çok benzerdir. Yüksek çarpma açılarında ise aşınma mekanizması tipik çarpma şeklindedir, malzeme plastik şekil değişimiyle yer değiştirebilir veya gevrek kırılma ile yerinden çıkabilir. Yüzey kırılğan ise maksimum erozyon oranına 90° gibi yüksek çarpma açılarında ulaşılır ve yüzeyin parçalanmasıyla şiddetli erozyon gözlemlenebilir (Stachowiak, 2006; Raghavendra ve diğ., 2012).

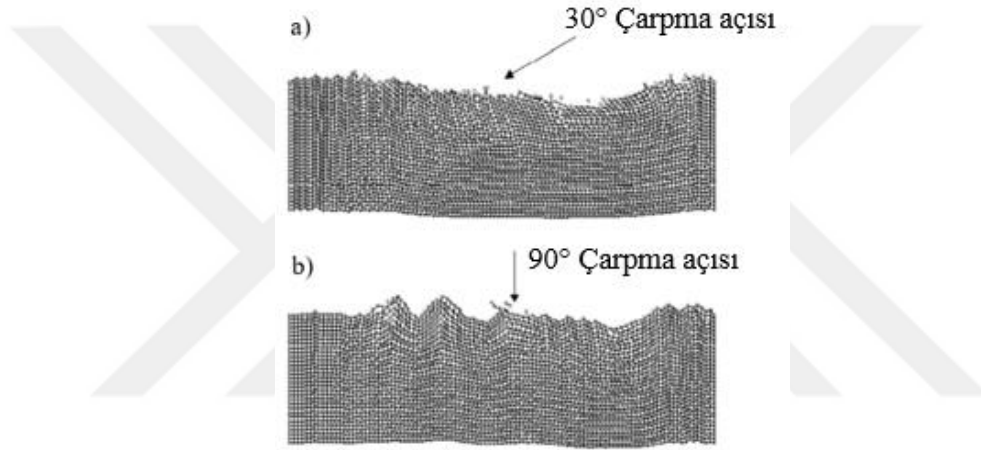
Parçacıkların çarpma açısına bağlı olarak sünek ve gevrek malzemelerdeki erozyon oranları Şekil 2.27’de gösterilmektedir. Sünek eroziv aşınma modunda maksimum erozyon, düşük çarpma açılarında gerçekleşirken gevrek eroziv aşınma modunda yüksek çarpma açılarında gerçekleşir (Stachowiak, 2006). Ayrıca düşük çarpma açılarında gevrek malzemelerin ağırlık kaybı, sünek malzemelerinkine göre daha azken açı arttıkça gevrek malzemelerin ağırlık kaybı sünek malzemelerden daha fazla olmuştur. Aşındırıcı parçacıklar düşük çarpma açılarında hedef malzeme yüzeyiyle daha uzun süre temas eder, yumuşak malzemelerde ağırlık kaybını artırır (Arslan, 2017). Dolayısıyla maksimum erozyon oranına sünek malzemelerde 15° - 30° ’de ulaşılırken gevrek malzemelerde 90° ’de ulaşılır. Düşük açılarda kesme mekanizması baskındır, büyük açılarda ise deformasyon mekanizması baskındır (Bircan, 2014).



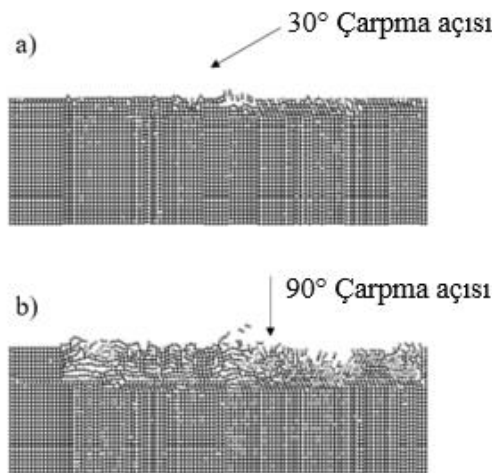
Şekil 2.27. Çarpma açısının sünek ve gevrek (kırılğan) malzemelerin aşınma oranları üzerindeki etkisi (Stachowiak, 2006; Barkoula ve Kocsis, 2002)

Şekil 2.28’de sünek malzemelerin 30° ve 90° çarpma açısındaki erozyonundan sonra hasarı şematik olarak gösterilmektedir. Sünek malzemelerde 90°’de, hız bileşeninin yüksek çarpma etkisi nedeniyle malzeme pürüzlülüğü artmasına rağmen malzeme 30°’ye göre daha düşük ağırlık kaybına uğramıştır (Chen ve Li, 2003).

Şekil 2.29’da gevrek malzemelerin 30° ve 90° çarpma açısındaki erozyonundan sonra hasarı şematik olarak gösterilmektedir. Kırılgan malzemelerin sünekliği düşük olduğundan deformasyona neden olan darbe enerjisine daha duyarlıdırlar. Çarpma açısı 30°’den 90°’ye arttıkça darbe enerjisi arttığı için gevrek malzemelerdeki erozyon oranı artar ve 90°’de maksimum erozyon meydana gelir (Chen ve Li, 2003).



Şekil 2.28. 30 aşındırıcı parçacığın çarpması sonrası sünek malzemenin yüzey morfolojisinin şematik gösterimi: a) 30° çarpma açısı, b) 90° çarpma açısı (Chen ve Li, 2003)



Şekil 2.29. 20 aşındırıcı parçacığın çarpması sonrası gevrek malzemenin yüzey morfolojisinin şematik gösterimi: a) 30° çarpma açısı ve b) 90° çarpma açısı (Chen ve Li, 2003)

Fiber takviyeli kompozitler ise 45°- 60° çarpma açılarında maksimum erozyon oranına ulaştıkları için yarı-sünek davranış gösterirler (Yıldıran, 2013). Takviye edilmemiş saf polimerlerin çoğu sünek özelliğe sahip olduğundan maksimum erozyon oranına 30° çarpma açılarında ulaşırlar ve kesme mekanizması baskındır (Fidan ve Sınmazçelik, 2006).

Katı partiküllerin hız bileşenlerini yatay (hedef yüzeye paralel) ve düşey (hedef yüzeye dik) olmak üzere ayırırsak düşük çarpma açılarında daha fazla yatay hız bileşeni elde ederiz ve bu da malzeme yüzeyinde çizik oluşturarak kesme mekanizmasını harekete geçirir (Avcu, 2011).

Kesme mekanizmasında çarpma hızının düşey bileşeni yüzeye nüfuz ederken yatay bileşeni malzeme hacmini uzaklaştırır (Ediriweera ve diğ., 2019).

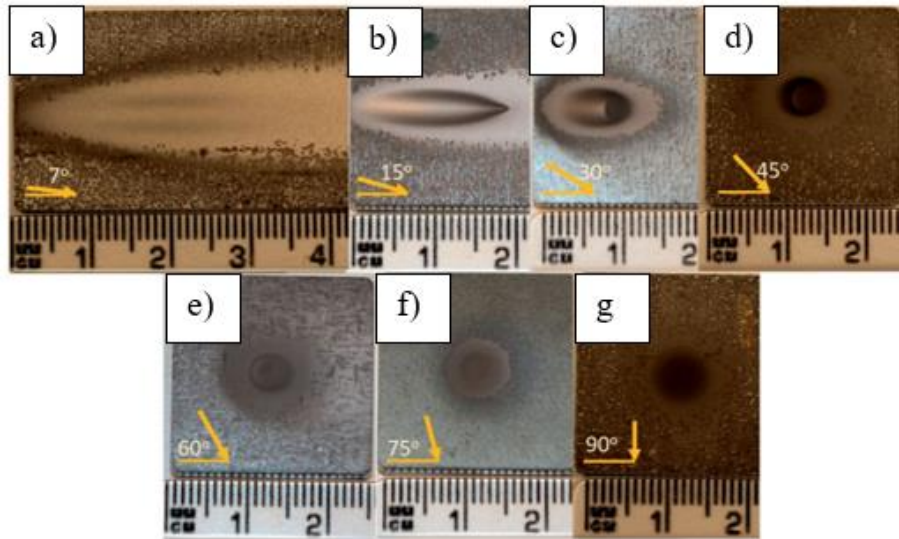
Çarpma açısının artmasıyla düşey hız bileşeni artar, bu ise hedef malzemenin yüzeyini bilyalı dövme işlemindeki gibi döverek çarpma etkisine benzer bir mekanizmayı harekete geçirir (Avcu, 2011). Çarpma açısı yüksek olduğunda yüzeye paralel olan yatay hız bileşeni düşük olduğundan kesme mekanizmasının önemi azalır ve kesme yerine önceki çarpışmalardan kaynaklanan pürüzlendirilmiş veya kırılmış parçalar yüzeyden uzaklaştırılır (Ediriweera ve diğ., 2019).

Şekil 2.30, oda sıcaklığında belirli bir hızda (70 m/s), çeşitli darbe açılarında yumuşak çelik (S355MC) numunelerinin 30 dk aşınmasından sonra hedef malzeme yüzeylerini göstermektedir. Darbe açısına bağlı olarak kesme, deformasyon veya her iki mekanizmanın bir kombinasyonu ile aşınma gerçekleşir ve düşük açılarda kesme mekanizmasıyla kanal şeklinde bir aşınma oluşurken açının artmasıyla deformasyon aşınması baskın hale gelir. Oluşan aşınma izleri 7°'de kanal şeklindeyken açı büyüdükçe elips şeklinde olup 90°'de dairesel şekildedir. Darbe açısı, baskın olan aşınma mekanizmaları üzerinde büyük etkiye sahip olduğundan ağırlık kaybını etkilemektedir (Ediriweera ve diğ., 2019).

J. R. L. Camacho ve arkadaşları 4140, 1018 çeliklerinin; 304, 316 ve 420 paslanmaz çeliklerinin; 6061 serisi alüminyum malzemenin; pirinç ve bakır malzemelerin katı

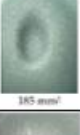
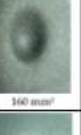
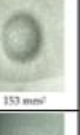
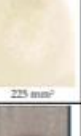
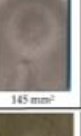
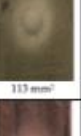
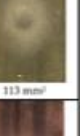
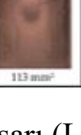
partikül erozyonuna karşı davranışını bilmek ve erozyon dirençlerini karşılaştırmak amacıyla performanslarını analiz etmişlerdir (Laguna-Camacho ve diğ., 2013).

Deney sırasında malzemeleri 420- 450 μm boyutundaki açılal şekilli silisyum karbür (SiC) aşındırıcılar tarafından 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° çarpma açılarında 24 ± 2 m/s'lik hızda ve $0,7 \pm 0,5$ g/dk sabit aşındırıcı akış hızında 10 dakika boyunca aşındırmışlardır. Şekil 2.31'den aşınma izlerinin düşük açılarda (30° ve 45°) eliptik şekle sahip olduğunu, darbe açısının artmasıyla (60° ve 90°) aşınma izi alanının azaldığını ve diğler erozyon çalışmalarındaki gibi dairesel bir şekle sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu durumu, Şekil 2.32'den görüldüğü gibi 30° ve 45° gibi düşük açılarda parçacık akışında daha yüksek sapma meydana geldiği ve yüzey boyunca kayma eylemi gerçekleştiği için gözlemişlerdir (Laguna-Camacho ve diğ., 2013).

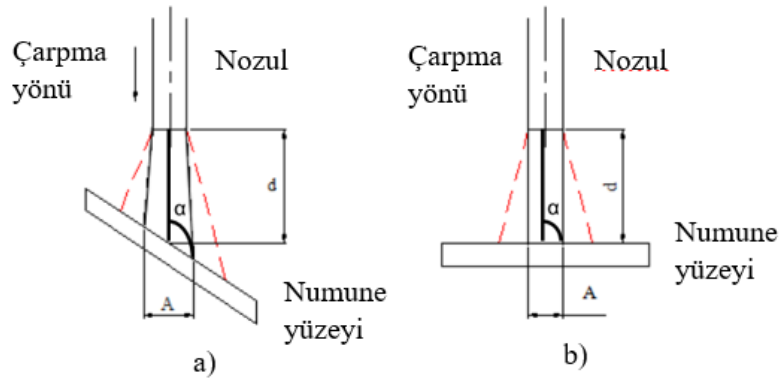


Şekil 2.30. a) 7°, b) 15°, c) 30°, d) 45°, e) 60°, f) 75° ve g) 90° çarpma açısı için 30 dakika süreyle aşınmış kraterler (Ediriweera ve diğ., 2019)

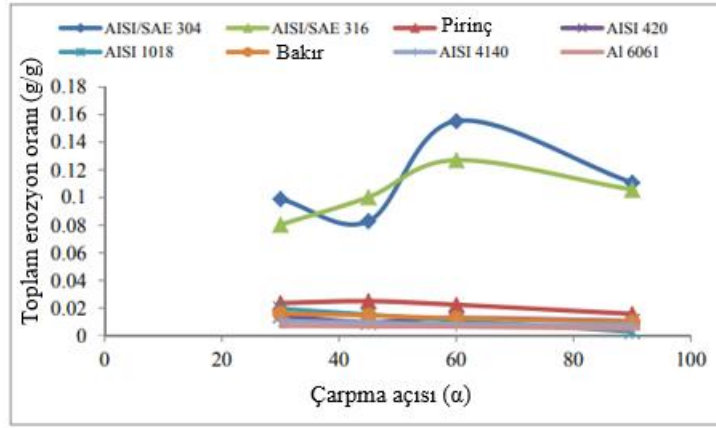
Şekil 2.33'ten malzemelerin eğik açılarda daha yüksek erozyon oranına sahip olduğuna ve 90°'ye yakın açılarda erozyon oranının önemli ölçüde azaldığına, dolayısıyla sünek bir davranış sergilediklerine ulaşmışlardır. AISI 304 ve 316 paslanmaz çelikleri en düşük erozyon direncini sergilemekle birlikte paslanmaz çelikler üzerinde yapılan önceki erozyon çalışmalarında 45°'den düşük açılarda maksimum erozyona ulaşılmasına rağmen bu çalışmada 60°'de ulaşmışlardır. Bu durumu, oda sıcaklığının malzeme performansını değiştirebileceğine bağlamışlardır (Laguna-Camacho ve diğ., 2013).

Malzeme	30°	45°	60°	90°
4140 çeliği	 226 mm ²	 220 mm ²	 201 mm ²	 177 mm ²
1018 çeliği	 170 mm ²	 170 mm ²	 153 mm ²	 133 mm ²
304 paslanmaz çelik	 205 mm ²	 185 mm ²	 160 mm ²	 153 mm ²
316 paslanmaz çelik	 230 mm ²	 205 mm ²	 186 mm ²	 179 mm ²
420 paslanmaz çelik	 240 mm ²	 230 mm ²	 225 mm ²	 215 mm ²
6061 alüminyum	 210 mm ²	 194 mm ²	 145 mm ²	 120 mm ²
Pirinc	 220 mm ²	 188 mm ²	 113 mm ²	 113 mm ²
Bakır	 185 mm ²	 164 mm ²	 113 mm ²	 95 mm ²

Şekil 2.31. Test edilen malzemelerde erozyon hasarı (Laguna-Camacho ve diğ., 2013)



Şekil 2.32. Darbe geometrisi: a) 45°'den küçük açılar, b) 90°'ye yakın veya 90° açılar (Laguna-Camacho ve diğ., 2013)



Şekil 2.33. Çarpma açısı- toplam erozyon oranı grafiği (Laguna-Camacho ve diğ., 2013)

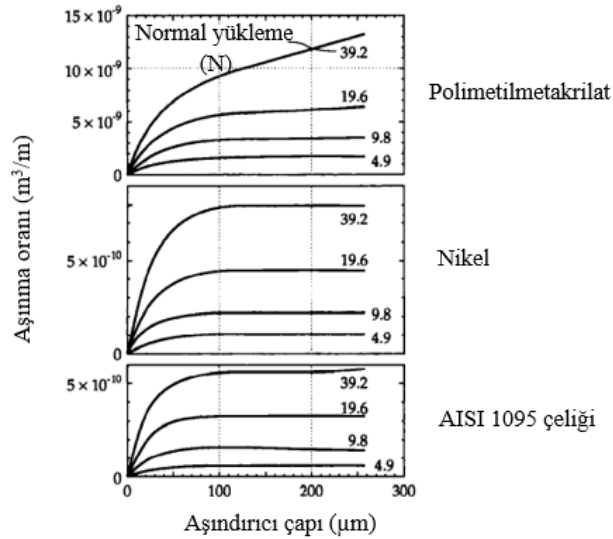
2.2.3. Parçacık Boyutu

Küçük boyutlu parçacıklar mikro kesme mekanizmasıyla yüzeyden malzeme kaldırırken büyük boyutlu olanlar mikro çatlama ve mikro kırılma mekanizmaları ile malzeme kaldırmaktadır. Parçacıkların boyutlarının artmasıyla taşıdığı kinetik enerji miktarı arttığından malzemede çatlak oluşumuna yol açacak yeterli darbe enerjisine sahiplerdir ve büyük parçalar koparabildikleri için yüksek aşınma oranlarına sebep olurlar. Dolayısıyla parçacık boyutunun artmasıyla erozyon oranı artacaktır ancak bu artış lineer değildir, hedef malzemenin sünek veya gevrek olmasına ve erozyon parametrelerine bağlıdır. Küçük parçacıkların kinetik enerjileri düşük olduğundan düşük aşınma oranlarına yol açarlar (Arslan, 2017; Avcu, 2011).

Erozyon oranının, 100- 200 μm kritik parçacık boyutu değerine kadar artarken bu kritik değerden sonra partikül boyutundan bağımsız olduğu gözlenmiştir. Ancak bu kritik değer malzemenin erozyona maruz kalma koşullarına ve malzeme ile parçacık etkileşimine bağlıdır. Parçacık boyutunun artmasıyla parçacıklar birbirleriyle çarpışarak etkileşime girebildiğinden kritik değerden sonra erozyon oranı azalabilmektedir. Erozyon oranının azalmasının başka bir nedeni ise hedef malzemenin birim ağırlığı başına daha az sayıda parçacık ulaşmasıdır (Barkoula ve Kocsis, 2002).

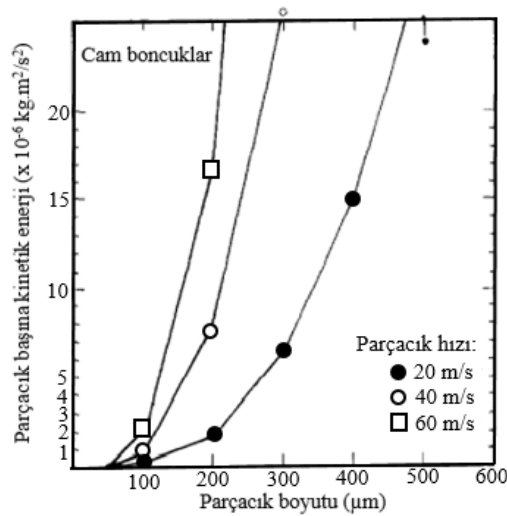
Şekil 2.34'te farklı malzemeler için aşındırıcı parçacığın tane boyutunun, erozyon oranını nasıl etkilediği gösterilmiştir. Burada 10 μm tane boyutunun altındaki aşındırıcıların aşınmaya neden olamayacak kadar küçük olduğunu ve sabit temas basıncı için 50 μm tane boyutuna kadar aşınmanın lineer olmayan bir şekilde arttığını gözlemlemişlerdir.

Ayrıca çoğu metal malzeme için 100 μm aşındırıcı tane boyutunda sınır bir değere ulaşılmıştır. Polimerlerde yüksek temas basınçlarında tane boyutunda 300 μm 'ye kadar bir artışla aşınma oranının da arttığı gözlenmiştir (Stachowiak, 2006).



Şekil 2.34. Aşındırıcı tane çapının ve temas basıncının bir polimer (PMMA, polimetilmetakrilat), Ni ve AISI 1095 çeliğinin aşınma oranına etkisi (Stachowiak, 2006)

Şekil 2.35'ten cam boncuğun partikül boyutunun ve hızının artmasıyla parçacıkların taşıdığı kinetik enerjilerin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni Denklem (2.1)'de gösterilen kinetik enerjinin, aşındırıcı kütlesi ve parçacık hızının karesiyle orantılı olması dolayısıyla parçacık hızının artması sonucu artmasıdır. Kinetik enerji artışıyla malzeme yüzeyine daha fazla enerji aktarılacağı için erozyon oranı artacaktır.

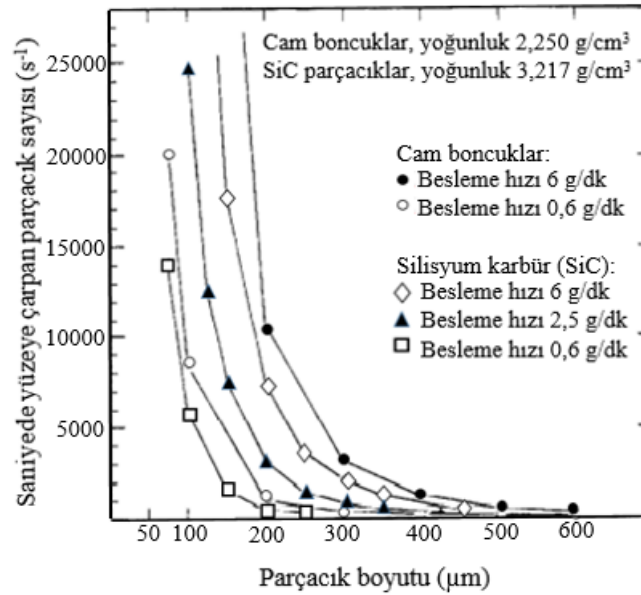


Şekil 2.35. Farklı parçacık boyutlarındaki cam boncukların kinetik enerjisi (Liebhard ve Levy, 1991)

$$E_{\text{kinetik}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{\text{hacim} \times \text{yoğunluk} \times v^2}{2} \quad (2.1)$$

Aynı kütleye sahip aşındırıcılar kıyaslandığında küçük boyuttaki partiküller daha fazla sayıda parçacık içererek yüzeye daha fazla sayıda darbe uygulayabilmekteyken kinetik enerjilerinin az olmasından dolayı büyük boyuttaki partiküllere göre aşındırıcılıkları daha azdır (Liebhard ve Levy, 1991).

M. Liebhard ve A. Levy yaptıkları çalışmada 1018 çeliğine çeşitli boyutlarda ve debilerde cam boncuklar ve SiC parçacıklar göndermişler ve Şekil 2.36'daki parçacık boyutu ile saniyede numuneye doğru hareket eden parçacık sayısı ilişkisine ulaşmışlardır. Buradan parçacık boyutunun artmasıyla numuneye çarpan parçacıkların sayısının azaldığını gözlemişler ve bunun nedenini numuneye çarpıp geri seken parçacıkların oluşturduğu kalkan etkisiyle açıklamışlardır (Liebhard ve Levy, 1991). Dolayısıyla belirli bir parçacık boyutunun üzerine çıkıldığında hedef yüzeye ulaşan parçacık sayısı azalabileceğinden erozyon oranı azalabilmektedir.

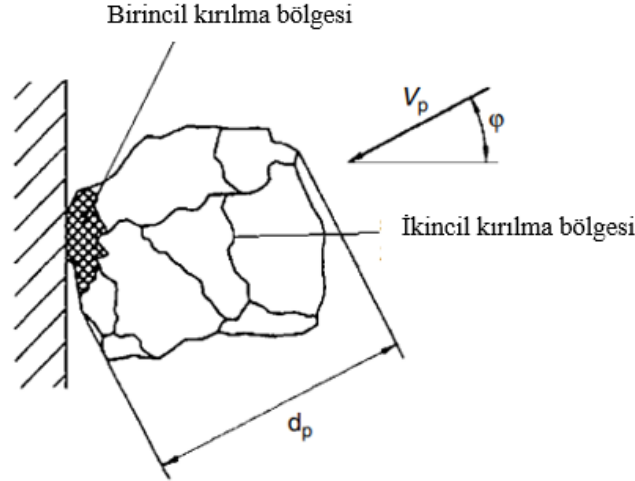


Şekil 2.36. Farklı parçacık boyutları için saniyede hedef yüzeye çarpan parçacık sayısı (Liebhard ve Levy, 1991)

2.2.4. Parçacıkların Kırılma Olasılığı

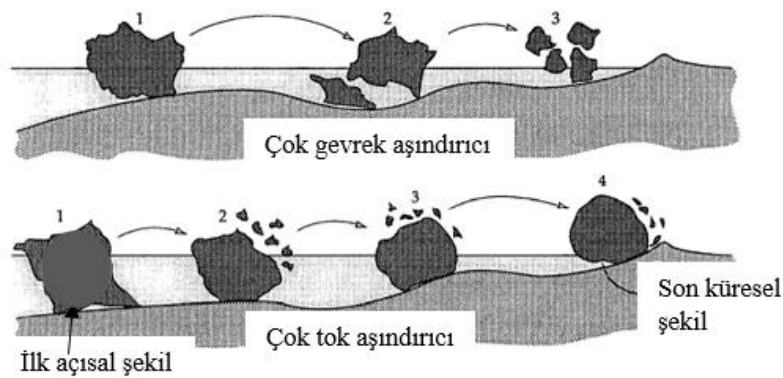
Aşındırıcı partikülün çarpmasıyla hedef malzeme yüzeyinde ve partikülde gerilmeler oluşur. Çarpma sonrası partiküller çarpma hızına, çarpma açısına ve parçacık boyutuna

bağlı olarak Şekil 2.37'deki gibi kırılabilir (Momber, 2008). Buradaki birincil kırılma bölgesi doğrudan malzeme yüzeyiyle temas eder, yüksek çarpma hızından dolayı gerilim dalgalarına maruz kalır. Gerilim dalgaları parçacığın arka kısmına doğru azalır ve arka taraftaki kısımlar ikincil kırılma bölgesi olarak adlandırılır (Yavuz, 2018).



Şekil 2.37. Hedef malzemeye çarpan bir aşındırıcı parçacığın kırılma yapısı (Momber, 2008)

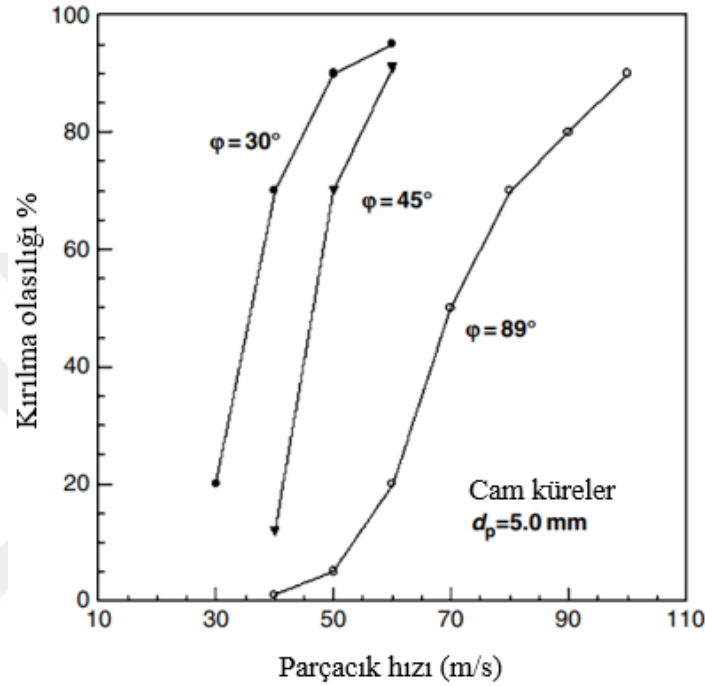
Şekil 2.38'de görüldüğü gibi katı parçacıklar çok gevrekse (kırılgan) hedef yüzeye çarptığında kırılarak küçük parçalara ayrılır ve aşınmayı azaltabilirler. Eğer aşındırıcı parçacık çok toksa hedef yüzeye çarptıkça keskin kenarları kırılarak yuvarlak bir hale gelir, bu da aşınmayı azaltmaktadır (Stachowiak, 2006).



Şekil 2.38. Köşeli aşındırıcı parçacığın gevrekliğinin ve tokluğunun aşındırma verimliliğine etkisi (Stachowiak, 2006)

Şekil 2.39, kuvars parçacıklarının çarpma açısı ve çarpma hızı değişiminin parçacıkların kırılma olasılığı üzerine etkilerini göstermektedir. Çarpma hızındaki ve çarpma açısındaki

artışla parçacıkların kırılma olasılığı artmıştır. Eşik hızları önemlidir çünkü gelen parçacıklar eşik hızını aşarsa kırılmaya başlar. Şekil 2.39’da 89° çarpma açısıyla çarpan kuvars parçacıkların eşik hızı (V_p) 40 m/s’dir. Ayrıca doyma hızı aşılsa bu durumda parçacıkların kırılma olasılığı 1 (%100) olur. Şekil 2.39’daki erozyon koşullarında doyma hızına ulaşılmamıştır (Momber, 2008).



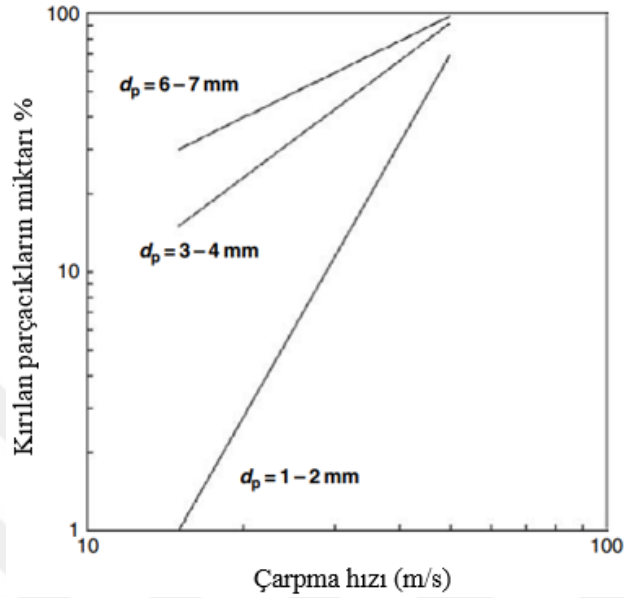
Şekil 2.39. Kuvars parçacıkların çarpma hızına ve çarpma açısına bağlı olarak kırılma olasılığı (Momber, 2008)

Eşik hız, hedef malzemenin sertliğinden de etkilenmektedir. Tablo 2.2’de görüldüğü gibi sertliği yüksek olan hedef malzemelerde eşik hızı düşmektedir.

Tablo 2.2. Hedef malzeme sertliğinin 700 µm boyuttaki cam boncukların eşik hızı üzerindeki etkisi (Momber, 2008)

Hedef malzeme	Vickers sertliği (GPa)	Eşik hız (m/s)
Alüminyum alaşımı	1.75	216–240
Pirinç	1.22	216–289
Bakır	0.89	250–288
Cam	6.14	175–200
Yumuşak çelik	1.98	201–218
Zirkonya	14.0	41–48
Silis kumu	30.5	47–82
Titanyum alaşımı	3.25	174–203

Şekil 2.40'tan görüldüğü gibi kuvars parçacıklarının hızının ve boyutunun artmasıyla kırılma olasılıkları artmıştır. Parçacık boyutunun artmasıyla ise parçacık hızının, kırılma olasılığındaki etkisi azalmıştır.

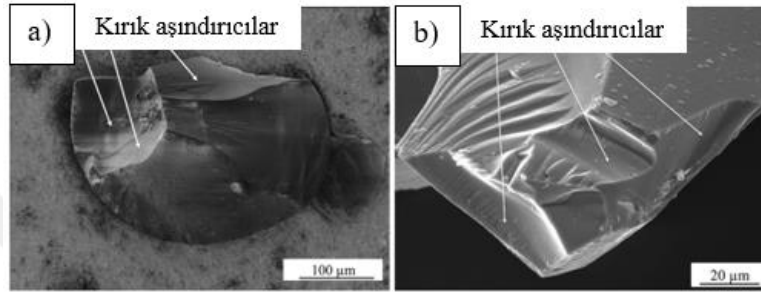


Şekil 2.40. Kuvars parçacıklarının kırılma olasılığına çarpma hızı ve parçacık çapının etkileri (Momber, 2008)

Erozyon, aşındırıcı parçacıkların parçalanmasıyla iki aşamalı bir süreçle gerçekleşir. İlk aşamada aşındırıcıların etkisiyle yüzeyde birincil erozyon meydana gelirken ikinci aşamada aşındırıcıların parçalanmasıyla oluşan ikincil aşındırıcıların etkisiyle gerçekleşir. Normal çarpma açısına yaklaştıkça darbe kuvveti artacağından ikincil erozyonun meydana gelmesi beklenebilir (Naveed, 2017). İkincil parçacıkların oluşmasıyla yüzey üzerindeki aşınma oranları artabilmektedir (Winter ve Hutchings 1974).

Şekil 2.41 (a), Ti-6Al-4V alaşımı ile etkileşiminden sonra küresel şekle sahip SiO_2 aşındırıcılarının çoklu yüzey ve kenarların oluşumuyla parçalanmasını göstermektedir. Şekil 2.41 (b)'deki açısallı SiO_2 aşındırıcılarında ise aşındırıcının yüzeyinde çizgilerle birlikte çok sayıda yüzeyin ve kenarın meydana geldiği görülmektedir. Erozyon esnasında aşındırıcıların parçalanmasını, hedef malzemenin ve aşındırıcıların kırılma tokluğunun yanında sertlikleri de etkilemektedir. Parçacık sertliğinin (H_p), hedef malzemenin sertliğine (H_t) oranı önemli bir faktördür (Naveed, 2017). $H_p/H_t < 1$ ise aşındırıcı partiküller genellikle ezilir veya parçalanır, aşındırıcıların aşınmasıyla yüzey

alanlarında artış görülür ve aşınan uçlar hedef yüzeye gömülebilir (Naveed, 2017) (Bousser, 2013). $H_p/H_t > 1$ ise aşındırıcıların yüzey alanlarındaki artış ihmal edilebilecek kadar düşüktür ve aşındırıcının parçalanma etkisi düşüktür. Ayrıca parçacıkların çarpma hızının artmasıyla partiküllerin parçalanma olasılığı da artmaktadır. Şekil 2.41'deki SiO_2 parçacığının sertliğinin Ti-6Al-4V malzemesinin sertliğine oranı (H_p/H_t) 2,8 iken hedef malzeme TiN seramik kaplamayla kaplandığında 0,65 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle SiO_2 aşındırıcısının daha sert olan TiN kaplama ile etkileşimiyle yüksek kırılma kırılma öngörülür (Naveed, 2017).



Şekil 2.41. Ti-6Al-4V alaşımı ile erozyon sonrası parçalanma: (a) SiO_2 küresel parçacık, (b) SiO_2 köşeli parçacık (Naveed, 2017)

P. H. Shipway ve I. M. Hutchings, yaptıkları çalışmada hedef malzeme ve parçacık özelliklerinin etkilerini araştırmak amacıyla yedi farklı seramik hedef malzeme (50 mm x 50 mm x 5 mm boyutlarında) ile dört farklı aşındırıcı kullanarak 90° çarpma açısında 0,8 g/dk ila 1,2 g/dk parçacık akışında erozyon testlerini gerçekleştirmişlerdir. Parçacıkların ve hedef malzemelerin Vickers mikrosertlik değerleri Tablo 2.3 ve Tablo 2.4'te verilmiştir (Shipway ve Hutchings, 1996).

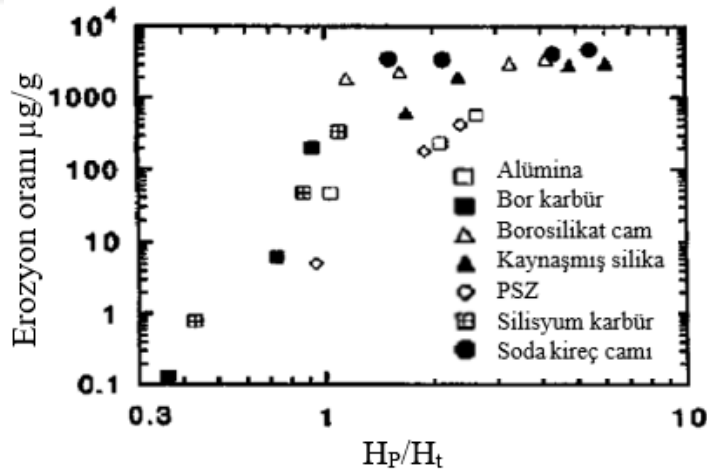
Tablo 2.3. Hedef malzemelerin sertlik ve tokluk değerleri (4,9 N yükte Vickers mikro indentasyon testi) (Shipway ve Hutchings, 1996)

Hedef malzeme	Bileşim (% ağırlıkça)	H (GPa)	Kc ($\text{MPa m}^{1/2}$)
Soda kireç camı	72 SiO_2 , 15 Na_2O , 5 CaO , 4 MgO	6,14	1,08
Borosilikat cam	81 SiO_2 , 13 B_2O_3 , 4 Na_2O	8,10	1,37
Kaynaşmış silika	100 SiO_2	5,54	1,62
Alümina	86 Al_2O_3 , 11 SiO_2	12,7	4,79 (98,1 N yükte)
Silisyum karbür	99 SiC	30,5	3,71 (98,1 N yükte)
Bor karbür	96 B_4C , 3C	36,3	3,59

Tablo 2.4. Aşındırıcı malzemelerin sertlik ve tokluk değerleri (1,97 N yükte Vickers mikro indentasyon testi) (Shipway ve Hutchings, 1996)

Partikül malzemesi	Bileşim (% ağırlıkça)	H (GPa)	Kc (MPa m ^{1/2})	Şekli
Silisyum	100 Si	9,3	1,3	Açısal
Silika	99 SiO ₂	13,1	1,4	Küresel
Alümina	95 Al ₂ O ₃ , 3 TiO ₂	26,5	3,4	Açısal
Silisyum karbür	99 SiC	33,4	3,5	Açısal

Şekil 2.42’de 60 m/s parçacık çarpma hızında tüm kombinasyonlar için parçacık sertliğinin (H_p) hedef malzeme sertliğine (H_t) oranına göre (H_p/H_t) erozyon oranı değerleri gösterilmektedir. Buradan hedef malzeme olarak düşük sertlikteki soda-kireç camının, borosilikatın ve kaynaşmış silikanın yüksek erozyon oranları sergilediğini gözlemlemişlerdir. Şekil 2.42’den H_p/H_t değerinin artmasıyla erozyon oranının arttığına ve parçacığın hedef malzemedan daha yumuşak olduğu durumda ($H_p/H_t < 1$) çok düşük erozyon oranlarının sergilendiğini gözlemlemişlerdir. Erozyon oranındaki bu değişikliklerin erozyon mekanizmasında değişim meydana gelmesinden kaynaklanabileceğinden bahsetmişlerdir (Shipway ve Hutchings, 1996).



Şekil 2.42. Test edilen tüm kombinasyonlar için partikülün sertliğinin hedef malzeme sertliğine (H_p/H_t) oranına karşı 60 m/s çarpma hızındaki erozyon oranı (Shipway ve Hutchings, 1996)

Parçacıklar hedeften daha sertse ($H_p/H_t > 1$) girintiden kaynaklanan bir kırılma mekanizması meydana gelirken parçacıklar hedef malzemedan daha yumuşaksa ($H_p/H_t < 1$) ufalanma mekanizmasının meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Sert aşındırıcılar hedef yüzeye her darbesinde malzeme çıkarırken, daha düşük sertlikteki

aşındırıcıların darbe sırasında hasara neden olmayıp hasarın birikmesiyle malzemeyi kaldıracığına ulaşmışlardır (Shipway ve Hutchings, 1996).

Ayrıca aşındırıcı parçacık sertliğinin hedef malzeme sertliğine oranını artırdığımızda erozyon oranı belirli bir seviyeye kadar artar ancak sonrasında sertlik oranındaki artışın önemli bir etkisi olmaz (Javaheri, 2019).

2.2.5. Parçacık Çarpma Hızı

Parçacık hızı çok düşük olduğunda gerilmeler plastik deformasyon için yeterli olmadığından aşınma yüzey yorulması şeklinde devam eder. Parçacık hızı artarsa çarpma sonucu yüzeyde plastik deformasyon oluşabilir, bu durumda aşınma tekrarlı plastik deformasyonla oluşmaktadır. Çok yüksek çarpma hızları söz konusuysa malzeme yüzeyinde lokal ergime meydana gelebilir (Avcu, 2011). Aşındırıcı parçacıklar küresel şekilde ise aşırı plastik deformasyon meydana geleceğinden malzeme yüzeyinde ince aşınmış malzeme plakaları oluşur, keskin köşeli şekilde ise kesme ve kırılma parçalanmanın meydana gelmesi daha muhtemeldir. Gevrek malzemelerde ise aşınma yüzey altı çatlaklar ile meydana gelir (Stachowiak, 2006).

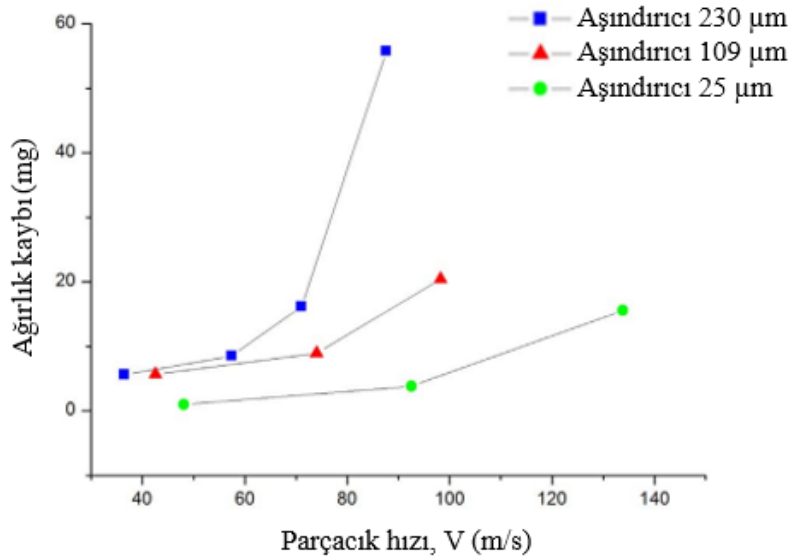
Orta ile yüksek hızlar için aşındırıcı parçacıkların çarpma hızıyla erozyon oranı arasındaki ilişki Denklem (2.2)'deki güç kanunu ile açıklanabilmektedir;

$$E = k \cdot V^n \quad (2.2)$$

Denklem (2.2)'de “E” kararlı durumdaki erozyon oranı, “k” deneysel sabit, “V” parçacık hızı [m/s] ve “n” aşındırıcının ve hedef malzemenin karakteristik özelliğini tanımlayan genellikle malzeme ve erozyon koşullarına bağlı olan hız üssü değeridir (Fidan ve Sınmazçelik; 2006; Sharma ve diğ., 2015). Örneğin n değeri gevrek polimerik kompozitlerde 3-5 değerleri arasındayken sünek polimerik malzemelerde 2-3 değerleri arasında değişmektedir (Fidan ve Sınmazçelik, 2006). Denklem (2.2)'deki k değeri ise partikül yoğunluğu ve şekli gibi parametreler tarafından kontrol edilir (Stachowiak, 2006). Buradan parçacık hızının erozyon oranı üzerinde büyük etkisi olduğu görülmektedir çünkü parçacık hızı 10 kat artarsa aşınma oranı 10^n kadar artacaktır (Stachowiak, 2006). Çarpma hızının artmasıyla parçacıkların çarpma enerjisi artar ve

hedef yüzey daha büyük deformasyon kuvvetine maruz kalacağı için yüzeyden daha fazla malzeme kaldırılır (Sharma ve diğ., 2015).

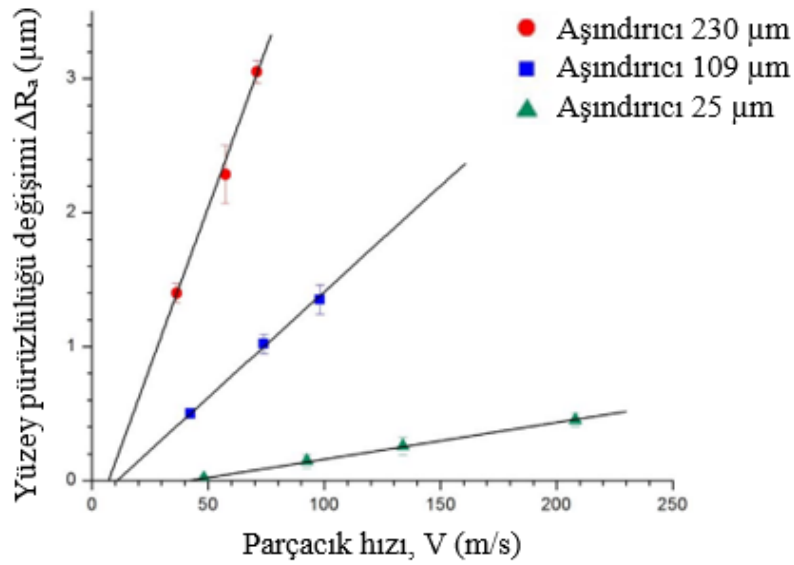
A. Evstifeev ve arkadaşları helikopter gaz türbinli motorundaki birinci kademe kompresörün kanatlarında kullanılan EI-961 krom çeliğinin erozyon direncini değerlendirmek için farklı boyutlardaki (ortalama çapları 25 μm , 109 μm ve 230 μm) ve akış hızlarındaki korindon partikülleri, 90° çarpma açısı ile 2 g/s parçacık debisinde 5 dakika süre ile küçük ölçekli bir rüzgar tüneline malzeme yüzeyine göndererek oda sıcaklığında katı partikül erozyonuna maruz bırakmışlardır. Erozyon direncini, numunenin ağırlık kaybına ve erozyon sonucundaki yüzey pürüzlülüğü değişimine göre değerlendirmişlerdir. Ağırlık kaybı (Δm), numunenin hassas elektronik terazi ile ölçülen ilk ağırlığıyla son ağırlığının farkının hesaplanmasıyla bulunduğu için ne kadar büyük bir değerse erozyon direnci o kadar zayıf demektir. Şekil 2.43'ten parçacık boyutunun artmasıyla ve aynı parçacık boyutunda parçacık hızının artmasıyla erozyon oranının arttığına ayrıca 25 μm gibi toz benzeri aşındırıcıların hız düşük olduğunda erozyon oranlarının çok düşük olmasına rağmen hız artışıyla erozyon oranının yüksek miktarda arttığına ulaşmışlardır (Evstifeev ve diğ., 2018).



Şekil 2.43. Üç farklı boyuttaki aşındırıcı parçacığın parçacık hızına göre ağırlık kaybı değişimi (Evstifeev ve diğ., 2018)

Malzemelerin yüzey pürüzlülüğü için Ra değerlerini kullanmışlar ve yüzeylerdeki pürüzlülük değişimini (ΔRa), erozyon sonrası pürüzlülük değerinden erozyon öncesi

pürüzlülük değerini çıkararak bulmuşlardır. Şekil 2.44'ten aşındırıcı parçacıkların boyutunun artmasının ve parçacık hızının artmasının yüksek yüzey pürüzlülüğü artışına (ΔR_a) neden olduğuna yani erozyon sonrası numunenin pürüzlülüğünün daha fazla olduğuna ulaşmışlardır. Ayrıca Şekil 2.44'teki çizgilerin x eksenine izdüşümü ($\Delta R_a = 0$) aşındırıcı parçacıkların malzeme yüzeyini pürüzlendirmek için eşik hızlarını temsil etmektedir. 230 μm , 109 μm ve 25 μm olan partiküllerin eşik hızlarını sırasıyla 8,4 m/s, 10 m/s ve 45 m/s bularak parçacık boyutunun azalmasıyla yüzeyi pürüzlendirmek için gerekli olan eşik hızı değerinin arttığına ulaşmışlardır (Evstifeev ve diğ., 2018).



Şekil 2.44. Yüzey pürüzlülüğünün parçacık hızına ve boyutuna bağlı değişimi (Evstifeev ve diğ., 2018)

2.2.5.1. Çift Disk Metoduyla Aşındırıcı Partiküllerin Çarpma Hızlarının Ölçülmesi

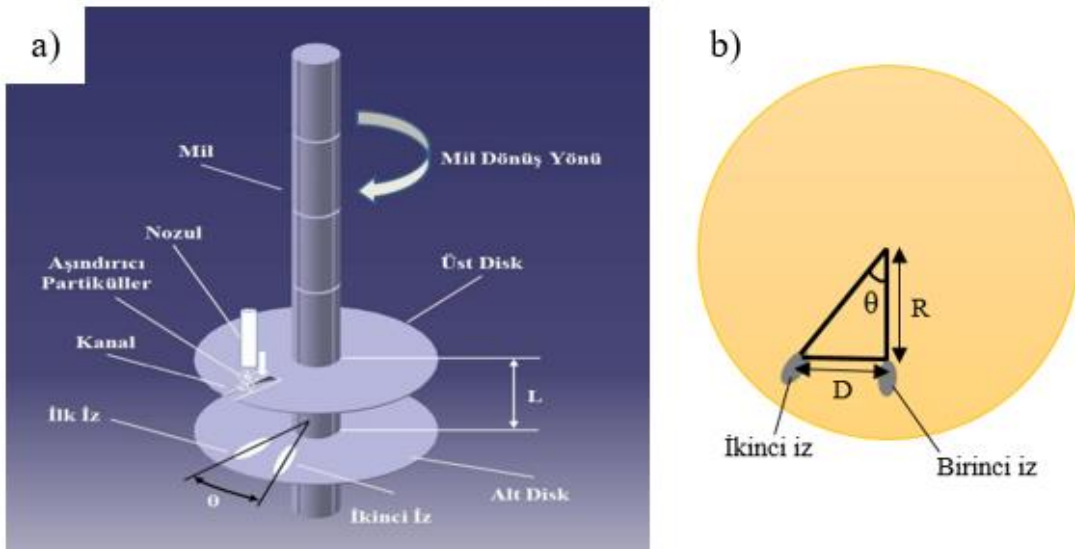
Çift disk metoduyla aşındırıcıların gönderilme hızları ölçülebilmektedir. Örneğin, farklı basınçlarda gönderilen ve dolayısıyla farklı çarpma hızlarına sahip aşındırıcıların çarpma hızlarının ölçümü bu yöntemle yapılabilir.

Şekil 2.45'te deney sisteminin görüntüsü, Şekil 2.46'da ise deneyde kullanılan parametrelerle birlikte deney sistemindeki elemanlar gösterilmiştir. Bu yöntemde belirli bir devir hızında (n) dönen iki diskin arasında belirli bir mesafe (L) bulunur ve üstteki diskten aşındırıcı püskürtülerek alttaki diske çarpar. Alttaki diskte oluşan iki partikül çarpma izinin arasındaki açı (θ) ölçülür. Alttaki diskte oluşan ilk iz diskler dönmeden

püskürtülen aşındırıcının izi, ikinci iz ise diskler dönerken püskürtülen ve diskler arasındaki mesafeden dolayı belirli bir süre sonra alttaki diske çarpan aşındırıcının izidir. Bu L ve θ değerleri Denklem (2.3)'te yerine konularak aşındırıcı parçacıkların üstteki diskten alttaki diske çarpması sırasında geçen süre (t) hesaplanır.



Şekil 2.45. Çift disk metodu deney sistemi (Avcu, 2013)



Şekil 2.46. a) Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler ve b) aşındırıcı çarpması sonrası alt diskin görünümü (Avcu, 2013)

$$t = \frac{60 \times \theta}{360 \times n} \quad (2.3)$$

t= Aşındırıcı parçacıkların üstteki diskten alttaki diske çarpması sırasında geçen süre (s)

θ = Aşındırıcı parçacıkların alttaki diske çarpmasıyla oluşan ilk ve ikinci iz arasındaki açı (°)

n= Disklerin dönüş hızı (d/dk)

Denklem (2.3)'ten elde edilen süre, Denklem (2.4)'te yerine konularak aşındırıcı partiküllerin çarpma hızı elde edilir.

$$V = \frac{L}{t} \quad (2.4)$$

V= Aşındırıcı parçacıkların çarpma hızı (m/s)

L= Üst ve alt disk arasındaki mesafe (m)

t= Aşındırıcı parçacıkların üstteki diskten alttaki diske çarpması sırasında geçen süre (s)

2.2.6. Parçacık Sertliği

Sertlikleri aynı olan iki malzemeden tokluğu fazla olan aynı koşullarda daha iyi erozyon direnci sergiler (Javaheri, 2019).

Aşındırıcı parçacıkların sertlik değerleri çeşitli testlerle elde edilmektedir. Metalik malzemeden olmayan parçacıkların sertliği çizme testi olan Mohs sertliği ile metalik malzeme olan parçacıkların sertliği ise girinti testleri olan Knoop, Vickers, Brinell sertlik testleriyle ölçülür (Momber, 2008).

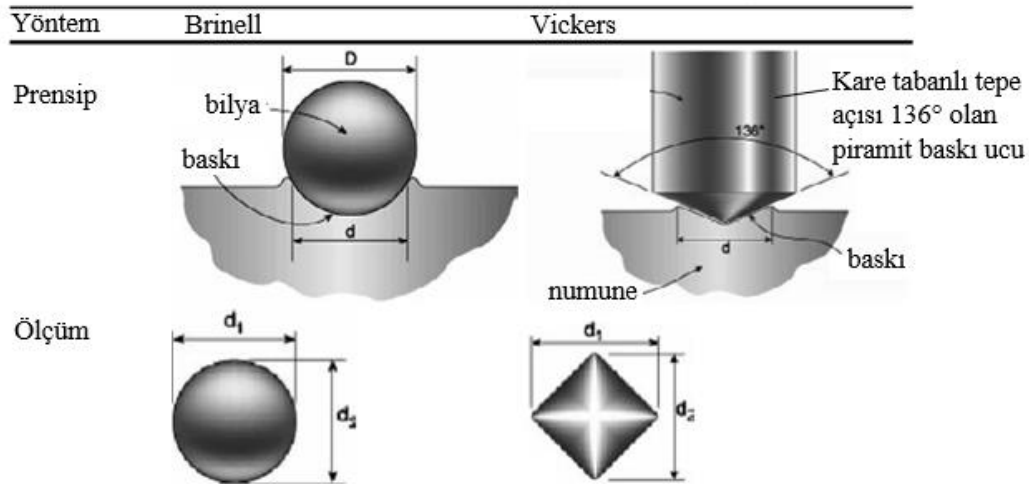
Mohs sertliğinde 1 ile 10 arasında bir skala vardır. Bir malzeme bu skalada yüksek sertlikteki malzeme tarafından çizilir ve daha düşük sertlikteki malzeme tarafından çizilmezse malzemenin Mohs sertlik değeri ikisi arasındadır. Örneğin sertliğini ölçeceğimiz malzeme, Tablo 2.5'ten sertlik değerlerini görebileceğimiz kuvars tarafından çizilir ama feldspar tarafından çizilmezse bu malzemenin Mohs sertlik değeri 6,5 olur. Aşındırıcı standardizasyonunda Mohs sertlik değerleri 7'den büyük veya 7'den küçük şeklinde listelenir. Çünkü aşındırıcı parçacıklar Mohs sertliği 7'ye karşılık gelen cam bir

plakaya sürülür ve plakayı çizerlerse Mohs sertlik değerleri 7'den büyük, çizemezlerse 7'den küçüktür (Momber, 2008).

Tablo 2.5. Mohs Ölçeği (Momber, 2008)

Malzeme	Mohs Sertliği
Talk	1
Alçı	2
Kalsit	3
Florit	4
Apatit	5
Ortoklaz (Feldspar)	6
Kuvars	7
Topaz	8
Korindon	9
Elmas	10

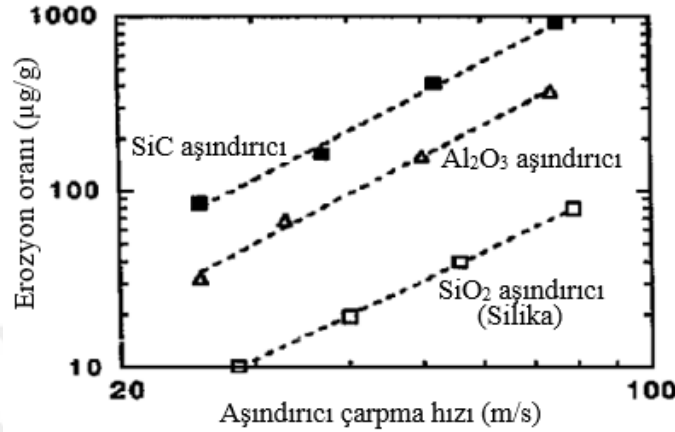
Şekil 2.47'de sıklıkla kullanılan Brinell ve Vickers girinti sertlik ölçme yöntemleri gösterilmektedir. Aşındırıcı parçacık özel bir reçine matrise gömülür ve girinti testinin gerçekleştirileceği yerde düzgün bir enine kesit elde etmek amacıyla cilalanır. Elde edilecek sertlik değerleri girinti yüküne bağlı olduğundan veri sayfalarında kullanılan girinti yük değerlerinin uygulanmasına özen gösterilmelidir (Momber, 2008).



Şekil 2.47 Girinti sertlik ölçüm yöntemleri (Momber, 2008)

P. H. Shipway ve I. M. Hutchings yaptıkları çalışmada alümina hedef malzemesinin yüzeyine üç farklı aşındırıcı göndermişlerdir. Şekil 2.48'de alümina hedef malzemesinin çeşitli sertliklerdeki aşındırıcılar tarafından hıza bağlı olarak aşındırılması sonucu erozyon oranları gösterilmiştir. Tablo 2.6'da gösterilen aşındırıcılardan, sertlik değeri en

yüksek olan silisyum karbürün (SiC) en yüksek erozyon oranına sebep olurken aralarında en düşük sertlik değerine sahip olan silikanın (SiO₂) en düşük erozyon oranına sebep olduğunu gözlemlemişlerdir. Dolayısıyla aşındırıcı sertliklerinin ve çarpma hızının artmasıyla erozyon oranının arttığına ulaşmışlardır (Shipway ve Hutchings, 1996).



Şekil 2.48. Silisyum karbür (SiC), alümina (Al₂O₃) ve silika (SiO₂) aşındırıcılarla çarpma hızına bağlı olarak alümina malzemesinin erozyon oranı (Shipway ve Hutchings, 1996)

Tablo 2.6. Aşındırıcı malzemelerin sertlik değerleri (1,97 N yükte Vickers mikro indentasyon testi) (Shipway ve Hutchings, 1996)

Partikül malzemesi	Bileşim (% ağırlıkça)	H (GPa)
Silisyum	100 Si	9,3
Silika	99 SiO ₂	13,1
Alümina	95 Al ₂ O ₃ , 3 TiO ₂	26,5
Silisyum karbür	99 SiC	33,4

Ayrıca hedef malzemeleri daha yumuşak aşındırıcılara maruz bıraktıklarında yüzeyde derin girintilere neden olmadıklarını ve daha az pürüzlü morfolojiler oluşturduklarını gözlemlemişlerdir (Shipway ve Hutchings, 1996).

2.2.7. Parçacıkların Kütlesel Debisi

Aşındırıcı parçacıkların birim zamanda birim alana çarpan kütlesi, parçacıkların akış debisidir ve birimi [kg/s]'dir. Bu parametre birincil etken olmamakla birlikte parçacıkların boyutunun büyümesi, parçacıkların hızının artması, nozul çapının artması gibi durumlar partikül akış debisinin değişmesine neden olur ve bu değişim erozyon oranını önemli ölçüde etkilemektedir. Aynı koşullar altında hedef malzeme yüzeyine temas eden aynı fiziksel özelliklerdeki aşındırıcı parçacıkların aynı etkiye neden olacağı

düşünülse de erozif aşınma esnasında birbirleriyle etkileşimde oldukları için aynı etkiye neden olamayabilirler (Arslan, 2017).

Parçacıkların akış debisinin bir eşik değere kadar artmasıyla doğru orantılı olarak erozyon oranı da artmaktadır. Bu eşik akış debisi değeri, malzemeye gelen ve geri seken parçacıklar arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır (Avcu, 2011). Bu etkileşim, parçacıklar hedef malzemeye ulaşmadan önce ve ulaştıktan sonra gerçekleşebilir. Hedef malzemeye yaklaşan iki parçacıktan arkadaki, öndekine çarparak kinetik enerjisinin bir miktarını ona aktarabilir ve kendisi yavaşlarken onun hızlanmasına neden olabilir. Ayrıca hedef malzemeye çarpıp geri seken aşındırıcı parçacıklar yeni gelen parçacıklara çarparak hızlarının yavaşlamasına, yönlerinin değişmesine hatta yüzeye ulaşamamalarına bile sebep olabilir (Arslan, 2017). Bu etkileşimlerin dışında farklı mekanizmalar oluşabilir ve erozif aşınmayı etkileyebilir.

Eşik parçacık akış debisi aşıldığında erozyon oranı az miktarda düşer. Bunun nedeni akış debisinin artmasıyla hedef malzeme yüzeyine çarpan parçacıklar arasındaki sürenin kısılmasıdır. Sürenin kısılmasıyla çarpan parçacıklar erozyona neden olabilmek için yeterli zamana sahip değildir dolayısıyla erozyon oranı azalır. Bu nedenle hedef malzemenin erozif aşınma davranışını etkilememek, partiküllerin etkileşimini ortadan kaldırmak amacıyla aşındırıcı akış debisi uygun seçilmelidir (Avcu, 2011).

M. Liebhard ve A. Levy yaptıkları çalışmada 1018 çeliğini oda sıcaklığında çeşitli parametrelerde (parçacık şekli, kütlesi, boyutu, hızı, besleme hızı) küresel cam boncuk ve açısız SiC aşındırıcılarını kullanarak katı partikül erozyonuna maruz bırakmışlar ve parametrelerin erozyona etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, küresel cam boncuk ve açısız SiC aşındırıcılarının farklı boyutlarda; 20 m/s ve 60 m/s olmak üzere basınç değişiminin neden olduğu iki farklı parçacık hızında; 0,6 g/dk, 2,5 g/dk ve 6 g/dk olmak üzere üç farklı besleme hızında ve 30° çarpma açısında ağırlık kaybını gözlemlemişlerdir. Erozyonun kararlı duruma ulaşması amacıyla aşındırıcılardan SiC için toplam 100 g, cam boncuklar için yüksek parçacık hızı testlerinde toplam 200 g ve düşük parçacık hızı testlerinde toplam 400 g aşındırıcı kullanmışlardır. Tablo 2.7'den 250-355 µm parçacık boyutu ile 20 m/s çarpma hızında debi değişimiyle ağırlık kaybında büyük bir fark olmamakla birlikte tüm çarpma hızlarında parçacık akış debisinin azalmasıyla erozyon oranının arttığına ve açısız parçacıkların küresel parçacıklara kıyasla daha fazla erozyona

neden olduğuna ulaşmışlardır. Parçacık hızının artmasıyla (60 m/s) erozyon oranında debinin etkisinin arttığını ve debi miktarının artmasıyla parçacıklar arası etkileşimin fazla olacağını dolayısıyla partiküllerin yüzeyi aşındırma etkinliğinin azalacağını gözlemlemişlerdir (Liebhard ve Levy, 1991).

Tablo 2.7. Parçacık şeklinin ağırlık kaybına etkisi (Liebhard ve Levy, 1991)

Partikül boyutu (μm)	Besleme hızı (g/dk)	Ağırlık kaybı (mg)			
		20 m/s		60 m/s	
		Küresel	Açısal	Küresel	Açısal
250-355	6.0	0.2	1.6	3.0	28.0
250-355	0.6	0.2	2.0	4.5	32.7
495-600	6.0	0.1	–	1.2	–
495-600	2.5	–	2.0	–	42.4

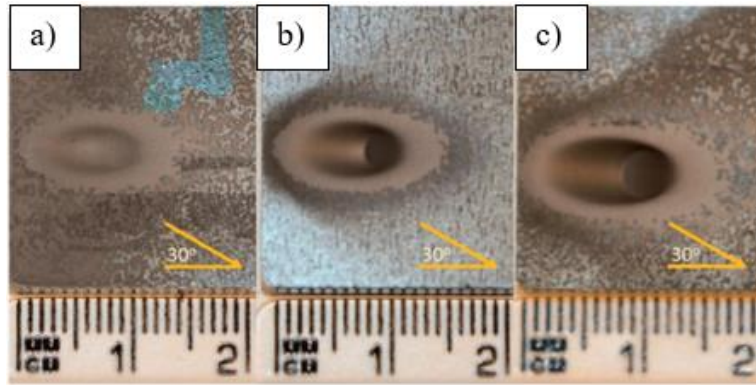
Parçacık akış debisinin azalmasıyla ağırlık kaybının artmasını Tablo 2.8’de listelenen iki parçacık arasındaki ortalama mesafeye bağlamışlar ve Tablo 2.8’den aynı parçacık boyutu ile aynı hız değeri için parçacık akış debisinin azalmasıyla parçacıklar arasındaki mesafenin arttığını gözlemlemişlerdir. Bu durumu parçacıklar arasındaki mesafe azaldıkça geri seken parçacıkların gelen parçacıklara çarparak onları yavaşlatabileceğine, açısını değiştirebileceğine dolayısıyla çarpma kuvvetini azaltabileceğine veya yüzeye çarpmasını engelleyebileceğine bağlamışlardır. Parçacıklar arasındaki mesafenin artmasının, geri seken parçacıkla yeni gelen parçacık arasındaki etkileşimi azaltacağından ve bir parçacığın yüzeye çarptıktan sonra arkasındaki parçacık aynı alana çarpmadan önce alanı terk edebileceğinden bahsetmişlerdir (Liebhard ve Levy, 1991).

Tablo 2.8. Parçacıklar arasındaki ortalama mesafe (Liebhard ve Levy, 1991)

Partikül boyutu (μm)	Besleme hızı (g/dk)	Hız (m/s)	Mesafe (mm)
Cam boncuklar			
212-250	6	20	3
212-250	0.6	20	29
250-355	6	60	20
250-355	0.6	60	196
SiC			
250-300	6	20	7
250-300	2.5	20	17
250-300	0.6	20	70
250-300	6	60	21
250-300	2.5	60	50
250-300	0.6	60	210

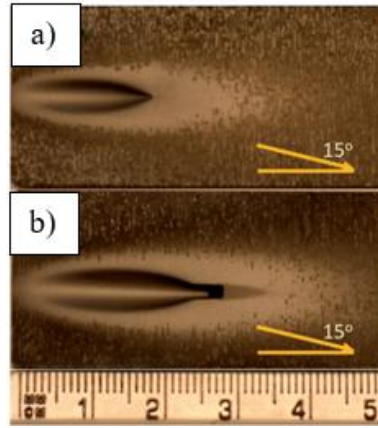
2.2.8. Maruz Kalma Süresi

M. Ediriweera ve arkadaşları; parçacık boyutunun, maruz kalma süresinin, çarpma açısının eroziv aşınmadaki etkilerini anlamak amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde DOMEX S355MC yumuşak çelik malzemelere ($25 \times 25 \text{ mm}^2$ ve $70 \times 25 \text{ mm}^2$ boyutlarında 5 mm kalınlığında) çeşitli çarpma açılarında (7° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90°) dökme dolomit aşındırıcıları (Mohs ölçeği sertliği 3,5 ve malzeme yoğunluğu $2,85 \text{ g/cm}^3$) oda sıcaklığında belirli bir hızda (70 m/s) göndermişlerdir. Maruz kalma süresinin etkisini gözlemlemek için parçacıkların besleme hızını sabit tutmuşlar ve ortalama çapı $168 \mu\text{m}$ olan aşındırıcı parçacıkları 7° ile 90° arasında değişen 7 farklı açıda göndererek test etmişlerdir. Şekil 2.49'daki 30° 'de 10 dk, 30 dk ve 100 dk aşınmaya uğramış malzeme yüzeylerini gözlemleyerek maruz kalma süresi arttıkça nozuldan uzak tarafı dairesel tabanlı olan kraterlerin belirginleştiğini gözlemlemiştir. Maruz kalma süresinin artmasıyla kraterin gelişmesi sonucu, ilk çarpma açısına göre kraterin silindirik yan duvarlarında çarpma açısının azaldığına ve kraterdeki dik yan duvarda ise çarpma açısının arttığına ulaşmışlardır. Dolayısıyla etkin çarpma açısının değişmesiyle aşınma mekanizması değişeceğinden 30° 'de kesme mekanizmasıyla erozyon gerçekleşirken krater içerisinde dik yüzeylerin gelişmesiyle partikül çarpması sonucu deformasyonun daha baskın olduğuna ulaşmışlardır (Ediriweera ve diğ., 2019).



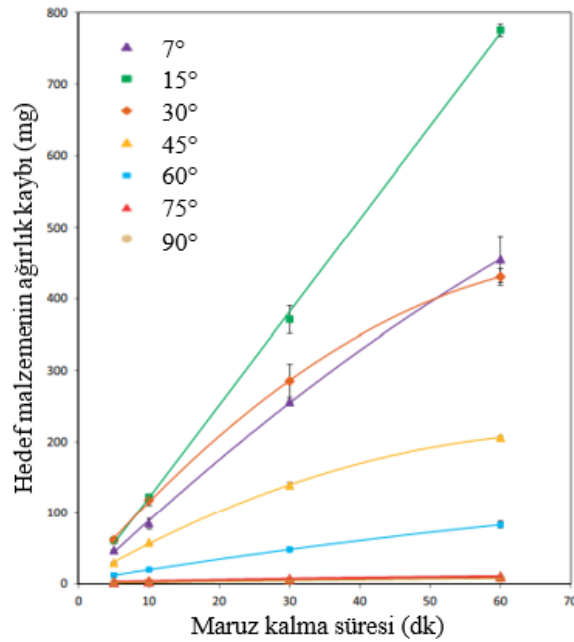
Şekil 2.49. 30° çarpma açısında farklı maruz kalma süresi ile kraterlerin gelişimi: a) 10 dakika, b) 30 dakika ve c) 100 dakika (Ediriweera ve diğ., 2019)

Şekil 2.50'deki 15° çarpma açısında 30 dk ve 90 dk süreyle aşınmış yüzeylerin Şekil 2.49'dakilerden farklı şekle sahip olduğunu gözlemlemişler ve 15° çarpma açısında uzun süre maruz kalma sonucunda dik yan duvarın geliştiğini böylece etkin çarpma açısının ilk durumdaki 15° 'ye göre değiştiğini gözlemlemiştir (Ediriweera ve diğ., 2019).



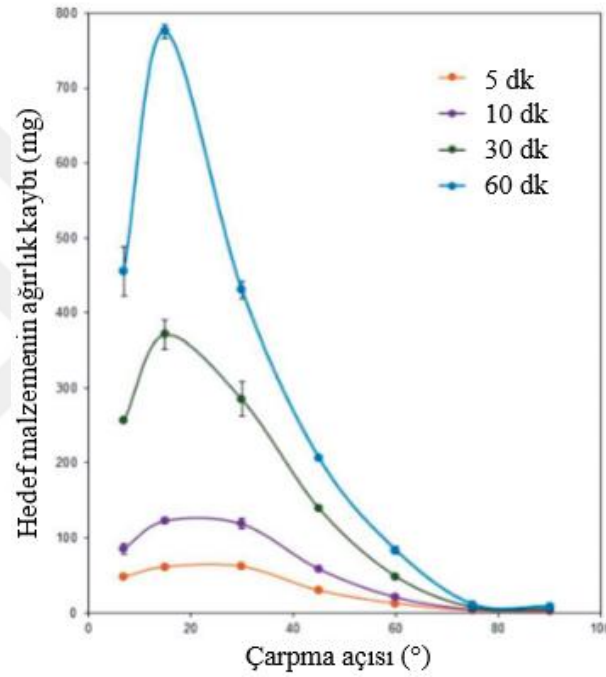
Şekil 2.50. 15° çarpma açısında farklı maruz kalma süresi ile kraterlerin gelişimi: a) 30 dakika, b) 90 dakika (Ediriweera ve diğ., 2019)

Şekil 2.51'deki maruz kalma süresine bağlı olarak farklı çarpma açılarındaki ağırlık kaybı değerlerine göre maruz kalma süresi arttıkça ağırlık kaybının arttığını gözlemlemiştir. 15° hariç diğer açılarda zamanla ağırlık kaybı hızının azalmasını, etkili çarpma açısının değişmesiyle ve dolayısıyla aşınma mekanizmasının değişmesiyle veya deformasyon sertleşmesiyle (pekleşme) ilişkilendirmişlerdir. Ayrıca ağırlık kaybı hızının düşük çarpma açılarındaki azalmasını, zamanla nozul ile hedef malzeme arasındaki mesafenin artmasından ve dolayısıyla parçacık hızının azalmasından kaynaklanabileceğinden bahsetmişlerdir (Ediriweera ve diğ., 2019).



Şekil 2.51. Farklı çarpma açıları için maruz kalma süresinin bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybı (Ediriweera ve diğ., 2019)

Şekil 2.52'deki maruz kalma sürelerine ve çeşitli çarpma açılarına bağlı olarak maruz kalma süresinin artmasıyla ağırlık kaybının arttığına ulaşılmıştır. Buradan 5 dk ve 10 dk gibi kısa maruz kalma sürelerinde sünek malzemelerin en fazla erozyona uğradığı 15°-30° açılarda yaklaşık olarak aynı miktarda ağırlık kaybının meydana geldiğini, 30 dk ve 60 dk gibi uzun maruz kalma sürelerinde 15°'deki ağırlık kaybının 30°'dekinden daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunu etkin darbe açısının, kısa maruz kalma sürelerinde ilk darbe açısına yakinken daha uzun maruz kalma sürelerinde ilk darbe açısına göre değişmesiyle açıklamışlardır (Ediriweera ve diğ., 2019).



Şekil 2.52. Çarpma açısının bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybı (Ediriweera ve diğ., 2019)

2.2.9. Hedef Malzeme Özellikleri

Hedef malzemenin özellikleri katı partikül erozyonunda aşınma mekanizmasını etkilediğinden aşınmayı önemli derecede etkiler. Ayrıca hedef malzemenin kırılma davranışı da aşınma esnasında aşınma mekanizmasını belirlemektedir. Aşınma karmaşık bir süreç olduğundan hedef malzemenin aşınma karakteristiğinin belirlenebilmesi için çeşitli parametreler altında (aşındırıcının hızı, kütleli debisi, çarpma açısı, karışım oranı) aşınma durumu incelenmelidir (Avcu, 2011).

Deneylerde sonuçların yorumlanması için aşınan hedef malzemenin sertliğinin, dayanıklılığının, kırılma davranışının bilinmesi ve yüzey pürüzlülüğünün tespit edilmesi

önemlidir. Hedef malzemenin sünek veya gevrek olması katı partikül erozyonunu etkilediğinden tüm parametreler aynı tutulsa bile farklı erozyon karakteristikleri sergilerler (Arslan, 2017).

Gevrek malzemelerde hedef malzeme sertliğinin artmasıyla erozyon oranı azaldığından aralarında ters ilişki vardır. Bu durum, sertlik artışıyla plastik deformasyona karşı direnme yeteneğinin artmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü katı partikül erozyonuyla oluşacak deformasyon miktarı, sertliğin yüksek olmasıyla azalır dolayısıyla yanal çatlak oluşumunu tetiklemek zorlaşır. Ayrıca çarpan parçacıkların keskin kenarlarının körleşmesi daha kolay meydana gelir. Aşınma sırasında ısınmadan kaynaklı darbe bölgeleri yumuşayabilir ve daha sert malzemelerde ısınma miktarı daha fazladır (Vaughan, 1991).

Hedef malzemenin termal özellikleri, erozyon esnasında darbe bölgelerinde meydana gelen bölgesel ısınmadan dolayı önemlidir. Çarpma bölgesindeki sıcaklık artışı, malzemenin özgül ısı kapasitesi belirler ve ısının bu bölgeden yayılma hızı malzemenin ısı iletkenliğine göre değişmektedir (Vaughan, 1991).

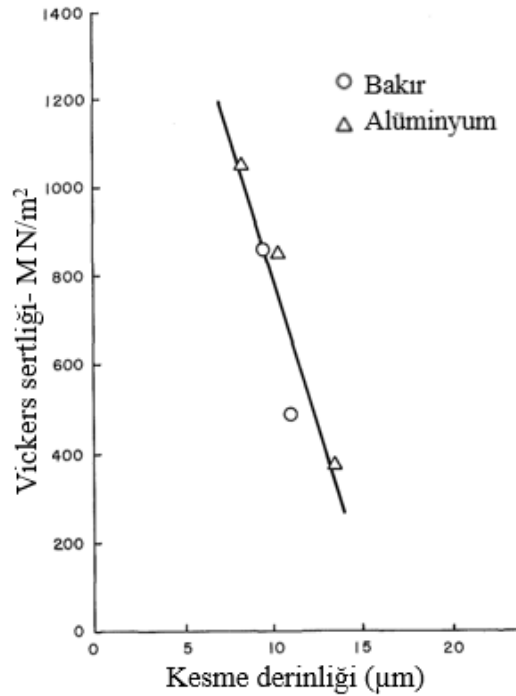
Gevrek malzemelerin erozyonunda çatlak başlangıcı neredeyse kaçınılmazdır. Malzemenin mikroyapısında kusurların bulunması ve bu kusurların boyutu, yoğunluğu, dağılımı çatlak başlama kolaylığını etkiler. Malzemenin tokluğu, makroskobik çatlak ilerlemesine karşı direncini gösterir. Çatlak oluşumu ve yayılmasıyla malzeme kaldırılmasının söz konusu olduğu gevrek malzemelerde, çatlak oluşumuna karşı direnç yani tokluk önemlidir (Vaughan, 1991).

Erozyon sürecinde hedef malzemenin tane boyutu da önemlidir. Taneler arası kırılma ile aşınmaya uğrayan gevrek malzemelerin küçük tane boyutuna sahip olması, kırılma için daha fazla yüzey enerjisi gerektirdiğinden daha düşük erozyon oranı sergilerler (Vaughan, 1991).

G. L. Sheldon yaptığı çalışmada, hedef malzemenin yüzey sertliğinin metal erozyonu üzerinde etkisini inceleyen Dilip Patel'in bazı araştırma sonuçlarına yer vermiştir. Çalışmada 0, T4 ve T6 koşullarındaki kimyasal olarak saf kurşun, kalay, kadmiyum, bakır, nikel ile birlikte 6061 alüminyum alaşımı malzemelerin 75 m/s çarpma hızındaki

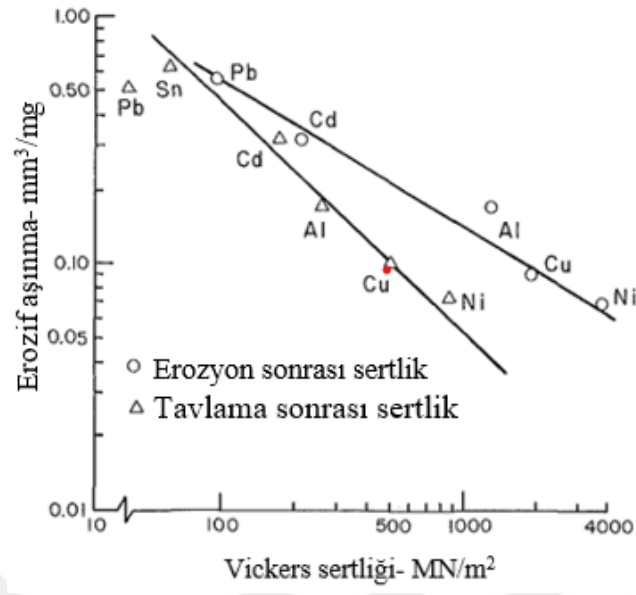
ve 20° çarpma açısındaki açısal 60 mesh silisyum karbür aşındırıcılarıyla erozyon testi gerçekleştirmiştir. Hedef malzemenin başlangıçtaki yüzey sertliğinin, aşındırıcıların erozyon sırasında kesme derinliğine etkisini incelemiştir (Sheldon, 1977).

Şekil 2.53'te 0, T4 ve T6 koşullarındaki alüminyum alaşımı ile pekleşme etkisiyle çeşitli başlangıç sertliklerine pekleştirilmiş saf bakır malzemeler incelendiğinde hedef malzeme yüzeyinin sertliğinin azalmasıyla aşındırıcıların kesme derinliğinin arttığını gözlemlemiştir. Dolayısıyla hedef malzemenin yüzey sertliğinin, parçacıkların ne kadar derine nüfuz edebileceğini etkileyeceğine ulaşmıştır (Sheldon, 1977).



Şekil 2.53. 75 m/s hızda ve 20° çarpma açısında 60 mesh SiC partikülü tarafından aşındığında bakır ve alüminyum için başlangıç sertliğinin bir fonksiyonu olarak kesme derinliği (Sheldon, 1977)

Şekil 2.54'te yüzey sertliğine bağlı olarak aşındırıcının birim ağırlığı başına hacim kaybı incelenmiştir. Buradaki malzemenin başlangıçtaki tavlanmış yüzey sertliği ve 20° çarpma açısında 75 m/s hızla çarpan 60 mesh SiC aşındırıcıları ile erozyonu sonrası yüzey sertliği incelendiğinde erozyon işlemiyle malzemenin pekleşme ile sertleştiği gözlemlenmiştir. Malzeme yüzeyinde, parçacıkların etkisiyle yüksek derecede pekleşme meydana gelirse erozyonun ilerlemesiyle kesme derinliğinde azalma meydana gelebileceğinden söz edilmiştir (Sheldon, 1977).



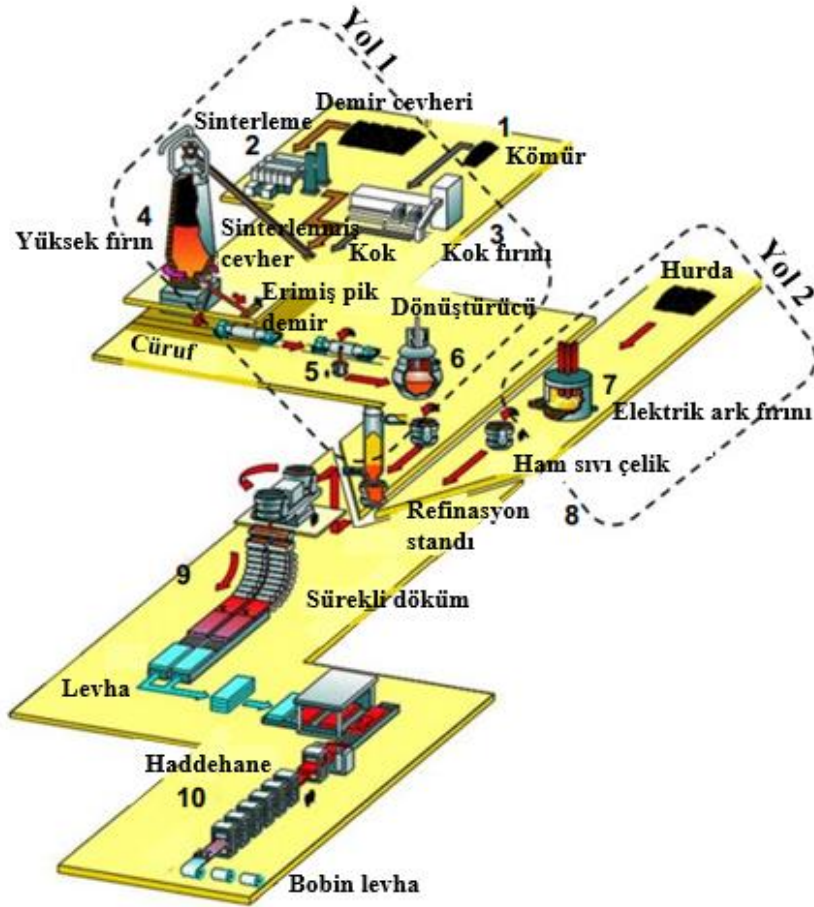
Şekil 2.54. Tavllanmış yüzeyin ve erozyon sonrası tamamen aşınmış yüzeyin Vickers sertliğinin bir fonksiyonu olarak bir dizi metal için hacim erozyonu (Sheldon, 1977)

3. BİRİNCİ NESİL ULTRA YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER (UHSS/AHSS)

Çelik, demir karbon alaşımından meydana gelmektedir. Demir karbon (Fe- C) denge diyagramında en fazla %2,06 C içeriğine sahip olan demir esaslı alaşımlara çelik denilmektedir. %2,06'dan daha fazla C içeren demir esaslı alaşımlar ise gevrek davranış gösterdiklerinden şekillendirilemezler ve döküm şeklinde kullanılarak dökme demir olarak adlandırılırlar. Ayrıca çeliğin içerisinde karbon elementinden farklı olarak çeşitli alaşım elementleri bulunabilir ve bunlar çeliğin özelliklerini etkiler. Çeliğe farklı özelliklerin kazandırılmasında alaşım elementlerinin dışında tavlama, sertleştirme gibi işlemler de uygulanabilmektedir (Biçen, 2019).

Şekil 3.1'de çelik üretim aşamaları gösterilmektedir. Bu yöntemlerden biri demirin hammaddesi olan demir cevheri ve kok kömürüyle diğeri ise hurda ile çelik eldesidir. Birinci yöntemle çelik üretiminde demir cevheri ve kireç taşı öncelikle sinterlenir ve pelet haline getirilir. Sinterlemedeki amaç; demir cevherinin, kireç taşı tozu ve ek malzemelerle belirli sıcaklıklara ısıtılıp ergitilmesiyle toz haldeki malzemelerin belirli bir tane büyüklüğüne getirilmesidir. Yüksek fırında sinterlenmiş cevher ve kok ısıtılır, içerisindeki istenmeyen maddeler uzaklaştırılarak pik demir (ham demir) elde edilir. Yüksek fırından çıkan malzemenin karbon içeriği %2,06'dan fazla olduğu için yüksek fırından sonra çelikhanelere iletilen eriyik sıvı ham demir içerisine oksijen üflenerek fazla karbonun oksijenle birleştirilip karbonmonoksit (CO) olarak sistemden uzaklaştırılması sağlanmaktadır. Bununla birlikte çelikhanelerde sıvı ham demire hurda ve çeşitli alaşım elementleri de eklenerek sıvı çeliğe dönüştürülmektedir (<https://www.erdemir.com.tr/kurumsal/celigin-hikayesi/>; <https://karboncelik.com/celik-uretimi-nasil-yapilir/>).

İkinci yöntemde ise elektrik ark fırınına hurda ilavesi yapılarak hurda eritilir ve gerekli alaşım elementlerinin ilave edilerek dinlendirilmesiyle sıvı çelik elde edilir. Sonrasında her iki yöntemle de elde edilen sıvı çelik, dökme demir kokillere doldurulup katılaşmaya bırakılan ingot döküm yöntemiyle veya suyla soğutulan bakır kokillere doldurularak kalıbın diğer ucundan katılaşmış olarak elde edilmesini sağlayan sürekli döküm yöntemiyle slab veya kütük olarak şekillendirilmektedirler (Biçen, 2019).

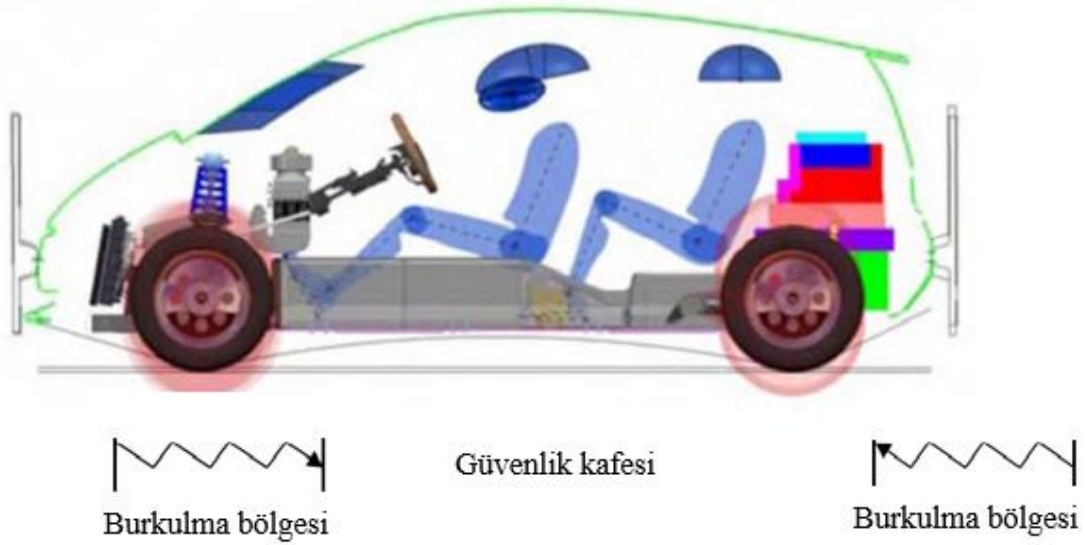


Şekil 3.1. Entegre bir çelik fabrikasının akış şeması: 1) hammadde teslimatı, 2) sinter tesisi, 3) kok fabrikası (kömürden kok yapımı), 4) yüksek fırın (cevhre indirgeme ile sıcak metal üretimi), 5) sıcak metal kükürt giderme, 6) dönüştürücü (sıcak metalin çeliğe dönüşümü), 7) elektrik ark ocağı (hurda çeliğin eritilmesi), 8) ikincil veya pota metalürjisi, 9) sürekli döküm (sıvının katı çeliğe dönüşümü), 10) sıcak haddeleme (Babich ve Senk, 2019)

Günümüze gelene kadar üretilmiş araçların ağırlıklarının ortalama olarak %63'ünü çelikler oluşturmaktadır (Bilir, 2014). Mühendislik uygulamalarında malzeme seçimini; dayanıklılık, güvenlik, üretilebilirlik, kalite, performans gibi birçok parametre etkiler. Otomotiv uygulamalarında bunlara ek olarak yakıt verimliliğinin sağlanması ve araçtaki parçaların göçük oluşumuna direnç göstermesi gibi estetik kaygılar bulunmaktadır. Dolayısıyla malzemeler, performans gereksinimlerini karşılayacak şekilde seçilmektedir (Keeler ve diğ., 2017).

Araçların tasarımları, çarpışma durumunda gelen yükleri karşılayabilmesi için önemlidir ve bu yapıların farklı güvenlik gereksinimlerini sağlamaları gerekmektedir. Şekil 3.2'de gösterilen sert güvenlik kafesiyle çevrelenen yolcu bölmesi, düşük veya yüksek hızlı

Çarpışma esnasında yolcu güvenliğinin sağlanması amacıyla tasarlanarak yolcuların etrafındaki alanı etkileyebilecek ve kafes yapısının bütünlüğünü bozabilecek herhangi bir deformasyonu önlemelidir. Aracın önünde ve arkasında yer alan burkulma bölgeleri, çarpışma esnasında mümkün olduğu kadar fazla enerji absorbe edebilecek şekilde tasarlanarak gelen darbeyi hafifletmeli ve yolcu bölgesinin yapısının korunmasına yardımcı olmalıdır. Bu nedenle bu bölgeler için malzeme seçiminde Tablo 3.1’de gösterilen genel kurallar uygulanmaktadır (Keeler ve diğ., 2017).

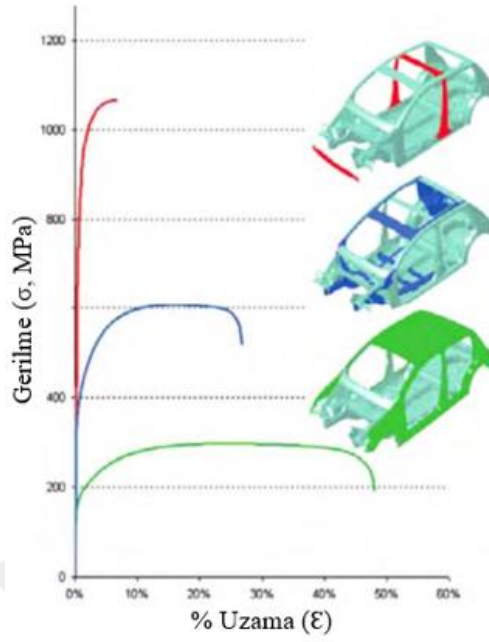


şekil 3.2. Bir aracın başlıca çarpışma yönetimi bölgeleri (Keeler ve diğ., 2017)

Tablo 3.1. Araç yapılarının farklı güvenlik gereksinimleri (Keeler ve diğ., 2017)

Çarpışma Bölgesi	Performans Gereklilikleri	İhtiyacı Karşılayacak Malzeme �zellikleri	Performans Kanıtı	Potansiyel �elik Seçimi
Burkulma Bölgesi	�arpışma durumunda bir mesafe boyunca yüksek enerji emilimi	Yüksek pekleşme, mukavemet ve süneklik	Gerilme-gerinim grafiğinde eğri altında geniş alan	Dual Fazlı (DP), Kompleks Fazlı (CP), TRIP
Yolcu Bölmesi	�arpışma olayı sırasında deformasyonun olmaması	Yüksek akma mukavemeti	σ - ϵ eğrilerinde maksimum çekme mukavemeti	Martenzitik, Dual Fazlı (>980 MPa)

şekil 3.3’te, farklı gerilme-birim şekil değişimi eğrilerine sahip malzemelerin araç yapısında nerelerde tercih edildiği gösterilmektedir.



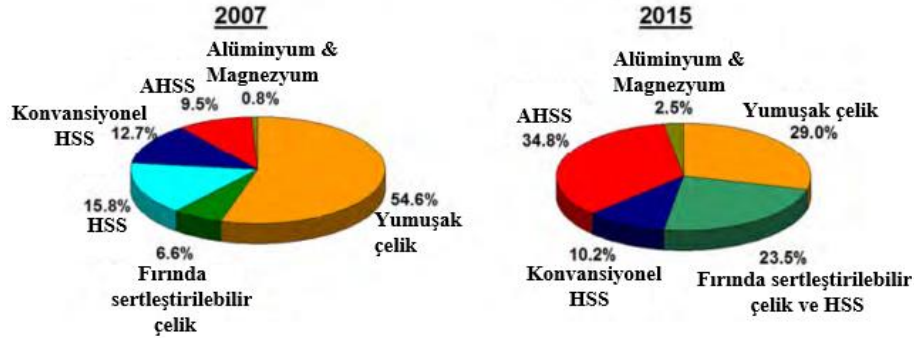
>Burada kullanılan çelikler özellikle çarpışma olaylarında yolcuların hayatta kalma alanını korumak için güvenlik açısından kritik parçalardır.

>Burada kullanılan malzemeler iyi bir mukavemet, şekillendirilebilirlik, enerji emilimi dengesine sahip yüksek mukavemetli çeliklerdir.

>Burada kullanılan malzemeler mükemmel şekillendirilebilirliğe sahip çeliklerdir (örn: derin çekme için)

Şekil 3.3. Farklı çelik türleri için gerilme- % uzama eğrileri ve gövde yapısındaki uygulamaları (Keeler ve diğ., 2017)

Şekil 3.4'te 2007 ve 2015 yılında üretilen araç gövdelerinde kullanılan malzemelerin ağırlık olarak ortalama yüzdeleri verilmiştir. 2007 model araç gövdelerinin ağırlık olarak ortalama %9,5'ini AHSS çelikleri (Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelik) oluştururken bu oran 2015 model araçlarda %34,8'e yükselmiştir.

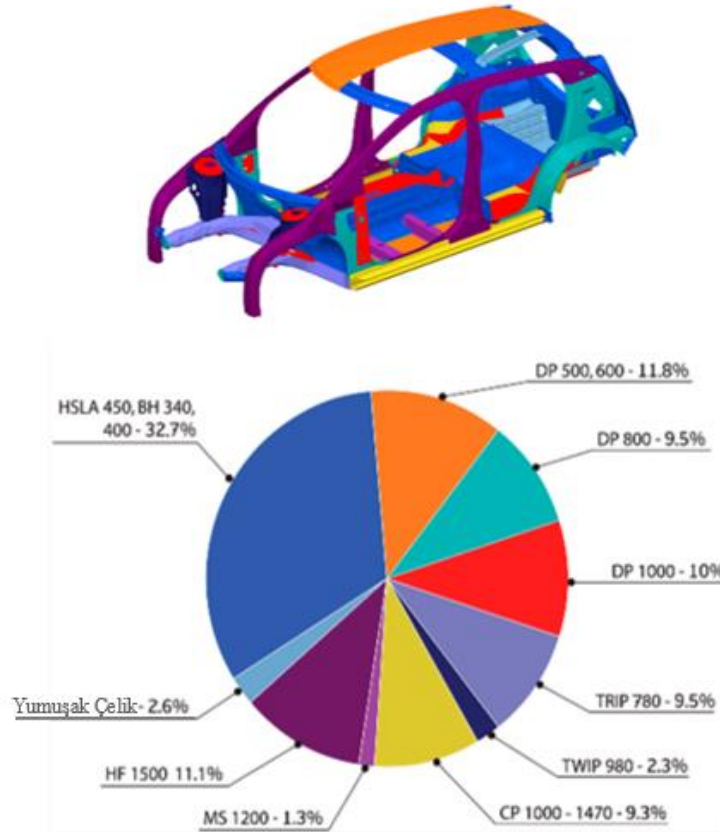


Şekil 3.4. Ducker Worldwide verilerine göre 2007 ve 2015 model ortalama araç gövdesi bileşenleri (Efe diğ., 2019)

2008 yılında başlatılan FSV (Geleceğin Çelik Aracı) programı, aracın ağırlığını azaltmaya çalışan, maliyeti düşürmeyi amaçlayan ve çarpışma güvenliği standartlarını karşılamaya yönelik 13 yıllık öncü çalışmalara dayanan üç yıllık bir programdır. Son teknoloji otomobil gövdelerini geliştirmeyi amaçlayan çelik endüstrisi yatırımdır, AHSS

çeliklerindeki daha güçlü ve daha şekillendirilebilir yeni gelişmelere inanmaktadır (Keeler ve diğ., 2017).

Şekil 3.5'ten FSV konsept aracının gövdesinin, kullanılan ortalama %64,7 ağırlık oranındaki AHSS çeliklerinden ve % 31,3 DP çeliklerinden oluştuğu görülmektedir (Efe diğ., 2019).



Şekil 3.5. FSV (Geleceğin Çelik Aracı) BEV (Akülü Elektrikli Araç) aracının gövde yapısındaki malzeme kullanım oranları (Bastidas ve diğ., 2021)

Tablo 3.2'den FSV-BEV aracın, 2010 model VW Polo araç ile karşılaştırıldığında gövde ağırlığının %23 daha az olduğu ve yakıt tüketiminin azaltıldığı görülmektedir. Bu nedenle AHSS çeliklerinin önemi dikkat çekmiş ve hem dünyada hem de ülkemizde öncelikli Ar-Ge (Araştırma ve Geliştirme) konuları arasında yerini almıştır (Efe diğ., 2019).

Tablo 3.2. FSV- BEV ve 2010 VW Polo araçların karşılaştırması (Efe diğ., 2019)

Araç	Sınıfı	Güç Aktarma Sistemi	Toplam Ağırlık	Gövde Ağırlığı	Ortalama Yakıt Tüketimi
FSV-BEV	B+	BEV*	958 kg	177 kg	2.42 l/100 km
2010 VW Polo	B	ICE-G**	1067 kg	231 kg	5.70 l/100 km

*BEV : Elektrikli Araç (Battery Electric Vehicle), **ICE-G: İçten Yanmalı Motor-Benzinli (Internal Combustion Engine-Gasoline)

Şekil 3.6’da farklı çeliklerin çekme mukavemeti değerleriyle uzama değerleri verilmiştir. Bu çelikleri mukavemet değerlerine yani mekanik özelliklerine göre sınıflandırdığımızda:

1- Düşük Mukavemetli Çeliklerin (LSS) çekme mukavemeti 270 MPa’dan daha düşüktür, orta karbonlu ve genellikle alaşımsız çeliklerdir (Biçen, 2019).

Bu çelik grubunda;

- Arayer atomsuz çelik (IF)
- Düşük karbonlu yumuşak çelik (Mild) bulunmaktadır (Hilditch ve diğ., 2015)

2- Yüksek Mukavemetli Çeliklerin (HSS) çekme mukavemeti 270-700 MPa değerleri arasındadır, düşük alaşımlılardır (Biçen, 2019).

Bu çelik grubunda;

- Yüksek mukavemetli arayer atomsuz çelik (IF- HS),
- Fırında sertleştirilebilir çelik (BH),
- Karbon mangan çeliği (CMn),
- Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik (HSLA) bulunmaktadır (Hilditch ve diğ., 2015).

3- I. Nesil ultra yüksek mukavemetli çeliklerin (UHSS/AHSS) çekme mukavemeti 700 MPa’dan daha yüksektir (Biçen, 2019).

Bu çelik grubunda;

- Dönüşüm kaynaklı plastisite çelik (TRIP),
- Dual fazlı çelik (DP),
- Kompleks fazlı çelik (CP),
- Martenzitik çelik (MART) bulunmaktadır (Hilditch ve diğ., 2015).

Aşırı mukavim veya aşırı sünek olan malzemeler, üretim esnasında sorunlara sebep olur. Bu nedenle geliştirilen AHSS çelikleri, daha ince kesitli malzemelerin kullanılmasıyla ağırlığın azaltılmasını sağlarken mekanik özelliklerde artış meydana geldiği için adından söz ettiren önemli bir malzeme konumundadır (Zeytin ve diğ., 2008). Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS) diğer sıradan çeliklere kıyasla parçanın ağırlığını azaltır,

parçanın üretimi için gerekli malzeme miktarını ve dolayısıyla işlenmesi gereken malzeme miktarını azaltır, taşıma ve depolama kapasitesini azaltmasıyla da birçok avantaj sağlar (Köse, 2015). Mukavemetlerinin yüksek olmasıyla birlikte şekillendirilebilirliklerini daha ince saclarla sağlayıp malzeme kullanımını azaltmasıyla yolcu güvenliğinin yüksek olduğu, çevre dostu ve daha ekonomik olarak üretilen araçlara olanak sağlamaktadır (Bilir, 2014).

AHSS çeliklerinin şekillendirilebilirliklerinin yüksek olması, karmaşık şekle sahip parçaların üretilmesine olanak tanır ve kırılma dayanıklılığının yüksek olmasının istendiği parçalarda kullanımı uygundur (Uijl ve Carless, 2012).

AHSS çelikleri genel olarak dört sınıfa ayrılabilir:

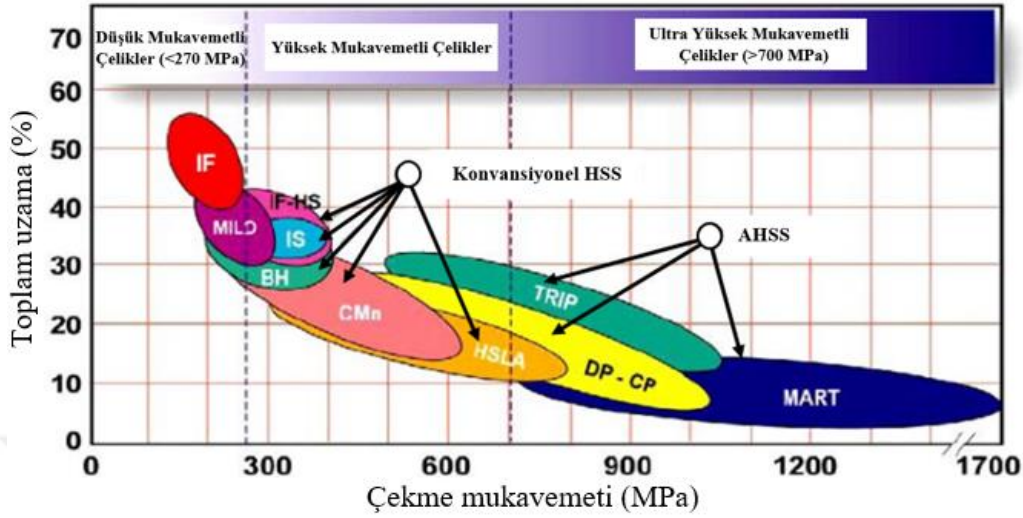
1. Kompleks Fazlı Çelikler (CP)
2. TRIP Çelikleri
3. Martenzitik Çelikler (MART)
4. Dual Fazlı Çelikler (DP)

Çok fazlı çelikler farklı mekanik özelliklerle birlikte farklı mikroyapı bileşenlerinin kombinasyonunu içerdiğinden mukavemet ve süneklik kabiliyetleri uyumludur (Zeytin ve diğ., 2008). Şekil 3.6'dan görüldüğü gibi dual fazlı çelikler (DP) ve transformasyona bağlı plastisite çelikler (TRIP), aynı çekme mukavemetini sergileyen yüksek mukavemetli geleneksel çeliklere (konvansiyonel HSS) göre daha yüksek mukavemet/süneklik değerleri ve pekleşme sağlar. Bu iki çelik türünde bir veya daha fazla sert faz, ferrit fazı içerisinde dağıldığından çoklu faz şeklinde tanımlanır (Bilir, 2014).

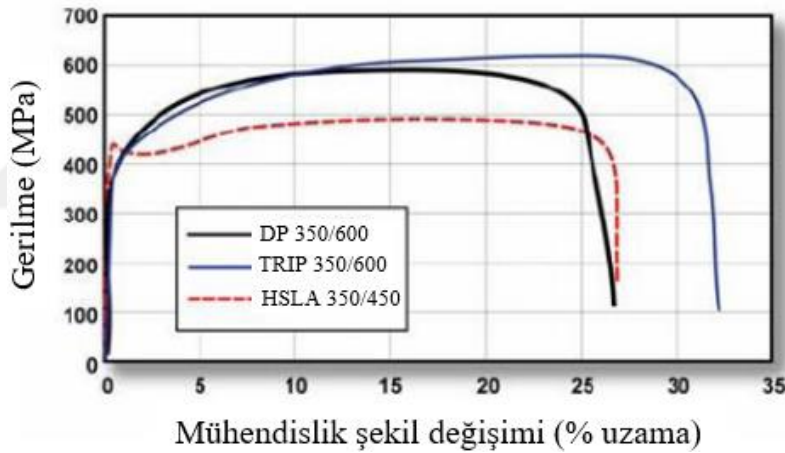
AHSS çelikleri DP 500/800, TRIP 500/800, CP 500/800 şeklinde isimlendirilebilirler. Bu durumda çeliğin akma dayanımının 500 MPa, çekme dayanımının 800 MPa olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 3.7'de DP 350/600, TRIP 350/600 ve HSLA 350/450 çeliklerinin gerilme birim şekil değişimi grafiği verilmiştir. Bu grafikten DP ve TRIP çeliklerinin akma ve çekme dayanımlarının yaklaşık aynı olmasına karşın TRIP çeliklerinin birim şekil değişiminin daha fazla olduğu, DP ve HSLA çeliklerinin de uzama değerlerinin yaklaşık aynı

olmasına karşın DP çeliklerinin çekme dayanımının daha iyi olduğu görülmektedir (Zeytin ve diğ., 2008).



Şekil 3.6. Farklı çeliklerin çekme mukavemeti ve uzama değerleri (Chang, 2010)



Şekil 3.7. DP, TRIP ve HSLA çeliklerinde gerilme – birim şekil değişimi grafiği (Zeytin ve diğ., 2008)

Araçların çarpışma bölgelerinde enerjiyi yüksek miktarda absorbe edebilen DP, CP, TRIP çelikleri tercih edilirken; dayanımları yüksek olan ve rijitlik sağlayan martenzitik, DP ($\sigma_{UTS} > 980$ MPa) çelikleri yolcu kabininde tercih edilir (Efe diğ., 2019).

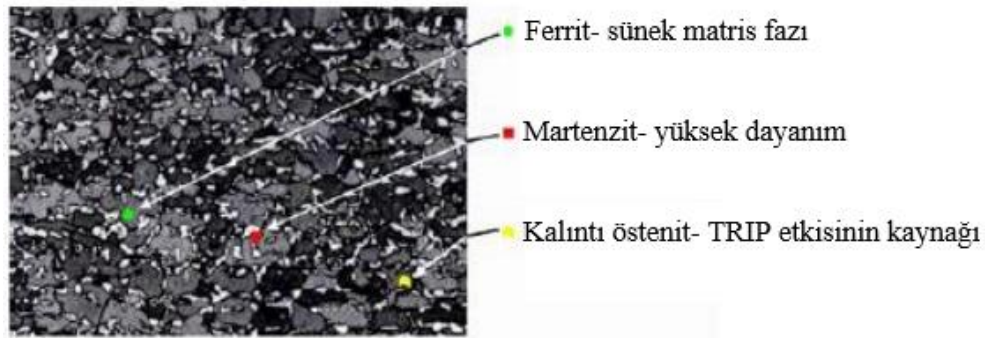
3.1. Kompleks Fazlı Çelikler (CP)

Kompleks fazlı çelikler, mikroyapısında ferrit ve beynit matrisine gömülü az miktarda martenzit, kalıntı östenit ve perlit içerir (Karaçalı, 2015; Hilditch ve diğ., 2015). İşleme sırasında tane büyümesini engellemek için titanyum, niobyum, vanadyum gibi çöktelteler

oluşturan alaşım ilaveleriyle ince tane boyutunun sağlandığı çeliklerdir. Son derece ince tane boyutuna sahip olmalarının yanında çökelti ve martenzit fazı gibi sert fazları içermeleri, akma dayanımlarının yüksek olmasını sağlamaktadır. Yaklaşık %7-15 süneklik değerine ve 800-1200 MPa'lık nihai çekme mukavemetlerine sahiptirler. Bu çeliklerin yaklaşık 600-1000 MPa arasında yüksek akma dayanımına sahip olmaları, DP ve TRIP çeliklerine göre daha düşük pekleşme oranlarına sahip oldukları anlamına gelmektedir (Hilditch ve diğ., 2015). Bu çeliklerin şekillendirilebilirlikleri, dual fazlı çeliklere göre daha yüksektir (Karaçalı, 2015; Ishikawa, 2012).

3.2. TRIP Çelikler

Şekil 3.8'de gösterilen TRIP çeliğinin yapısında, ferrit fazı içerisinde martenzit ve/veya beynit fazı ile birlikte %5-15 oranlarında kalıntı östenit bulunur (Karaçalı, 2015) (Ishikawa, 2012). Deforme edilmeleri durumunda yapısındaki östenit, martenzite dönüşür ve bu esnada pekleşme üssünün (n değeri) artmasıyla homojen deformasyonun gerçekleştiği bölge genişletilir dolayısıyla malzemenin uzama değerleri artar (Karaçalı, 2015). Östenit fazının mikroyapıya dahil edilmesiyle martenzite dönüşüm ile ek şekillendirilebilirlik elde edilir, bu nedenle şekillendirme ile malzemenin gücü artırılır (Uijl ve Carless, 2012). Bu çeliklerin mukavemet değerleri 600 MPa ile 800 MPa arasındadır, yüksek uzama ve iyi pekleşme oranlarına sahip olduklarından gerekerek şekillendirme için uygundurlar (Ishikawa, 2012).

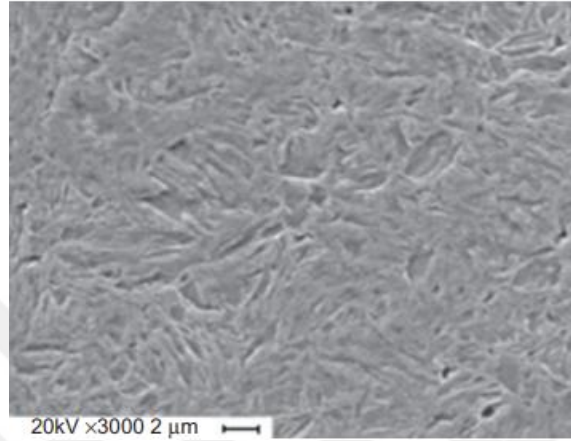


Şekil 3.8. TRIP çeliğinin mikroyapısı (Karaçalı, 2015)

3.3. Martenzitik Çelikler (MART)

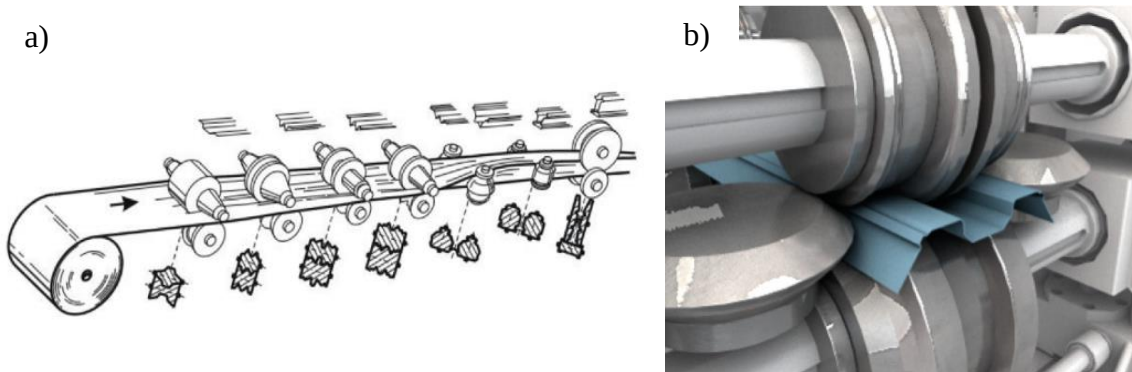
Şekil 3.9'da SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüsü verilen martenzitik çelikler, mangan ve bor alaşım elementlerini içerdiği için sertleştirilebilirlikleri yüksektir

(Ishikawa, 2012). Bu çelikler yüksek mukavemet değerleriyle birlikte düşük uzama gösterdikleri (yaklaşık %4-7) için otomobil gövdesinde sınırlı olarak deformasyona uğrayan parçalarda kullanılırlar (Karaçalı, 2015). Çekme dayanımları 900 MPa ile 1600 MPa aralığındadır, akma dayanımları 800 MPa ile 1350 MPa arasında değiştiği için çok düşük pekleşme davranışına sahiptirler (Hilditch ve diğ., 2015).



Şekil 3.9. Martenzitik çeliğin SEM görüntüsü (Hilditch ve diğ., 2015)

Yüksek akma dayanımlarından ve düşük sünekliklerinden dolayı şekillendirilmeleri zordur. Birincil şekillendirilme yöntemleri oda sıcaklığında yapılan Şekil 3.10'da gösterilen rulo şekillendirme işlemidir ancak bu şekillendirme yöntemiyle karmaşık şekle sahip parçalar üretilmeyeceğinden parça karmaşıklığı ve dolayısıyla martenzitik çeliklerin kullanımı sınırlanmış olur (Hilditch ve diğ., 2015). Genellikle otomotiv sektöründe aracın A ve B sütunları ile aracın gövde parçalarında kullanılmaktadırlar (Karaçalı, 2015).



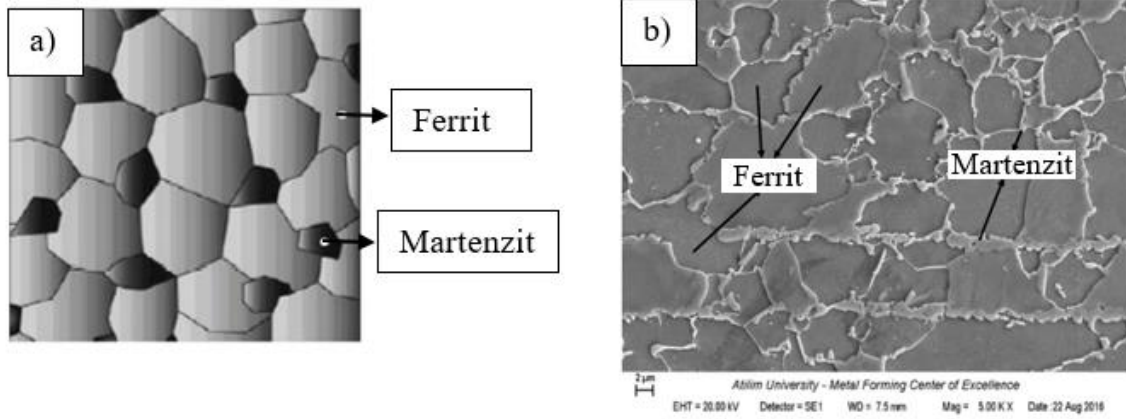
Şekil 3.10. Rulo şekillendirme işlemi: a) şematik gösterimi, b) rulo şekillendirme makinesi (Han ve diğ., 2018; <https://www.voestalpine.com/sadef/en/Roll-forming>)

Ancak çok sert çelikler oldukları için öncelikle ısıtılıp form verilmesinin ardından su verilerek nihai mukavemet değerlerine ulaştırılabilir ve böylelikle yüksek mukavemet değerine sahip karmaşık geometrideki parçalara şekil verilebilir (Karaçalı, 2015).

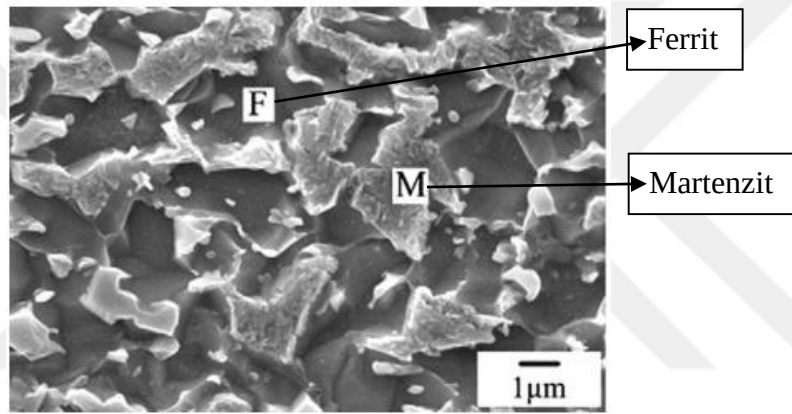
3.4. Dual Fazlı Çelikler

Dual fazlı çelikler, ferritik (α) ana yapıda olup içerisinde martenzitik adacıklar bulunduran Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de gösterildiği gibi bir mikroyapıya sahiptir (Zeytin ve diğ., 2008). Yumuşak ferrit matrisi içerisinde %10- 30 oranında adacıklar biçiminde dağılmış martenzit fazı bulunmaktadır (Bilir, 2014). Bu çelikler genel olarak düşük karbonlu olarak üretilirler ancak yapılarında ferrit ile martenzitin yanında sementit, perlit, beynit ve kalıntı östenit bulunabilir. Farklı fazları bir arada bulunduran dual fazlı çelik mikroyapısı ısıtılıp işlemlerin uygulanmasıyla elde edilmektedir. Bu ısıtılıp işlemler sırasında kritik sıcaklıklar arasında (Fe-C denge diyagramında A1-A3 sıcaklıkları arasında) oluşan östenitin, perlitte veya beynite dönüşmeyecek ancak martenzit yapısının oluşmasını sağlayacak soğutma hızı seçilir. Östenitin bir kısmı martenzite dönüşürken bir kısmı dönüşmeden kalıntı östenit olarak kalır ve dolayısıyla elde edilen yapı östenit, martenzit, ferrit içerir. Buradaki östenit ile martenzit fazları ikinci faz olarak kabul edilerek martenzit fazı olarak adlandırılmakta ve dual fazlı çelik mikroyapısının ferrit ile martenzitten oluştuğu kabul edilmektedir (Tokgöz, 2014). Yapıdaki bu fazların miktarı, şekli, dağılımı, tane boyutları farklı mekanik özellikler sağlar (Efe diğ., 2019).

Dual fazlı çeliklerin dayanımını, bulundurduğu martenzit hacim oranı ve ferrit fazında meydana gelen sertlik artışı etkiler. Matris olan ferrit fazı, yapıya süneklik sağlarken martenzit hacim oranına bağlı olarak malzeme mukavemet kazanır. Martenzitin dayanımı kritik sıcaklıklar arası tavlama koşullarına ve bileşimindeki C içeriğine bağlı olarak ferrit fazının dayanımı tane boyutuna bağlıdır. Süneklik özelliklerini ferritin karbon içeriğinin düşük olması, martenzitin plastisitesi ve kalıntı östenit oranı etkiler. 780 MPa ve daha fazla mukavemete sahip çeliklerin sünekliğini ancak çift fazlı mikroyapıyla sağlarız. Bu çelikler, HSLA çeliklerinin yeni bir sınıfıdır ancak eşit mukavemet değerindeki HSLA çeliklerine göre daha fazla süneklik sergilerler. Dolayısıyla yüksek miktarda enerji absorbe edebilirler ve şekillendirilme kabiliyetleri ile kaynaklanabilme özellikleri iyidir (Zeytin ve diğ., 2008).



Şekil 3.11. Dual fazlı çeliğin mikroyapısı: a) şematik gösterim, b) taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü (Zeytin ve diğ., 2008; Davut ve diğ., 2018)



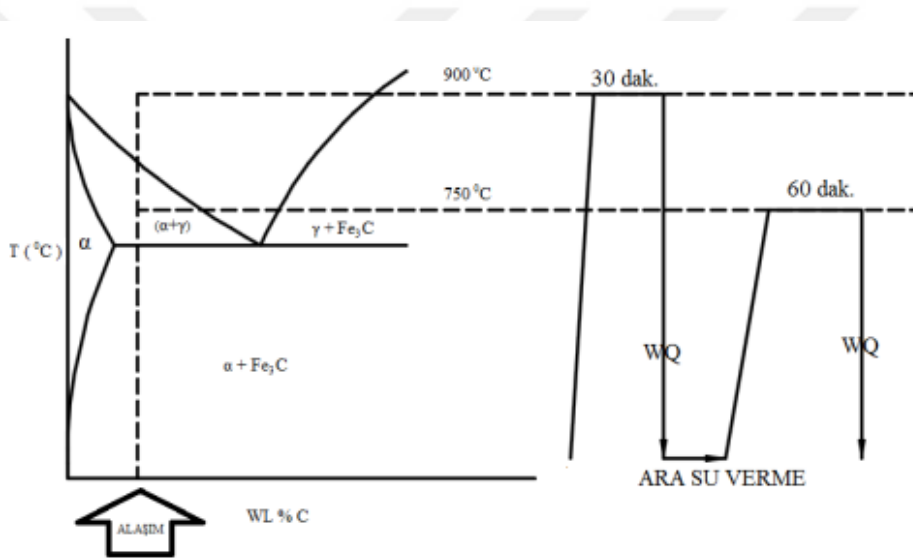
Şekil 3.12. Dual fazlı çeliklerin mikroyapısının SEM görüntüsü (Hilditch ve diğ., 2015)

Dual fazlı çeliklerdeki çift fazlı yapıyı elde etmek için çeşitli ısı işlemleri uygulanmaktadır ve bu ısı işlemlerinde östenitin martenzit fazına dönüşümünü sağlamak için çelik uygun bir hızda soğutulur (Umur, 2016). Uygulanan ısı işlemleri üç grupta sınıflandırılır:

- 1- Ara su verme (Umur, 2016)
- 2- Kritik sıcaklıklar arası bölgede tavlama (Umur, 2016)
- 3- Kademeli (basamaklı) su verme (Umur, 2016)

Şekil 3.13'te gösterilen ara su verme işlemi kısaca, öncelikle östenit bölgesinden (γ) su verilerek elde edilen martenzit yapının ikincil ısı işlemi olarak ferrit+östenit ($\alpha+\gamma$) çift faz bölgesine ısıtılıp bekletildikten sonra su verilmesi şeklinde açıklanabilir (Bilir, 2014). Dolayısıyla ardışık iki aşamadan oluşur. İlk aşamada ötektoid altı çelikler östenit

bölgesine (γ , Fe-C denge diyagramında A3 sıcaklığının üzerine) kadar ısıtılıp tavllanır ve tavlama sonrası hızla soğutularak martenzit yapısı elde edilir. İkinci aşamada ise malzeme tekrar ferrit+östenit ($\alpha + \gamma$) bölgesine ısıtılarak tavllanır, bu sırada ferrit ile östenit fazları çekirdeklenir ve büyür. Dolayısıyla martenzit tanelerinin sınırlarında östenit çekirdekleri oluşur ve su verme işlemiyle östenitin martenzite dönüşümü sağlanırken ferrit tavlama esnasındaki gibi kalır (Umur, 2016). Su verme sonunda ferrit fazı içerisinde homojen dağılmış iğnesel martenzit yapısı içeren bir mikroyapı elde edilir. İnce dağılıma sahip ferrit+martenzit fazı olduğu için iğnesel yapı şeklinde isimlendirilir. Sonuç olarak bu ısıtılıp işlemle üretilen dual fazlı çelikler diğer yöntemlerle üretilenlere göre daha homojen dağılıma sahip olup ince taneli martenzit fazı içerir (Bilir, 2014).

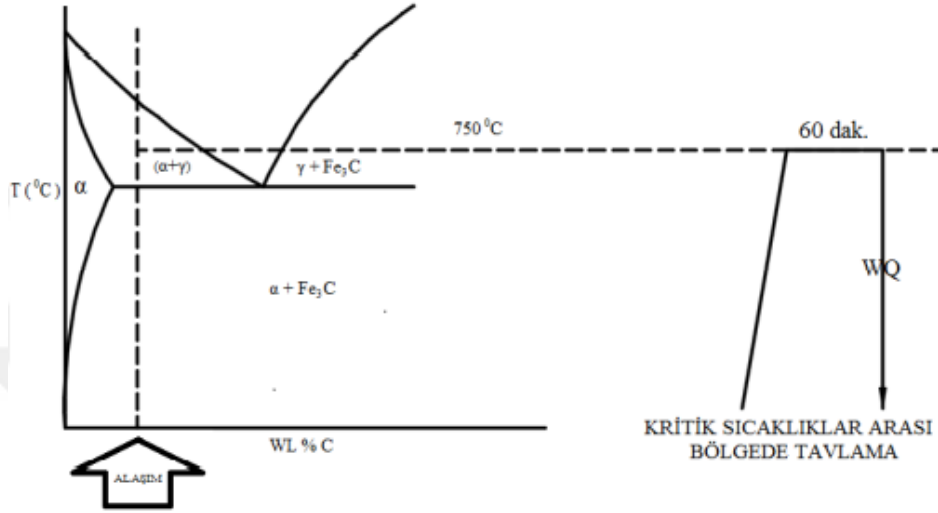


Şekil 3.13. Ara su verme ısıtılı işlemiyle dual fazlı çelik üretimi (Umur, 2016)

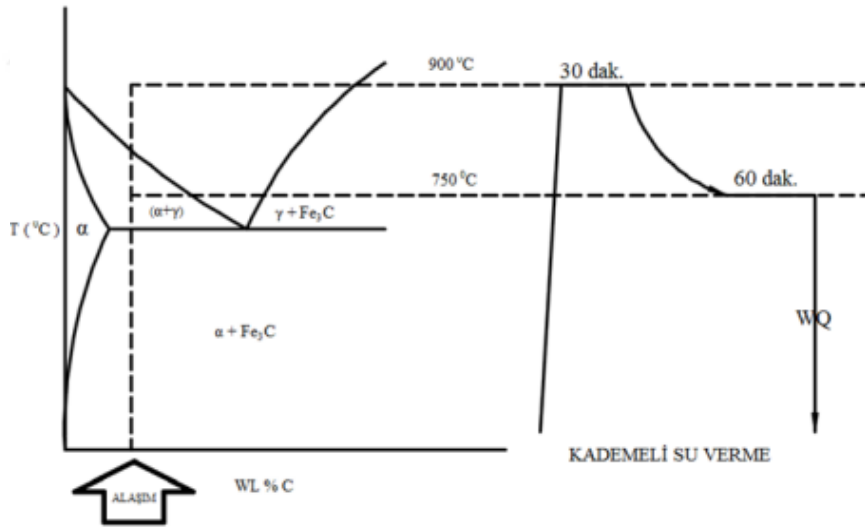
Şekil 3.14'te gösterilen kritik sıcaklıklar arası bölgede tavlama işleminde başlangıç mikroyapısı ferrit ve perlitten oluşan ötektoid altı çelik, Fe-C denge diyagramındaki A1-A3 sıcaklıkları arasında olan ferrit+östenit ($\alpha + \gamma$) bölgesine kadar ısıtılıp tavllanır. Bu bölgede oluşan östenit, perlitteki ferrit- sementit ara yüzeyinde çekirdeklenerek büyür. Ardından uygulanan su verme işlemiyle ferrit sınırlarında küresel martenzit bulunduran bir mikroyapı elde edilmiş olur (Umur, 2016; Bilir, 2014).

Şekil 3.15'te gösterilen kademeli (basamaklı) su verme işlemi ardışık iki aşamadan oluşur. Öncelikle ötektoid altı çelikler Fe-C denge diyagramındaki A3 sıcaklığının üzerindeki östenit bölgesine (γ) ısıtılarak tavllanır ve östenit yapısı elde edilir. Sonrasında ferrit+östenit ($\alpha + \gamma$) bölgesine yavaş soğutmayla primer östenit tane sınırlarında ferrit

çekirdeklenerek büyür. Su verme işlemiyle primer östenit dönüşür. Çift fazlı bölgeye yavaş soğutmayla kaba ferrit-martenzit dağılımı sağlandığından ferrit yapının kaba martenziti çevrelediği mikroyapı elde edilir (Umur, 2016; Bilir, 2014).



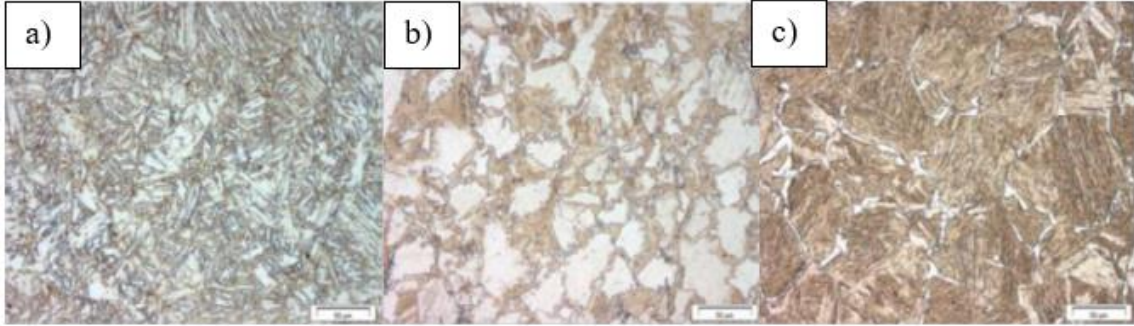
Şekil 3.14. Kritik sıcaklıklar arası bölgede tavlama ile dual fazlı çelik üretimi (Umur, 2016)



Şekil 3.15. Kademeli su verme ısıtma işlemiyle dual fazlı çelik üretimi (Umur, 2016)

Şekil 3.16 (a), ara su verme ısıtma işlemi sonucunda ferrit matrisi içerisinde dağılmış ince taneli martenzit fazını; Şekil 3.16 (b), kritik sıcaklıklar arası tavlama sonucunda ferrit matrisi içerisinde dağılmış küresel martenzit fazını; Şekil 3.16 (c), kademeli su verme ısıtma işlemi sonucunda ferrit matrisi tarafından çevrelenmiş kaba martenzit yapısını göstermektedir. Dolayısıyla dual fazlı çelik üretimi için uygulanacak üç ısıtma işlem yöntemi

sonucunda farklı mikroyapılar elde edilir ve bunlara bağlı olarak dual fazlı çeliklerin sergiledikleri mekanik özellikler farklılık göstermektedir. Aynı martenzit hacim oranı için üniform uzama ve toplam % uzama değerleri ara su verilmiş yapıda, kademeli su verilmiş yapıya göre daha fazladır. Kademeli su verilmiş yapıda, deformasyon sonucunda çatlak oluşumu ve çatlağın hızlı bir şekilde ilerlemesi söz konusu olduğundan diğer yapılara göre sünekliği düşüktür (Umur, 2016).



Şekil 3.16. Farklı ısıtıl işlem yöntemlerinin oluşturduğu mikroyapılar: a) ara su verme, b) kritik sıcaklıklar arası tavlama, c) kademeli su verme (Bilir, 2014)

Dual fazlı çelikler; üretildikleri yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çeliklere ve karbon çeliklerine kıyasla pekleşme hızının yüksek olması, akma dayanımının düşük olması, sürekli akma davranışı göstermesi gibi özelliklere sahiptir (Tokgöz, 2014). Ayrıca HSLA çeliklerine kıyasla daha iyi dayanım- süneklik özellikleri sergilemeleri, dual fazlı çeliklerin şekillendirilme kabiliyetlerinin yüksek olması, mukavemet/ağırlık oranlarının yüksek olması, akma mukavemeti/çekme mukavemeti oranının düşük olması dolayısıyla otomotiv sektöründe oldukça önemli konumdadırlar (Köse, 2015; Tokgöz, 2014).

Dual fazlı çeliklerin özellikleri;

- Düşük akma dayanımı (Köse, 2015).
- Yüksek dayanım (Köse, 2015).
- Düşük akma/çekme mukavemeti oranı (Chang, 2010).
- Sürekli akma davranışı (belirgin akma noktası göstermez) (Köse, 2015).
- Yüksek üniform ve toplam uzama miktarı (Köse, 2015).
- Yüksek pekleşme oranı (Köse, 2015).
- Yüksek yorulma dayanımı (Köse, 2015).
- Yüksek korozyon direnci (Köse, 2015).

3.4.1. Dual Fazlı Çeliklerin Mikroyapı Bileşenlerinin Mekanik Özelliklere Etkisi

Dual fazlı çeliklerin mikroyapısındaki bileşenlerin mekanik özelliklere etkisi farklıdır. Mukavemet değerlerindeki artışı martenzit sağlarken şekil alabilirliği sağlayarak yapıya süneklik katan ferritin de yapıda bir miktar bulunması gerekir. Çünkü derin çekme ve germe işlemlerinde mukavemeti yüksek olmasına rağmen yırtılmalar meydana geldiği için tek başına martenzitin sağladığı mukavemetteki artış yeterli olmayıp yapıda yeterli miktarda ferrit fazının da yer almasıyla ferritin sünekliğinden yararlanılmalıdır (Umur, 2016).

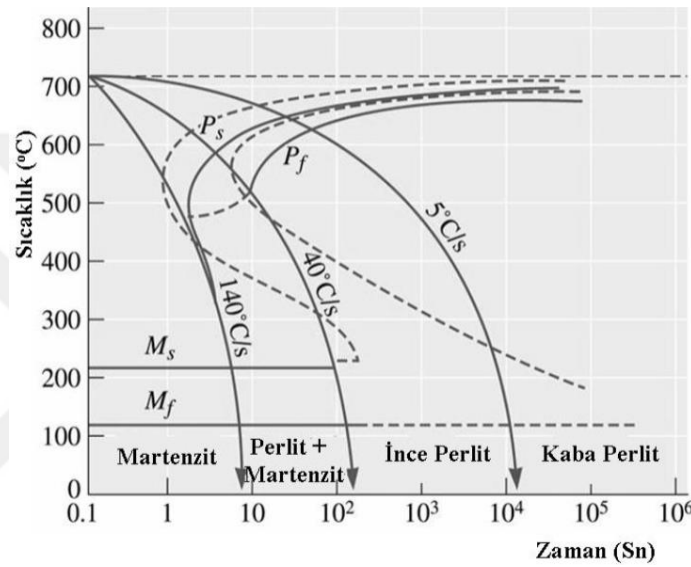
Şekil 3.17’de çeliklerin zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı gösterilmiştir. Buradan görüldüğü gibi çok hızlı bir soğutma gerçekleştirildiğinde yani kritik soğutma hızı aşıldığında östenit fazı, Ms (martenzit başlangıç) sıcaklığından itibaren martenzite dönüşmeye başlayacak; Mf (martenzit bitiş) ile gösterilen sıcaklığın altına düşülmesiyle martenzit dönüşümü tamamlanıp yapı tamamen martenzitten oluşacaktır. İlk olarak martenzit oluşumunun görüldüğü kritik soğutma hızı, alt kritik soğutma hızı olarak isimlendirilirken martenzitin tüm kesitte oluşumunun gerçekleştiği soğutma hızı ise üst kritik soğutma hızı olarak adlandırılmaktadır. Dolayısıyla yapı, Ms sıcaklığının altına inildiğinde tamamen martenzitten oluşmaz ve sıcaklık düştükçe martenzit miktarı artmaktadır. Martenzit oluşumu, çeliğin yeterli miktarda karbon içermesine ve soğumanın yeterli hızda olmasına bağlıdır. Mf sıcaklığı, çeliğin karbon içeriğine; Ms ve Mf sıcaklıkları, kimyasal bileşimine göre değişmektedir (Dağışan, 2007).

Soğutma işlemi sırasında martenzit oluşumu için gerekli kritik soğutma hızından daha düşük sıcaklıklar kullanıldığında östenitin, martenzit dışındaki fazlara dönüşümü gerçekleşir. Dolayısıyla böyle bir durumda östenit, ferrite dönüşür ve yapıda önceden bulunan ferrit eski ferrit olarak adlandırılırken soğutma sonrasında oluşan ve tane sınırında eş eksenli şekilde çekirdeklenen ferrit, eş eksenli veya yeni ferrit olarak adlandırılır (Dağışan, 2007).

Östenitin soğutma esnasında yapıda dönüşmeden kalması kalıntı östenit olarak adlandırılır. Dual fazlı çeliklerin üretilmesi sırasında uygulanan ısı işlem sonucunda yapıda kalıntı östenit elde edilir. Bu çeliklerdeki kalıntı östenit miktarı yavaş soğutma hızlarında % 9 civarındayken hızlı soğutma hızlarında daha düşerek % 2 olabilir. Kalıntı

östenit yapının sünekliğini artırır ancak dual fazlı çeliklerde az miktarda bulunması dolayısıyla yapıya etkisi düşük olduğundan mekanik özelliklere etkisi ihmal edilebilir (Dağışan, 2007).

Martenzit oluşumu için kullanılan kritik soğutma hızından daha düşük soğutma hızının uygulanmasıyla östenit, perlitte dönüşür. Martenzit ile perlit arasında ise beynit dönüşümü gerçekleşir. Beynit fazı, yapının sünekliğini artırır, dolayısıyla dinamik yüklere direncini artırır (Dağışan, 2007).



Şekil 3.17. Zaman sıcaklık dönüşüm (TTT) diyagramı (<https://docplayer.biz.tr/44219637-Mal-201-fazlar-ve-demir-sementit-diyagrami-ttt-diyagramlari-celik-isil-islemleri-kasim-2016.html>)

3.4.1.1. Martenzitin Etkisi

Martenzit, çeliklerde östenit fazına su verilmesiyle oluşan sert mikroyapıdır. Hızlı soğutma ile ferrit-sementit fazları arasındaki karbon (C) yayılımı engellendiği için difüzyonun engellenmesiyle martenzit fazı oluşmaktadır. Dual fazlı çeliklerin mukavemetinde büyük öneme sahip olan bu fazın hacim oranı ve morfolojisi mekanik özelliklerde etkili olmaktadır. Tavlama sıcaklığı, östenitin sertleşme kabiliyeti, çeliğin karbon içeriği martenzit hacim oranını etkiler ve bu oranın artmasıyla çeliğin dayanım değeri artarken sünekliği azalır. Olabildiğince küçük çapa sahip olan martenzitin %20-40 martenzit hacim oranında olmasıyla dual fazlı çeliklerin mekanik özellik-süneklik kombinasyonları iyi olmaktadır. Ayrıca martenzit içeriğindeki karbon miktarının

artmasıyla martenzitin sertliğinin artması dolayısıyla çeliğin mukavemeti artmakta sünekliği azalmaktadır (Umur, 2016).

Martenzit fazı ferritten aktarılan yükü taşır, martenzit dönüşümünden kaynaklanan plastik şekil değişiminin etkisiyle martenzitlerin etrafındaki ek dislokasyonlar ferrit fazının pekleşme davranışını etkiler ve martenzitin artmasıyla dislokasyon yoğunluğu artacağından ferrit fazındaki güçlendirme etkisi artış gösterir (Mazinani, 2006). Martenzit miktarları aynı olan iki mikroyapıdan ferrit içerisindeki dağılımı daha ince olan, kaba martenzit dağılımına göre daha iyi mukavemet- süneklik ilişkisi sağladığından martenzitin ferrit içerisindeki dağılımı önemlidir (Bilir, 2016). Ayrıca martenzitteki karbon miktarı, dönüşüm hızına ve östenitteki karbon miktarına bağlıdır. Kritik tavlama sıcaklığının artırılması ferrit+ östenit bölgesindeki östenitin karbon içeriğinin azalmasına neden olur (Bilir, 2016).

3.4.1.2. Ferritin Etkisi

Dual fazlı çeliklerin özellikleri üzerinde etkili olan diğer bir faz ferrittir. Ferrit fazının tane boyutu, yapısındaki dağılım, içerisindeki çökelti ve içerisindeki arayer ile yer alan atomlarının bulunması yapıya etki etmektedir. Tane boyutu, akma mukavemetini etkiler ve ferrit tane boyutunun küçük tutulmasıyla ve eş eksenli olmasıyla optimum özellikler elde edilmektedir (Bilir, 2016; Umur, 2016). Ferrit tane boyutunun küçülmesiyle içerisindeki dislokasyon hareketliliği, malzemenin çekme dayanımı, tokluk değeri, % uzama miktarı artış gösterir (Umur, 2016).

Dual fazlı çeliğin dayanımının ve sünekliğinin yüksek olması için dayanım ve süneklik değerlerinin yüksek olduğu ferrit fazı gerekli olduğundan ferrit fazının dayanımı artırılmalıdır. Soğutma ile martenzit tanelerinde % 2-4'lük hacim genişlemesinin meydana gelmesiyle ferrit tanelerinde kalıntı gerilme oluşumunu sağlanıp ferritin dayanımı artmaktadır. Ferritteki dislokasyon yoğunluğunun artmasıyla sertlik artışı meydana geleceğinden çeliğin mekanik özellikleri iyileşir (Umur, 2016).

3.4.1.3. Östenitin Etkisi

Kritik sıcaklıklar arası tavlama ile dual fazlı çeliklerin üretiminde soğutma esnasında östenitin tamamının martenzite dönüşmemesiyle dönüşmeden kalan %2-9 oranlarında

kalıntı östenit bulunmaktadır. Kalıntı östenitler; dual fazlı çeliklerdeki martenzit ile yapıda veya martenzit dilimleri arasında ince tabaka şeklinde, ferrit tanelerinin içerisinde veya ferrit tanelerinin etrafında küçük adacıklar olarak bulunabilirler. Yapıdaki küçük hacim oranına sahip östenitler mekanik özelliklere etki etmez. Kalıntı östenitin plastik deformasyonla birlikte martenzite dönüşümüyle çeliğin dayanım-süneklik kombinasyonu geliştirilebilir (Umur, 2016).

3.4.2. Dual Fazlı Çeliklerin Mekanik Özellikleri

Dual fazlı çelikler, yüksek dayanımlı düşük alaşımlı (HSLA) çeliklerle aynı çekme mukavemetine sahiptir ancak toplam uzama değerleri daha fazla olduğu için şekillendirilebilirlikleri daha yüksektir (Özdemir, 2017).

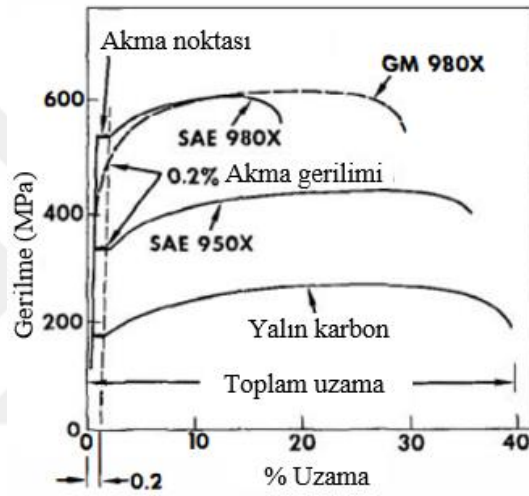
Dual fazlı çeliklerin mukavemet özellikleri, bulundurduğu iki fazın özellikleriyle belirlenir. Araştırmacıların birçoğu DP çeliğinin çekme mukavemetinin, martenzit hacim oranının artmasıyla doğrusal olarak arttığını belirtmiştir. Mekanik davranışın belirlenmesinde malzemenin yüke maruz kaldığı durumda fazlar arasındaki deformasyonun nasıl bölüneceği anlaşılacak deformasyon esnasında bileşen fazların karmaşık etkileşimi anlaşılmalıdır (Mazinani, 2006).

Dual fazlı çelikler yumuşak bir matris içerisinde rastgele dağılımlı sert adacıklar bulundurur ve bu iki fazdaki gerinim ile gerilimler aynı olmamakla beraber yumuşak faz sert faza göre daha fazla deforme olur. Martenzit fazında deformasyon çok küçüktür ama nispeten yüksek gerilimlere maruz kaldığından dual fazlı çeliğe gelen yüklerin büyük bölümünü karşılamaktadır (Fonstein, 2017).

3.4.2.1. Akma Mukavemeti

Akma mukavemetinin düşük olmasıyla malzemenin plastik şekil değiştirmesi daha kolay olmaktadır (Bilir, 2014). Diğer bir deyişle akma mukavemetlerinin düşük olması, plastik şekil verme sırasında uygulanan belirli bir kuvvet karşısında daha fazla deformasyona uğramaları veya aynı deformasyon miktarı için daha az bir kuvvet gerektirmeleri açısından avantaj sağlar (Tokgöz, 2014). Ayrıca dual fazlı çeliklerin akma mukavemetleri, temperlenmiş martenzit yapısına kıyasla daha düşüktür (Bilir, 2014).

Şekil 3.18’de sade karbonlu, HSLA (SAE 950X, SAE 980X) ve dual fazlı çeliklerin (GM 980X) gerilme gerinim eğrileri gösterilmiştir. Buradaki SAE, otomotiv mühendisleri topluluğunun tanımlamasıdır ve GM 980X, General Motors tarafından geliştirilen dual fazlı çeliktir. Şekil 3.18’den GM 980X dual fazlı çeliği ile SAE 980X HSLA çeliğinin çekme mukavemetlerinin benzer olmasına rağmen dual fazlı çeliğin toplam uzamasının fazla olması dolayısıyla daha sünek olduğu görülmektedir. Düşük gerilmelerde hızlı bir şekilde sertleşirler (Rashid, 1981). Ayrıca dual fazlı çeliklerin akma dayanımlarının daha düşük olduğu ve belirgin olmayan, sürekli bir akma davranışı gösterdiği de görülmektedir (Özdemir, 2017).



Şekil 3.18. Sade karbonlu, HSLA (SAE 950X, SAE 980X) ve dual fazlı (GM 980X) çelikler için gerilme- gerinim grafiği (Rashid, 1981)

Dışarıdan gelen bir yük olması durumunda dual fazlı çelikteki ferritte plastik akış başladığı için ferrit fazının gücü akma davranışını kontrol eder. Ferritin akma geriliminden daha düşük gerilmelerde, martenzitlerin etrafındaki bölgelerde bulunan ferritte mikro akma meydana gelir ve ferrit içerisindeki birçok bölgede eş zamanlı plastik akış meydana gelir (Mazinani, 2006).

3.4.2.2. Süneklik

Yüksek süneklik özellikleri DP çeliklerin büyük bir avantajıdır (Fonstein, 2017). Şekil 3.18’den dual fazlı çeliklerin belirgin bir akma noktasının olmadığı, düşük akma dayanımları (YS) ve yüksek maksimum çekme dayanımları (UTS) dolayısıyla düşük akma/çekme dayanımı (YS/ UTS) oranına sahip oldukları görülmektedir. Bu nedenle

şekillendirilebilirlikleri eşdeğer çekme mukavemetine sahip ferrit- perlit çeliklerinden daha iyidir (Rashid, 1981).

Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çeliklerin uzama değerleri maksimum %18'e çıkabilirken dual fazlı çeliklerin %28'e kadar çıkabilmektedir. Bu durum ticari anlamda geniş kullanım alanı bulmalarını sağlamıştır (Özdemir, 2017).

Sünekliği doğrudan ferritin hacim oranı ve morfolojisi, martenzitin karbon içeriği etkilemektedir. Ferrit hacim oranının %70'ten fazla olması ve saf olması, martenzit karbon içeriğinin az olması ve dolayısıyla çatlak oluşumunun azaltılmasıyla yüksek süneklik sağlanır (Özdemir, 2017).

3.4.2.3. Pekleşme (Deformasyon Sertleşmesi) Davranışı

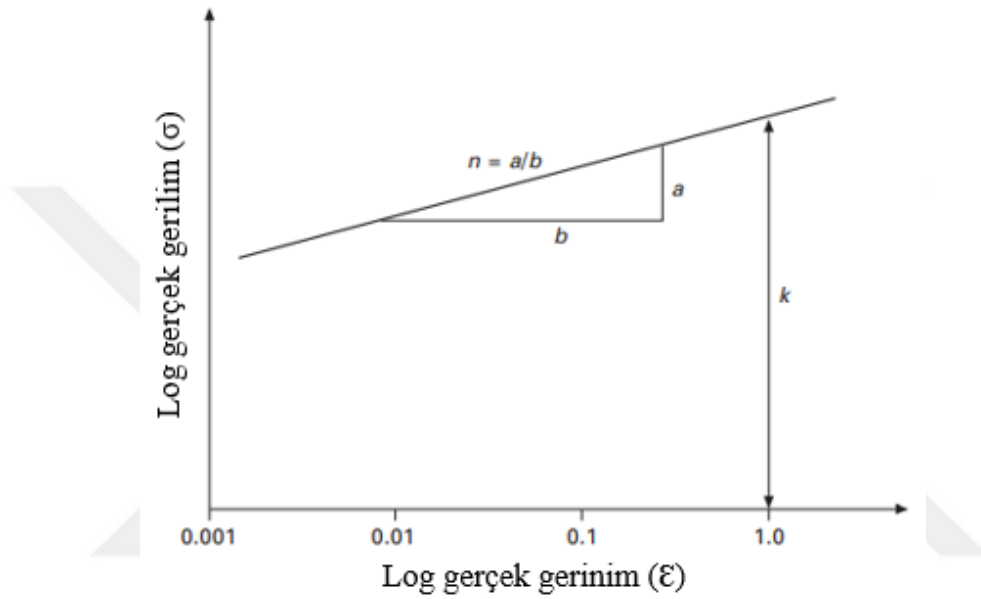
Pekleşme davranışı, şekillendirme sırasında malzemeyi güçlendirdiği için önemli bir özelliktir (Uijl ve Carless, 2012). Deformasyon sertleşmesi, malzemelerin mutlak ergime sıcaklıklarından (T_m) daha düşük sıcaklıklarda ($T < 0,3T_m$) plastik deformasyona uğramaları sonucunda sertliklerinin ve mukavemetlerinin artmasına denir. Buradaki $T < 0,3T_m$ ifadesi soğuk deformasyon şartlarını göstermektedir ve malzemenin soğuk deformasyona uğramasıyla mukavemeti artar. Malzemede pekleşmenin meydana gelmesi için plastik deformasyona maruz kalması gerektiğinden malzeme bir miktar sünekliğe sahip olmalıdır (Tokgöz, 2014). Pekleşme kabiliyetini gösteren pekleşme üssü değeri (n); malzemenin bölgesel deformasyona karşı direncinin bir derecesidir, diğer bir deyişle deforme olan malzemenin ne kadar hızlı güç kazandığının ölçüsüdür (Tokgöz, 2014; Uijl ve Carless, 2012). “ n ” değeri gerilme altında malzemenin birim şekil değişimini dağıtabilme kabiliyetidir. Dolayısıyla bu değer büyümeyeyle daha homojen birim şekil değişimi elde edilmekte, şekillendirilme kabiliyeti artmakta, gerilimler diğer bölgelere daha iyi dağıtılabildiği için yerel gerilim birikimleri azalmakta ve malzemede meydana gelen sertleşme sonucunda boyun vermeye direnci artmaktadır (Tokgöz, 2014; Uijl ve Carless, 2012).

Pekleşme üssü (n) değeri, Şekil 3.19'daki çekme testinde logaritmik ölçekte çizilmiş gerçek gerilme- gerinim eğrisinin eğiminden elde edilebilir. Gerilme ve gerinme

arasındaki ilişki aşağıdaki Denklem (3.1)'de gösterilen Holloman denklemiyle elde edilebilir (Uijl ve Carless, 2012);

$$\sigma = k \cdot \epsilon^n \quad (3.1)$$

Burada σ - gerçek gerilme, ϵ - gerçek birim şekil değişimi, k - malzemenin dayanım sabiti ve n - pekleşme üstelidir (Uijl ve Carless, 2012).

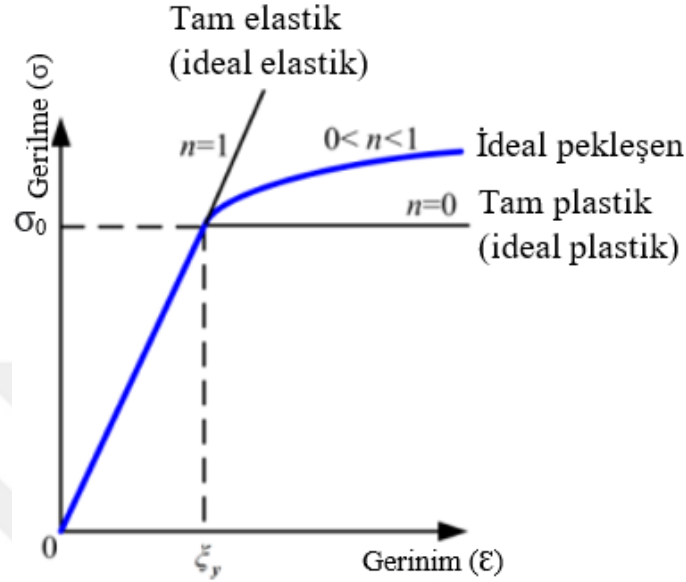


Şekil 3.19. Pekleşme üssü (n) ile gerçek gerilme-gerinim eğrisinin logaritmik gösterimi (Uijl ve Carless, 2012)

Genellikle 0 ile 1 değerleri arasında değişen n katsayısı malzemenin pekleşebilme kapasitesinin büyüklüğünü ifade ettiği için düşük değere sahip olduğunda malzeme fazla pekleşmeden koparken yüksek değere sahip olduğunda malzeme pekleşebilir ve bu da sünek yapısının olması demektir (<https://muhendishane.org/kutuphane/malzemelerin-mekanik-davranisi/akmanin-matematiksel-tarifi/>; Lu ve diğ., 2018). Şekil 3.20’de gösterildiği gibi iki uç değer olan $n=1$ ve $n=0$ durumlarında malzemeler sırasıyla ideal elastik ve ideal plastik durumda olacak şekilde değişir (Lu ve diğ., 2018).

Dual fazlı çelikler yüksek pekleşme oranına sahiptir. Deformasyon esnasında plastik deformasyona uğrayan ferrit, martenzit fazına uygulanan gerilimi aktarmaktadır. Hızlı soğumayla oluşan martenzit ve bileşen fazların plastik uyumsuzluğu nedeniyle ferritte oluşan dislokasyonlar, pekleşmeye katkı sağlar (Mazinani, 2006). Pekleşme

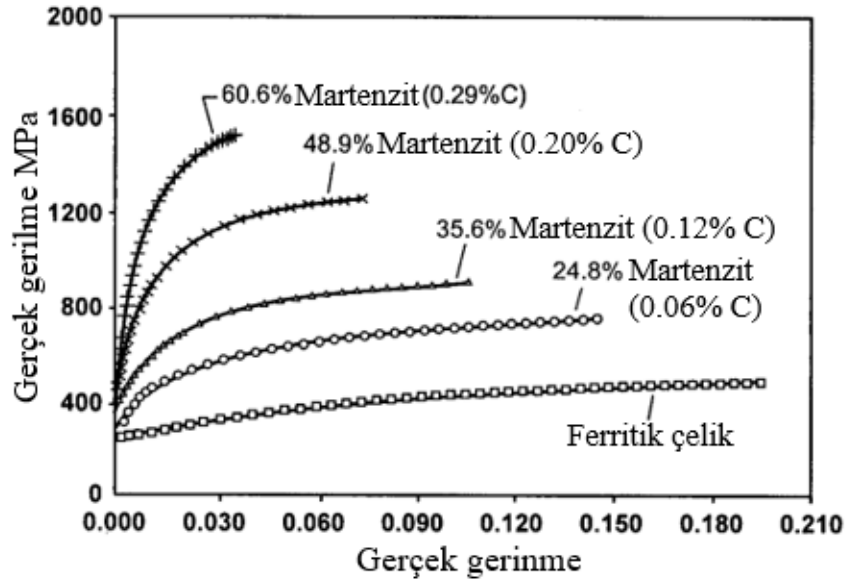
özelliklerinden dolayı derin çekme işlemlerinde kesiti azalan malzemenin diğer kademelerde uygulanan kuvvetleri karşılayabilmesi için sertleşmesini sağladıklarından derin çekme sacı olarak kullanılabilirler (Tokgöz, 2014).



Şekil 3.20. Elastik- plastik malzemeleri sertleştiren kuvvet yasasının kurucu yasası (Lu ve diğ., 2018)

Pekleşme oranlarının yüksek olması, şekillendirildikten sonra mukavemetlerinin artmasını sağlar. Ayrıca dayanımlarının yüksek olması ve enerji absorbe etme kapasitelerinin fazla olması dolayısıyla çarpma durumunda aracın emniyetini sağlarlar, diğer çeliklere göre düşük sac kalınlığında kullanıldıklarında ihtiyacı karşılayabildikleri için benzer çeliklere kıyasla parça ağırlığını %15-20 oranında azaltırlar ve araç ağırlığını azaltarak yakıt tüketimini azaltırlar (Bilir, 2014) (Zeytin ve diğ., 2008). Dolayısıyla şekil alabilirliği yüksek olan dual fazlı çeliklerin, otomobil parçalarında kullanılmasıyla toplam araç ağırlığı azaltılır ve yakıt tüketiminde tasarruf sağlanır (Köse, 2015). Araçlarda kaputta, ön ve arka akslarda, kapılarda kullanılır ve araç çarpışma bölgelerinden yapısal gövde elemanlarına kadar geniş bir kullanıma sahiptir (Efe diğ., 2019).

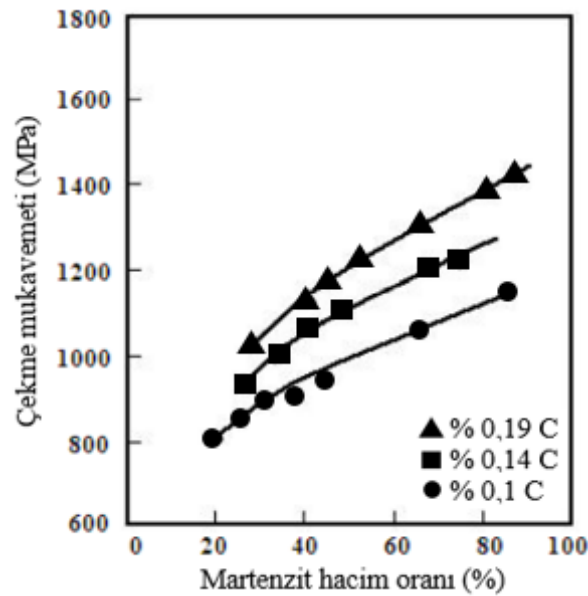
Dual fazlı çeliklerin pekleşme davranışı, martenzit içeriğinden ve martenzit adacıklarının boyutundan etkilenmektedir. Pekleşme oranları martenzit adacıklarının boyutunun azalmasıyla artmakta ve Şekil 3.21’de görüldüğü gibi martenzit içeriğinin artmasıyla akma ve çekme dayanımları da artmaktadır (Mazinani, 2006).



Şekil 3.21. Farklı karbon konsantrasyonlarına ve martensit içeriğine sahip %1,5 Mn dual fazlı çeliklerin, ferritik çeliğe kıyasla 760°C'de kritik olarak tavllanmış gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrileri (Mazinani, 2006)

3.4.2.4. Çekme Mukavemeti

Şekil 3.22'de gösterilen dual fazlı çeliklerdeki martenzit hacim oranına bağlı olarak çekme mukavemetlerindeki değişim incelendiğinde martenzit hacim oranının artmasıyla ve karbon içeriğinin fazla olmasıyla çekme mukavemeti değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir (Özdemir, 2017).



Şekil 3.22. Martenzit hacim oranının çekme mukavemetiyle ilişkisi (Özdemir, 2017)

3.4.2.5. Kopma Mukavemeti

Dual fazlı çeliklerin çekme testlerinde kopma durumu, mikro boşluk oluşumuyla onu takip eden çatlak oluşumu sonucunda meydana gelir. Çatlak oluşumu mikroyapıdaki sert faz olan martenzit üzerinde meydana gelmektedir. Martenzitte boşlukların oluşması sebebiyle martenzit- ferrit ara yüzeylerinin ayrışması dolayısıyla gevrek kırılma meydana gelir (Özdemir, 2017). Ancak yapılarında süneklik kazandıran ferrit fazı bulundurmaları dolayısıyla sünek kırılma davranışı sergilerler (Mazinani, 2006).

3.4.2.6. Kırılma Davranışı

Dual fazlı çelikler sert ve deforme olmayan martenzit fazı içermelerine rağmen sünek kırılma davranışı sergilerler. Martenzit karbon içeriğine bağlı olarak gevrek bir fazdır ve kırılması boyun verme gibi homojen olmayan deformasyonlarda yüksek gerinimlerde gerçekleşebilir. Ayrıca deformasyonla ferritin ve martenzitin plastik uyumsuzluğundan dolayı arayüzeylerinde ayrışma oluşabilir. Dual fazlı çeliklerdeki sünek kırılma davranışı, martenzit çatlamasıyla meydana gelen veya ferrit- martenzit arayüzeylerindeki kohezyon sebebiyle oluşan mikro boşlukların genellikle sünek olan ferrit matrisi içerisinde büyümesiyle meydana gelmektedir. Dolayısıyla sünek kırılma davranışı; mikro boşlukların oluşması, boşlukların büyümesi ve boşlukların birleşmesi sonucunda çukurlu kırılma yüzeyinin oluşması şeklinde üç aşamada gerçekleşmektedir (Mazinani, 2006).

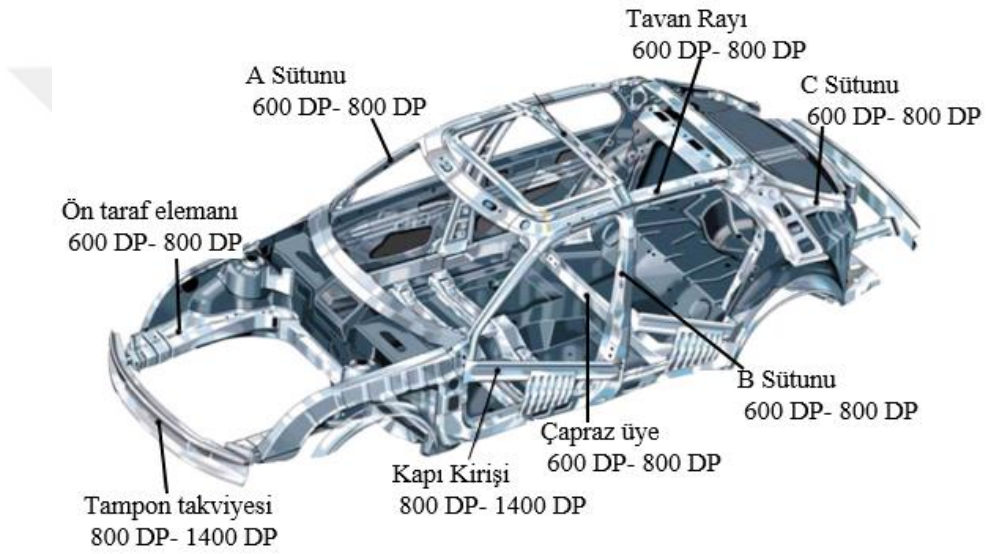
Bu çeliklerdeki martenzit boyutu, içeriği ve morfolojisi kırılma davranışını etkiler. Martenzit adacıklarının büyük, birbirine bağlı ve bantlı yapıda olması durumunda, ince ve birbirinden izole olan martenzitlere göre zayıf kırılma özellikleri gözlenir (Mazinani, 2006).

Tablo 3.3'te dual fazlı çeliklerin kalitelerinin mekanik özellikleri gösterilmektedir. Buna göre dual fazlı çelik kalitesinin artmasıyla akma ve çekme mukavemetleri artmakta, % uzama değerinin düşmesi dolayısıyla sünekliği azalmakta, n pekleşme üssü değeri de azalmaktadır.

Şekil 3.23, Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'te dual fazlı çeliklerin kullanıldığı otomobil parçaları gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Dual fazlı çelik kalitelerinin mekanik özellikleri (Zeytin ve diğ., 2008)

Ürün	Akma Mukavemeti [MPa]	Çekme Mukavemeti [MPa]	Uzama [%]	n değeri
DP600	350	650	27-30	0,16
DP700	400	720	21-24	0,15
DP800	450	810	16-22	0,14
DP900	550	900	11-15	0,13
DP1000	600	1050	8-13	0,12



Şekil 3.23. SAAB (Svenska Aeroplan AktieBolaget) otomotiv şirketinde çeşitli DP çelik derecelerinden üretilen otomobil parçaları (Fonstein, 2017)



Şekil 3.24. Kalınlığı 1,35 mm olan DP1180 çeliğinin tamponda uygulanması (Köse, 2015)



Şekil 3.25. DP980 çeliğinin B sütunu desteğinde uygulaması (Köse, 2015)

3.4.3. Dual Fazlı Çeliklerin Literatür İncelemesi

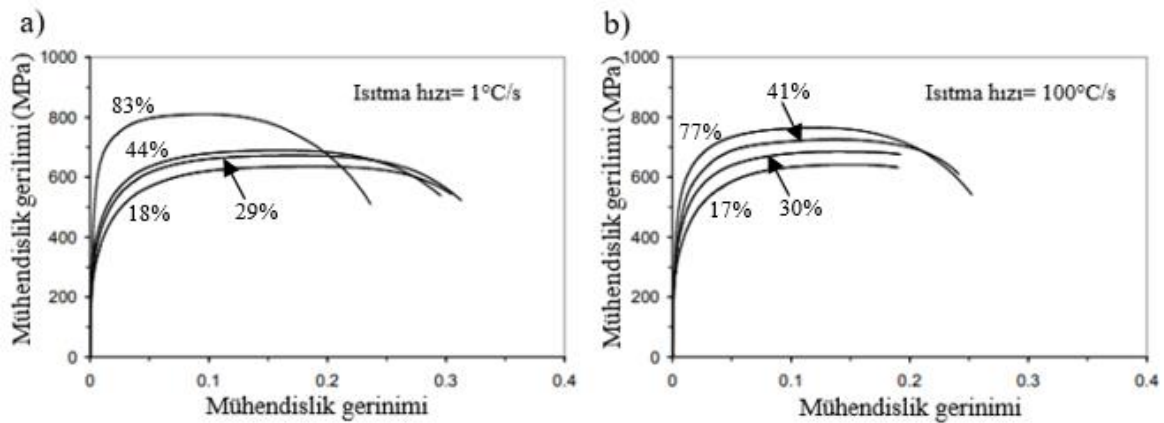
M. Mazinani ve W. J. Poole yaptıkları çalışmada; düşük ve yüksek ısıtma hızlarını takiben farklı sıcaklıklarda kritik sıcaklıklar arası tavlama ile elde ettikleri iki farklı martenzit içeriğine ve morfolojiye sahip dual fazlı çelik numunelerdeki, martenzitin deformasyon davranışını ve bunun düşük karbon içeriğine sahip DP çeliğinin çekme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Başlangıç malzemesi olarak mikroyapısında ferrit matrisi içerisinde gömülü halde %8-10 oranında bantlı perlit bulunduran soğuk haddelenmiş bir düşük karbonlu çeliği seçmişlerdir. Dual fazlı çeliklerin mekanik özelliklerine kurucu fazların mukavemetinin, morfolojisinin, hacim oranının etki ettiğinden ve deformasyon sırasında martenzitin elastik kalıp kalmayacağının da dikkate alınması gereken bir etki olduğundan bahsetmişlerdir. Bu amaçla bir C-Si-Mn dual fazlı çelikte martenzitin deformasyon davranışını araştırarak martenzitin plastisitesinin, çekme özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Bunun için Tablo 3.4'teki deneysel koşullar altında ölçü uzunluğu 20 mm olan numunelere, MTS çekme makinesini kullanarak $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında çekme testleri uygulamışlardır. Çekme numunelerinin farklı kırılma bölgelerindeki martenzit adalarının kalınlık ölçümünü taramalı elektron mikroskopunu (SEM) kullanarak ölçüm mikroyapılarının görüntü analizi yoluyla martenzit fazındaki plastik gerinimi elde etmişlerdir (Mazinani ve Poole, 2007).

Tablo 3.4. DP çelik numunelere uygulanan ısıtma işlem parametreleri ve martenzit içerikleri (Mazinani ve Poole, 2007)

Isıtma hızı (°C/s)	Kritik sıcaklık (°C)	Tutma süresi (s)	Martenzit içeriği (%)
1	755	60	18
	780	60	29
	795	60	32
	820	60	44
	850	120	83
100	730	60	17
	740	60	25
	760	60	30
	780	60	41
	795	60	52
	810	60	77

Tablo 3.4'teki farklı ısıtma hızları kullanıldığında (1 °C/s, 100 °C/s) yaklaşık aynı martenzit hacim oranını elde etmek için kritik sıcaklıklar arası tavlama işleminde farklı sıcaklıkların kullanıldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca üretilen DP çeliklerdeki martenzit tane yapısını, düşük ısıtma hızı kullanıldığında ferrit tane sınırları üzerinde uzanan ince ölçekli ağ şeklinde elde ederken yüksek ısıtma hızı kullanıldığında daha büyük ve çoğunlukla bantlı şekilde elde etmişlerdir (Mazinani ve Poole, 2007).

Şekil 3.26 ve Tablo 3.5 incelendiğinde her iki ısıtma hızı için martenzit hacim fraksiyonundaki artışla DP çeliklerin akma ve çekme dayanımlarının arttığını ancak uniform şekil değiştirmelerinin azaldığını gözlemlemişlerdir (Mazinani ve Poole, 2007).



Şekil 3.26. Farklı ısıtma hızlarıyla elde edilen farklı martenzit içeriğine sahip DP çeliklerinin mühendislik gerilme-gerinim eğrileri: a) düşük ısıtma hızı ve b) yüksek ısıtma hızı (Mazinani ve Poole, 2007)

Tablo 3.5. Farklı DP çeliklerin çekme özellikleri (Mazinani ve Poole, 2007)

Isıtma hızı	1 °C/s				100 °C/s			
Martenzit içeriği (%)	18	29	44	83	17	30	41	77
Akma dayanımı (MPa)	293	320	360	540	290	353	360	495
Çekme dayanımı (MPa)	635	672	688	810	642	685	725	768
Gerçek üniform gerinim	0.16	0.15	0.14	0.09	0.14	0.13	0.12	0.11
Gerçek kırılma dayanımı (MPa)	944	1132	1211	1445	871	1000	1082	1434
Gerçek kırılma gerinimi	0.67	0.78	0.83	1.06	0.48	0.54	0.59	0.99

Tablo 3.6’da ise martenzit hacim oranının karbon içeriğine etkisi gösterilmiş ve martenzit hacim oranının artmasıyla karbon içeriğinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Karbon içeriği düşük olan martenzitin plastik deformasyona daha kolay uğraması bekleneneğinden, aynı durumun temperlenmiş numune için de geçerli olacağından bahsetmişler ve bunun nedenini temperleme sonrası martenzitin mukavemetinin azalması dolayısıyla plastik şekil değişimi gösterebilmesi olarak açıklamışlardır. Bu nedenle %17 martenzit içeriğine sahip numunelerden sadece su verilmiş olanın çekme esnasında elastik şekil değişimine uğradığını, ek olarak temperlenmiş olanın plastik deformasyona uğradığını gözlemlemişlerdir (Mazinani ve Poole, 2007).

Tablo 3.6. Farklı DP çelik numunelerinde martenzit plastik gerinimi ve karbon içeriği (Mazinani ve Poole, 2007)

Martenzit içeriği (%)	17	17	30	41
Martenzitin tahmini karbon içeriği (% ağırlıkça)	0.33	-	0.19	0.14
Koşullar	Q	Q-T	Q	Q
Uzak alan gerinimi	0.07	0.08	0.07	0.06
Martenzitte plastik gerinim	~ 0	0.04	0.02	0.04

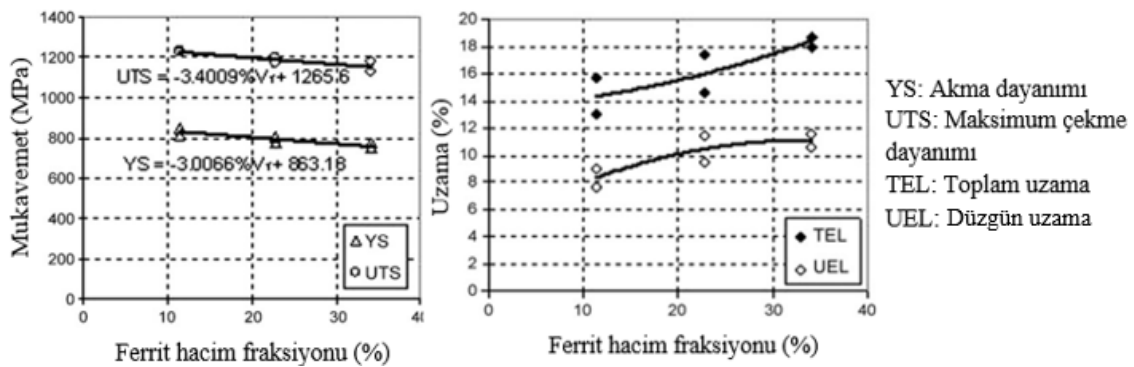
Q: Su verilmiş, Q- T: Su verilmiş- temperlenmiş

Sonuç olarak martenzit hacim oranındaki artışla karbon içeriğinin azaldığına, dolayısıyla akma dayanımının da azalarak bu dayanım değerinin martenzit hacim oranıyla ters orantılı olduğuna ulaşmışlardır. Ayrıca temperleme işleminin martenzit plastisitesi üzerindeki etkisini değerlendirerek bu işlemin martenzitin mukavemetini azalttığından ve bu fazın deformasyon davranışını elastikten elasto-plastiğe değiştirdiğinden bahsetmişlerdir. Temperleme işleminin ve martenzit içeriğinin artışının martenzitin plastisitesini benzer bir şekilde artırdığı sonucuna ulaşmışlardır (Mazinani ve Poole, 2007).

A. P. Pierman ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, martenzit fazının hacimsel oranının dual fazlı çelikte artmasıyla kopma ve akma dayanımlarının arttığından ancak belirli karbon oranında martenzit miktarındaki artışla malzemedeki bükülebilirliğin arttığından bahsetmişlerdir. Karbon miktarındaki artışla malzeme sertliğinin arttığına ulaşmışlardır (Pierman, 2014).

K. S. Choi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, DP980 çeliğinde hacimsel olarak martenzit fazının fazla olmasıyla mekanik özelliklerindeki değişimi gözlemlemişlerdir. Bu doğrultuda malzemenin sertliğinin ve akma dayanımının arttığından ancak kopma gerilmesinin azaldığından bahsetmişlerdir (Choi ve diğ., 2009).

M. R. Akbarpour ve A. Ekrami yaptıkları çalışmada AISI 4340 çeliğini 910°C'de 1 saat ısıtmış sonrasında doğrudan 750°C'de farklı hacim fraksiyonları elde etmek amacıyla 30, 60 ve 80 dakika bekletme süreleriyle kritik sıcaklıklar arası tavlama işlemi gerçekleştirilerek %11,3, %22,8 ve %34,1 oranında ferrit hacim oranı içeren mikroyapılar elde etmişlerdir. Son olarak numuneleri 350°C'de 40 dakika tutup ardından oda sıcaklığına kadar hava ile soğutmuşlar ve elde edilen dual fazlı ferrit-beynit yapıya oda sıcaklığında 1 mm/dk hızda, $4,6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinme oranında çekme testi uygulamışlardır. Şekil 3.27'den görüldüğü gibi ferrit hacim oranının artmasıyla akma ve çekme dayanımı değerlerinin doğrusal olarak azaldığı ve süneklik (% uzama) değerlerinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır (Akbarpour ve Ekrami, 2008).

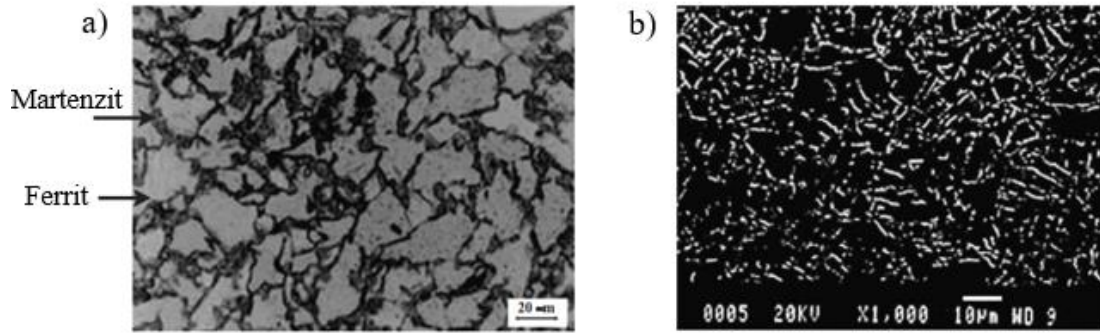


Şekil 3.27. DP çeliklerde ferrit hacim oranının bir fonksiyonu olarak mukavemet ve % uzama (Akbarpour ve Ekrami, 2008)

P. Movahed ve arkadaşları yaptıkları çalışmada dual fazlı çelik yapısındaki martenzit ve ferrit fazlarının miktarının eşit olmasıyla malzemenin süneklik ve dayanım değerlerinin

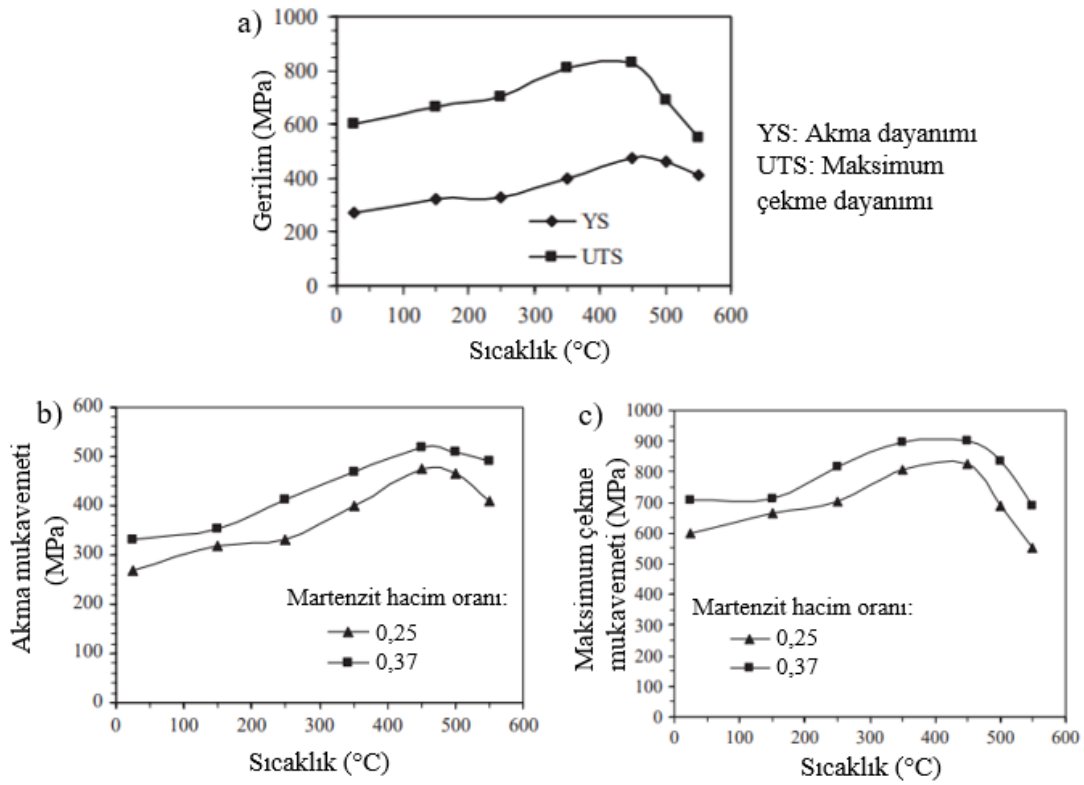
iyileştiğine, martenzit hacim oranındaki artışın daha da artmasıyla sünekliğin ve çekme dayanımının azaldığına ulaşmışlardır (Movahed ve diğ., 2009).

A. Ekrami yaptığı çalışmada bir karbon manganez çeliğine ısıtma işlemi uygulanarak farklı martenzit morfolojisine ve hacim fraksiyonuna sahip çift fazlı mikroyapılar elde etmiştir. Çift fazlı mikroyapıda Şekil 3.28 (a)'daki ağıllı martenzitin farklı hacim fraksiyonlarını elde etmek için normalize edilmiş çubuk şeklindeki numuneleri kritik sıcaklıklar arası tavlama işlemiyle 740°C ve 780°C sıcaklıklarda 30 dk ısıtmış ve ardından su vermesiyle 0,25 ve 0,37 martenzit hacim oranı elde etmiştir. Şekil 3.28 (b)'deki lifli martenziti elde etmek için ise normalize edilmiş çubuk şeklindeki numuneleri 1000°C'de 30 dk ısıtıp su vermiş, sonrasında tekrar 740 °C'de 30 dakika ısıtıp su vermesiyle (çifte su verme) 0,25 martenzit hacim oranı elde etmiştir. Ürettiği bu dual fazlı çeliklere 25-550°C sıcaklıkları arasındaki farklı sıcaklıklarda 2 mm/dk hızda çekme testi uygulamıştır (Ekrami, 2005).

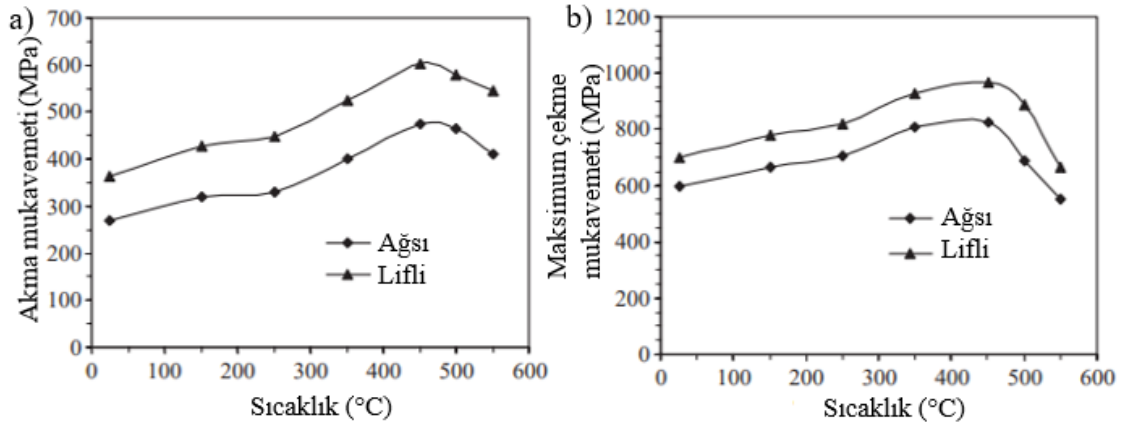


Şekil 3.28. Martenzit hacim oranı 0,25 olan çeliklerin mikroyapısı: (a) ağıllı martenzit, (b) lifli martenzit (beyaz) (Ekrami, 2005)

Şekil 3.29 (a)'dan görüldüğü gibi çekme testinin uygulandığı sıcaklığın 450°C'ye kadar artmasıyla akma ve çekme dayanımlarının arttığına, 450°C'den sonra ise sıcaklık artışıyla yumuşamaya ve martenzit fazının temperlenmesi kaynaklı akma ve çekme dayanımlarının azaldığına ulaşmıştır. Şekil 3.29 (b) ve Şekil 3.29 (c)'den ise martenzit hacim fraksiyonunun artmasıyla akma ve çekme dayanımlarının arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca benzer şekilde Şekil 3.30'dan martenzit morfolojisinin ağılıdan lifli morfolojiye dönüşümüyle akma ve çekme dayanımlarının arttığı sonucuna ulaşmıştır. Dolayısıyla martensit hacim fraksiyonu artırılarak veya martensit morfolojisi ağıllı yapıdan lifli martenzite dönüştürülerek akma ve çekme mukavemetlerinin artırıldığı sonucuna ulaşmıştır (Ekrami, 2005).



Şekil 3.29. Farklı sıcaklıklarda: a) 0,25 hacim oranında ağırlı martenziti olan çelikte akma gerilimi ve nihai çekme mukavemeti, b) ağırlı martenzit hacim oranının akma gerilimiyle ilişkisi, c) ağırlı martenzit hacim oranının nihai çekme mukavemetiyle ilişkisi (Ekrami, 2005)



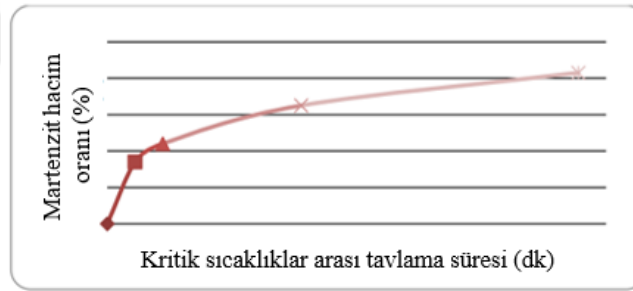
Şekil 3.30. Martensit morfolojisinin farklı sıcaklıklarda: a) akma gerilimi ve b) nihai çekme mukavemeti üzerindeki etkisi (Ekrami, 2005)

3.4.3.1. Dual Fazlı Çeliklerin Erozyon Aşınma Davranışının Literatür İncelemesi

P. Swaroop ve arkadaşları yalın karbonlu dual fazlı çeliklere uygulanan ısıtıl işlemin mekanik özelliklerdeki ve aşınma davranışındaki etkilerini incelemek amacıyla çekme

testi, sertlik testi, darbe testi ve katı partikül erozyonu testlerini (30° çarpma açısında, 20 m/s hızda, alümina parçacıklarla) gerçekleştirmişlerdir. Öncelikle numuneleri 910°C'de 5 dakika bekletip ardından havada soğutarak normalleştirmişlerdir. Sonrasında dual fazlı çeliklerin eldesinde mikroyapıdaki martenzit ve ferrit fazlarının farklı oranlarda elde edilebilmesi için 780°C sıcaklıkta çeşitli sürelerde kritik sıcaklıklar arası tavlama (ICA) ve ardından su verme (WQ) işlemlerini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen tüm dual fazlı çeliklerin mikroyapısında ferrit matris içinde dağılmış martenzit adalarının yer aldığını ve Şekil 3.31'de gösterildiği gibi aynı kritik sıcaklıklar arası tavlama sıcaklığında, tavlama süresinin artmasıyla martenzit oranının arttığını gözlemlemişlerdir (Swaroop ve diğ., 2017).

Tablo 3.7'den de martenzit oranının en fazla olduğu 19 dakikalık kritik sıcaklıklar arası tavlama durumunda aşınmanın en az olduğunu ifade etmişlerdir. Bunu martenzit oranındaki artışla çeliğin sertleşmesine ve deformasyona karşı direnmesine bağlamışlardır (Swaroop ve diğ., 2017).



Şekil 3.31. 780°C kritik sıcaklıklar arası tavlama süresi ile martenzit hacim fraksiyonunun (% MvF) değişimi (Swaroop ve diğ., 2017)

Tablo 3.7. Kritik sıcaklıklar arası tavlama süresine bağlı olarak erozyon testinde meydana gelen ağırlık kaybı (Swaroop ve diğ., 2017)

Numune özellikleri	Toplam ağırlık kaybı (mg)
780°C, 2 dk, su verme	0.199
780°C, 3 dk, su verme	0.166
780°C, 4 dk, su verme	0.163
780°C, 9 dk, su verme	0.162
780°C, 19 dk, su verme	0.141

Martenzitin; sünek olan ferrit matrisi içerisinde dağılan sert ve yük taşıyan bir faz olmasından dolayı mikroyapıdaki miktarının hacimsel olarak artmasıyla maksimum çekme mukavemetinde (UTS) artışa neden olacağından bahsetmişler, malzemelerin maksimum çekme mukavemetinde ve sertliğinde meydana gelen artışla erozif aşınma azalırken tokluğun artmasıyla da aşınmanın azaldığı sonucuna ulaşmışlardır (Swaroop ve diğ., 2017).

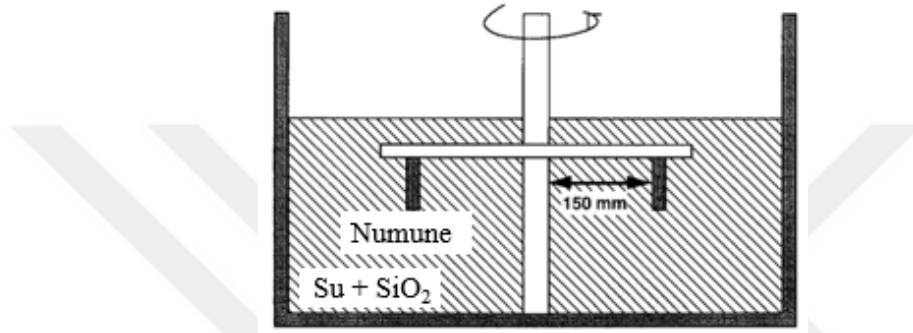
Aşınan DP çelik yüzeylerinin SEM gözleminden aşınma mekanizmasının kesme ve sürme mekanizmalarıyla gerçekleşen sünek mod olduğuna ulaşmışlar ve mikroyapıdaki martenzit miktarının artmasıyla aşınmanın karışık kırılma moduna (sünek ve gevrek kırılma) dönüştüğünü gözlemlemişlerdir. Bu malzemeler bir miktar sünekliğe ve plastik deformasyon eğilimine sahip olduğu için malzemeye gelen gerilmeler dağıtılacağından ve çatlak oluşumu önleneyeceğinden erozyon direncinin yüksek olması istendiğinde bir miktar sünekliğe sahip, sertliği yüksek olan malzemelerin en iyi seçim olacağından bahsetmişlerdir (Swaroop ve diğ., 2017).

S. Endo ve M. Nagae yaptıkları çalışmada farklı sıcaklık aralığında uyguladıkları ısıtma işlemleri elde ettikleri dual fazlı çeliklerin mikroyapısındaki martenzit hacim fraksiyonunun malzeme özellikleri (sertliği, pekleşme indeksi, erozyon direnci) üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çünkü bulamaç ortamında erozyona maruz kalan bir çeliğin sertliğinin ve pekleşme indeksinin artırılmasıyla mükemmel bir erozyon direnci elde edilebilmektedir. Bu nedenle dual fazlı çelikleri erozyona karşı daha dayanıklı hale getirmek amacıyla sertlik ve pekleşme indeksiyle ilgili olarak ferrit- martensit fazlarının hacim fraksiyonu optimizasyonunu yapmışlardır (Endo ve Nagae, 1996).

Yapısında ferrit ve martenzit fazlarını bulunduran dual fazlı çeliklerin, benzer dayanımlı ferrit-perlit veya beynit mikroyapılı çeliklere göre şekillendirilebilirliğinin iyi ve pekleşme indekslerinin yüksek olduğundan bahsetmişlerdir. Dolayısıyla erozyon direncinin, şekillendirilebilirliğin ve kaynaklanabilirliğin istendiği uygulamalarda dual fazlı çelikler tercih edilebilmektedir. Dual fazlı çeliklerin üretimi için çelik malzemeyi $\alpha+\gamma$ sıcaklık aralığındaki değişen sıcaklıklarda yeniden ısıtıp 1800 saniye tuttuktan sonra 30°K/s hızda soğutma işlemi uygulamışlar ve yeniden ısıtma sıcaklığının değiştirilmesiyle mikroyapıdaki fazların hacim oranlarını, kimyasal bileşimlerini değiştirmeyi amaçlayarak malzemelere çekme ve bulamaç erozyonu testini

uygulamışlardır. Yeniden ısıtma işlemiyle ferritin (α) bir kısmını östenite (γ) dönüştürdükten sonra östenitin yüksek soğutma hızında martenzit dönüşümünü gerçekleştirerek dönüştürülmemiş ferrit ile dönüştürülmüş martensitten oluşan çift fazlı mikroyapıyı elde etmişlerdir (Endo ve Nagae, 1996).

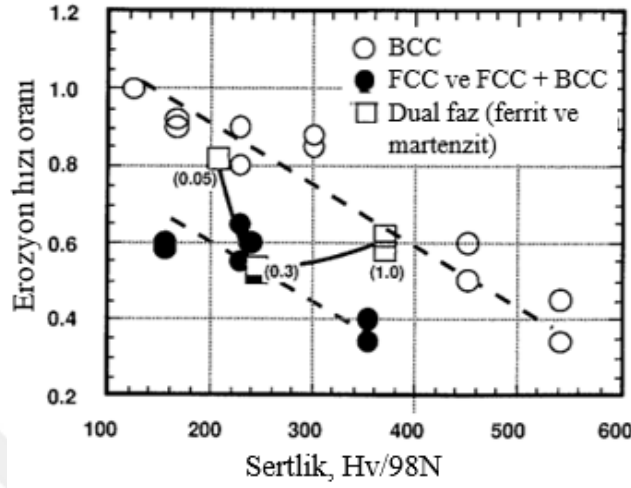
Şekil 3.32’de şematığı gösterilen bulamaç erozyonu testi için 60 mm uzunluğunda, 10 mm çapında silindirik numuneleri döner tablaya sabitlenmişler ve aşındırıcı olarak ortalama çapı 700 μm olan SiO_2 ile su kullanmışlardır (Endo ve Nagae, 1996).



Şekil 3.32. Bulamaç erozyonu testi için test cihazının şematik çizimi (Endo ve Nagae, 1996)

Şekil 3.33’te % 0,15 C, % 1,5 Si ve % 1,5 Mn içeren, ısıl işlem koşullarına bağlı olarak martenzit hacim oranı 0,05 ila 1,0 arasında değiştirilen dual fazlı çeliğin sertlik ve erozyon oranı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Burada erozyon oranı, test edilen çeliklerin ağırlık kaybının aynı anda test edilen standart SS400 (düşük karbonlu çelik) numunelerin ağırlık kaybına oranıyla elde edilmiştir. Şekil 3.33’te martenzit hacim oranları parantez içerisinde gösterilmiştir. Buradaki içi dolu işaretlerle gösterilen daha yüksek pekleşme indekslerine sahip östenitik (FCC, yüzey merkezli kübik) ve östenit-ferrit dual fazlı (FCC+BCC) çeliklerin, içi boş işaretlerle gösterilen daha düşük pekleşme indekslerine sahip ferritik çeliklere (BCC, hacim merkezli kübik) göre daha iyi erozyon direnci gösterdiğinden bahsetmişlerdir. Dolayısıyla daha yüksek pekleşme indeksine sahip çeliklerin erozyona karşı daha dirençli olduğuna ulaşmışlardır. Ayrıca ferrit- martenzit dual fazlı çeliklerde martenzit hacim oranını bir miktar artırdıklarında (0,05’ten 0,3’e) erozyon oranının azaldığını ve ilk duruma göre (0,05) tam martenzit mikroyapısında (1,0) sertliğin yüksek olmasına rağmen erozyon oranının arttığını gözlemlemişlerdir. Yani martenzit hacim oranının bir yere kadar artırılmasıyla erozyona karşı direncin arttığına

daha da arttırılmasıyla erozyon oranının olumsuz yönde etkilendiğine ulaşmışlardır (Endo ve Nagae, 1996).



Şekil 3.33. Sertliğin erozyon oranına etkisi (Endo ve Nagae, 1996)

Benzer sertlikteki çeliklere kıyasla daha yüksek pekleşme indeksine sahip ferrit-martenzit dual fazlı çeliklerin daha düşük pekleşme indekslerine sahip çeliklere göre daha iyi erozyon direnci gösterdiğinden bahsetmişlerdir. Dolayısıyla ferrit- martenzit dual fazlı çeliklerde en yüksek erozyon direncinin 0,3 martenzit hacim oranında meydana geldiğine ve bu erozyon direncinin standart bir SS400 çeliğine (düşük karbonlu çelik) göre neredeyse iki kat daha fazla olduğuna ulaşmışlardır (Endo ve Nagae, 1996).

A. Sharma ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kritik sıcaklıklar arası tavlama ile geliştirdikleri üç farklı martenzit hacim fraksiyonuna sahip (0,36, 0,59 ve 0,72) orta karbonlu DP çeliklerinin kuru koşullarda erozif aşınmasını karakterize etmeyi amaçlamışlardır. Bunun için 850°C'de 30 dakika normalize edilip yapıyı homojenleştirmek için havada soğutulan % 0,4 C içeren normalleştirilmiş numuneleri, farklı martenzit hacim fraksiyonları elde etmek için 740°C sıcaklıkta sırasıyla 2, 4 ve 5 dakika süreyle (DP2, DP4, DP5 olarak adlandırmışlar) kritik sıcaklıklar arasında tavlayıp dual fazlı çelik yapıyı geliştirmelerinin ardından su vermişler ve martenzit hacim fraksiyonunu 0,36, 0,59 ve 0,72 olarak gözlemlemişlerdir. Tablo 3.8'de tüm malzemelerin mekanik özelliklerine yer vermişler ve sert olan martenzit miktarının artmasına bağlı olarak sünekliğin azalmasına karşın sertliğin ve maksimum çekme mukavemetinin arttığına ulaşmışlardır (Sharma ve diğ., 2015).

Tablo 3.8. Çelik numunelerin mekanik özellikleri (Sharma ve diğ., 2015)

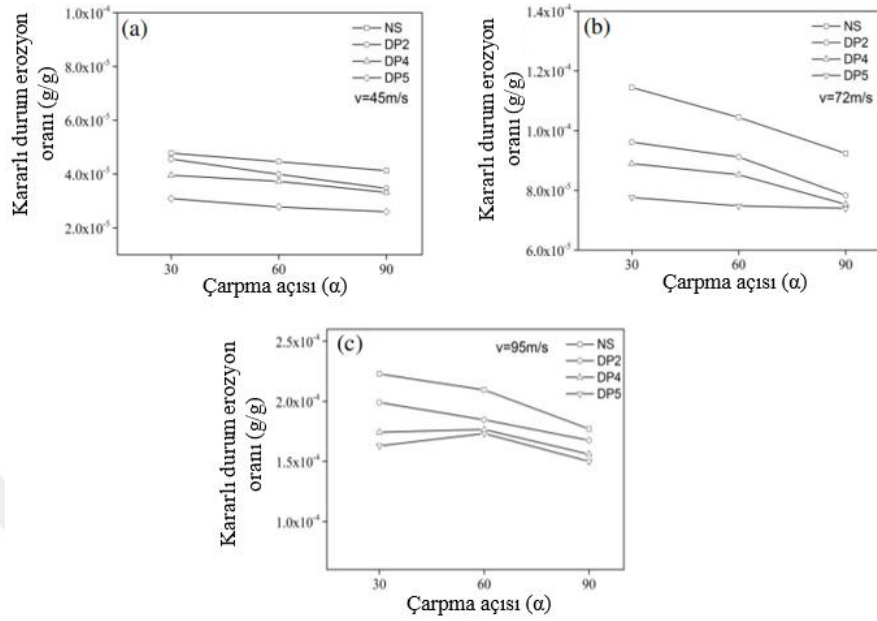
Özellik	Malzemeler			
	NS	DP2	DP4	DP5
Sertlik (HV)	189	298	362	392
Maksimum çekme mukavemeti (MPa)	720	812	952	1080
Kopmada uzama (%)	21	15	8	4
Martenzit hacim fraksiyonu (%)	-	36	59	72

Erozif aşınma testlerini çarpma açısının ve hızının etkisini incelemek için üç farklı çarpma açısında (30°, 60° ve 90°), üç farklı çarpma hızında (45 m/s, 72 m/s ve 95 m/s), aşındırıcı olarak köşeli silis kumu (ortalama boyutu 200 µm) kullanarak 5 dakika süre boyunca oda sıcaklığında gerçekleştirmişlerdir. Mikroyapı ile aşındırıcı davranışı arasındaki ilişkiyi gözlemlemek için 29 mm x 29 mm x 5 mm boyutlarındaki DP çeliklerine ve normalleştirilmiş çeliğe (NS) aşınma testlerini uygulamışlardır (Sharma ve diğ., 2015).

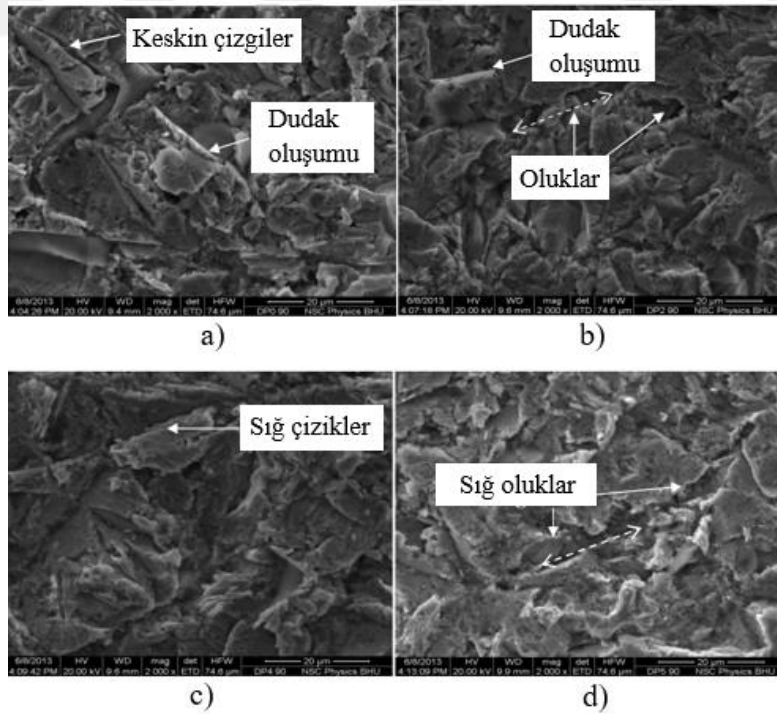
Dual fazlı çeliklerin erozyon oranının, düşük açı ve yüksek hızda (30° ve 95 m/s) kayma ve aşındırıcıların birleşik etkisinden dolayı daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Şekil 3.34'ten tüm çelikler için erozyon oranlarının; darbe açısının artmasıyla azaldığına, çarpma hızının artmasıyla arttığına ve belirli bir açıda en yüksek aşınmanın normalize edilmiş çelikte görülüp martenzit oranının arttığı DP5 çeliğine doğru gidildikçe erozyon oranının azaldığına ulaşmışlardır. Çarpma açısının artmasıyla DP5 çeliğinin erozyon oranındaki değişikliğinin az olmasından dolayı tüm açılarda aynı aşınma direncini sürdürdüklerinden bahsetmişler ve DP5 çeliğinin diğer malzemelere göre maksimum aşınma direnci göstermesini, dual fazlı çeliklerdeki martenzit miktarının artmasıyla meydana gelen sertlik artışına bağlamışlardır (Sharma ve diğ., 2015).

Ayrıca tüm malzemelerin aşınmış yüzeylerinin SEM mikrograflarını incelemeleri sonucunda Şekil 3.35'te gösterildiği gibi normalize edilmiş çelikte dudak oluşumu ve mikro sürme, DP2 çeliğinde çizik ve dudak oluşumu gözlemişlerdir. DP4 ve DP5 çeliklerinde ise dudak oluşumu gözlemlemeyip aşındırıcıların kırılğan faz olan martenzit adalarını aşındırmasıyla yüzeyde sığ oluklar oluşturup malzemenin kaldırılmasını sağladığını gözlemlemişlerdir. Dolayısıyla normalize edilmiş çelikten DP5 çeliğine gidildikçe meydana gelen olukların sığlaştığını gözlemleyerek bu çalışmadaki

malzemeler arasında DP5 çeliğinin aşınmaya en dayanıklı malzeme olduğundan bahsetmişlerdir (Sharma ve diğ., 2015).



Şekil 3.34. Çelik numunelerin belirli çarpma hızlarında çeşitli çarpma açılarında göre kararlı durum erozyon oranının değişimi: a) 45 m/s, b) 72 m/s, c) 95 m/s (Sharma ve diğ., 2015)



Şekil 3.35. 90° darbe açısı ve 45 m/s darbe hızında test edilen dual fazlı çeliklerin x2000 büyütmedeki taramalı elektron mikrofrafı (a) NS, (b) DP2, (c) DP4, (d) DP5 (Sharma ve diğ., 2015)

X. Ji ve arkadaşları yaptıkları çalışmada DP980 dual fazlı çeliğinin bulamaç erozyonu koşullarında sergilediği aşınma davranışını; DP600 dual fazlı çelik, AISI 304 östenitik paslanmaz çelik ve ASTM (Amerika Test Etme ve Malzeme Topluluğu) A283C düşük karbonlu çelik ile karşılaştırmışlardır. Bu amaçla sırasıyla 1 mm, 1,2 mm, 2 mm ve 2 mm kalınlıklarındaki DP980, DP600, AISI 304 paslanmaz çelik ve ASTM A283C düşük karbonlu çelik numunelerine Tablo 3.9’da gösterilen ısıt işlemleri uygulamışlardır (Ji ve diğ., 2014).

Erozyon testleri için 20 x 30 mm boyutlarındaki numunelere su ve ağırlıkça %5,68 veya %8,5 SiO₂ partikülü (350-600 µm) içeren bulamacı 30° ve 90°’lik çarpma açılarında 30 dakika boyunca 10,09 ve 13,01 m/s çarpma hızlarında göndermişlerdir. Ayrıca numunelerin sertliklerini Vickers mikrosertlik test cihazı kullanarak ölçmüşlerdir (Ji ve diğ., 2014).

Tablo 3.9. Numunelere uygulanan ısıt işlemler (Ji ve diğ., 2014)

Numune	Isıt işlem
DP980	Alındığı gibi
DP980A	880°C’de 1 saat östenizasyon + fırında soğutma
DP980B	880°C’de 1 saat östenizasyon + 760°C’ye fırında soğutma + su verme
DP980C	880°C’de 1 saat östenizasyon + 670°C’ye fırında soğutma + su verme
DP980D	880°C’de 1 saat östenizasyon + su verme
DP600	Alındığı gibi
AISI 304	Alındığı gibi
ASTM A283C	Alındığı gibi

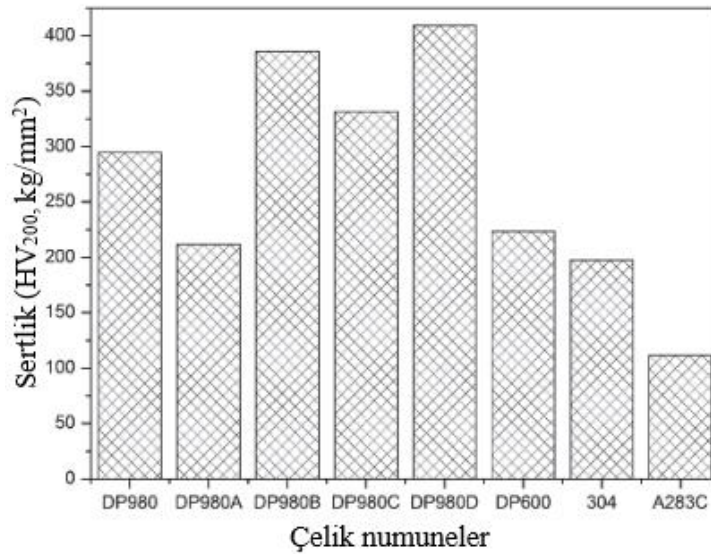
DP980 çeliği soğuk haddeleme, DP600 çeliği sıcak haddeleme sonrasında hızlı soğutma ile üretildiği için DP980’in tane boyutunun DP600’e göre daha ince olduğundan bahsetmişlerdir. Bu nedenle Şekil 3.36’dan görüldüğü gibi soğuk haddelenmiş çeliğin (DP980) pekleşmesi sebebiyle sıcak haddelenene göre (DP600) sertliğinin daha yüksek olduğuna ulaşmışlardır. DP980D numunesinin yüksek miktarda martenzit içermesi dolayısıyla en yüksek sertliğe sahip olduğundan bahsetmişlerdir (Ji ve diğ., 2014).

DP980A numunelerinde östenitleme sonrasında fırında soğutulduğu için ferrit ve perlit fazlarının olduğunu, östenitleme sonrası su verme ile soğutulan DP980B, DP980C ve DP980D numunelerinde ise martenzitlerin oluştuğunu gözlemlemişlerdir. DP980C numunesinin fırında yüksek sıcaklığa daha fazla maruz kaldığı için en büyük tane boyutunu sergilediğine ulaşmışlardır. Bu nedenle Şekil 3.37 (a) ve Şekil 3.37 (b)’den

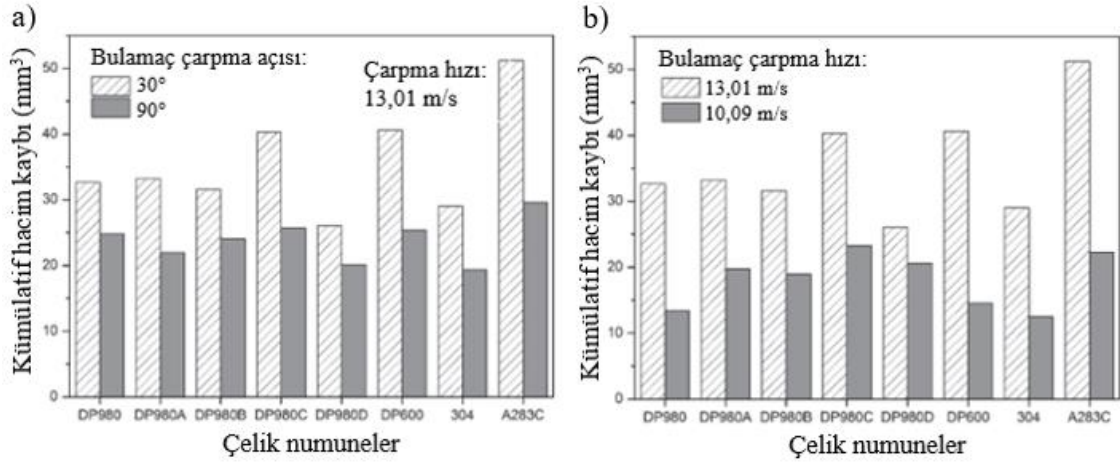
görüldüğü gibi martenzit hacim oranının fazla olduğu en yüksek sertlikteki DP980D numunesinin en düşük erozyon oranı sergilediğine ve dolayısıyla sertliğin erozyon direnci için önemli olduğuna ulaşmışlardır. Tane boyutunun küçük olmasıyla çarpan parçacıklar tarafından oluşturulabilecek plastik deformasyona karşı direnç fazla olacağından DP980A'ya göre daha büyük ferrit taneleri içeren DP980C numunesinin erozyon oranının daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir (Ji ve diğ., 2014).

Ayrıca Şekil 3.37 (a) ve Şekil 3.37 (b)'den DP980 çeliğinin, DP600'den ve ASTM A283C'den daha iyi erozyon direnci sergilediğini; AISI 304'ten daha kötü erozyon direnci sergilediğini gözlemleyip bu durumu AISI 304 çeliğinin iyi bir pekleşme oranına sahip olmasına bağlamışlardır (Ji ve diğ., 2014).

Parçacıkların hedef yüzeye aktardıkları enerji, çarpma hızının karesiyle orantılı olarak arttığı için Şekil 3.37 (b)'den yüksek çarpma hızında (13,01 m/s) kümülatif hacim kaybının daha fazla olduğuna ulaşmışlardır. Uygulanan ısıtma işlemlerin, yüksek çarpma hızlarında erozyon direncini geliştirirken düşük çarpma hızlarında olumsuz olarak etkilediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca DP çeliklerdeki martenzit adacıklarının, yüksek darbe hızlarında gönderilen aşındırıcılar tarafından mikro kesme ve mikrosürme mekanizmalarıyla malzeme kaldırılmasını engellediğinden bahsetmişlerdir (Ji ve diğ., 2014).



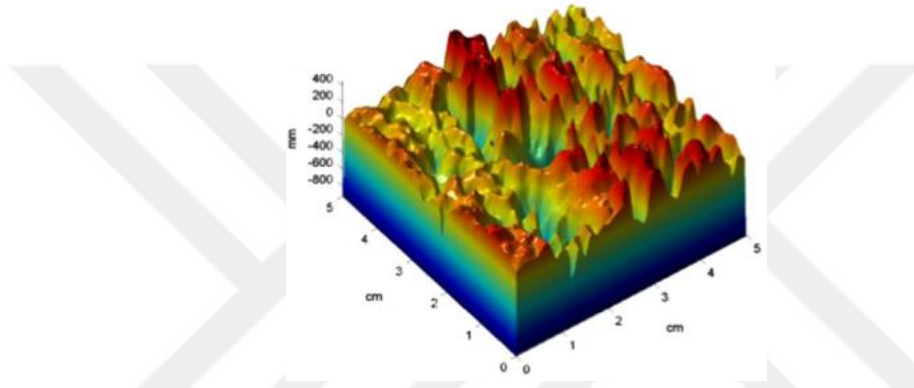
Şekil 3.36. İşlem uygulanmamış DP980 ve ısıtma işlem uygulanmış numuneler (Ji ve diğ., 2014)



Şekil 3.37. Numunelerin bulamaç erozyonunda: a) çarpma açısına bağlı kümülatif hacim kaybı, b) çarpma hızına bağlı kümülatif hacim kaybı (Ji ve diğ., 2014)

4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK DEĞERLERİ

Yüzey pürüzlülüğü, malzeme yüzeyinde genellikle malzemeye uygulanan üretim prosesiyle meydana gelen Şekil 4.1’de görüldüğü gibi girinti ve çıkıntı şeklindeki küçük düzensizliklerin sonucunda oluşmaktadır. Son yüzey kalitesini; parçanın malzemesi, kullanım amacı ve parçaya uygulanan imalat işlemleri (ısıl işlem vb.) etkilemektedir (Hamamcı, 2012). Örneğin talaşlı imalatla iş parçasının işlenmesi sırasında kesici takımların titreşmesiyle oluşan izlere etki eden bazı faktörler nominal yüzeyden sapmalara neden olarak pürüzlülük oluşuma yol açmaktadır (Şah, 2018).



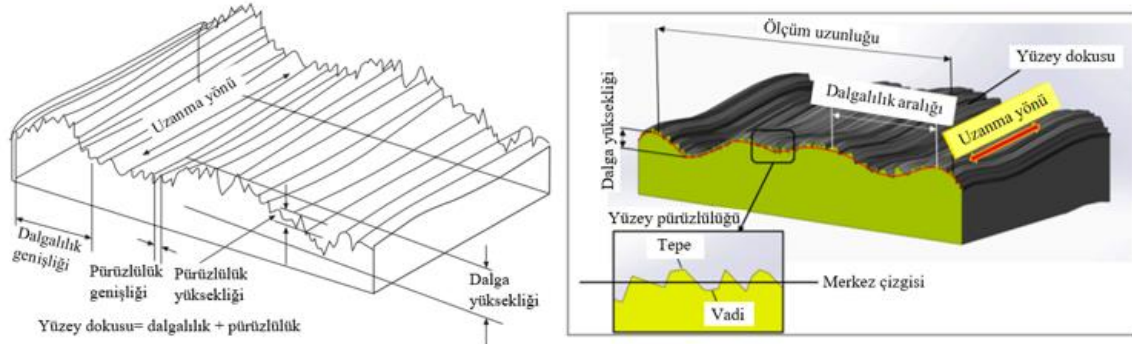
Şekil 4.1. Bir yüzeyin 3 boyutlu pürüzlülük parametreleriyle izometrik görünümü (Sadowski ve diğ., 2016)

Yüzey kalitesinin sağlanması için yüzey pürüzlülüğü önemlidir ve pürüzlülük değerinin düşük olması; enerji ve işçilik maliyetlerini etkilemekte hatta parçaların reddedilmesinde yüksek pürüzlülük değerleri gerekçe olabilmektedir (Hamamcı, 2012). Bu nedenle imalatçılar yüzey pürüzlülüğünü minimum seviyede tutmayı amaçlar (Şah, 2018).

Yüzey pürüzlülüğü; sürtünme, yapışma, aşınma, yorulma gibi performans özelliklerini ve parçanın görünümünü etkilemektedir (Mogahzy, 2008).

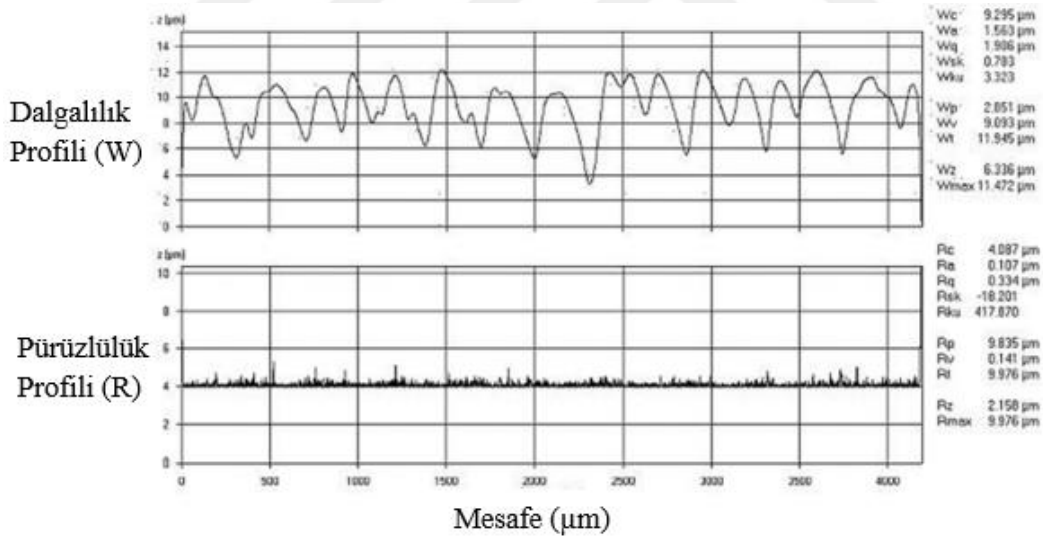
Yüzey dokusu, yüzeyin nominalinden küçük ve yerel sapmalara denilmektedir. Yüzey dokusu; yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılık olmak üzere iki ana düzensizlikten oluşmaktadır. Şekil 4.2’den görüldüğü gibi dalgalı yüzeyler, yüzey pürüzlülüğüne göre daha büyük dalga boyundadır ve takım tezgahlarındaki titreşim gibi lokal sapmalardan dolayı oluşabilir (Kalami ve Urbanic, 2021). Dalgalılık daha geniş aralıkta (daha uzun dalga boyu), yüzeyin nominalinden sapmaların meydana gelmesiyle oluşur (Mogahzy, 2008).

Dalgalılığın üzerine yüksek frekans varyasyonlarının bindirilmesiyle ise yüzey pürüzlülüğü meydana geldiğinden yüzey pürüzlülüğünün ölçülebilmesi için büyük ölçekli gürültüler olan dalgalılık ve nominal geometri profilinin kaldırılması gerekir (Kalami ve Urbanic, 2021).



Şekil 4.2. a) Yüzey dokusu parametreleri, b) yüzey dokusundaki pürüzlülük ve dalgalılığın şematik gösterimi (Mogahzy, 2008; Kalami ve Urbanic, 2021)

Şekil 4.3'te dalgalılığın ve pürüzlülüğün arasındaki fark gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Dalgalılık ve pürüzlülük profilleri arasındaki fark (Furman ve diğ., 2010)

Optik profilometre; malzemelerin yüzey morfolojisini, yüzey pürüzlülüğünü hassas bir şekilde elde etmeyi sağlar. Pürüzlülük parametreleri, malzeme yüzeyindeki çizgisel bir profilin veya alanın (yüzey) taranmasıyla elde edilebilmektedir. Profillerin taranmasıyla elde edilen ve iki boyutlu olan profil pürüzlülük parametreleri “R” harfiyle gösterilirken alanların taranmasıyla elde edilen alansal pürüzlülük parametreleri “S” harfiyle gösterilmektedir. Profil pürüzlülük parametreleri daha yaygındır ancak alan pürüzlülük

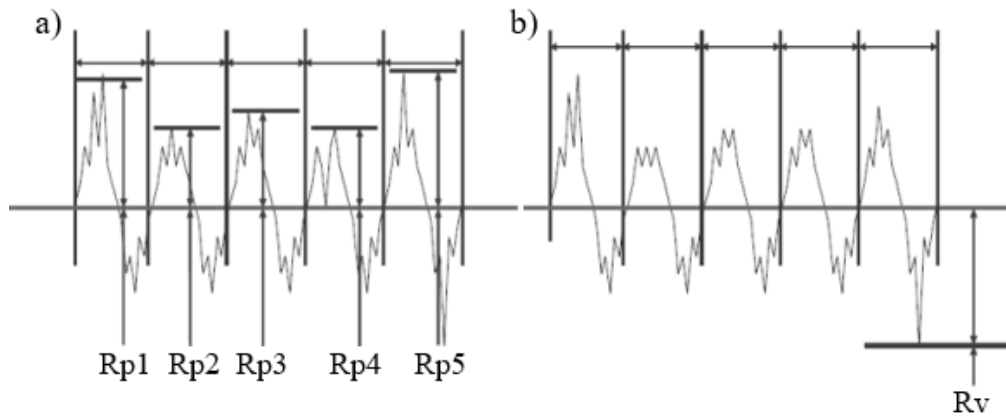
parametreleri malzemenin tüm yüzeyinin taranmasıyla elde edildiği için daha anlamlı değerler vermektedir (Özbeyaz, 2014; Stachowiak, 2004).

Altında ve üstünde kalan pürüzlülük alanlarını eşit olacak şekilde bölen çizgi, profil ortalama çizgisi olarak adlandırılmaktadır. Genellikle pürüzlülük değerleri “ μm ” cinsinden ifade edilmektedir (Hamamcı, 2012).

1- Profil Parametreleri:

R_p (Maksimum tepe yüksekliği): En yüksek tepe noktası ile ortalama çizgi arasındaki mesafedir (Akbaş, 2019).

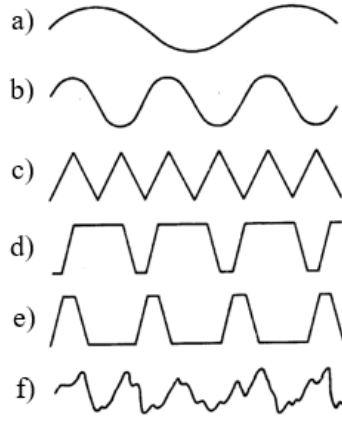
R_v (Maksimum vadi derinliği): En derin vadi ile ortalama çizgi arasındaki mesafedir (Akbaş, 2019). Şekil 4.4’te R_p ve R_v değerleri pürüzlülük profili üzerinde gösterilmiştir.



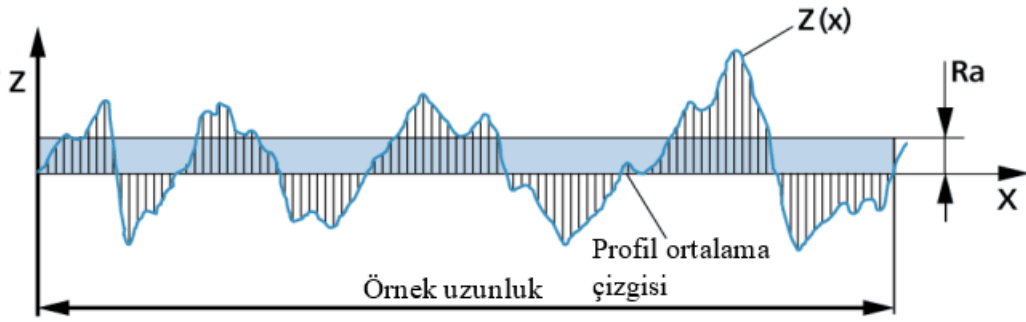
Şekil 4.4. Pürüzlülük profili üzerinde pürüzlülük değerlerinin gösterimi: a) R_p ve b) R_v (Hamamcı, 2012)

R_a (Ortalama pürüzlülük): Evrensel olarak tanınan pürüzlülük parametresi R_a , profilin ortalama çizgisinin üstünde ve altında kalan pürüzlülüklerin (pürüz yüksekliklerinin ve derinliklerinin) aritmetik ortalamasıdır (Hamamcı, 2012).

Şekil 4.5’te gösterildiği gibi farklı yüzeylerdeki R_a değerleri aynı olabildiğinden R_a pürüzlülük değerinin tek başına kullanımı yüzey özelliklerinde yanlış yorumlamalara yol açabilir (Kadivara ve diğ., 2021). Şekil 4.6’da R_a değeri pürüzlülük profili üzerinde gösterilmiştir. Gelişmişliği az olan profilometrelerde bile R_a pürüzlülük değerinin ölçülmesi kolaydır (Özbeyaz, 2014).



Şekil 4.5. Aynı Ra değerine sahip çeşitli yüzey profilleri (Taga, 2015)

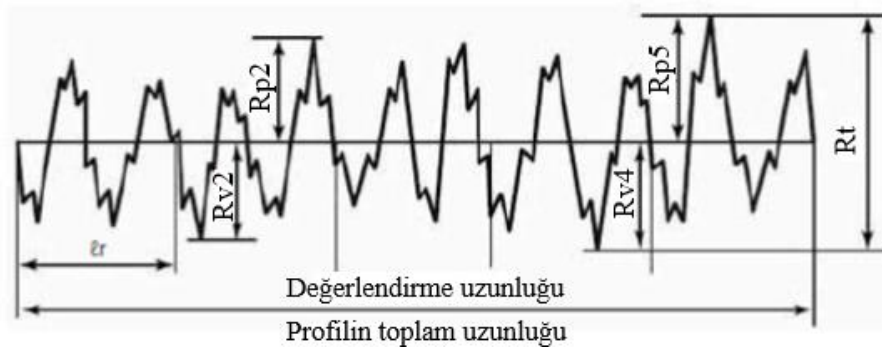


Şekil 4.6. Pürüzlülük profili üzerinde Ra parametresinin şematik gösterimi (Sarıoğlu, 2017)

Rt: Profildeki en yüksek ve en düşük noktalar olan maksimum tepe yüksekliği ve maksimum vadi derinliği arasındaki dikey mesafedir (Sarıoğlu, 2017). Denklem (4.1)'de Rt değerinin hesaplaması verilmiştir.

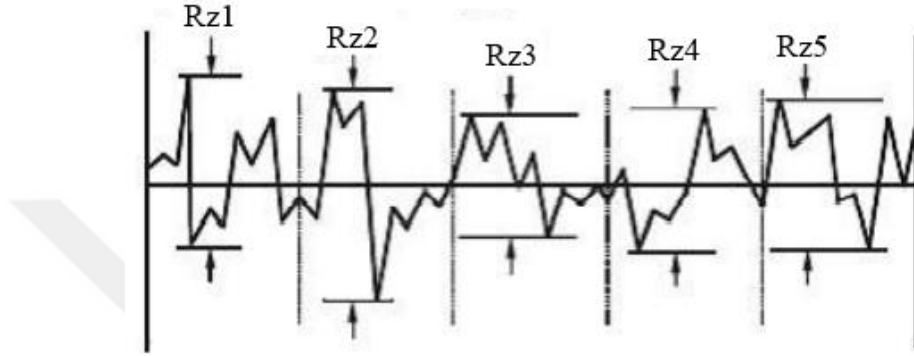
$$R_t = R_p + R_v \quad (4.1)$$

Şekil 4.7'de Rp, Rv ve Rt değerlerinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.7. Pürüzlülük profili üzerinde Rp, Rv ve Rt parametrelerinin şematik gösterimi (Nicolas ve diğ.,2020)

Rz (Ortalama pürüzlülük derinliği): Beş bitişik örneklem uzunluğundaki tepeden vadiye olan yüksekliklerin ortalamasıdır (Çelik, 2007). On nokta yüksekliği olarak da adlandırılmaktadır. ISO sistemine göre örneklem uzunluğunun içerisindeki maksimum beş tepe yüksekliği ve maksimum beş çukur derinliğinin ortalamasının yükseklik farkıdır (Hamamcı, 2012). Şekil 4.8’de Rz değerinin şematığı ve Denklem (4.2)’de Rz değerinin matematiksel hesaplaması verilmiştir.



Şekil 4.8. Pürüzlülük profili üzerinde Rz değerlerinin şematik gösterimi (Çelik, 2007)

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (4.2)$$

2- Alan Parametreleri:

Sa: Ölçümün yapıldığı alandaki tüm tepelerin yüksekliğinin ve vadilerin derinliğinin aritmetik ortalamasıdır (Yıldıran, 2017).

St: Ölçümün yapıldığı alandaki maksimum tepe yüksekliğinden maksimum vadi derinliğine olan uzunluktur (Yıldıran, 2017).

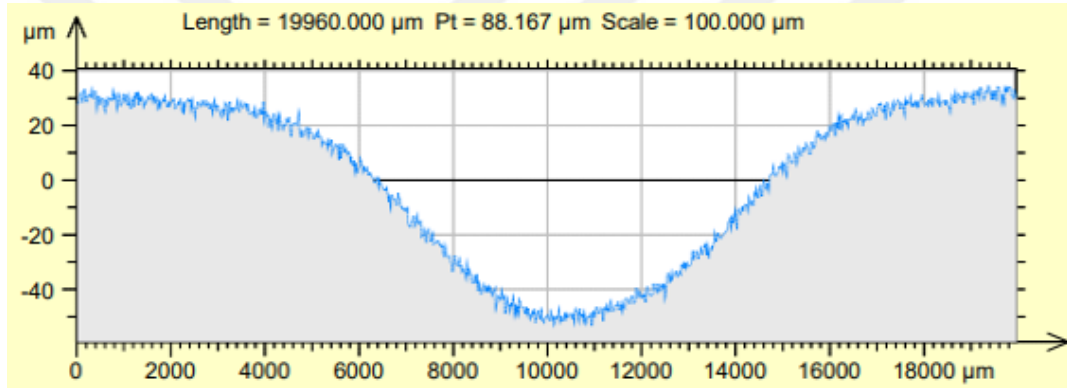
Sq (RMS, Ortalama Karekök Yüksekliği): Pürüzlülük yüksekliklerin karelerinin toplamının karekök ortalamasıdır (Furman ve diğ., 2010). Yükseklik dağılımını elde etmemizi sağlar (Yıldıran, 2017). Denklem (4.3)’te profil parametresi Rq değerinin hesaplanması verilmiştir, Sq değeri alanın taranmasıyla benzer şekilde hesaplanmaktadır (Hamamcı, 2012).

$$R_q = \sqrt{\frac{Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2 + \dots + Z_n^2}{n}} \quad (4.3)$$

Ssk: Yüzey topografyasındaki yüzey çizgilerinin ortalama çizgiye göre simetrikliğinin bir derecesi olduğundan yükseklik dağılımının şeklini ifade eder (Yıldıran, 2017). Ssk değeri pozitifse ($Ssk > 0$) yüzey düzlemi çok sayıda tepe içerir, Ssk değeri negatifse ($Ssk < 0$) yüzey düzlemi esas olarak derin ve ince vadilere sahiptir (Sadowski ve diğ., 2016).

Sku: Yüzey topografyasındaki yükseklik dağılımının yayılımını ifade eder (Yıldıran, 2017). Yüzeydeki yükseklik dağılımı $Sku < 3$ olduğunda düzenli, $Sku > 3$ olduğunda düzensiz demektir (Sadowski ve diğ., 2016).

Şekil 4.9'daki Pt pürüzlülük değeri, deneylerdeki aşınan malzemenin taranması sonucu elde edilen çukurun dişi ile malzemenin üst yüzeyi arasındaki mesafedir.



Şekil 4.9. Çeşitli parametreler altında katı partikül erozyonuna maruz bırakılan numunenin Pt pürüzlülük değeri

5. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmanın amacı, DP980 ve DP1180 dual fazlı çeliklerle birlikte derin çekmede kullanılan 6224 sacının katı partikül erozyonu sonucunda erozif aşınma davranışlarını incelemektir.

5.1. Malzeme Seçimi

Deneysel çalışmalarda mukavemetlerinin ve şekillendirilebilirliklerinin yüksek olması sebebiyle endüstride yaygın olarak kullanılan dual fazlı çelikler ile mekanik özelliklerin aşınma üzerindeki etkisini görmek amacıyla derin çekmede kullanılan bir sac malzemeye erozif aşınma testleri uygulanmıştır. Bu nedenle hedef malzeme olarak DP980 ve DP1180 çelikleri ile Ereğli Demir ve Çelik Fabrikası'nın derin çekmede kullanılan 6224 kodlu sacı deneylerde kullanılmak üzere seçilmiştir. Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de % ağırlıkça kimyasal bileşimleri gösterilen 40 mm x 80 mm x 2 mm boyutlarında levhalar halindeki numunelerden 6224 sac malzemesi Ulus Metal A.Ş.'den, DP980 ile DP1180 çelikleri Toyotetsu'dan temin edilmiştir. Şekil 5.1'de, kullanılan numunelerle birlikte numunelerin boyutları gösterilmiştir.

Tablo 5.1. DP980 ve DP1180 çeliklerinin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) (Poulin ve diğ., 2020)

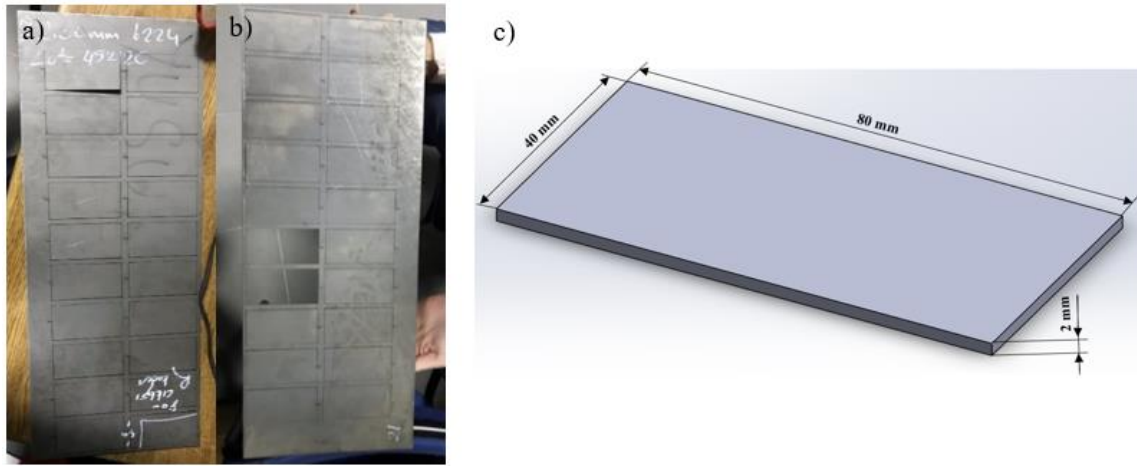
	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Sn	Al	Zr	V	Cb	Ti	B	N ₂
DP 980	0.11	2.411	0.013	0.005	0.013	0.027	0.009	0.255	0.385	0.006	0.049	0.005	0.011	0.004	0.002	0.0001	0.0033
DP 1180	0.168	2.222	0.015	0.0053	1.421	0.021	0.007	0.036	0.013	0.007	0.051	0.005	0.012	0.007	0.039	0.0004	0.0086

Tablo 5.2. 6224 sac malzemesinin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) (https://www.erdemir.com.tr/Sites/1/upload/files/Yassi_Urun_Katalogu_2021_-_TR-4874.pdf)

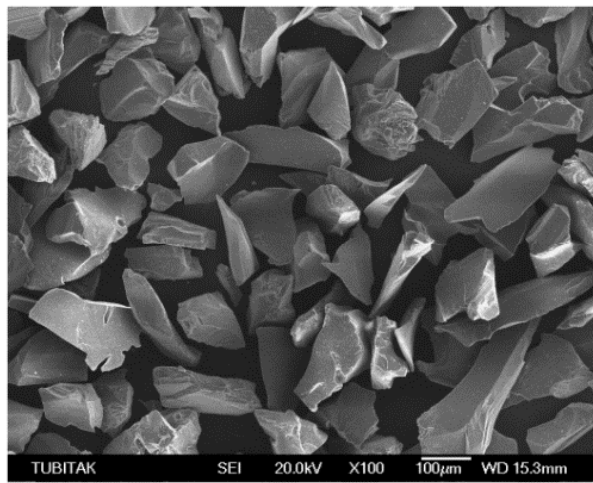
Malzeme	C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni	V	Ti	B	N
6224 sacı	0,040	0,239	0,015	0,005	0,027	0,054	0,023	0,015	0,027	0,005	0,012	0,0036	0,0046

Deneysel çalışmalardaki erozif aşınma testlerinde Şekil 5.2'de SEM fotoğrafı gösterilen Reflot FP 120 (Avrupa Aşındırıcı Üreticileri Federasyonu) (120 mesh, Fepa standartı= 90-125 µm boyutunda) beyaz kaynaşmış alüminyum oksit aşındırıcılar kullanılmıştır.

Alüminyum oksit, mineral içerikli olmakla beraber metal alüminyum malzemesinin oksijene duyarlılığı ile oluşan sarf malzemedir. Sertliği yüksektir ve köşeli yapıdadır, bu nedenle aşındırıcılığı yüksektir. Malzemenin yüzeyinden boyanın kaldırılması, özellikle kaplama yapılacak malzemeler için yüzey pürüzlendirme işlemlerinde kullanılabilir. Çünkü basınçlı hava kullanılarak hızlandırılan alüminyum oksit aşındırıcılar; hedef malzeme yüzeyine püskürtüldüğünde mikron boyutlarında yarıklar oluşturur, kaplama malzemesi bu yarıklar dolayısıyla yüzeye daha iyi yerleştiği için kaplama ömrünün uzun olmasını sağlar. Ayrıca bu aşındırıcılar saflıklarına göre kahverengi, pembe ve beyaz renkte olmak üzere derecelendirilir (Avcu, 2011). Şekil 5.2'deki SEM fotoğrafından aşındırıcıların şeklinin keskin köşeli olduğu görülmektedir.



Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan numuneler: a) derin çekmede kullanılan Ereğli Demir ve Çelik Fabrikası'nın 6224 kodlu sacı, b) DP980 ve DP1180 çelikleri, c) numune boyutları

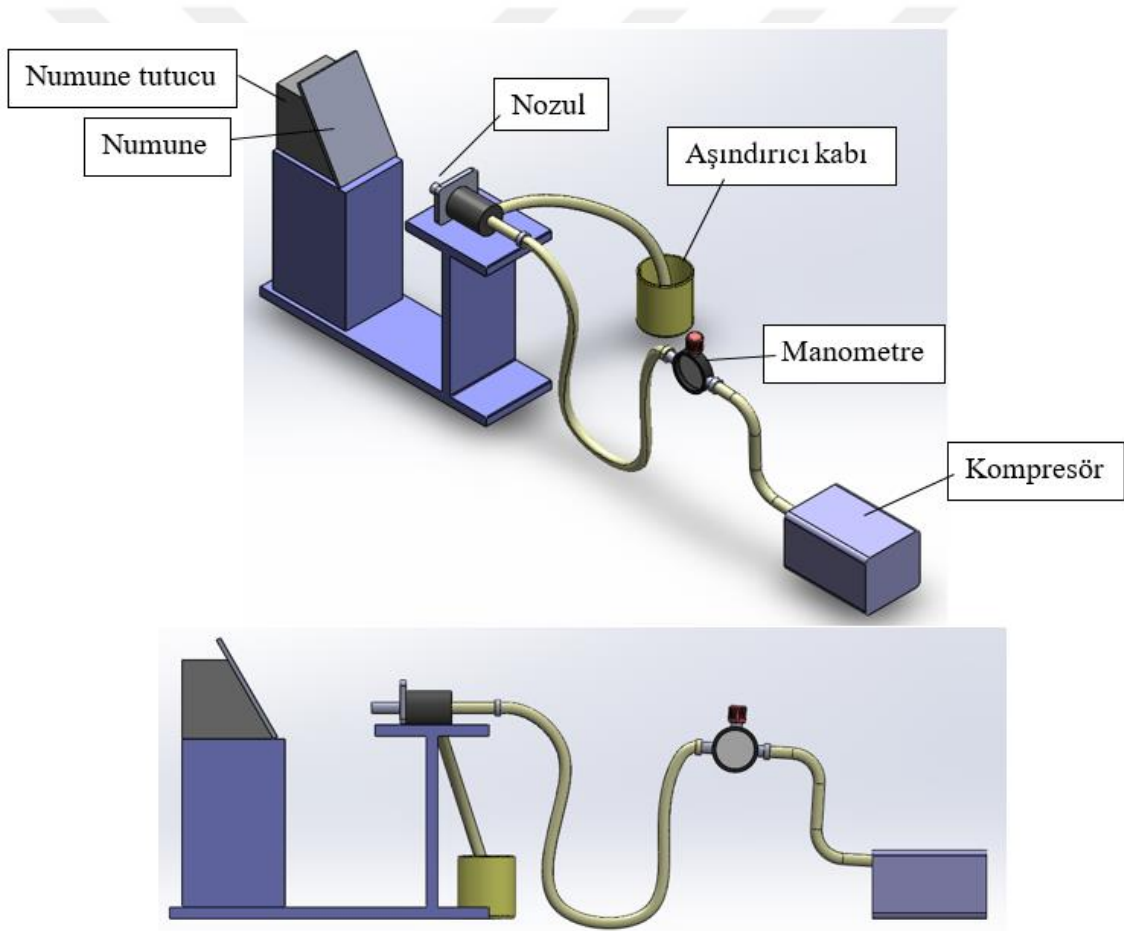


Şekil 5.2. 120 mesh partikül boyutuna sahip (90-125 µm boyutunda) alüminyum oksit aşındırıcıların büyütülmüş SEM fotoğrafı (Avcu, 2011)

5.2. Uygulanan Deneysel Yöntem

Bu çalışmada kullanılan numuneler, oda sıcaklığında farklı parametreler altında ASTM G76 standardına göre erozif aşınmaya maruz bırakılmıştır. ASTM G76 standardı, basınçlandırılmış ve kuru hava ile aşındırıcı parçacıkların hızlandırılarak numune yüzeyine çarptırılmasını içerir.

Aşınma testleri, Şekil 5.3'te şematik görüntüsü verilen erozif aşınma test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Farklı parametrelerin kombinasyonlarıyla birçok deney gerçekleştirilmiştir ve bu parametreler Tablo 5.3'te gösterilmiştir. Tablo 5.4'te ise katı partikül erozyonu testinin bilgilerine yer verilmiştir.



Şekil 5.3. Erozif aşınma test düzeneğinin şematik görüntüsü: a) izometrik, b) ön görünüş

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'teki deneyin yapıldığı erozif aşınma test düzeneği; basınçlı hava kompresörü, manometre, nozul, Şekil 5.6'da gösterilen numune tutucu, kumlama kabini elemanlarından oluşur ve aşınan katı partiküllerin toplandığı bir kısım bulunur. Kabininin

dışarısındaki pedal ile kabin içerisinde sabitlenmiş nozul kontrol edilebilmektedir. Kabinin dışarısına yerleştirilen bir basınç regülatörü (basınç düzenleyici) sayesinde basınç ayarlanabilmektedir ve kabinin dışarısındaki manometreden basınç değeri görülebilmektedir.

Tablo 5.3. Katı partikül erozyonu deneylerinde kullanılan parametreler

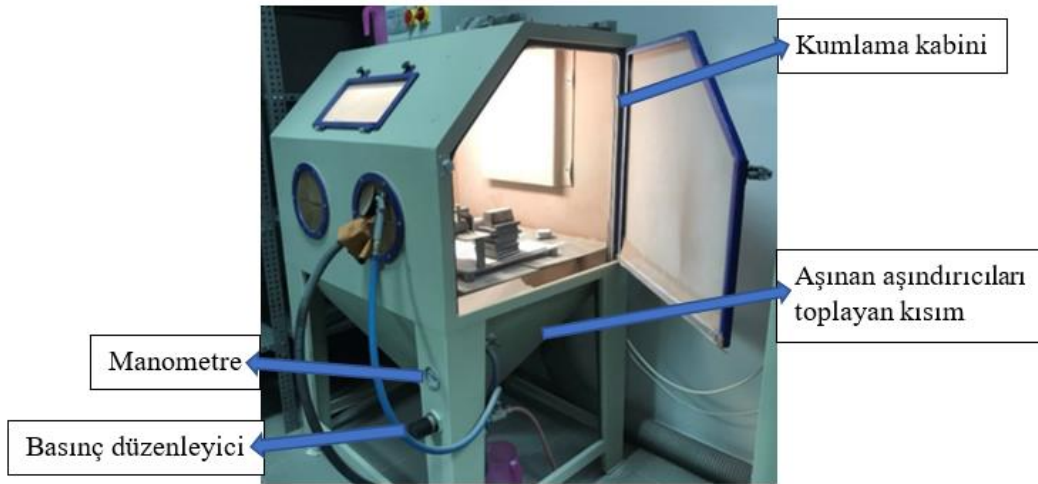
Püskürtme Basıncı (Bar)	Püskürtme Süresi (s)	Aşındırıcı Çarpma Açısı (°)
1	10	15
2	20	30
	30	45
		60
		75
		90

Tablo 5.4. Katı partikül erozyonu deneylerinin bilgileri

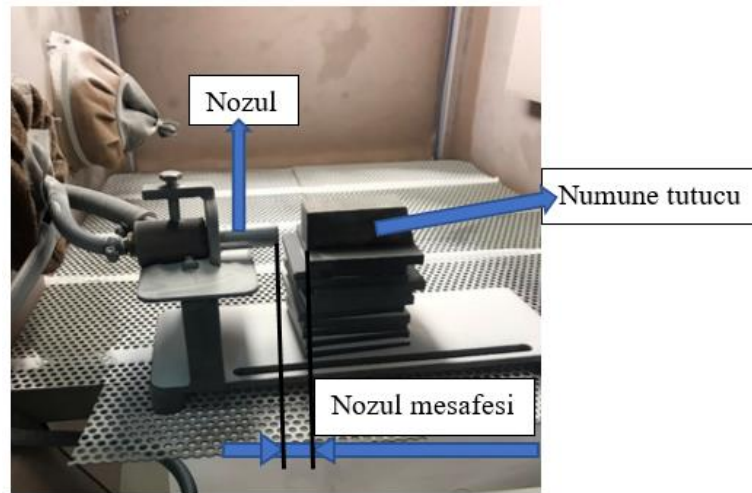
Püskürtme basıncı (bar)	1, 2
Aşındırıcı partikül	Reflot FP 120 mesh beyaz kaynaşmış alüminyum oksit (Al_2O_3)
Aşındırıcı boyutu (μm)	90- 125
Aşındırıcı çarpma açısı (°)	15, 30, 45, 60, 75, 90
Hedef malzeme	DP980 çeliği, DP1180 çeliği, 6224 sac malzemesi
Deney sıcaklığı (°C)	25± 2 (oda sıcaklığı)
Maruz kalma süresi (s)	10, 20, 30
Hedef malzeme boyutları (mm)	40 x 80 x 2
Nozul- numune mesafesi (mm)	20
Aşındırıcı şekli	Köşeli
Aşındırıcı kütleli debisi (g/s)	8,13 (1 bar için), 12,02 (2 bar için)

Erozif aşınma test cihazında kompresör yardımıyla hava basınçlandırılır. Deneyler sırasında 1 bar ve 2 bar olmak üzere basınç değerleri değiştirilmiştir. Dolayısıyla

partiküllerin kütleli debisi 1 bar basınçta 8,13 g/s, 2 bar basınçta 12,02 g/s olarak hesaplanarak gönderilmiştir. Çeşitli açılarda tutulan numunelere, basınçlandırılmış hava ile köşeli Al_2O_3 (Reflot FP 120 mesh beyaz kaynaşmış alüminyum oksit, 90- 125 μm parçacık boyutunda) aşındırıcılar karıştırılarak 5 mm çapa sahip çelik bir nozul vasıtasıyla gönderilmiştir. Numuneler; tutma açılarının farklı olduğu numune tutucuların kullanılmasıyla 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° olmak üzere istenen açılarda 10 s, 20 s, 30 s sürelerde aşındırılmıştır. Nozul ile numune arasındaki mesafe 20 mm olarak sabit tutulmuştur. Eroziyon aşınmaya maruz kalan numunelerin yüzeyine basınçlı hava tutularak üzerinde kalan tozlar veya kum parçacıkları temizlendikten sonra 0,1 mg hassasiyetteki elektronik terazide (Shimadzu Atx-224, Japan) tartılarak numunenin önce ağırlık kaybı sonra ise erozyon oranı hesaplanmıştır.



Şekil 5.4. Eroziyon aşınma test düzeneğindeki kabinin dışı

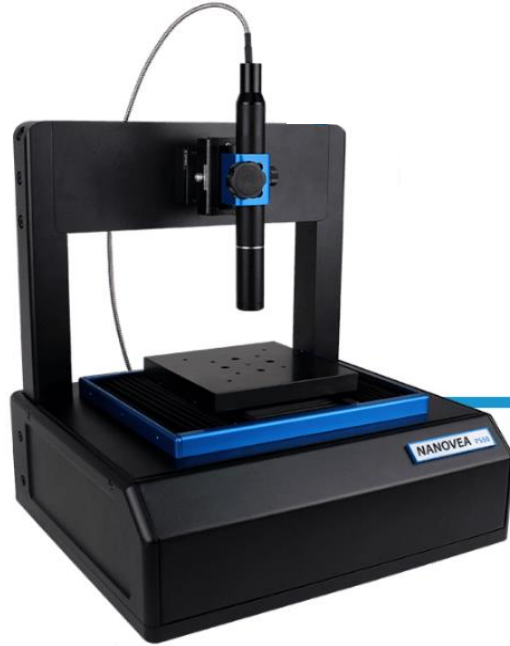


Şekil 5.5. Eroziyon aşınma test düzeneğindeki kabinin içi



Şekil 5.6. Numune tutucu (Ediriweera ve diğ., 2019)

Sonrasında Şekil 5.7’de gösterilen temassız bir 3 boyutlu (3D) optik profilometre (Nanovea PS50, USA) ile aşınmış malzeme yüzeyinde en fazla aşınmanın meydana geldiği kraterdeki en derin noktadan geçen profil veya yüzey taranarak pürüzlülük değerleri (R_a , R_t , S_a , S_q ve P_t) ölçülmüş ve yüzey topografyası elde edilmiştir.



Şekil 5.7. Deneylerde kullanılan temassız 3 boyutlu (3D) optik profilometre (Nanovea PS50, USA) (<https://nanovea.com/instruments/ps50/>)

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Aşındırıcı Parçacıkların Kütlesel Debilerinin Hesaplanması

Deneysel çalışmalarda aşındırıcıların farklı basınçlarda (1 bar, 2 bar) gönderilmesi sebebiyle her basınç değeri için ayrı ayrı aşındırıcı kütlesel debisi hesaplanmıştır. Tablo 6.1’de Reflot FP 120 mesh beyaz kaynaşmış alüminyum oksit aşındırıcısının kütlesel debisinin hesaplanması için gönderilme basıncına bağlı olarak gerçekleştirilen deneylerin sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 6.1. 120 mesh alüminyum oksitin farklı gönderilme basınçlarındaki kütlesel debisinin hesaplanması için gerçekleştirilen deneylerin sonuçları

Deney No	Aşındırıcı parçacık	Püskürtme basıncı (bar) ve süresi (s)	Parçacıkların ilk ağırlığı (g)	Parçacıkların son ağırlığı (g)	Parçacıkların ağırlık farkı (gönderilen aşındırıcı miktarı) (g)	Ağırlık farklarının ortalaması (g)	Aşındırıcıların kütlesel debisi (g/s)
1	Reflot FP 120 mesh beyaz kaynaşmış alüminyum oksit	1 bar 10 s	1402	1299	103	81,33333	8,133333
2			1299	1232	67		
3			1232	1158	74		
4	Reflot FP 120 mesh beyaz kaynaşmış alüminyum oksit	2 bar 15 s	1786	1597	189	180,3333	12,02222
5			1597	1434	163		
6			1434	1245	189		

Aşındırıcıların kütlesel debisinin hesaplanmasında, aşındırıcılar gönderilmeden önce ve aşındırıcılar gönderildikten sonra bulundukları kabın ağırlığı Şekil 6.1’de gösterilen elektronik terazi yardımıyla ölçüldü.

Bu iki ağırlık farkı alınarak gönderilen aşındırıcıların ağırlığına ulaşıldı. Aynı basınç ve süre koşulları altında üç defa ölçüm yapıldı. Gerçekleştirilen üç deneydeki gönderilen aşındırıcı miktarının ortalaması alınıp gönderilme süresine bölünmesiyle aşındırıcıların kütlesel debisine ulaşıldı.

Tablo 6.1 incelendiğinde aşındırıcıların gönderilme basıncının artmasıyla kütlesel debilerinin arttığı sonucuna ulaşılabılır.



Şekil 6.1. Deneylerde kullanılan 0,1 mg hassasiyetteki elektronik terazi (Shimadzu Atx-224, Japan) (<https://www.cihazmarketi.com/urun/shimadzu-atx224-analitik-terazi>)

6.2. Aşınan Malzemelerin Erozyon Oranlarının Hesaplanması

Erozyon oranı; Denklem (6.1)'de gösterilen hedef malzemede meydana gelen ağırlık kaybının, hedef malzemeye gönderilen toplam aşındırıcı ağırlığına bölünmesiyle elde edilir.

$$\text{Erozyon oranı} = \frac{\text{Hedef malzemedeki ağırlık kaybı}}{\text{Gönderilen toplam aşındırıcı ağırlığı}} \quad (6.1)$$

Tablo 6.2'de 6224 sac malzemesinin farklı basınç ve sürelerde aşındırılmasıyla elde edilen deneysel verilerine yer verilmiştir ve bu değerler kullanılarak erozyon oranına ulaşılmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler aşınma sonrası basınçlı hava ile temizlenip aşındırılmadan önceki ve sonraki ağırlıkları Şekil 6.1'deki 0,1 mg hassasiyetteki elektronik terazi (Shimadzu Atx-224, Japan) yardımıyla ölçülüp bu değerlerin farkının alınmasıyla hedef malzemenin aşınma miktarı elde edilmiştir. Sonrasında aşındırıcı partikülün gönderilen basınç değerindeki kütleli debisi, gönderilme süresiyle çarpılarak gönderilen toplam aşındırıcı ağırlığı elde edilmiştir. Son olarak kırmızı ile işaretlenen hedef malzemedeki ağırlık kaybı değeri (aşınma miktarı), gönderilen toplam aşındırıcı ağırlığına bölünerek erozyon oranlarına ulaşılmıştır. Şekil 6.2'de ise aşındırılan numunelerin görüntüsü verilmiştir.

Tablo 6.2. 6224 sac malzemesinin farklı basınç ve sürelerdeki deneysel verileri

Basınç (bar) ve süre (s)	Parçacık çarpma açısı (°)	Aşınmamış numunenin ağırlığı (g)	Aşınmış numunenin ağırlığı (g)	Ağırlık farkı (aşınma miktarı) (g)	Parçacıkların kütleli debisi (g/s)	Gönderilen toplam aşındırıcı ağırlığı (g)	Erozyon oranı x 10 ⁵ (g/g)
1 bar 10 s	30°	48,5849	48,5624	0,0225	8,13	81,3	27,67527675
2 bar 20 s	60°	48,5148	48,4503	0,0645	12,02	240,4	26,83028286



Şekil 6.2. Çeşitli parametrelerde aşındırılmış numuneler

6.3. Katı Partikül Erozyonunun Partikül Çarpma Açısına Bağlı Değişimi

Bu bölümde 6224 sac malzemesinin, DP980 ve DP1180 çeliklerinin farklı partikül çarpma açılarındaki erozyon oranlarının değişimi incelenmiştir. Bu amaçla alüminyum oksit aşındırıcılar; numunelere 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° çarpma açılarında gönderilmiştir. Tablo 6.3, Tablo 6.4 ve Tablo 6.5'te sırasıyla 6224 sac malzemesinin, DP980 ve DP1180 çeliklerinin belirli koşullar altında gerçekleştirilen deneylerinin sonuçları verilmiştir.

Tablo 6.3. 6224 sac malzemesiyle yapılan deneylerin sonuçları

Deney No	Basınç (bar)	Maruz kalma süresi (s)	Partikül çarpma açısı (°)	Erozyon oranı x 10 ⁵ (g/g)
1	1 bar	10 s	15°	18,2456
2			30°	27,67527675
3			45°	6,519065191
4			60°	6,150061501
5			75°	-3,07503075
6			90°	-0,36900369

Tablo 6.3. (Devam) 6224 sac malzemesiyle yapılan deneylerin sonuçları

Deney No	Basınç (bar)	Maruz kalma süresi (s)	Partikül çarpma açısı (°)	Erozyon oranı x 10 ⁵ (g/g)
7	1 bar	20 s	15°	14,7601476
8			30°	14,08364084
9			45°	10,57810578
10			60°	8,179581796
11			75°	6,211562116
12			90°	0,36900369
13	1 bar	30 s	15°	14,59614596
14			30°	15,29315293
15			60°	8,979089791
16			90°	3,19803198
17	2 bar	10 s	15°	30,6156406
18			30°	36,02329451
19			45°	29,70049917
20			60°	20,54908486
21			75°	13,06156406
22			90°	8,153078203
23	2 bar	20 s	15°	49,00166389
24			30°	34,60898502
25			45°	31,281198
26			60°	26,83028286
27			75°	15,51580699
28			90°	9,109816972
29	2 bar	30 s	15°	34,88630061
30			30°	41,0427066
31			60°	24,73655019
32			90°	9,484193012

Tablo 6.4. DP980 çeliğiyle yapılan deneylerin sonuçları

Deney No	Basınç (bar)	Maruz kalma süresi (s)	Partikül çarpma açısı (°)	Erozyon oranı x 10 ⁵ (g/g)
1	1 bar	10 s	15°	29,5202952
2			30°	24,600246
3			45°	18,57318573
4			60°	12,79212792
5			75°	4,9200492
6			90°	5,166051661

Tablo 6.4. (Devam) DP980 çeliğiyle yapılan deneylerin sonuçları

Deney No	Basınç (bar)	Maruz kalma süresi (s)	Partikül çarpma açısı (°)	Erozyon oranı x 10 ⁵ (g/g)
7	1 bar	20 s	15°	25,03075031
8			30°	21,52521525
9			45°	15,92865929
10			60°	17,71217712
11			75°	10,27060271
12			90°	5,350553506
13	1 bar	30 s	15°	25,33825338
14			30°	18,65518655
15			60°	13,44813448
16			90°	4,59204592
17	2 bar	10 s	15°	61,48086522
18			30°	60,39933444
19			45°	43,26123128
20			60°	35,10815308
21			75°	21,79700499
22			90°	16,05657238
23	2 bar	20 s	15°	52,03826955
24			30°	45,63227953
25			45°	36,35607321
26			60°	29,99168053
27			75°	21,83860233
28			90°	13,26955075
29	2 bar	30 s	15°	47,11591791
30			30°	40,82085413
31			60°	28,56350527
32			90°	7,043815862

Tablo 6.5. DP1180 çeliğiyle yapılan deneylerin sonuçları

Deney No	Basınç (bar)	Maruz kalma süresi (s)	Partikül çarpma açısı (°)	Erozyon oranı x 10 ⁵ (g/g)
1	1 bar	10 s	15°	19,43419434
2			30°	11,31611316
3			45°	10,94710947
4			60°	4,9200492
5			75°	4,9200492
6			90°	4,67404674

Tablo 6.5. (Devam) DP1180 çeliğiyle yapılan deneylerin sonuçları

Deney No	Basınç (bar)	Maruz kalma süresi (s)	Partikül çarpma açısı (°)	Erozyon oranı x 10 ⁵ (g/g)
7	1 bar	20 s	15°	13,83763838
8			30°	12,97662977
9			45°	10,57810578
10			60°	8,979089791
11			75°	7,564575646
12			90°	0,49200492
13	1 bar	30 s	15°	12,38212382
14			30°	13,16113161
15			60°	10,74210742
16			90°	2,78802788
17	2 bar	10 s	15°	30,78202995
18			30°	36,10648918
19			45°	29,78369384
20			60°	22,04658902
21			75°	13,81031614
22			90°	4,908485857
23	2 bar	20 s	15°	32,8202995
24			30°	37,7703827
25			45°	29,15973378
26			60°	22,7953411
27			75°	15,34941764
28			90°	11,10648918
29	2 bar	30 s	15°	32,44592346
30			30°	35,10815308
31			60°	26,37271215
32			90°	7,45978924

Tablo 6.3, Tablo 6.4 ve Tablo 6.5'teki deneysel verilerden yararlanılarak Şekil 6.3'te 2 bar basınçta 20 s maruz kalma süresinde numunelerin ayrı ayrı erozyon oranları gösterilmiş ve diğer parametrelerde de yaklaşık aynı sonuçlar olduğu için gösterilmemişlerdir.

Şekil 6.4'te tüm numunelerin erozyon oranlarının partikül çarpma açısına bağlı değişimi gösterilmiştir.

Şekiller incelendiğinde tüm basınç değerlerinde ve maruz kalma sürelerinde aşındırıcıların çarpma açısının değişmesiyle aşınma miktarının büyük miktarda değiştiği görülmektedir.

Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 incelendiğinde 15° - 30° gibi düşük aşındırıcı partikül çarpma açılarında maksimum aşınma gözlenirken 90° 'lik çarpma açısında düşük miktarda aşınma gözlenmektedir.

6224 sac malzemesi, DP980 çeliği ve DP1180 çeliği 15° - 30° partikül çarpma açıları aralığında maksimum miktarda aşınmaktadır. Bu durum 6224 sac malzemesinin, DP980 ve DP1180 çeliklerinin sünek aşınma davranışıyla açıklanabilir. Dolayısıyla deneylerin tümünde maksimum aşınma miktarı, düşük çarpma açılarında gözlenmekte ve çarpma açısı arttıkça aşınma miktarı azalmaktadır.

Literatür çalışmalarında da sünek malzemelerin en fazla malzeme kaybının düşük çarpma açılarında ($\sim 30^{\circ}$) meydana geldiği bilgisi yer almaktadır.

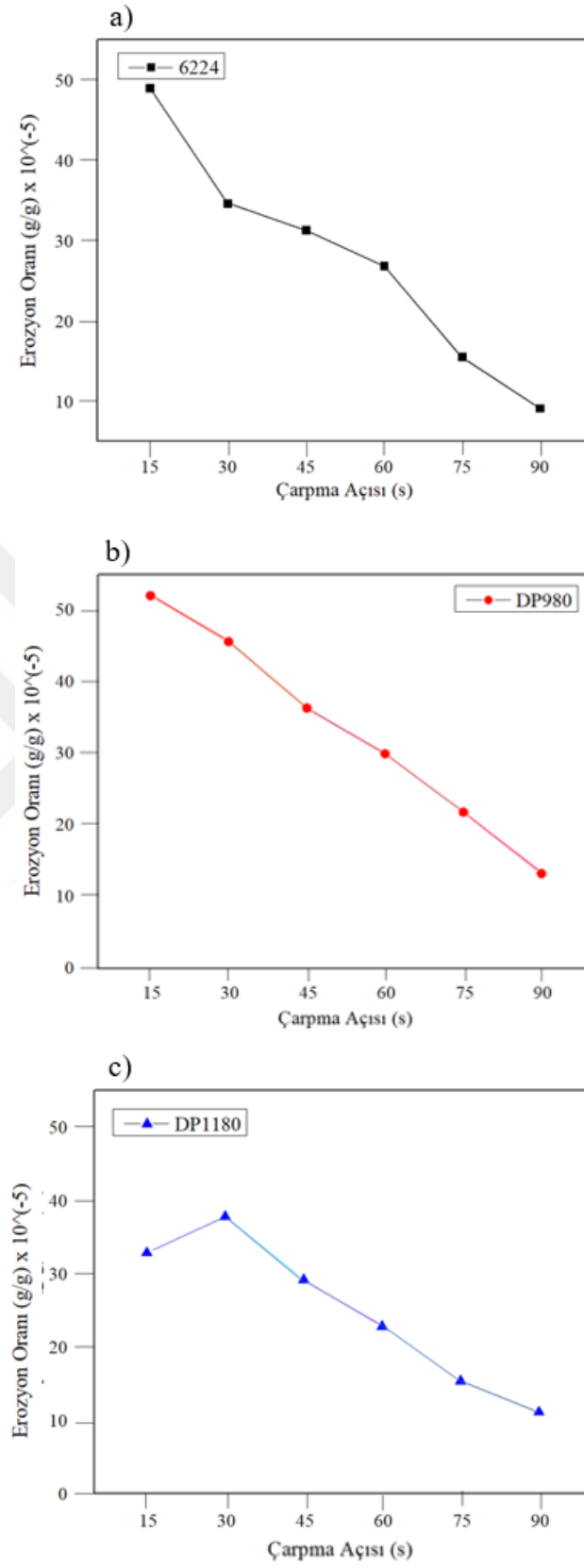
Bunun nedeninin aşındırıcı partiküllerin çarpma açısının azalmasıyla yatay hız bileşeninin artması, çarpma açısının artmasıyla ise yatay hız bileşeninin azalması olduğu söylenebilir.

Düşük çarpma açıları malzeme yüzeyinde daha az çarpmanın meydana gelmesiyle birlikte yatay hız bileşeninin büyük olmasından dolayı malzeme yüzeyinin çizilmesini ve kesilmesini içeren mikro kesme ve mikrosürme mekanizmalarıyla aşınma gerçekleşir.

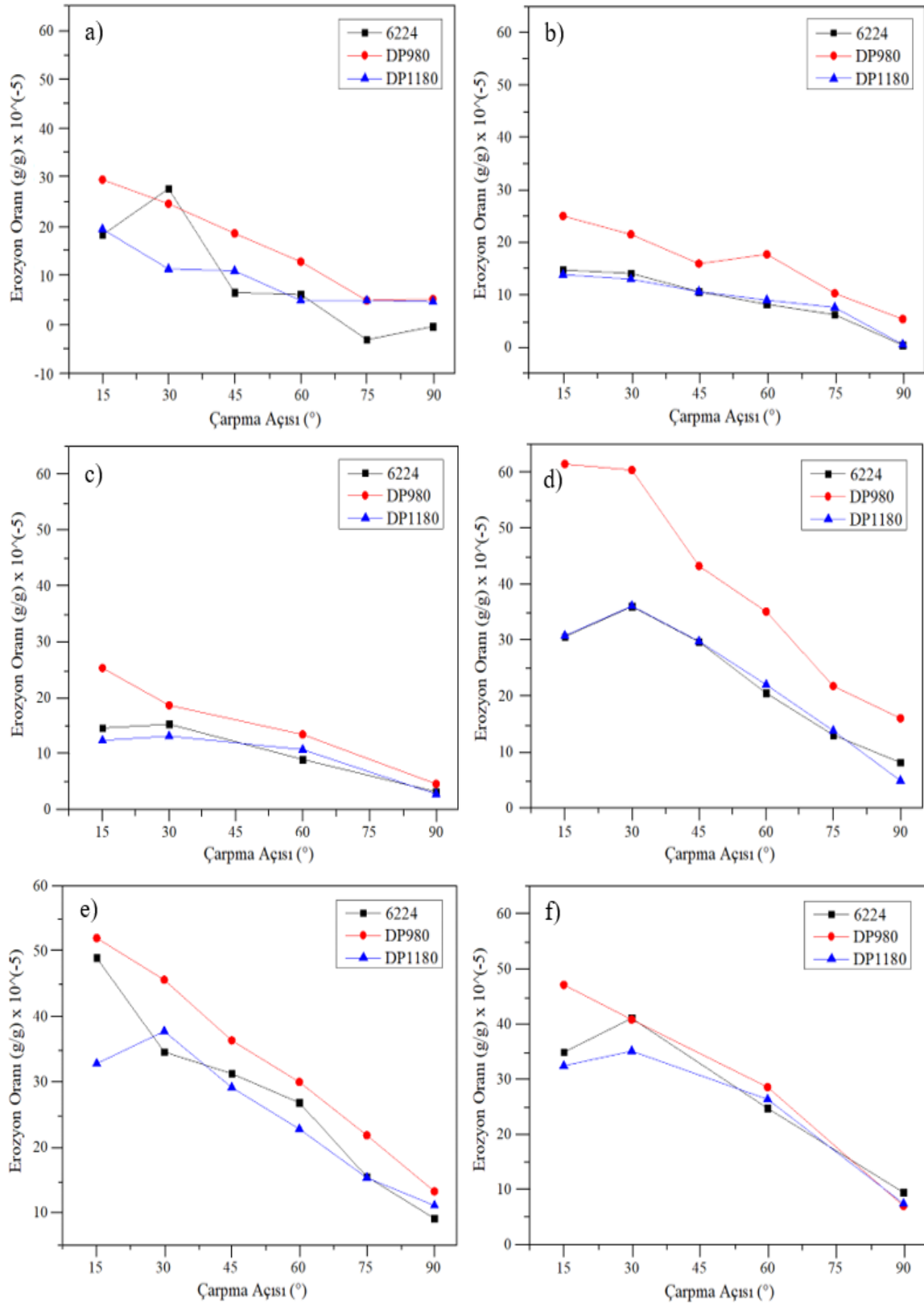
Yüksek çarpma açıları ise dik hız bileşeni büyük olduğundan çarpma etkisinin fazla olmasıyla aşındırıcılar tarafından malzeme yüzeyinde mikro çatlaklar oluşturularak malzeme kaybı gerçekleşir.

Ancak deneylerde kullanılan tüm numuneler sünek aşınma davranışı gösterdiğinden köşeli alüminyum oksit aşındırıcılarla yapılan testlerde bu malzemelerin yüzeylerinde mikro çatlak oluşturarak yüksek miktarda aşınma gerçekleşemez. Bunun yerine aşındırıcılar düşük açılarda malzeme yüzeyiyle fazla miktarda temas eder ve bu etkileşim sonucunda ilerlediği yüzey boyunca malzeme kaldırır veya yer değiştirmesine neden olur.

Bu nedenle tablolar ve grafikler incelendiğinde keskin köşeli alüminyum oksit aşındırıcıların düşük çarpma açıları deney numunelerinde mikro kesme ve mikrosürme mekanizmalarıyla daha fazla malzeme kaybına neden olduğu görülmektedir.



Şekil 6.3. 2 bar basınçta ve 20 s maruz kalma süresinde numunelerin erozyon oranları: a) 6224, b) DP980, c) DP1180



Şekil 6.4. Numunelerin çeşitli basınç ve maruz kalma sürelerinde çarpma açısına bağlı erozyon oranı değişimleri: a) 1 bar 10 s, b) 1 bar 20 s, c) 1 bar 30 s, d) 2 bar 10 s, e) 2 bar 20 s, f) 2 bar 30 s

6.4. Katı Partikül Erozyonunun Püskürtme Basıncına Bağlı Değişimi

Bu bölümde 6224 sac malzemesinin, DP980 ve DP1180 çeliklerinin farklı püskürtme basınçlarındaki erozyon oranlarının değişimi incelenmiştir. Bu amaçla alüminyum oksit aşındırıcılar, numunelere 1 bar ve 2 bar olmak üzere iki farklı basınçta gönderilmiştir.

Tablo 6.3, Tablo 6.4 ve Tablo 6.5'teki deney verilerinden yararlanılarak çizilen grafiklerden Şekil 6.5'te 20 s maruz kalma süresi ve 30° çarpma açısında basınca bağlı tüm numunelerin ayrı ayrı erozyon oranı değerleri gösterilmiş ve diğer parametrelerde de yaklaşık aynı sonuçlar olduğu için onlar gösterilmemişlerdir.

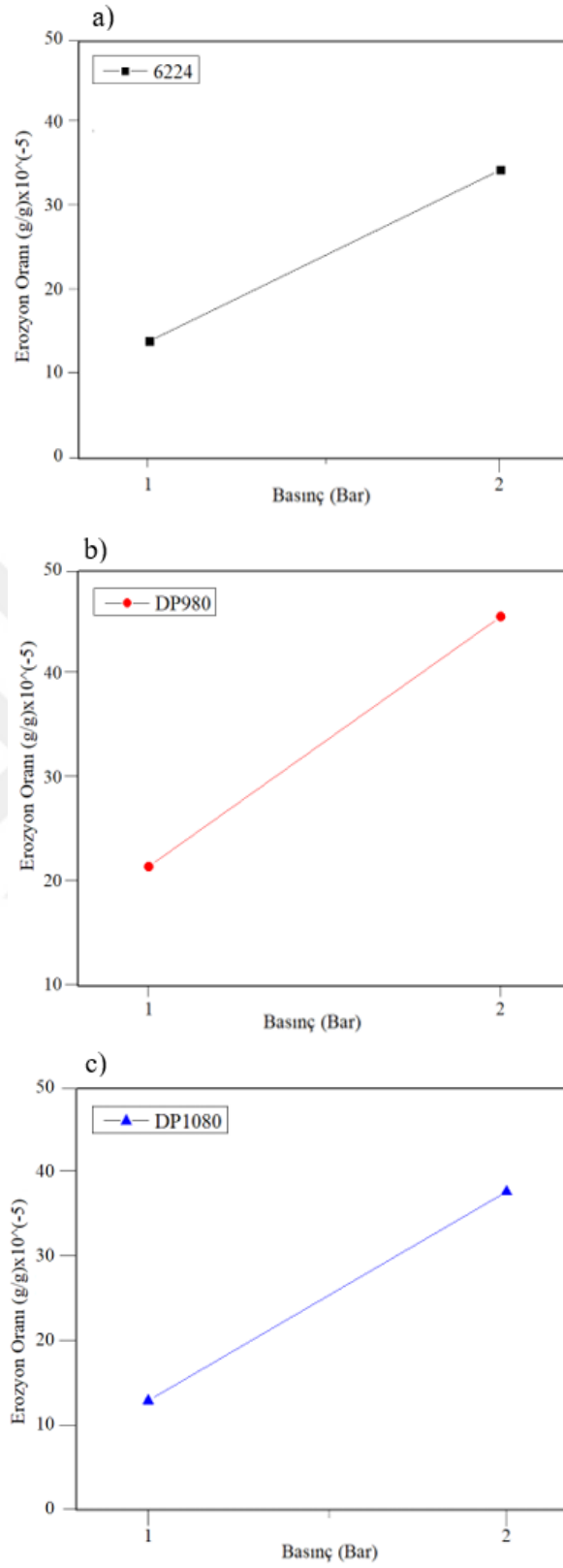
Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'de tüm numunelerin erozyon oranlarının sırasıyla 10 s ve 20 s maruz kalma sürelerinde püskürtme basıncına bağlı değişimi gösterilmektedir.

Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da ise sırasıyla 6224 sac malzemesinin, DP980 ve DP1180 çeliklerinin çeşitli partikül çarpma açılarındaki erozyon oranlarının püskürtme basıncına bağlı değişimi gösterilmektedir.

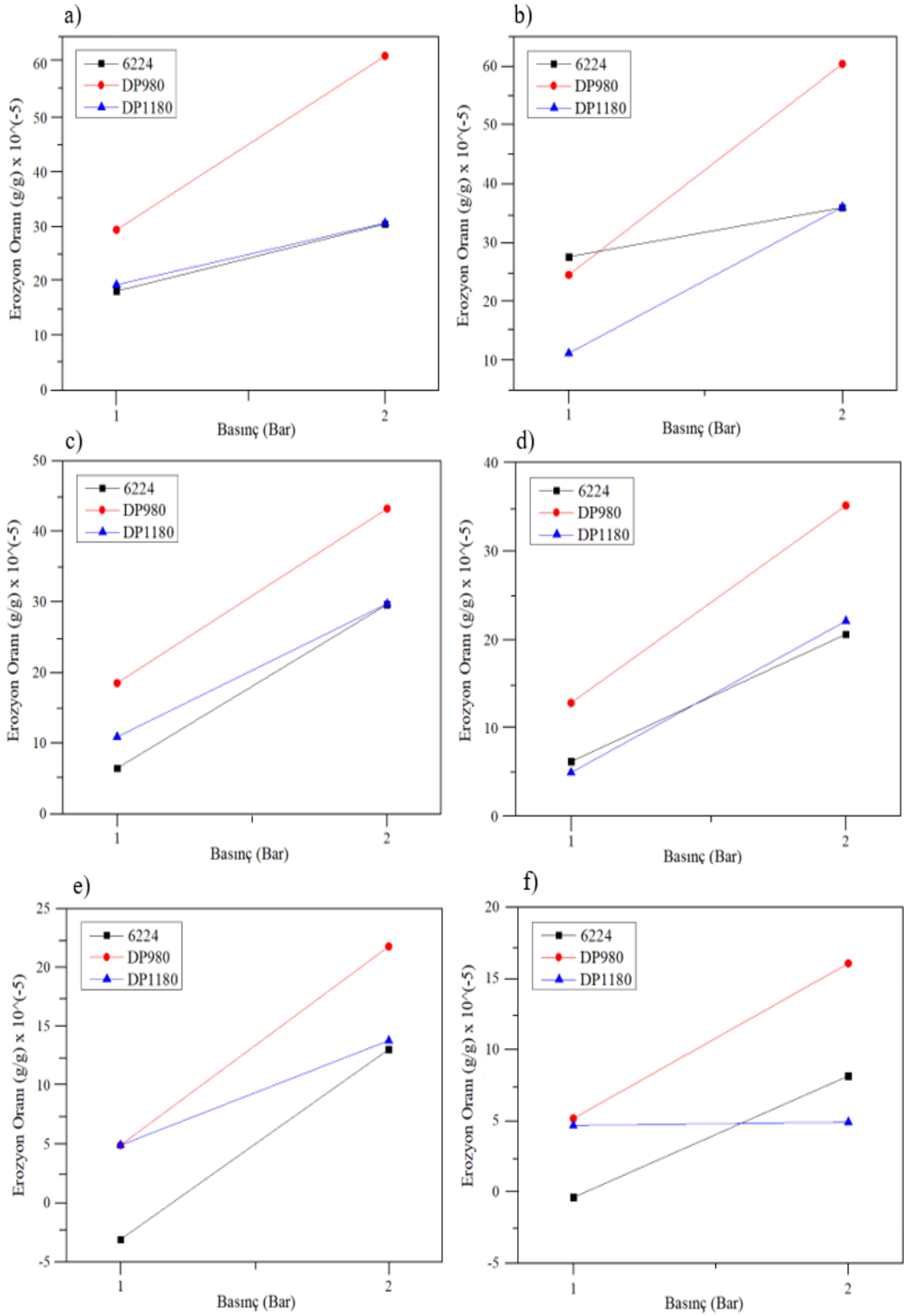
Bu şekiller incelendiğinde tüm partikül çarpma açılarında ve tüm maruz kalma sürelerinde püskürtme basıncının artırılmasıyla numunelerde meydana gelen erozyon oranlarının arttığı görülmektedir. Bu durum, püskürtme basıncındaki artışla gönderilen aşındırıcıların kütsel debisinin artması sonucu hedef malzeme yüzeyine çarpan parçacık sayısının artmasıyla açıklanabilir. Malzeme yüzeyine çarpan parçacık sayısının artmasıyla belirli bir alana çok sayıda parçacık çarpacağından oradan tekrarlı darbe etkisiyle malzeme kaldırılacaktır.

Ayrıca püskürtme basıncının artmasıyla aşındırıcıların yüzeye çarpma hızı da artmaktadır. Çarpma hızının artmasıyla yüzeye aktarılan enerji fazla olacağından daha fazla malzeme kaldırma oranlarına ulaşılacaktır.

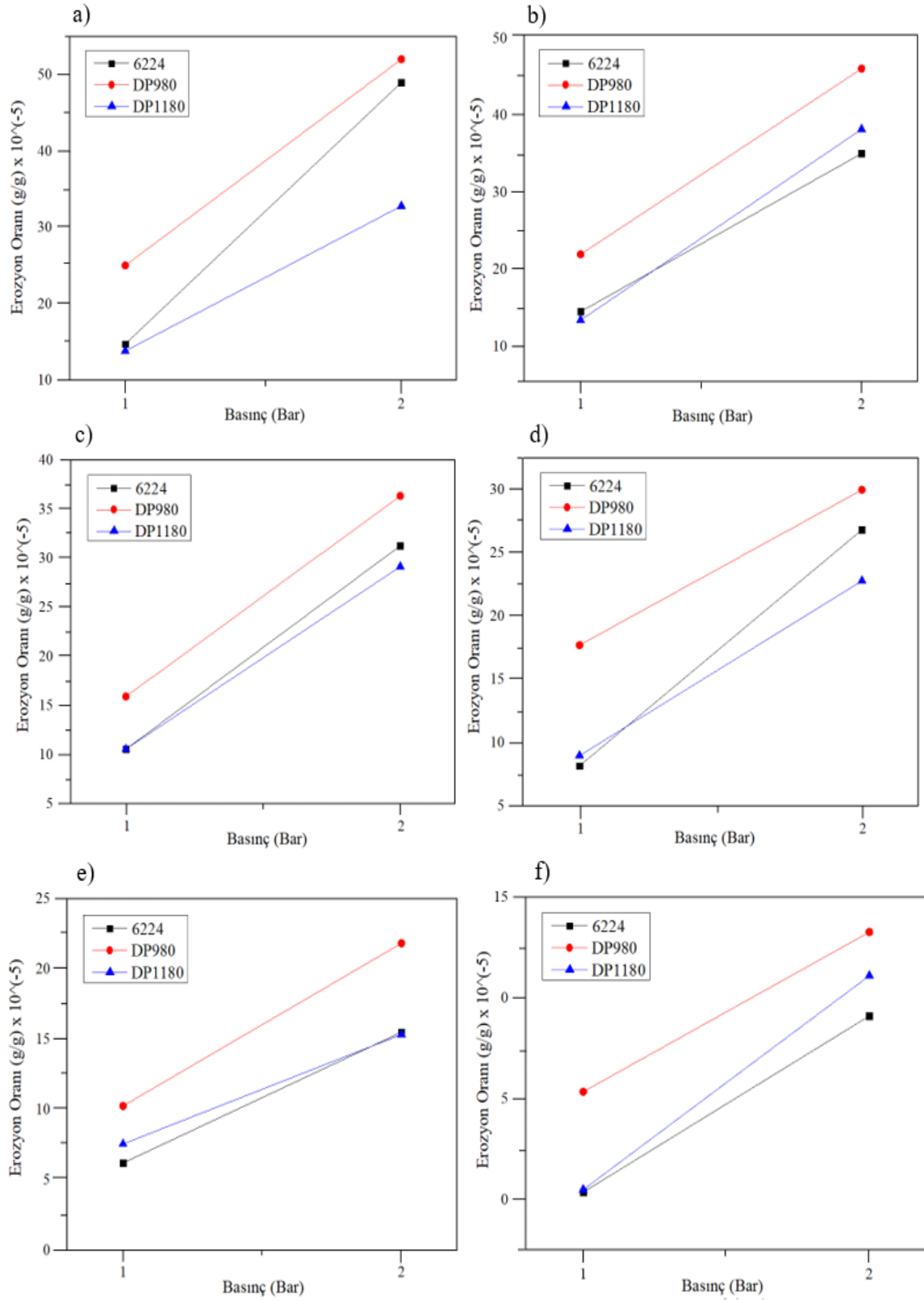
Dolayısıyla basınç artışı sonucunda daha fazla sayıda aşındırıcı parçacık, hedef malzemeye daha yüksek hız ile çarpmaktadır. Bu da malzemelerin daha yüksek püskürtme basınçlarında, düşük püskürtme basınçlarına göre daha fazla aşınmasına sebep olmaktadır.



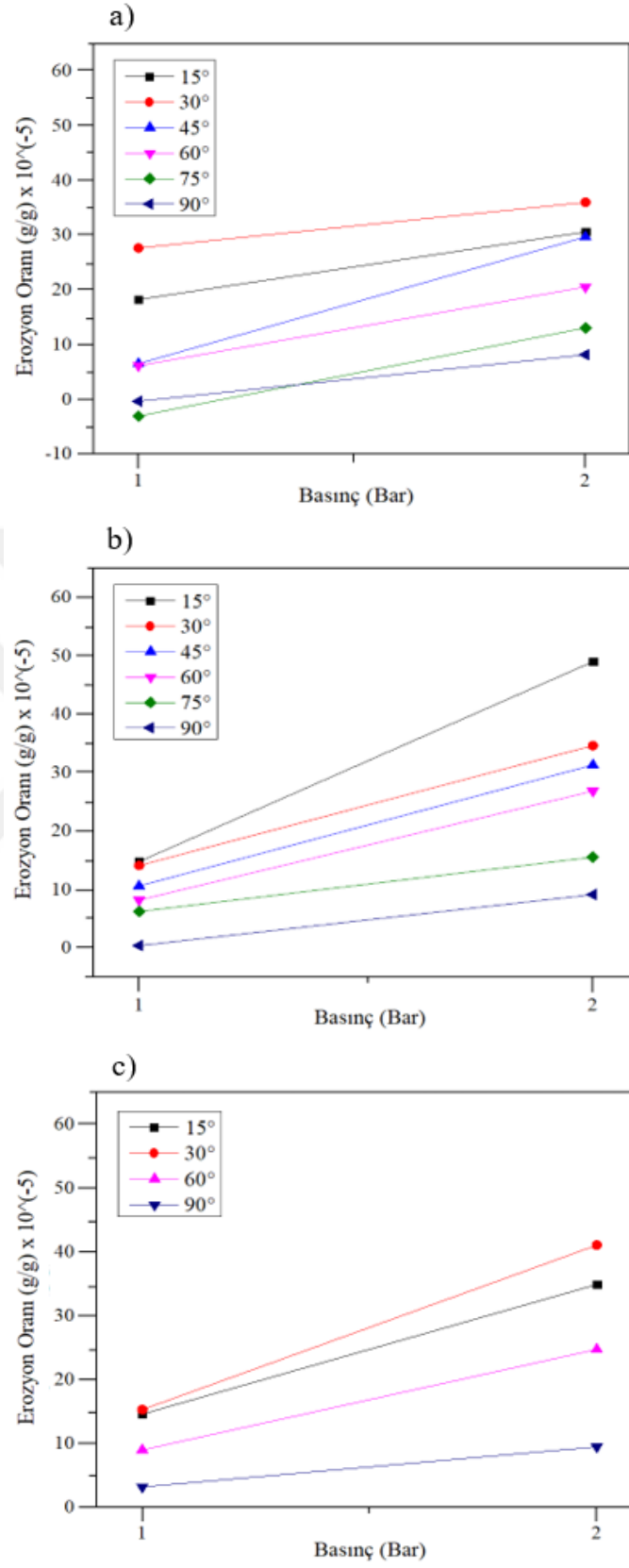
Şekil 6.5. Numunelerin 20 s maruz kalma süresinde ve 30° çarpma açısında basınca bağlı erozyon oranı değerleri: a) 6224, b) DP980, c) DP1080



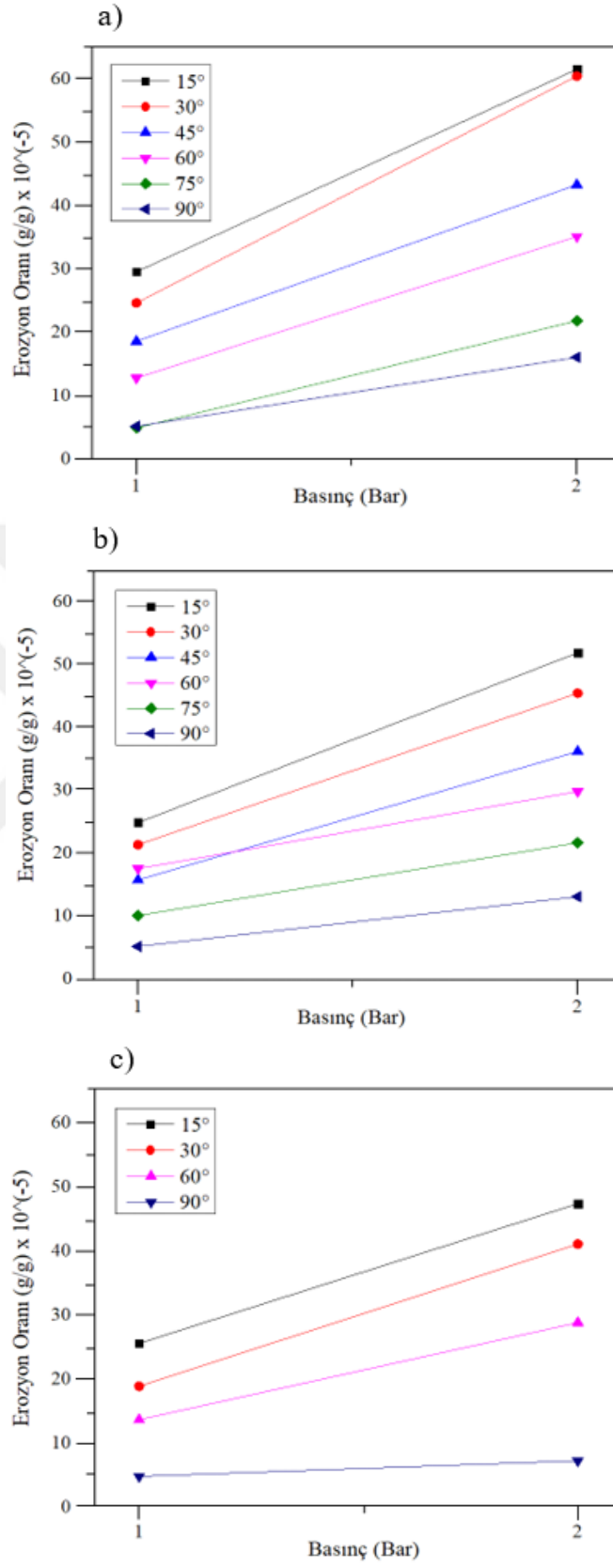
Şekil 6.6. Numunelerin 10 s maruz kalma süresinde ve çeşitli partikül çarpma açılarında basınca bağlı erozyon oranı değerleri: a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75°, f) 90°



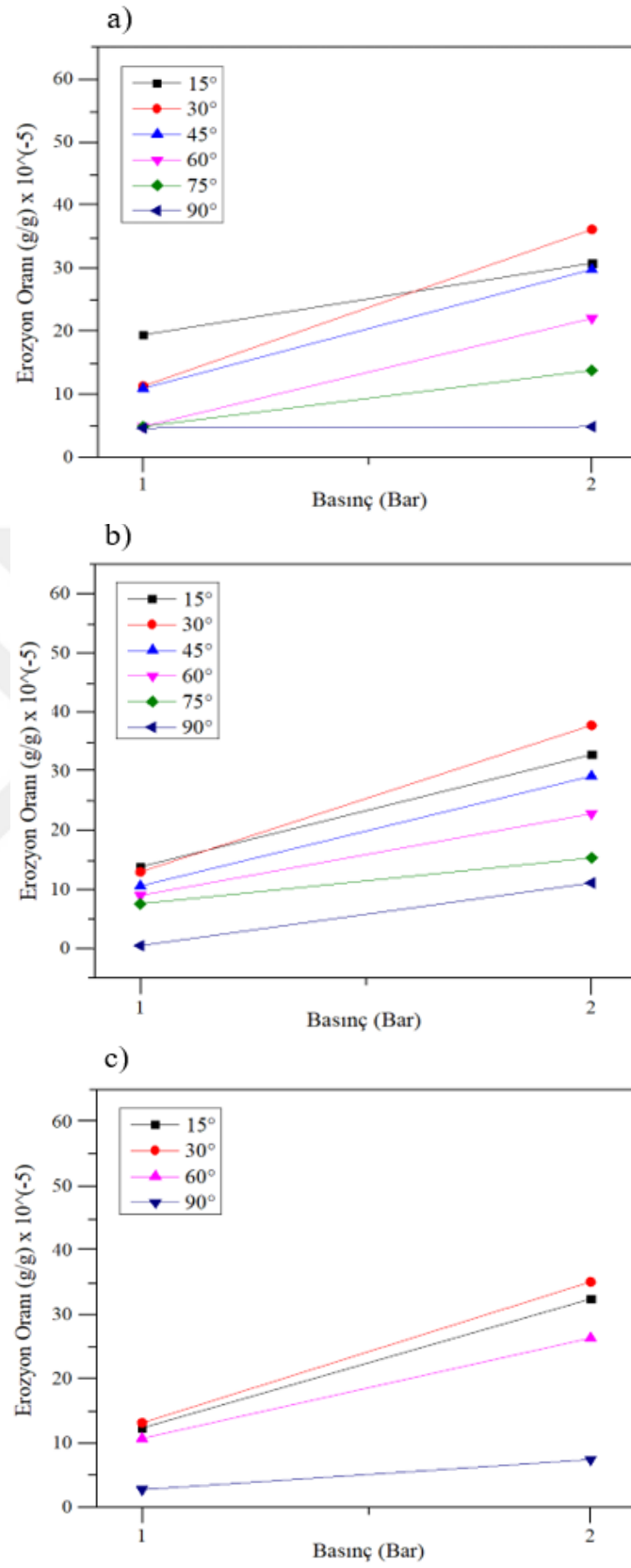
Şekil 6.7. Numunelerin 20 s maruz kalma süresinde çeşitli partikül çarpma açılarında basınca bağlı erozyon oranı değerleri: a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75°, f) 90°



Şekil 6.8. 6224 numunesinin çeşitli maruz kalma sürelerinde, basınca ve partikül çarpma açılarına göre erozyon oranı değerleri: a) 10 s, b) 20 s, c) 30 s



Şekil 6.9. DP980 numunesinin çeşitli maruz kalma sürelerinde, basınca ve partikül çarpma açılara göre erozyon oranı değerleri: a) 10 s, b) 20 s, c) 30 s



Şekil 6.10. DP1180 numunesinin çeşitli maruz kalma sürelerinde, basınca ve partikül çarpma açılarına göre erozyon oranı değerleri: a) 10 s, b) 20 s, c) 30 s

6.5. Katı Partikül Erozyonunun Numunelerin Mekanik Özelliklerine Bağlı Değişimi

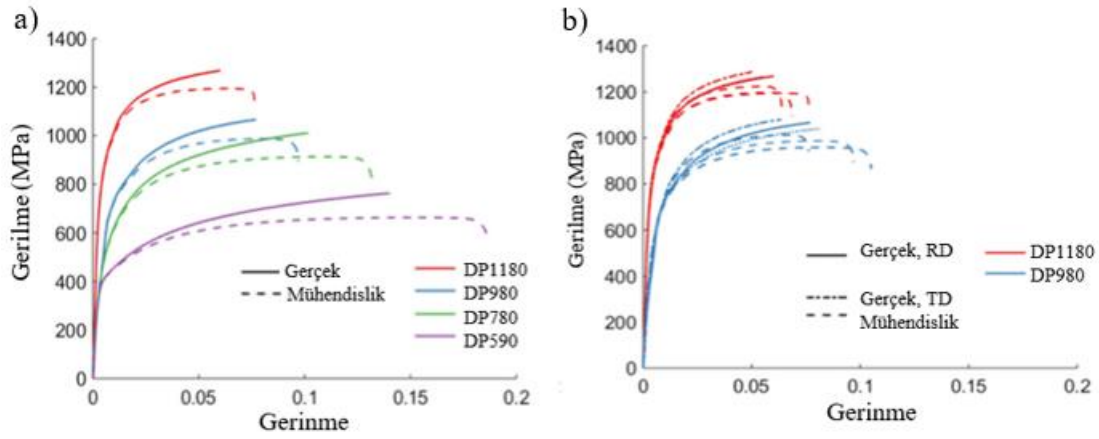
Bu bölümde farklı parametreler altında katı partikül erozyonuna maruz bırakılan 6224 sac malzemesi ile DP980 ve DP1180 çeliklerinin mekanik özelliklerinin, meydana gelen erozyon oranlarına etkisi ve bu amaçla numunelerin mekanik özelliklerine bağlı olarak erozyon oranları incelenmiştir.

Tablo 6.6’da DP980 ve DP1180 çeliklerinin haddeme yönündeki (RD) ve enine yöndeki (TD) mekanik özelliklerine yer verilmiştir. 50,4 mm uzunluğunda ve 11,7 mm genişliğinde ölçü bölgesine sahip 1 mm sac kalınlığındaki DP980 ve DP1180 numunelere, MTS 647 hidrolik çeneleri olan bir çekme test cihazında 10^{-3} s^{-1} sabit bir gerinim hızında çekme testleri uygulanmıştır (Poulin ve diğ., 2020).

Tablo 6.6’daki mekanik özellikler incelendiğinde DP1180 çeliğinin DP980 çeliğine göre akma dayanımının ve çekme dayanımının daha yüksek olduğu, çekme dayanımındaki ve kopma esnasındaki gerinim değerlerinin ise daha düşük olduğu görülmektedir. Şekil 6.11’de gösterilen gerilme- gerinim eğrilerinden de DP1180’in DP980’e göre dayanım değerlerinin daha yüksek olup uzama yani süneklik değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 6.6. DP980 ve DP1180 çeliklerinin haddeme yönündeki ve enine yöndeki mekanik özellikleri (Poulin ve diğ., 2020)

Mekanik Özellikler	DP980 (RD, haddeme yönü)	DP980 (TD, enine yön)	DP1180 (RD, haddeme yönü)	DP1180 (TD, enine yön)
%0,2 offset akma dayanımı (MPa)	630	634	839	851
Çekme dayanımı (MPa)	987	1012	1194	1223
Çekme dayanımında mühendislik gerinimi	0,0808	0,0658	0,0619	0,0545
Kopmada mühendislik gerinimi	0,0971	0,0764	0,0767	0,064



Şekil 6.11. DP çeliklerin çeşitli yönlerdeki gerilme-gerinim eğrileri: a) haddeleme yönü (RD), b) enine yön (TD) (Poulin ve diğ., 2020)

Ayrıca Tablo 6.7’de verilen 6224 sac malzemesinin ve Tablo 6.8’de verilen DP980 ve DP1180 çeliklerinin mekanik özellikleri incelendiğinde dual fazlı çeliklerin akma ve çekme dayanımlarının 6224 sac malzemesinin çok üzerinde olduğu görülmekte ve dolayısıyla dual fazlı çeliklerin mukavemet değerlerinin daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Tablo 6.7. 6224 sac malzemesinin mekanik özellikleri (https://www.erdemir.com.tr/Sites/1/upload/files/Yassi_Urun_Katalogu_2021_-_TR-4874.pdf)

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma/Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama
6224 sacı	235	350	0,671	31,8

Tablo 6.8. DP980 ve DP1180 çeliklerinin mekanik özellikleri (Madrid ve diğ., 2018)

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma/Çekme Dayanımı (MPa)	n (pekleşme üssü)	Martenzit Karbon İçeriği (% ağırlıkça)
DP980	716 ± 33	1043 ± 15	0,69	0,11	0,17
DP1180	827 ± 5	1256 ± 3	0,66	0,10	0,20

Tablo 6.3, Tablo 6.4 ve Tablo 6.5’teki deney verilerinden yararlanılarak numunelerde meydana gelen erozyon oranlarının değişimini gösteren şekiller, önceki bölümlerde gösterilmiştir. Şekil 6.4, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7 incelenip üç numune kıyaslandığında en

fazla aşınmanın DP980 çeliğinde meydana geldiği, diğer iki malzemenin yaklaşık aynı erozyon oranına sahip olmakla birlikte genel olarak 6224 sac malzemesinin erozyon oranının daha fazla olduğu ($ER_{DP980} > ER_{6224} > ER_{DP1180}$) görülmektedir.

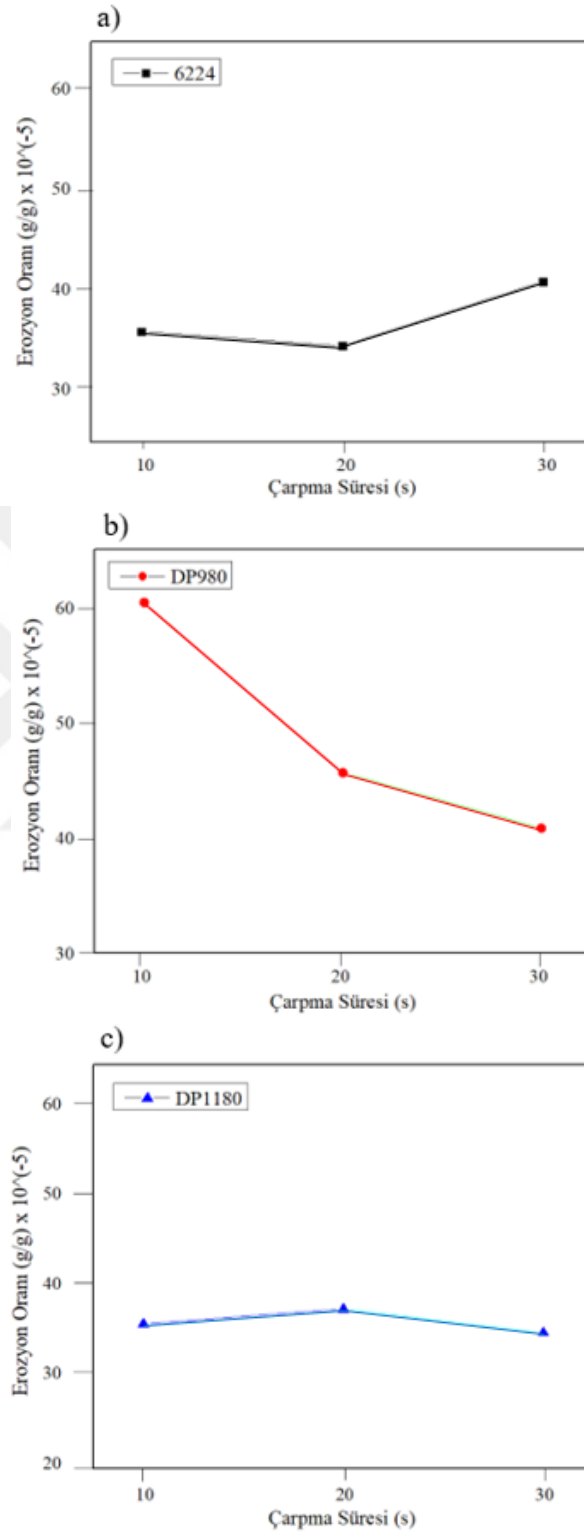
Mekanik özelliklerine bakıldığında mukavemet değerleri bakımından en yüksek özellikleri DP1180 sergilerken ardından DP980 iyi mekanik özellikler ($DP1180 > DP980 > 6224$) sergilemektedir. Bu durumda DP980 ile DP1180 çeliklerini kıyasladığımızda mekanik özellikleri iyi olan malzemelerin daha az aşındığı yani erozyona daha dirençli olduğu sonucuna varabilirken 6224 sac malzemesiyle DP980 çeliğini kıyasladığımızda mekanik özellikleri daha iyi olan DP980 çeliğinin daha fazla aşındığı görülmektedir. Bu nedenle malzemelerin mekanik özellikleriyle erozyon oranı arasında net bir ilişkinin bulunmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum malzemelerin talaşlı imalatla talaş verme kabiliyetiyle alakalı olabilmektedir.

6.6. Katı Partikül Erozyonunun Maruz Kalma Süresine Bağlı Değişimi

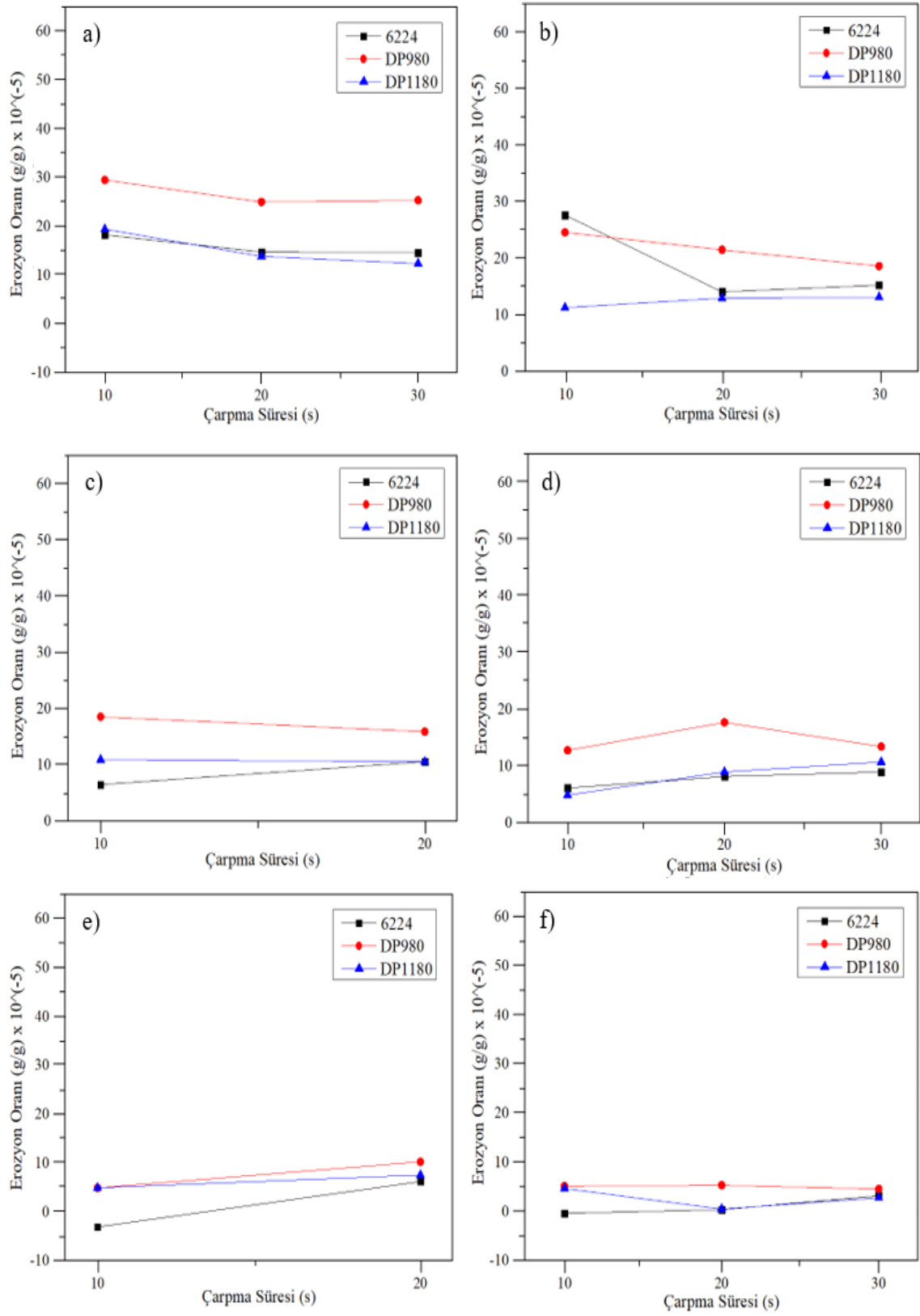
Bu bölümde 6224 sac malzemesinin, DP980 ve DP1180 çeliklerinin erozyon oranlarının farklı maruz kalma sürelerinde değişimi incelenmiştir. Bu amaçla alüminyum oksit aşındırıcılar numunelere 10 s, 20 s ve 30 s süreyle püskürtülmüştür. Tablo 6.3, Tablo 6.4 ve Tablo 6.5'teki deney verilerinden yararlanılarak Şekil 6.12'de 2 bar basınçta 30° çarpma açısında numunelerin ayrı ayrı erozyon oranları maruz kalma sürelerine bağlı olarak gösterilmiştir. Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'te sırasıyla 1 bar ve 2 bar basınçta tüm numunelerin erozyon oranlarının maruz kalma süresine bağlı değişimi gösterilmektedir.

Gerçek erozyon oranı değerleri çok küçük olduğu için grafiklerde 10^5 ile çarpılarak gösterilmiştir, bu değerleri 10^5 'e böldüğümüzde gerçek erozyon oranı değerlerine ulaşabiliriz. Dolayısıyla gerçek erozyon oranı değerlerini düşündüğümüzde Şekil 6.12, Şekil 6.13, Şekil 6.14'teki eğriler, aralarında çok az fark olduğundan yaklaşık olarak doğrusaldır. Yani numuneler 10 s, 20 s ve 30 s olmak üzere tüm maruz kalma sürelerinde aynı erozyon oranı değerlerini sergilemişlerdir. Diğer bir deyişle, maruz kalma süreleri 10'ar saniye artmasına rağmen numuneler aynı aşınma direncini sergilemiştir. Bu durum, maruz kalma süresinin artmasıyla aşınmanın artmaya devam ettiği ancak bu sırada gönderilen toplam aşındırıcı miktarının da artmasıyla numunenin aşınma miktarının

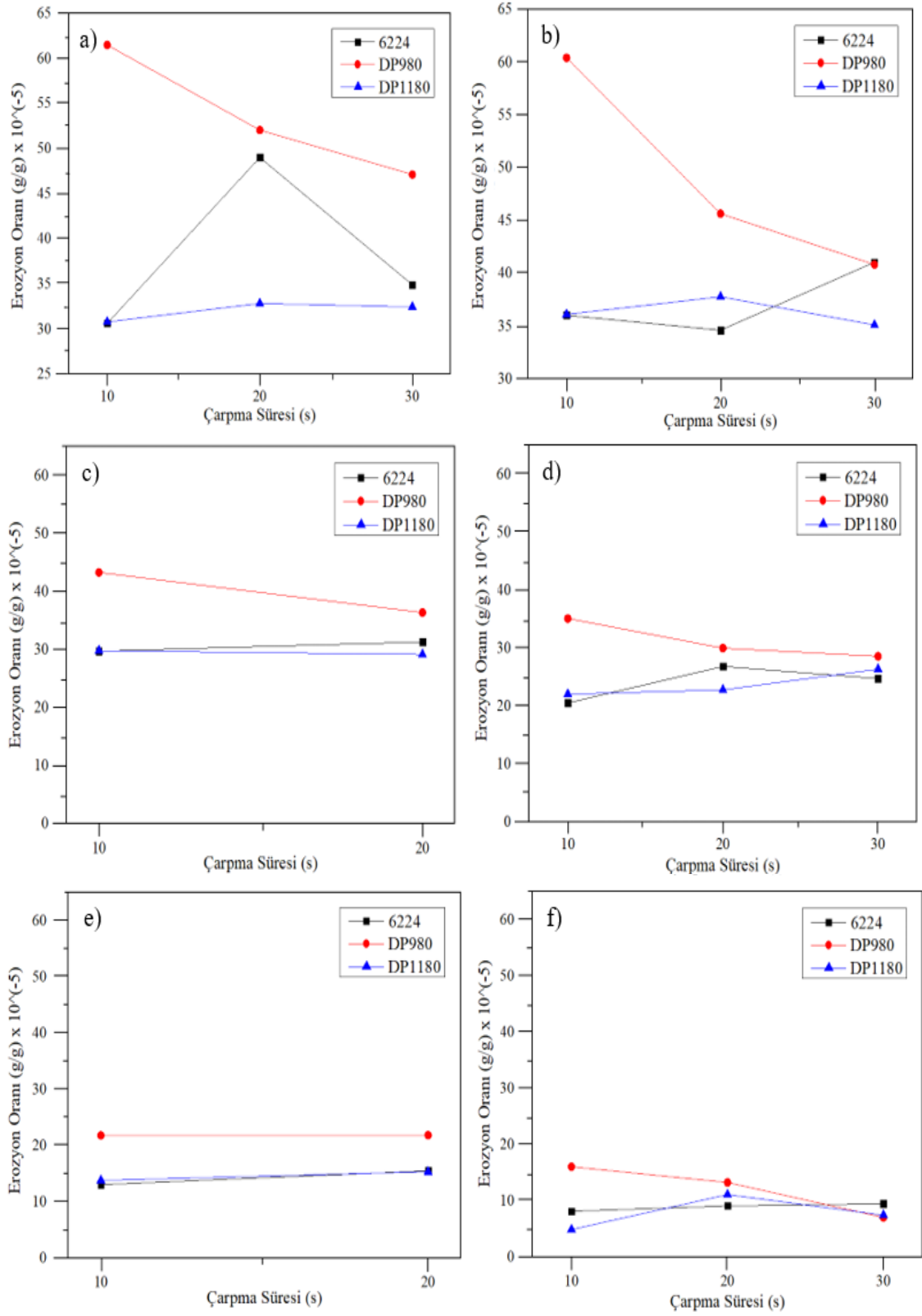
gönderilen toplam aşındırıcı miktarına bölünmesiyle elde edilen erozyon oranı değerinin sabit kalmasına neden olduğu şeklinde açıklanabilir.



Şekil 6.12. 2 bar basınçta ve 30° çarpma açısında numunelerin maruz kalma süresine bağlı erozyon oranları: a) 6224, b) DP980, c) DP1180



Şekil 6.13. Numunelerin 1 bar basınçta, çeşitli partikül çarpma açılarında, maruz kalma süresine bağlı erozyon oranı değerleri: a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75°, f) 90°



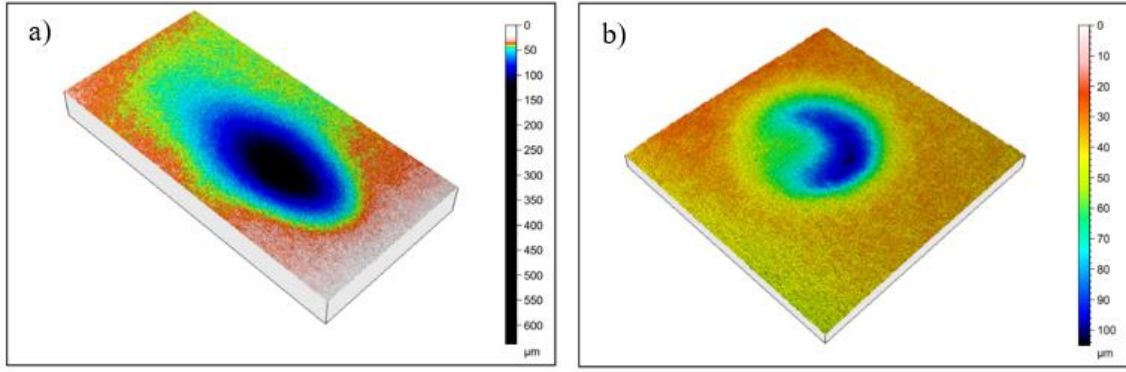
Şekil 6.14. Numunelerin 2 bar basınçta, çeşitli partikül çarpma açılarında, maruz kalma süresine bağlı erozyon oranı değerleri: a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75°, f) 90°

6.7. Numunelerin Yüzey Topografyaları

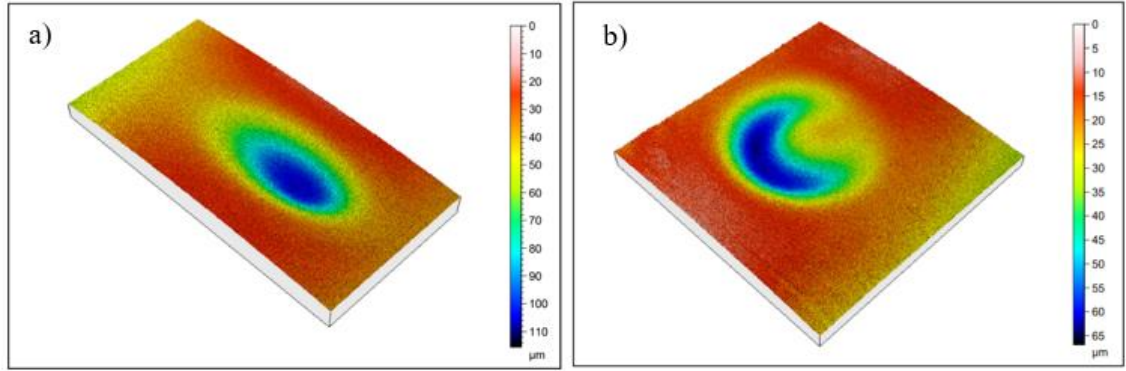
Önceki bölümlerde; deneylerde kullanılan numunelerde meydana gelen erozyon oranlarının genel olarak 15° - 30° çarpma açılarında en yüksek, 90° çarpma açısında en düşük olduğu belirtilmiştir. Bu sonuçlardan yararlanarak, bu bölümde en fazla aşınmanın meydana geldiği parametreler olan 2 bar basınç ile 20 s maruz kalma süresinde, partikül çarpma açısı olarak 30° ve 90° 'de aşınmaya maruz kalmış numunelerin optik profilometre yardımıyla yüzeyleri taranıp yüzey pürüzlülük değerleri ve yüzey topografyası elde edilmiştir. Şekil 6.15, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'de gösterilen yüzey topografyaları ile numunelerin yüzey dokusunu görebiliriz. Topografyalar incelendiğinde tüm numune yüzeylerindeki aşınmanın; 30° çarpma açısında daha geniş bir alana yayıldığı, 90° çarpma açısında ise daha bölgesel olduğu görülmektedir. Ayrıca 30° çarpma açısında aşınma miktarının fazla olmasından dolayı aşınma izinin derinliğinin 90° çarpma açısına kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir.

Aşınmanın yüzeyde yayılmış olmasının nedeni; 30° çarpma açısında yatay hız bileşeninin fazla olmasının etkisiyle sürekli aşınma davranışı gösteren numunelerin mikro kesme ve mikrosürme mekanizmalarıyla kesilerek ve sürülerek malzemenin kaldırılmasını sağladığı düşünülmektedir. Ek olarak, düşük çarpma açısında gönderilen aşındırıcı parçacıkların birbiriyle etkileşime girme durumunun az olmasından dolayı aşındırıcıların yüzeye ulaşmadan geri sekmesiyle karşılaşılma durumu daha azdır.

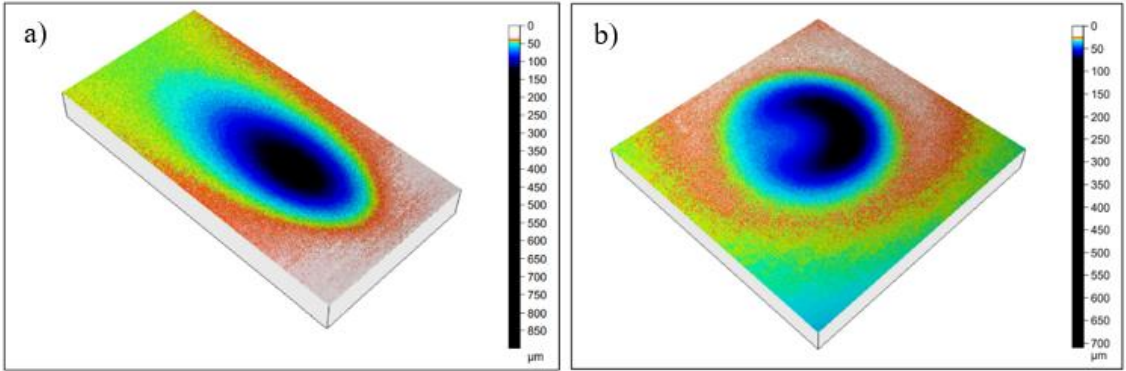
Yatay hız bileşeninin olmadığı 90° çarpma açısında aşınma izinin dairesel şekle sahip olması ise aşındırıcıların sadece dik bir şekilde gönderilmesi sonucu yoğun olarak belirli bir bölgeye çarpmalarından dolayı oradaki tekrarlı darbe etkisiyle malzemenin kaldırılmasından kaynaklanabilmektedir. 90° çarpma açısında aşınma izinin derinliğinin düşük olmasının, yüksek çarpma açısında gönderilen aşındırıcıların birbirleriyle etkileşime girerek arkadan gelenlerin yönlerinin saptırılması sonucunda yüzeye ulaşsalar bile aktardıkları enerjinin düşük olması nedeniyle yüksek miktarda malzeme kaldıramamalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca dik hız bileşeninin, yüzeyde yorulma ile çatlak oluşumuyla malzeme kaldırmada etkin olmasından dolayı sürekli aşınma davranışı gösteren numunelerden yüksek miktarda malzeme kaldıramamasından kaynaklanabilmektedir.



Şekil 6.15. 6224 sac malzemesinin 2 bar püskürtme basıncında ve 20 s maruz kalma süresinde aşınmış yüzeylerinin topografyası: a) 30°, b) 90°



Şekil 6.16. DP980 çeliğinin 2 bar püskürtme basıncında ve 20 s maruz kalma süresinde aşınmış yüzeylerinin topografyası: a) 30°, b) 90°



Şekil 6.17. DP1180 çeliğinin 2 bar püskürtme basıncında ve 20 s maruz kalma süresinde aşınmış yüzeylerinin topografyası: a) 30°, b) 90°

6.8. Numunelerin Pürüzlülük Değerleri

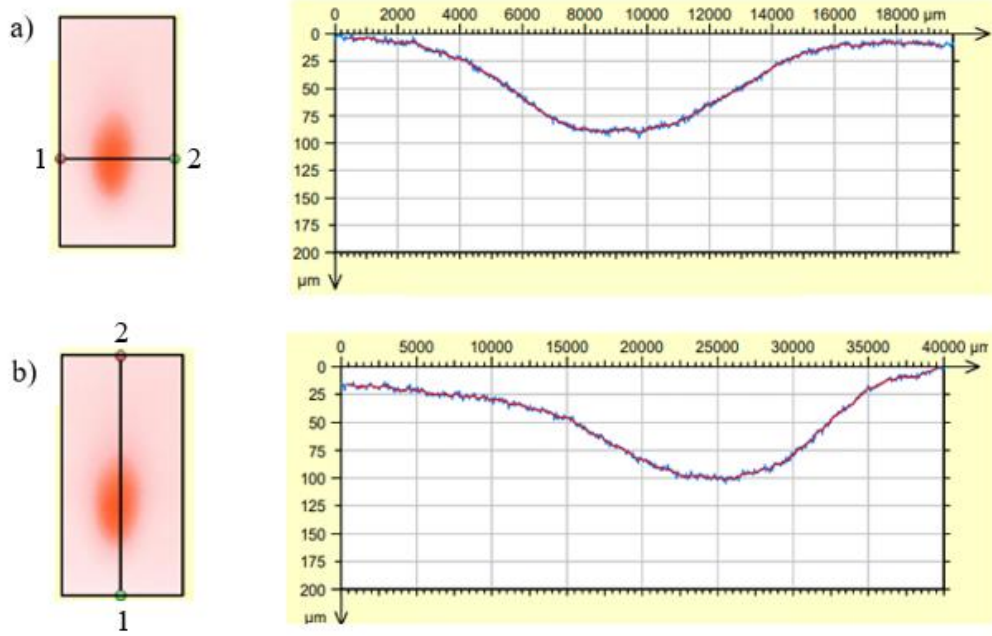
Şekil 6.18- Şekil 6.23'te numunelerin 2 bar basınçta, 20 s maruz kalma süresinde 30° ve 90° çarpma açılarındaki 1 ve 2 olarak numaralandırılan yönler bağli olarak yatay ve

dikey pürüzlülüklerinin çıkarıldığı profiller ile kalınlıkları boyunca pürüzlülükleri gösterilmiştir. Şekil 6.18- Şekil 6.23 incelendiğinde yatay profillerin dikey profillere kıyasla pürüzlülüklerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Çünkü mikro kesme ve mikrosürme mekanizmalarıyla aşınarak sünek aşınma davranışı gösteren numuneler, erozyon yönüne bağlı olarak dikey profil çizgisi boyunca aşındırıcıların kesme ve sürme etkilerine maruz kalacağından bu doğrultuda daha fazla erozyon gerçekleşir ve dolayısıyla yatay profil çizgisine kıyasla dikey profil çizgisinde daha az pürüzlülük farkı meydana gelir. Bu nedenle grafiklerde yatay profil çizgisindeki yüzey pürüzlülüğünün, dikey profil çizgisindeki pürüzlülüğe göre daha fazla olduğunu görürüz.

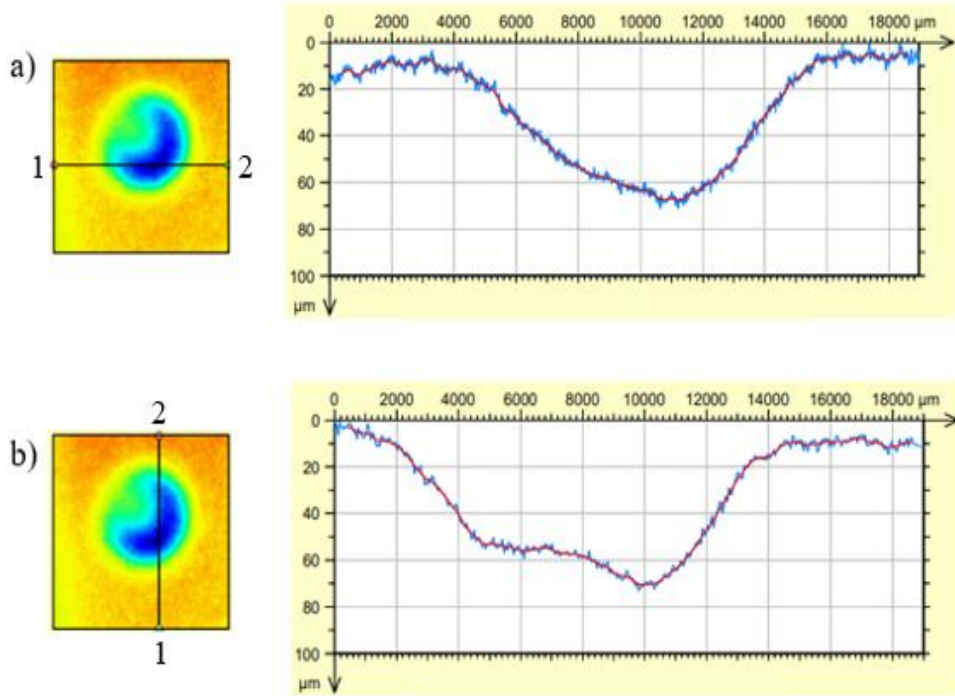
Şekil 6.24- Şekil 6.28’de numunelerin 2 bar, 20 s’de çarpma açılarına bağlı olarak (30° ve 90°), yatay ve dikey profil çizgilerinde olmak üzere sırasıyla R_a , R_t , S_a , S_q ve P_t pürüzlülük değerleri gösterilmiştir. Şekil 6.24- Şekil 6.28 incelendiğinde yatay ve dikey pürüzlülük değerlerinin ikisinde de 30° çarpma açılarındaki pürüzlülük değerlerinin 90° ’dekilere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Önceki bölümlerde en çok aşınmanın 15° - 30° çarpma açılarında, en az aşınmanın 90° çarpma açısında gözlemlendiğinden bahsedilmişti. Dolayısıyla en çok aşınmanın gözlemlendiği çarpma açısında pürüzlülük değerinin daha fazla olması, aşınma ile yüzey pürüzlülüğü arasında doğrusal bir uyum olduğunu göstermektedir.

P_t pürüzlülük değeri, aşınan malzemede oluşan çukurun dibi ile malzemenin üst yüzeyi arasındaki mesafedir. Şekil 6.28’deki sütun grafiğinde, Şekil 6.29’da gösterilen yatay profil çizgisi boyunca olan P_t pürüzlülük değerleri gösterilmektedir. Şekil 6.29’da gösterilen aşındırılmış numunelerde, kalınlık kesiti boyunca olan pürüzlülükler incelendiğinde 30° ve 90° partikül çarpma açılarının her ikisinde de DP980 numunesinin merkezindeki yüzeyden kaldırılmış malzeme hacminin fazla olduğu görülmektedir. Önceki bölümlerde en fazla erozyon oranının 15° - 30° çarpma açılarında, en düşük erozyon oranının ise 90° çarpma açısında gözlemlendiğinden bahsedilmişti. Şekil 6.28 ve Şekil 6.29; bu durumu desteklemektedir çünkü Şekil 6.28’de tüm numunelerin P_t pürüzlülük değerlerinin 30° çarpma açısında 90° ’ye kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 6.29 (a)’daki 30° çarpma açısında malzemenin kaldırılması dolayısıyla oluşan erozyon krateri, Şekil 6.29 (b)’deki 90° çarpma açısındakine göre daha

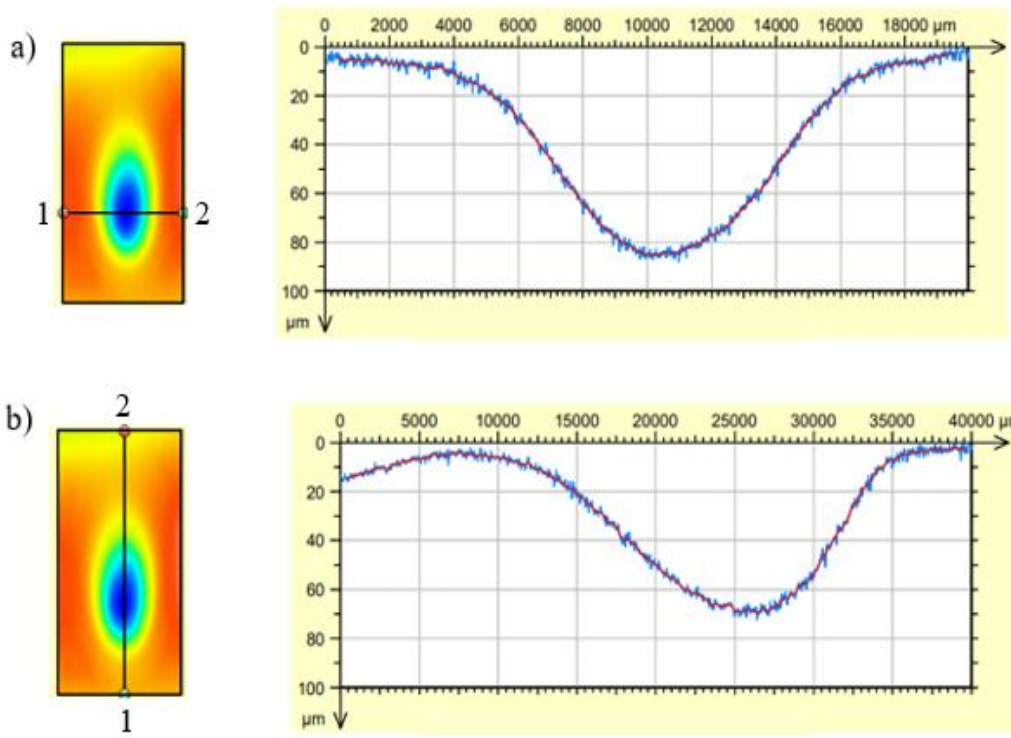
belirgindir. Diğer numunelerde de aynı sonuç ve görseller elde edildiği için sadece Şekil 6.29’da gösterilen DP980 numunesinin sonucuna yer verilmiştir.



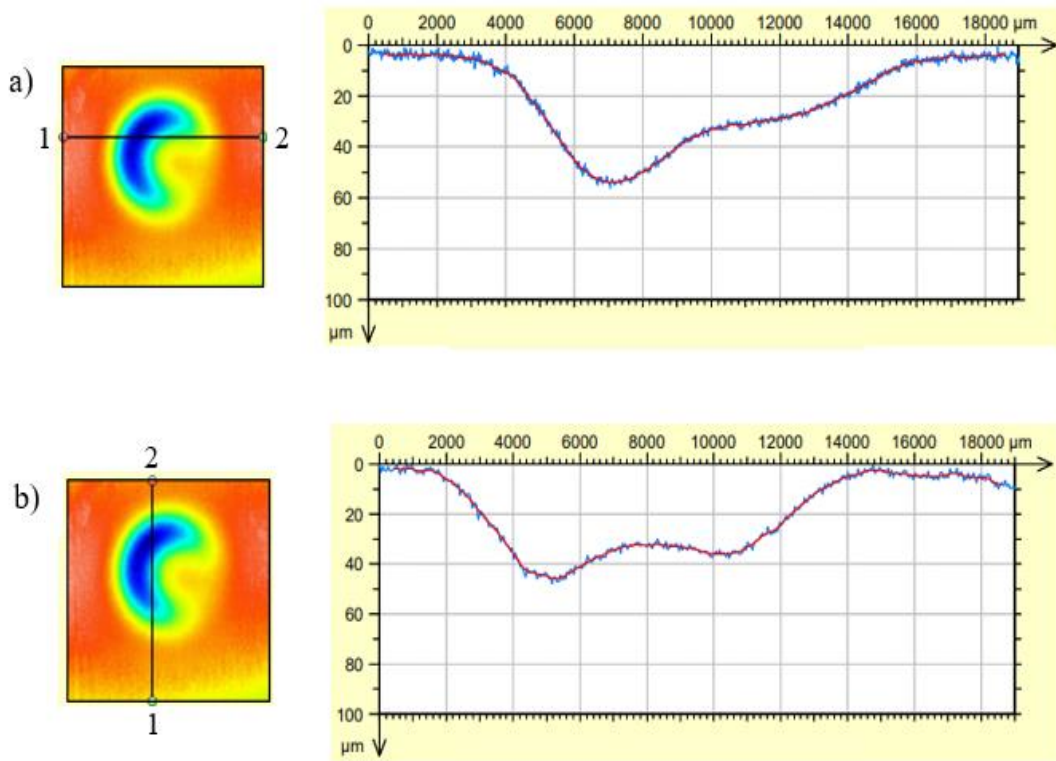
Şekil 6.18. 6224 sac malzemesinin 2 bar, 20 s, 30°’de pürüzlülükleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi



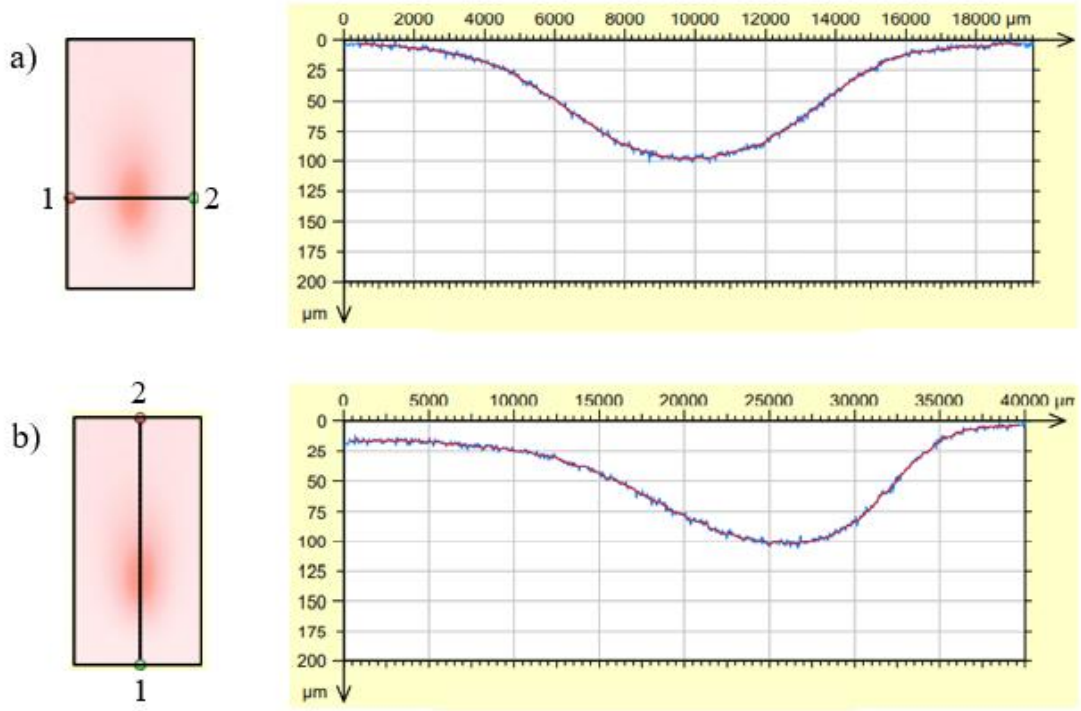
Şekil 6.19. 6224 sac malzemesinin 2 bar, 20 s, 90°’de pürüzlülükleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi



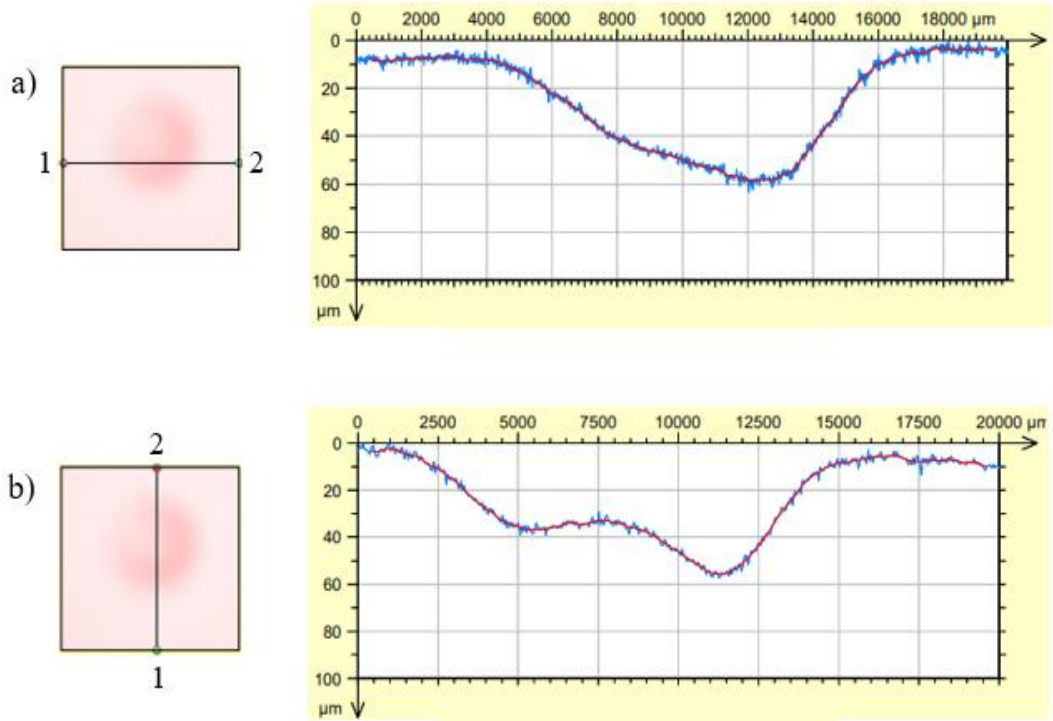
Şekil 6.20. DP980 çeliğinin 2 bar, 20 s, 30°'de pürüzlülükleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi



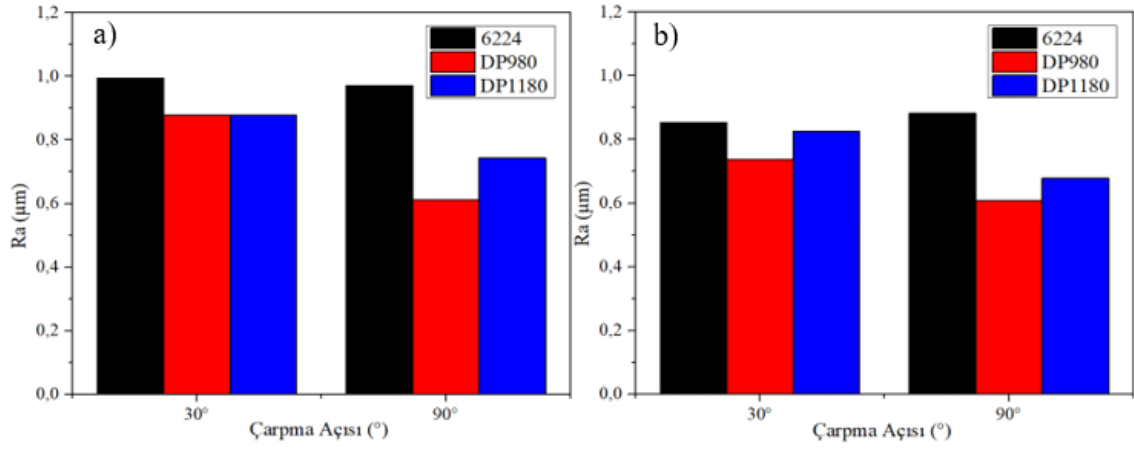
Şekil 6.21. DP980 çeliğinin 2 bar, 20 s, 90°'de pürüzlülükleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi



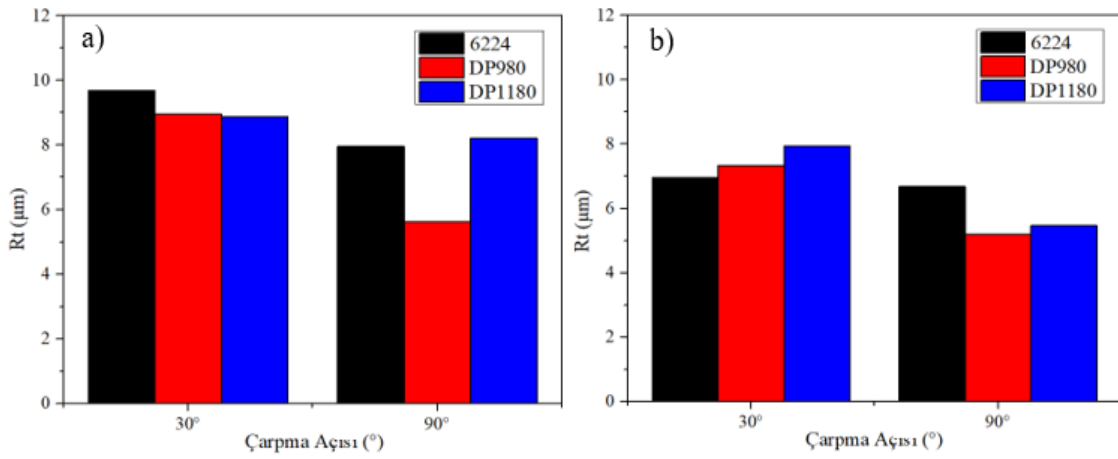
Şekil 6.22. DP1180 çeliğinin 2 bar, 20 s, 30°'de pürüzlülükleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi



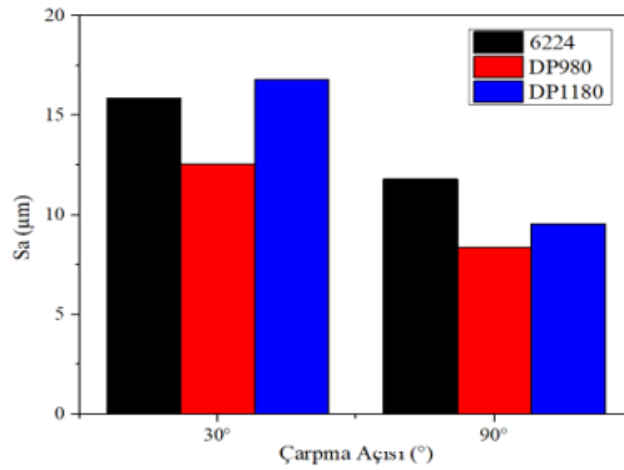
Şekil 6.23. DP1180 çeliğinin malzemesinin 2 bar, 20 s, 90°'de pürüzlülükleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi



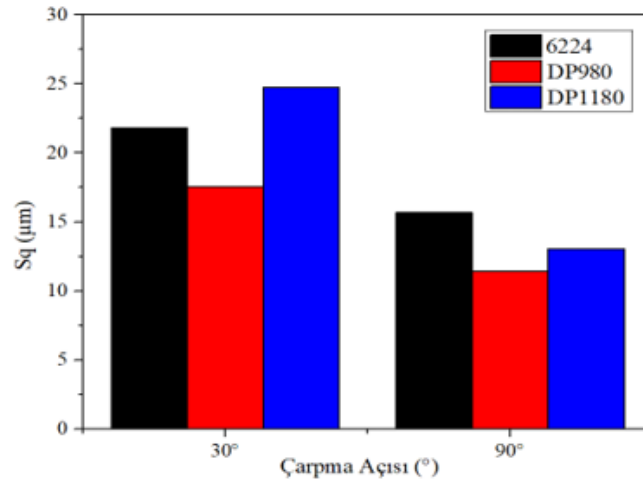
Şekil 6.24. 2 bar 20 s’de numunelerin R_a pürüzlülük değerleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi



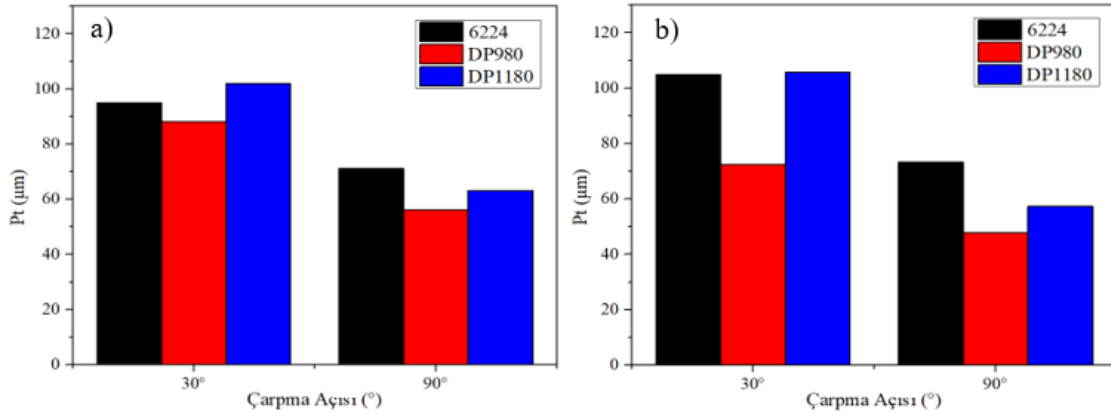
Şekil 6.25. 2 bar 20 s’de numunelerin R_t pürüzlülük değerleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi



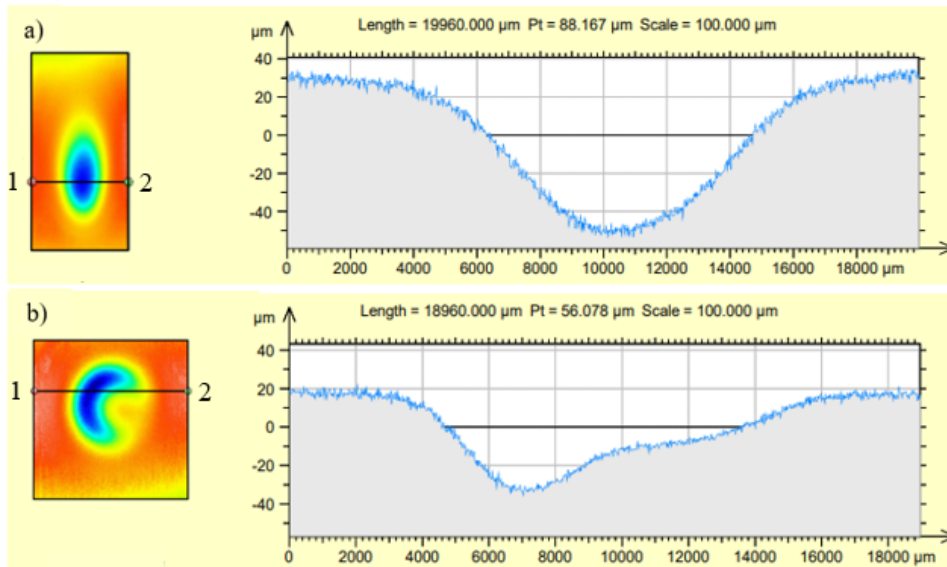
Şekil 6.26. 2 bar 20 s’de numunelerin yatay ve dikey profil çizgilerindeki S_a pürüzlülük değerleri



Şekil 6.27. 2 bar 20 s’de numunelerin yatay ve dikey profil çizgilerindeki Sq pürüzlülük değerleri



Şekil 6.28. 2 bar 20 s’de numunelerin Pt pürüzlülük değerleri: a) yatay profil çizgisi, b) dikey profil çizgisi



Şekil 6.29. DP980 numunesinin çeşitli partikül çarpma açılarında 2 bar 20 s’de yatay profil çizgilerindeki Pt pürüzlülük değerleri: a) 30°, b) 90°

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- Katı partikül erozyonu testlerinde tüm malzemelerde en fazla erozyon oranı, düşük partikül çarpma açılarında (15° - 30°) meydana geldiği için sünek aşınma davranışı sergiledikleri gözlenmiştir. Bu sonuç, sünek malzemelere uygulanan erozif aşınma testlerindeki sünek malzemelerin eğik açılarda daha fazla erozyona uğradığı sonucuyla uyumludur.

- Püskürtme basıncının artmasıyla malzemelerde meydana gelen aşınma miktarı artmıştır. Bu sonuç, literatür çalışmalarındaki püskürtme basıncının artırılmasıyla aşındırıcının hedef yüzeye aktardığı enerjinin artması sonucu erozyon oranını artırdığı sonucuyla uyumludur.

- En yüksek mekanik özelliği DP1180 çeliği sergilerken en düşük mekanik özelliği 6224 sac malzemesi sergilemiştir ($DP1180 > DP980 > 6224$). En çok aşınma DP980 çeliğinde meydana gelmiştir ve DP1180 çeliği en yüksek erozyon direncini sergilemiştir ($ER_{DP980} > ER_{6224} > ER_{DP1180}$). Dolayısıyla malzemelerin mekanik özellikleriyle erozyon oranı arasında net bir ilişki bulunmadığından meydana gelen aşınmanın mekanik özelliklerden bağımsız olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

- Maruz kalma süresinin artmasıyla aşınmanın ve gönderilen toplam aşındırıcı miktarının artmaya devam etmesi sebebiyle erozyon oranı değerinin (numunenin aşınma miktarının gönderilen toplam aşındırıcı miktarına oranı) sabit kaldığına ulaşılmıştır.

- Eğik çarpma açılarında (30°), malzemede aşınmanın meydana geldiği profile (dikey profil çizgisi) dik olan profilde (yatay profil çizgisi) daha yüksek pürüzlülük değerleri gözlenmiştir.

- Aşınmanın fazla olduğu 30° çarpma açısında yüzey pürüzlülüklerinin de fazla olması dolayısıyla aşınma ile yüzey pürüzlülüğü arasında doğrusal bir ilişki olduğuna ulaşılmıştır.

- 30° çarpma açısında malzemenin kaldırılması dolayısıyla oluşan erozyon krateri, 90° çarpma açısındakine göre daha belirgindir ve her iki açıda da numunenin merkezinden daha fazla malzeme kaldırılmıştır.

KAYNAKLAR

- Abbasi, S. (2011). Characterisation of Airborne Particles From Rail Traffic. Licentiate Thesis, Department of Machine Design Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Akbarpour, M. R., Ekrami, A. (2008). Effect of Ferrite Volume Fraction on Work Hardening Behavior of High Bainite Dual Phase (DP) Steels. *Materials Science and Engineering*, 477(1-2), 306–310. DOI: 10.1016/j.msea.2007.05.051
- Akbaş, B. (2019). Simulation of Laminar Microchannel Flows With Realistic 3D Surface Roughness. Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
- Alqallaf, J., Ali, N., Teixeira, J. A., Addali, A. (2020). Solid Particle Erosion Behaviour and Protective Coatings for Gas Turbine Compressor Blades- A Review. *Processes*, 8(8), 984. DOI: 10.3390/pr8080984
- Arslan, G. (2017). Hava Araçlarında Yıldırımsavar Hibrit Kompozitlerde Katı Partikül Erozyonunun Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 511152.
- Avcu, E. (2011). Farklı Büyüklüklere Sahip Aşındırıcı Partikül Karışımlarının Ti6Al4V Alaşımının Eroziyon Davranışına Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 283038.
- Avcu, E., Fidan S., Bora, M. Ö., Çoban, O., Taşkıran, İ. (2012). Solid Particle Erosive Wear Behavior of Glass Mat Reinforced PPS Composites: Influence of Eroding Particle Size, Pressure, Particle Impingement Angle, and Velocity. *Advances in Polymer Technology*. DOI: 10.1002/adv.21286
- Avcu, E. (2013). Titanyum Alaşımlarının Partikül Erozyonu İle Pürüzlendirilmesi ve Aşındırılması İşlemlerinin Optimizasyonu. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 348736.
- Babich, A., Senk, D. (2019). Coke In the Iron and Steel Industry. *New Trends in Coal Conversion*, 367-404. DOI: 10.1016/B978-0-08-102201-6.00013-3
- Barkoula, N.M., Kocsis, J. K. (2002). Review Processes and Influencing Parameters of The Solid Particle Erosion of Polymers and Their Composites. *Journal Of Materials Science*, 37(18), 3807 – 3820. DOI: 10.1023/A:1019633515481
- Bastidas, D. M., Ress, J., Bosch, J., Martin, U. (2021). Corrosion Mechanisms of High-Mn Twinning-Induced Plasticity (TWIP) Steels: A Critical Review. *Metals*, 11(2), 287. DOI: 10.3390/met11020287
- Biçen, M. (2019). Farklı Ark Kaynak Yöntemleriyle Birleştirilen Yüksek Mukavemetli API 5L X80 Çeliğinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 572701.

- Bilir, O. G. (2014). Orta Karbonlu Dual Fazlı Çeliklerde Faz Dönüşümlerinin Termodinamik Modellenmesi Ve Mikroyapısal Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 372698.
- Bilir, Y. (2016). Çift Fazlı Çeliklerde Mikroyapının Mekanik Özelliklere Etkisi. 18th International Metallurgy & Materials Congress.
- Bircan, B. (2014). Inconel 718 Alaşımının Katı Partikül Erozyon Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 353711.
- Bojdo, N., Filippone, A. (2014). Effect of Desert Particulate Composition on Helicopter Engine Degradation Rate. *40th European Rotorcraft Forum, Southampton*. DOI: 10.13140/2.1.2959.8086
- Bousser, E. (2013). Solid Particle Erosion Mechanisms of Protective Coatings for Aerospace Applications. Doktora Tezi, Université De Montreal, Departement De Genie Physique, Canada.
- Chang, C. (2010). Correlation Between the Microstructure of Dual Phase Steel and Industrial Tube Bending Performance. Electronic These, University of Windsor, Canada, 178.
- Chen, Q., Li, D. Y. (2003). Computer Simulation of Solid Particle Erosion. *Wear*, 254(3-4), 203–210. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00006-1
- Choi, K. S., Liu, W. N., Sun, X., Khaleel, M. A., (2009). Influence of Martensite Mechanical Properties on Failure Mode and Ductility of Dual-Phase Steels. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, 40(4), 796-809. DOI: 10.1007/s11661-009-9792-6
- Çelik, K. A. (2007). Development of A Methodology For Prediction of Surface Roughness of Curved Cavities Manufactured By 5-Axes Cnc Milling. Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 199163.
- Dağışan, E. (2007). Çift Fazlı Çeliklerin Eroziv Aşınma Davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 177693.
- Davut, K., Şimşir, C., Çetin, B. (2018). Strain Hardening Behavior Characterization of Dual Phase Steels. *Hittite Journal of Science and Engineering*, 5(4), 301-306. DOI: 10.17350/HJSE19030000107
- Ediriweera, M., Chladek, A., Ratnayake, C. (2019). Effect of Impact Angle, Exposure Time, and Particle Size On Impact Erosion. *Particulate Science and Technology*, 1-9. DOI: 10.1080/02726351.2019.1663328

- Efe, M., Şimşir, C., Bayramin, B., Atik, K., Çobanoğlu, M. (2019). Çift Fazlı Çeliklerin Yüksek Sıcaklık ve Endüstriyel Deformasyon Hızlarında Şekillendirilebilirliği. Tübitak, Ankara.
- Ekrami, A. (2005). High Temperature Mechanical Properties of Dual Phase Steels. *Materials Letters*, 59(16), 2070-2074. DOI: 10.1016/j.matlet.2005.02.018
- Endo, S., Nagae, M. (1996). Ferrite-Martensite Dual Phase Anti-Erosion Steel. *ISIJ International*, 36(1), 95-100. DOI: 10.2355/isijinternational.36.95
- Evstifeev, A., Kazarinov, N., Petrov, Y., Witek, L., Bednarz, A. (2018). Experimental And Theoretical Analysis of Solid Particle Erosion of A Steel Compressor Blade Based on Incubation Time Concept. *Engineering Failure Analysis*, 87, 15-21. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.01.006
- Fidan, S., Sınmazçelik, T. (2006). Polimerler ve Polimer Kompozitlerde Katı Partikül Erozyonun Mekanizmaları ve Malzeme Performansını Etkileyen Faktörler. 13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 9-11 Kasım.
- Finnie, I. (1960). Erosion of Surfaces By Solid Particles. *Wear*, 3(2), 87-103. DOI: 10.1016/0043-1648(60)90055-7
- Fonstein, N. (2017). Dual-Phase Steels. 169-216. DOI: 10.1016/B978-0-08-100638-2.00007-9
- Friedrich, K. (2015). Routes For Achieving Multifunctionality In Reinforced Polymers And Composite Structures. 3-41. DOI: 10.1016/B978-0-323-26434-1.00001-5
- Furman, G., Roever, E., Frette, G., Gomez, S. (2010). Analysis of the Surface Softness of Tissue Paper Using Confocal Laser Scanning Microscopy. 26(3), 30-38.
- Gedikli, H., Özen, İ. (2020). Helikopter Pali Aşınma Kalkanındaki Katı Partikül Erozyon Davranışının İncelenmesi. *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 26(1), 68-74. DOI: 10.5505/pajes.2019.82150
- Gohardani, O. (2011). Impact of Erosion Testing Aspects on Current And Future Flight Conditions. *Progress in Aerospace Sciences*, 47(4), 280-303. DOI: 10.1016/j.paerosci.2011.04.001
- Hamamcı, M. (2012). Yüksek Hızlı İşlemede Kesme Parametrelerinin Yüzey Kalitesi Açısından Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 329490.
- Han, F., Wang, Y., Wang, Z. L. (2018). Mechanical Bending Property of Ultra-High Strength Steel Sheets In Roll Forming Process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 19(12), pp. 1885-1893. DOI: 10.1007/s12541-018-0216-7

- He, G., Sun, D., Chen, J., Han, X., Zhang, Z., Fang, Z., Yang, L. Yang, Z. (2019). Key Problems Affecting the Anti-Erosion Coating Performance of Aero-Engine Compressor: A Review. *Coatings*, 9, 821. DOI: 10.3390/coatings9120821
- Hilditch, T.B., Souza, T., Hodgson, P. D. (2015). Properties and Automotive Applications of Advanced High-Strength Steels (AHSS). 9-28. DOI: 10.1016/B978-0-85709-436-0.00002-3
- Ishikawa, T. (2012). Understanding and Controlling Microstructural Evolution In Metal Forming: An Overview. *Woodhead Publishing Limited*, 3-16, DOI: 10.1533/9780857096340.1.3
- Javaheri, V. (2019). Design, Thermomechanical Processing And Induction Hardening of A New Medium-Carbon Steel Microalloyed With Niobium. Doktora Thesis, University of Oulu Graduate School, Faculty of Technology Acta University, Finland, Oul. C 713.
- Javaheria, V., Portera, D., Kuokkalab, V. T. (2018). Slurry Erosion of Steel – Review of Tests, Mechanisms and Materials. *Wear*, 408–409, 248-273. DOI: 10.1016/j.wear.2018.05.010
- Ji, X., Han, X., Zhou, M., Liu, J. (2014). Effect of Heat Treatment on the Slurry Erosion Resistance of High Strength Steel DP980. *International Journal of Materials Research*, 105(5), 487-492. DOI: 10.3139/146.111042
- Kadivar, M., Tormeya, D., McGranaghana, G. (2021). A Review on Turbulent Flow Over Rough Surfaces: Fundamentals and Theories. *International Journal of Thermofluids*, 10, 100077. DOI: 10.1016/j.ijft.2021.100077
- Kalami, H., Urbanic, J. (2021). Exploration of Surface Roughness Measurement Solutions For Additive Manufactured Components Built By Multi-Axis Tool Paths. *Additive Manufacturing*, 38, 101822. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101822
- Karaçalı, G. (2015). Soğuk Haddelenmiş Çift Fazlı DP600 Kalite Çeliklerin Yaşlanma Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 397863.
- Keeler, S., Kimchi, M., Mooney, P. J. (2017). Advanced High-Strength Steels. Version 6.0, Application Guidelines, *World Auto Steel*, 2-20. April 2017.
- Köse, C. N. (2015). Bir B Segment Araç İçin Ön Gövde Çarpma Parçalarının Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 389197.
- Laguna-Camacho, J. R., Vite-Torres, M., Gallardo-Hernández, E. A., Vera-Cárdenas, E. (2013). Solid Particle Erosion on Different Metallic Materials. *Tribology in Engineering*, DOI: 10.5772/51176

- Liebhard, M., Levy, A. (1991). The Effect of Erodent Particle Characteristics Erosion of Metals. *Wear*, 151(2), 381-390. DOI: 10.1016/0043-1648(91)90263-T
- Lu, X., Xu, H., Zhao, B. (2018). Effect of Hardening Exponent of Power-Law Hardening Elastic-Plastic Substrate on Contact Behaviors in Coated Asperity Contact. *Materials*, 11(10), 1965. DOI: 10.3390/ma11101965
- Madrid, M., Tyne, C. J. V., Sadagopan, S., Pavlina, E. J., Hu, J., Clarke, K. D. (2018). Effects of Testing Method on Stretch-Flangeability of Dual-Phase 980/1180 Steel Grades. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 70, 918-923. DOI: 10.1007/s11837-018-2852-x
- Mazinani, M. (2006). Deformation and Fracture Behaviour of A Low Carbon Dual Phase Steel. Doctoral Thesis, The University of British Columbia, Canada.
- Mazinani, M., Poole, W. J. (2007). Deformation Behaviour of Martensite in a Low-Carbon Dual-Phase Steel. *Advanced Materials Research*, 15-17, 774-779. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.15-17.774
- Mogahzy, Y. (2008). Friction and Surface Characteristics of Synthetic Fibers. 292-328 DOI: 10.1533/9781845694722.2.292
- Momber, A. (2008). Blast Cleaning Technology, Springer, Germany.
- Movahed, P., Kolahgar, S., Marashi, S. P. H., Pouranvari, M., Parvin, N. (2009). The Effect of Intercritical Heat Treatment Temperature on the Tensile Properties and Work Hardening Behavior of Ferrite–Martensite Dual Phase Steel Sheets. *Materials Science and Engineering*, 518(1-2), 1–6. DOI: 10.1016/j.msea.2009.05.046
- Natarajan, Y., Murugesan, P. K., Mohan, M., Khan, S. A. L. A. (2020). Abrasive Water Jet Machining Process: A State of Art of Review. *Journal of Manufacturing Processes*, 49, 271-322. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.11.030
- Naveed, M., Schlag, H., König, F., Weiß, S. (2017). Influence of the Erodent Shape on the Erosion Behavior of Ductile and Brittle Materials. *Tribology Letters*, 65(1), 18. DOI: 10.1007/s11249-016-0800-x
- Nicolas-Silvente; A. I., Velasco-Ortega, E., Ortiz-Garcia, I., Monsalve-Guil, L., Gil, J., Jimenez-Guerra, A. (2020). Influence of the Titanium Implant Surface Treatment on the Surface Roughness and Chemical Composition. *Materials*, 13, 314. DOI: 10.3390/ma13020314
- Özbeyaz, K. (2014). Prediction of Surface Roughness Value For Machining of Aluminum 1050 Material By Using Artificial Neural Network. Master Thesis, Marmara University, İstanbul.

- Özdemir, C. (2017). Otomotiv Sektöründe Kullanılan DP600 Çeliklerinin CMT Kaynak Yöntemi Kullanılarak Birleştirilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 484501.
- Patnaik, A., Satapathy, A., Chand, N., Barkoula, N. M., Biswas, S. (2010). Solid Particle Erosion Wear Characteristics of Fiber And Particulate Filled Polymer Composites: A Review. *Wear*, 268(1-2), 249–263. DOI: 10.1016/j.wear.2009.07.021
- Pierman, A. P., Bouaziz, O., Pardoën, T., Jacques, P. J., Brassart, L. (2014). The Influence of Microstructure and Composition on The Plastic Behaviour of Dual-Phase Steels. *Acta Materialia*, 73, 298–311. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.04.015
- Poulin, C. M., Vogel, S. C., Korkolis, Y. P., Kinsey, B. L., Knezevic, M. (2020). Experimental Studies Into the Role of Cyclic Bending During Stretching of Dual-Phase Steel Sheets. *International Journal of Material Forming*, 13, 393-408. DOI: 10.1007/s12289-019-01530-2
- Raghavendra, G., Ojha, S., Acharya, S. K., Deo, C. R. (2012). Studying the Parameters of the Solid Particle Erosion and Test Procedure. *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, 1(13), 176-181.
- Rashid, M. S. (1981). Dual Phase Steels. *Annual Review Materials Science*, 11(1), 245-266. DOI: 10.1146/annurev.ms.11.080181.001333
- Ricardo, G. A. N., Sommerfeld, M. (2020). Experimental Evaluation of Surface Roughness Variation of Ductile Materials Due To Solid Particle Erosion. *Advanced Powder Technology*. DOI: 10.1016/j.appt.2020.07.023
- Sadowski, L., Czarnecki, S., Hola, J. (2016). Evaluation of the Height 3D Roughness Parameters of Concrete Substrate and The Adhesion To Epoxy Resin. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 67, 3-13. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.12.019
- Sarıoğlu, B. (2017). Ortodontik Debonding Sonrası Farklı Zamanlarda Uygulanan Beyazlatma Tekniklerinin Mine Yüzeyine Etkilerinin In-Vitro Olarak İncelenmesi. Ortodonti Anabilim Dalı Uzmanlık Tezi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu.
- Sharma, A., Kumar, A., Tyagi, R. (2015). Erosive Wear Analysis of Medium Carbon Dual Phase Steel Under Dry Ambient Condition. *Wear*, 334-335, 91-98. DOI: 10.1016/j.wear.2014.12.005
- Sheldon, G. L. (1977). Effects of Surface Hardness and Other Material Properties on Erosive Wear of Metals by Solid Particles. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 99(2), 133. DOI: 10.1115/1.3443422
- Shipway, P. Hutchings, I. M. (1996). The Role of Particle Properties In the Erosion of Brittle Materials. *Wear*, 193(1), 105-113. DOI: 10.1016/0043-1648(95)06694-2

- Stachowiak, G. W. (2006). Aşındırıcı, Eroziv ve Kaviteasyon Aşınması. 501–551. DOI: 10.1016/B978-075067836-0/50012-2
- Stachowiak, G. W. (2004). Characterization of Test Specimens. 115-150. DOI: 10.1016/S0167-8922(04)80022-1
- Sundararajan, G., Roy, M. (1997). Solid Particle Erosion Behaviour of Metallic Materials At Room And Elevated Temperatures. *Tribology International*, 30(5), 339-359. DOI: 10.1016/S0301-679X(96)00064-3
- Swaroop, P., Rajput, S. K., Chaudhari, G. P., Nath, S. K. (2017). Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and To Study The Wear Behavior of Dual-Phase Steels Using Air-Jet Erosion Test. 6 June 2017.
- Şah, A. (2018). Frezeleme İşleminde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne ve Kesme Enerjisine Etkisinin Taguchi Metodu İle Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 515233.
- Taga, Ö. (2015). In-Line Cutting Operation Control In Finishing By Measuring Surface Roughness. Doctor Of Philosophy Thesis, Dokuz Eylül University, İzmir.
- Tokgöz, G. (2014). Dual Fazlı Sacların Mekanik Özelliklerinin Deformasyon Hızına Bağlı Olarak Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 426006.
- Uijl, N.J. Den, Carless, L. J. (2012). Advanced Metal-Forming Technologies for Automotive Applications. *Woodhead Publishing Limited*, 28-56. DOI: 10.1533/9780857095466.28
- Umur, Y. (2016). Dual Fazlı Çelik Saclarda Geri Yaylanma Probleminin DeneySEL Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 455521.
- Vaughan, R. A. (1991). The Effects of Hardness, Toughness, Microstructure and Thermomechanical Heating on the Erosion of Ceramic and Ultrahard Materials. Master Thesis, University Of Cape Town, A Thesis Submitted To the Faculty of Engineering, South Africa.
- Vite-Torres, M., Laguna-Camacho, J. R., Baldenebro-Castillo, R. E., Gallardo-Hernandez, E. A., Vera-Cardenas, E. E., Vite-Torres, J. (2013). Study of Solid Particle Erosion on AISI 420 Stainless Steel Using Angular Silicon Carbide And Steel Round Grit Particles. *Wear*, 301(1-2), 383-389. DOI: 10.1016/j.wear.2013.01.071
- Winter, R. E., Hutchings, I. M. (1974). Solid Particle Erosion Studies Using Single Angular Particles. *Wear*, 29(2), 181-194. DOI: 10.1016/0043-1648(74)90069-6

- Yavuz, A. (2018). Katı Partikül Erozyonunun Endüstriyel Alandaki Önemi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 521350.
- Yıldıran, E. (2017). Debonding Sonrası Mine Yüzey Pürüzlülüğünün Optik Profilometre İle İncelenmesi. Diş Hekimliğinde Uzmanlık Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Zonguldak, 493223.
- Yıldıran, Y. (2013). 3003 H14 Alüminyum Alaşımının Katı Partikül Erozyonu Davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 342538.
- Zeytin, H. K., Aydın, H., Kubilay, C., Teymur, B., Deniz, A. (2008). Otomotiv Endüstrisi ve Çelik: Yeni Nesil Çelikler 57H5501. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme Enstitüsü, Kocaeli.
- URL-1: <https://docplayer.biz.tr/44219637-Mal-201-fazlar-ve-demir-sementit-diyagrami-ttt-diyagramlari-celik-isil-islemleri-kasim-2016.html>, (Ziyaret Tarihi: 2 Kasım 2021).
- URL-2: <https://karboncelik.com/celik-uretimi-nasil-yapilir/>, (Ziyaret Tarihi: 10 Ocak 2022).
- URL-3: <https://muhendishane.org/kutuphane/malzemelerin-mekanik-davranisi/akmanin-matematiksel-tarifi/>, (Ziyaret Tarihi: 14 Kasım 2021).
- URL-4: <https://nanovea.com/instruments/ps50/>, (Ziyaret Tarihi: 15 Mart 2022).
- URL-5: <https://www.cihazmarketi.com/urun/shimadzu-atx224-analitik-terazi>, (Ziyaret Tarihi: 15 Mart 2022).
- URL-6: <https://www.erdemir.com.tr/kurumsal/celigin-hikayesi/>, (Ziyaret Tarihi: 10 Ocak 2022).
- URL-7: https://www.erdemir.com.tr/Sites/1/upload/files/Yassi_Urun_Katalogu_2021_-_TR-4874.pdf, (Ziyaret Tarihi: 10 Ocak 2022).
- URL-8: <https://www.voestalpine.com/sadef/en/Roll-forming>, (Ziyaret Tarihi: 12 Ekim 2021).

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Akpınar, İ. Ö., Sınmazçelik, T. (2022). Dual Fazlı Çeliklerin Eroziyon Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. 2. *Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve Yenilikçi Çalışmalar Sempozyumu*, Balıkesir, Türkiye, 02-05 Mart 2022.



ÖZGEÇMİŞ

İrem Özge AKPINAR, ilk ve orta öğrenimini Balıkesir’de tamamladı. Lise öğrenimini 2016 yılında Kocaeli’de tamamladı. 2016 yılında kazandığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nü 2020 yılında aynı akademik yılda mezun olan öğrenciler arasında 7. olarak 3,34 ortalama ile tamamladı. Yüksek lisans öğrenimine 2020 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başladı. 2022 yılında Ford Otomotiv Sanayi A.Ş. Yeniköy Fabrikası’nda Makine Mühendisi olarak çalışmaktadır.

