İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PASLANMAZ ÇELİKLERİN KURU VE KOROZİF ORTAMLARDAKİ TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. Gürhan ÖZDABAK

Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Programı : MALZEME

MAYIS 2003

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PASLANMAZ ÇELİKLERİN KURU VE KOROZİF ORTAMLARDAKİ TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. Müh. Gürhan ÖZDABAK
(506001220)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Mayıs 2003

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. E. Sabri KAYALI
Prof.Dr. Metmet KOZ(M.Ü.)

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarımın her aşamasında desteğini esirgemeyen, olumlu fikir ve eleştirileri ile beni yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU' na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım aşamasında yardımlarını esirgemeyen Arş.Gör. Harun MİNDİVAN'a ve mekanik metalurji laboratuvarında çalışan diğer arkadaşlarıma teşekkür ederim

Bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan ve beni her yönden destekleyen babam ERDEMİR Enerji Yöneticisi Abdulkadir ÖZDABAK' a ve anneme teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2003 Gürhan ÖZDABAK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ **ii**
KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **vıı**
ÖZET **xii**
SUMMARY **xiii**

1. GİRİŞ **1**
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı 1

2. PASLANMAZ ÇELİKLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ **2**
2.1. Tanımı 2
2.2. Sınıflandırılması 2
2.2.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler 2
2.2.2. Martensitik Paslanmaz Çelikler 3
2.2.3. Ostenitik Paslanmaz Çelikler 3
2.2.3. Çift Fazlı Paslanmaz Çelikler 4
2.2.3. Çökelme İle Sertleşen Paslanmaz Çelikler 4

3. PASLANMAZ ÇELİKLERİN AŞINMA VE KOROZYON ÖZELLİKLERİ **5**
2.1. Paslanmaz Çeliklerin Korozyon Özellikleri 5
2.2. Paslanmaz Çeliklerin Aşınma Özellikleri 14

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **20**
4.1. Malzemeler 20
4.2. Mikroyapısal Karakterizasyon 21
4.3. Aşınma Deneyleri 21
4.4. Korozyon Deneyleri 22

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME **23**
5.1. Mikroyapısal Karakterizasyon Sonuçları 23
5.2. Aşınma Deneyi Sonuçları 25
5.2.1. Kuru Ortam Aşınma Deneyi Sonuçları 25
5.2.2. Deniz Suyu Ortamındaki Aşınma Deneyi Sonuçları 27
5.2.3. Sülfürik Asit Ortamındaki Aşınma Deneyi Sonuçları 30
5.2.3.1. %50 Sülfürik Asit Ortamındaki Aşınma Deneyi Sonuçları 30
5.2.3.2. %90 Sülfürik Asit Ortamındaki Aşınma Deneyi Sonuçları 33
5.2.4. %10 Demir Klorür Ortamındaki Aşınma Deneyi Sonuçları 36

5.3. Ortamın Aşınma Miktarına Etkisi 39
5.4. Korozyon Deneyi Sonuçları 40

6. GENEL SONUÇLAR 43

KAYNAKLAR 44

EKLER 46

ÖZGEÇMİŞ 69

KISALTMALAR

HMK	: Hacim Merkezli Kübik
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
PREN	: Oyuklanma Direnci Eşdeğer Sayısı (Pitting Resistant Equivalent Number)

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1. 0.5M H_2SO_4 ortamındaki korozyon deneyinde kullanılan alaşımların kimyasal kompozisyonları …….. 6

Tablo 3.2. %10 H_2SO_4 çözeltisinde kullanılan alaşımların kimyasal kompozisyonları ve sertlik değerleri 10

Tablo 3.3. Standartsız çift fazlı paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu .. 11

Tablo 3.4. 1M H_2SO_4 ortamındaki korozyon deneyinde kullanılan paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonları…….. 12

Tablo 3.5. Uygulanan farklı ısıl işlemler sonucunda alaşımların korozyon potansiyelleri ve korozyon hızlarının değişimi……..…..... 12

Tablo 3.6. Paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonları …… 13

Tablo 3.7. 304 kalite paslanmaz çeliğin 1mol/l H_2SO_4 ortamındaki korozif aşınma hızının değişmi……. 13

Tablo .3.8. İncelenen malzemelerin aşınma hacimleri ve sürtünme katsayısı sonuçları……...……..... 18

Tablo 4.1. İncelenen paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri……..……. 20

Tablo 4.2. İncelenen paslanmaz çeliklerin $Cr_{eş}$ ve $Ni_{eş}$ değerleri…….. 20

Tablo 5.1. İncelenen paslanmaz çeliklerin mikrosertlik değerleri……. 23

Tablo 5.2. Çeşitli deney ortamlarında 360 dak süre sonunda incelenen paslanmaz çeliklerin yüzeylerinde oluşan iz alanı ve aşınma miktarlarının değişimi…….. 40

Tablo E.1. Kuru ortamdaki aşınma deneyi sonrası bilyelerde oluşan aşınma iz alanları…….. 68

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Ferritik paslanmaz çelik grubu……..... 2
Şekil 2.2 : Martensitik paslanmaz çelik grubu..... 3
Şekil 2.3 : Ostenitik paslanmaz çelik grubu..... 4
Şekil 3.1 : Bölgesel iklim koşullarında 304 ve 316 kalite paslanmaz çeliklerin yıllık krom ve kaybı değişimi..... 6
Şekil 3.2 : 1, 2, 3 no'lu alaşımların 0.5m H_2SO_4'teki ağırlık kayıplarının deney süresince değişimi…..... 7
Şekil 3.3 : (a)Yeniden kristalize olmuş ferrit taneleri ile bir çok sayıdaki inklüzyon tane sınırlarında çökelmiştir. Bu inklüzyonlar Si ve Al oksitler ve MnS' dür. (b) İnklüzyon olarak Al ve Si oksitler görülmektedir. Mn içeriğinin çok düşük olması nedeniyle MnS görülmemektedir. (c) İnklüzyonlar çevresinde ferrit taneleri ile birlikte Fe_2Nb intermetalik bileşikler görülmektedir…… 8
Şekil 3.4 : 0.5M H_2SO_4 ortamında Nb içeriğine bağlı olarak Alaşım 2 ve3-4-5-6'nın korozyon hızının değişimi……. 8
Şekil 3.5 : 1M LiBr ve 1M LiCl çözeltilerinde Mo konsantrasyonunun ferritik paslanmaz (Fe-18%Cr-x%Mo) çelikte oyuk oluşum potansiyeline etkisi..... 9
Şekil 3.6 : Mo konsantrasyonunun Ostenitik paslanmaz çelikte oyuk oluşum potansiyeli üzerine etkisi..... 9
Şekil 3.7 : (a)S1 ve (b)S2 malzemelerinin mikroyapıları..... 10
Şekil 3.8 : S1, S2 ve 316L kalite paslanmaz çeliklerin %10 H_2SO_4 ortamındaki ağırlık kayıpları..... 11
Şekil 3.9 : Paslanmaz çeliklerin Cr, Mo ve N içeriklerine göre belirlenmiş PREN değerleri..... 13
Şekil 3.10 : Çift fazlı paslanmaz çeliklerin farklı ortamlardaki korozif aşınma kaybının yüke göre değişimi (pin-on-ring, 0.025 m/s).
1. %69 H_3PO_4
2. %69 H_3PO_4 + 250mg/l Cl^-
3. %69 H_3PO_4 + 500mg/l Cl^-
4. %69 H_3PO_4 + 1000mg/l Cl^-
5. %69 H_3PO_4 + 5000mg/l Cl^-…….... 15

Şekil 3.11 : Çift fazlı paslanmaz çeliklerin farklı ortamlardaki korozif aşınma hızının yüke bağlı olarak değişimi(pin-on-ring, 0.03m/s, 1 saat).
1. 0.5 mol/l H_2SO_4
2. 0.5 mol/l H_2SO_4 + 3.5% NaCl…….... 15

Şekil 3.12 : Çift fazlı paslanmaz çeliklerin 95N yük ve 0.025 m/s aşınma hızlarında aşınma debrislerinin SEM görüntüleri.
(a) %69 H_3PO_4
(b) %69 H_3PO_4 + 5000mg/l Cl^-……. 16
Şekil 3.13 : (1) Çift Fazlı, (2) Ostenitik, (3) Ferritik, paslanmaz çeliklerin 1mol/l H_2SO_4 çözeltisinde ve 0.19 m/s kayma hızlarında korozif aşınma hızının yük ile değişimi……. 17
Şekil 3.14 : 0.5M H_2SO_4 ortamında gerçekleştirilen aşınma deneylerinde kullanılan 3 farklı temas konfigürasyonu…..……. 18
Şekil 3.15 : 3 farklı kalitedeki paslanmaz çeliklerin kuru ortamdaki Pin-on-drum aşınma cihazındaki hacim kayıplarının deney süresince değişimi(334 dak)…….. 19
Şekil 3.16 : 3 farklı kalitedeki paslanmaz çeliklerin %22 NaCl çözeltisinde, Pin-on-drum aşınma cihazındaki hacim kayıplarının deney süresince değişimi(334 dak)…….. 19
Şekil 4.1 : Reciprocating Aşınma Cihazı…….. 22
Şekil 5.1 : Bu çalışmada incelenen paslanmaz çeliklerin mikroyapıları (a) 316 (b)304L (c) 316L (d) 304E (e) PH 17-4 (f) 22-13-5 mikroyapıları(X200) ……..…….. 24
Şekil 5.2 : Kuru ortamda aşınma deneyleri sırasında paslanmaz çeliklerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin deney süresince gelişimi.... 25
Şekil 5.3 : İncelenen paslanmaz çeliklerin için Aşınma İz Alanı-Sertlik değişimi…….……...…….. 26
Şekil 5.4 : (a) PH 17-4 ve (b) 22-13-5 kalite paslanmaz çeliklerin kuru ortamdaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri(X50)....…….. 26
Şekil 5.5 : (a) PH 17-4 ve (b) 22-13-5 kalite paslanmaz çeliklerin kuru ortamdaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri(X700)……... 26
Şekil 5.6 : İncelenen paslanmaz çeliklerin kuru ortamda aşınma sırasındaki kararlı durum sürtünme katsayıları……... 27
Şekil 5.7 : Deniz suyundaki aşınma deneyleri sırasında paslanmaz çeliklerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin deney süresince gelişimi…….. 28
Şekil 5.8 : İncelenen paslanmaz çeliklerin yüzeyinde deniz suyunda oluşan iz alanına (a) -$Cr_{eş}$ be (b) Ni eş değerinin etkisi (Deney süresi 360 dak)……. 28
Şekil 5.9 : Deniz suyunda yapılan aşınma deneyleri sırasında incelenen paslanmaz çeliklere ait kararli durum sürtünme katsayıları…….. 29
Şekil 5.10 : (a) 316L ve (b) 22-13-5 kalite paslanmaz çeliklerin deniz suyu ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri(X50)…….. 29
Şekil 5.11 : (a) 316L ve (b) 22-13-5 kalite paslanmaz çeliklerin deniz suyu ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri(X700)……... 30
Şekil 5.12 : %50 H_2SO_4 çözeltisindeki aşınma deneyleri sırasında paslanmaz çeliklerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin deney süresince gelişimi……..……... 31

Şekil 5.13 : İncelenen paslanmaz çeliklerin yüzeyinde %50 H_2SO_4 ortamında oluşan iz alanına (a) -$Cr_{eş}$ be (b) Ni eş değerinin etkisi (Deney süresi 360 dak)…… 31
Şekil 5.14 : %50 H_2SO_4 çözeltisinde yapılan aşınma deneyleri sırasında incelenen paslanmaz çeliklere ait kararlı durum sürtünme katsayıları…….. 32
Şekil 5.15 : (a) 304E ve (b) 22-13-5 kalite paslanmaz çeliklerin %50 H_2SO_4 ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri(X50)…….. 32
Şekil 5.16 : (a) 304E ve (b) 22-13-5 kalite paslanmaz çeliklerin %50 H_2SO_4ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri(X700)…….. 32
Şekil 5.17 : %90 H_2SO_4 çözeltisindeki aşınma deneyleri sırasında paslanmaz çeliklerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin deney süresince gelişimi……... 33
Şekil 5.18 : İncelenen paslanmaz çeliklerin yüzeyinde %90 H_2SO_4 ortamında oluşan iz alanına (a) $Cr_{eş}$ ve (b) Ni eş değerinin etkisi (Deney süresi 360 dak)…… 34
Şekil 5.19 : %90 H_2SO_4 çözeltisinde yapılan aşınma deneyleri sırasında incelenen paslanmaz çeliklere ait kararli durum sürtünme katsayıları……... 34
Şekil 5.20 : (a) 304E ve (b) 22-13-5 kalite paslanmaz çeliklerin %90 H_2SO_4 ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri(X50)…….. 35
Şekil 5.21 : (a) 304E ve (b) 22-13-5 paslanmaz çeliklerin %90 H_2SO_4 ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (X700)…….. 35
Şekil 5.22 : 304E kalite paslanmaz çelikte %90 H_2SO_4 ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izinde çatlak oluşumu.(X2500)……. 35
Şekil 5.23 : %10 $FeCl_3$ çözeltisindeki aşınma deneyleri sırasında paslanmaz çeliklerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin deney süresince gelişimi…….. 36
Şekil 5.24 : İncelenen paslanmaz çeliklerin yüzeyinde %10 $FeCl_3$ ortamında oluşan iz alanına (a) $Cr_{eş}$ be (b) Ni eş değerinin etkisi (Deney süresi 360 dak)……... 37
Şekil 5.25 : (a) 22-13-5 ve (b)316L kalite paslanmaz çeliklerin %10 $FeCl_3$ ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri(X50)…….. 37
Şekil 5.26 : (a) 22-13-5 ve (b) 316L kalite paslanmaz çeliklerin %10 $FeCl_3$ ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri(X700)……... 38
Şekil 5.27 : %10 $FeCl_3$ çözeltisinde yapılan aşınma deneyleri sırasında incelenen paslanmaz çeliklere ait kararlı durum sürtünme katsayıları……... 38
Şekil 5.28 : İncelenen paslanmaz çeliklerin korozyon deneyi sırasında ağırlıklarının değişimi…… 41
Şekil 5.29 : İncelenen paslanmaz çeliklerde %10 $FeCl_3$ ortamında ağırlık kaybına (a) $Cr_{eş}$ ve (b) Nieş değerinin etkisi (Deney süresi 1440 dak) ……..…… 41

Şekil 5.30 : Paslanmaz çeliklerin korozyon deneyi sonrası yüzeylerinde meydana gelen korozyon ürünlerinin optik mikroskop görüntüleri.(a) 304E, (b) 316, (c) 316L, (d) 304L, (e) PH 17-4, (f) 22-13-5…….. 42
Şekil A1 : Kuru ortamdaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri…….. 46
Şekil A2 : Kuru ortamdaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri…….. 47
Şekil A3 : Deniz suyu ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri……... 48
Şekil A4 : Deniz suyu ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri……... 49
Şekil A5 : %50 H_2SO_4 ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri……... 50
Şekil A6 : %50 H_2SO_4 ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri……... 51
Şekil A7 : %90 H_2SO_4 ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri……... 52
Şekil A8 : %90 H_2SO_4 ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri……... 53
Şekil A9 : %10 $FeCl_3$ ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri……..... 54
Şekil A10 : %10 $FeCl_3$ ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri……..... 55
Şekil B1 : Kuru ortamdaki aşınma deneyleri süresince sürtünme katsayılarının değişimi. (a)PH 17-4, (b) 316L, (c) 316, (d) 304L, (e) 304E, (f) 22-13-5..... 56
Şekil B2 : Deniz suyu ortamdaki aşınma deneyleri süresince sürtünme katsayılarının değişimi. (a)PH 17-4, (b) 316L, (c) 316, (d) 304L, (e) 304E, (f) 22-13-5..... 57
Şekil B3 : %50 H_2SO_4 ortamdaki aşınma deneyleri süresince sürtünme katsayılarının değişimi. (a)PH 17-4, (b) 316L, (c) 316, (d) 304L, (e) 304E, (f) 22-13-5…….. 58
Şekil B4 : %90 H_2SO_4 ortamdaki aşınma deneyleri süresince sürtünme katsayılarının değişimi. (a)PH 17-4, (b) 316L, (c) 316, (d) 304L, (e) 304E, (f) 22-13-5…….. 59
Şekil B5 : %10 $FeCl_3$ ortamdaki aşınma deneyleri süresince sürtünme katsayılarının değişimi. (a)PH 17-4, (b) 316L, (c) 316, (d) 304L, (e) 304E, (f) 22-13-5…….. 60
Şekil C1 : Kuru ortamdaki aşınma deneyi sonrası paslanmaz çeliklerin aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri(X50. (a) 180 (b) 270 (c)360 dak …… 61
Şekil C2 : Deniz suyu ortamdaki aşınma deneyi sonrası paslanmaz çeliklerin aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri(X50). (a) 180 (b) 270 (c)360 dak …….. 62
Şekil C3 : %50 H_2SO_4 ortamındaki aşınma deneyi sonrası paslanmaz çeliklerin aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri(X50). (a) 180 (b) 270 (c)360 dak ……... 63

Şekil C4 **:** %90 H_2SO_4 ortamındaki aşınma deneyi sonrası paslanmaz çeliklerin aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri(X50). (a) 180 (b) 270 (c)360 dak…… 64
Şekil C5 **:** %10 $FeCl_3$ ortamındaki aşınma deneyi sonrası paslanmaz çeliklerin aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri(X50). (a) 180 (b) 270 (c)360 dak ……... 65
Şekil D1 **:** İncelenen paslanmaz çeliklerin %10 FeCl3 çözeltisinde gerçekleştirilen korozyon deneyi yüzey görüntüleri……. 66
Şekil E1 **:** Kuru ortamdaki aşınma deneyi sonrası aşındırıcı bilyelerin optik mikroskop görüntüleri……. 67

PASLANMAZ ÇELİKLERİN KURU VE KOROZİF ORTAMLARDAKİ TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Paslanmaz çelikler; yüksek korozyon direncine sahip olmaları nedeni ile kimya, petrokimya, enerji, gıda, ilaç gibi endüstri dallarında yaygın olarak kullanılırlar. Kullanım amaçlarına göre, farklı oranlarda krom(minimum %11 krom) ve nikel ilavesi ile değişik mikroyapılar da paslanmaz çelik üretilmektedir. Bunlar metalurjik yapılarına göre; Martensitik, Ferritik, Ostenitik, Çökelme ile sertleştirilen ve çift fazlı paslanmaz çeliklerdir.

Bu çalışmada, farklı kalitedeki (316, 22-13-5, 316L, 304L, 304E, PH 17-4) paslanmaz çeliklerin kuru ve korozif ortamlardaki aşınma davranışları incelenmiştir. Aşınma deneyi, salınım hareketi yapan karşı yüklemeli (reciprocating) aşınma cihazında alumina bilya kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Korozif ortam olarak Deniz Suyu, %50 ve %90 konsantrasyonlarda sülfürik asit(H_2SO_4) ve % 10 konsantrasyonda $FeCl_3$ (Demir Klorür) kullanılmıştır. Ayrıca, % 10 konsantrasyonundaki $FeCl_3$ çözeltisinde korozyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Farklı ortamlarda gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda; paslanmaz çeliklerin kullanılan ortamlara karşı olan aşınma dirençleri belirlenmiştir. Aşınma direnci üzerine krom ve nikel gibi alaşım elementlerinin etkileri incelenmiş olup, bu alaşım elementlerinin aşınma direncini olumlu yönde etkilediği sonucuna varılmıştır. Ancak Demir Klorür çözeltisinde gerçekleştirilen aşınma deneylerinde ise özellikle bileşimde bulunan kromun paslanmaz çeliklerin aşınma direncini olumsuz yönde etkiledikleri tespit edilmiştir.

EXAMINING THE TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF STAINLESS STEELS IN DRY AND CORROSIVE MEDIA

SUMMARY

High corrosion resistant stainless steels can be used widely in industry such as; chemical, petrochemical, energy, food and medicine. Depending on the aim of usage, stainless steels which have different microstructure can be produced by adding different ratios of chromium (11 % min.) and nickel. Main types of stainless steels are; Martensitic, Ferritic, Ostenitic, Precipitation Hardening and Dual Phase Stainless steels.

In this study; we aimed to examine the tribological performance of various stainless steels (316, 22-13-5, 316L, 304L, 304E, PH 17-4) in dry and various corrosive media (sea water, 50% and 90% sulfuric acid and ferric chloride) by utilizing a reciprocating wear tester. Also, a corrosion test was done in ferric cloride. Wear resistance of the investigated stainless steels were determined for different corrosive media to evaluate the relationship between the wear resistance and the composition mainly for nickel and chromium. Finally it is concluded that, chromium improves the wear resistance of stainless steels in sea water and sulfuric acid. However, in ferric chloride solution wear resistance of stainless steels decreases with increasing their chromium content, which improves the corrosion resistance in stagnant ferric cloride.

1. GİRİŞ

1.1. Giriş ve Amaç

Paslanmaz çelikler, en az %11 Cr içeren demir esaslı alaşımlardır. Paslanmaz çeliklerin paslanmazlık özelliği yüzeyinde oluşan çok ince kromoksit tabakasından gelmektedir. Diğer elementler ise paslanmaz çeliğin tipik özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılırlar. Bunlar; nikel, molibden, bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum, azot ve selenyumdur. Karbon oranı ise % 0.03-%1 aralığında değişmektedir.

Kullanım amaçlarına göre farklı oranlarda krom ve nikel ilavesi ile değişik mikroyapılarda paslanmaz çelikler üretilebilmektedir. Bu amaçla paslanmaz çelikler 5 ana grupta incelenir. Bunlar; ferritik paslanmaz çelikler, martensitik paslanmaz çelikler, ostenitik paslanmaz çelikler, çift fazlı paslanmaz çelikler ve çökelme ile sertleşen paslanmaz çeliklerdir. Yüksek korozyon direncine sahip olmaları nedeniyle paslanmaz çelikler, gıda, enerji, kimya, petrokimya, ilaç gibi endüstri dallarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada farklı kalitedeki (22-13-5, 316, 316L, 304L, 304E, PH 17-4) paslanmaz çeliklerin kuru ve korozif ortamlardaki aşınma davranışlarının incelenmesi ve aşınma dirençleri üzerine krom ve nikel gibi alaşım elementlerinin etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2.PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çelikler, %12' den daha yüksek oranda krom içeren ve bir çok ortamda üstün korozyon direnci gösteren çelik türüdür. Klasik teoriye göre, bileşiminde bulunan krom, yüzeyde ince oksit tabakası oluşturarak çeliği korozyondan korumaktadır[1]. Diğer elementler paslanmaz çeliğin tipik özelliklerini geliştirmek amacıyla ilave edilirler. Bunlar; nikel, molibden, bakır, titanyum, alüminyum, silis, niyobyum, azot, kükürt ve selenyumdur.

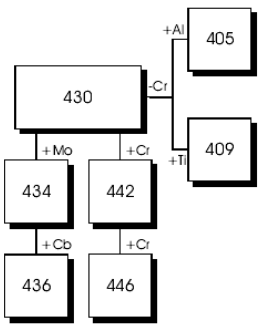
Kristal yapıya ve sertleşme mekanizmasına bağlı olarak paslanmaz çelikleri;

- Ferritik paslanmaz çelikler,
- Martensitik paslanmaz çelikler,
- Ostenitik paslanmaz çelikler,
- Çift fazlı paslanmaz çelikler ve
- Çökelme ile sertleşen paslanmaz çelikler

olmak üzere beş gruba ayırmak mümkündür.

2.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler

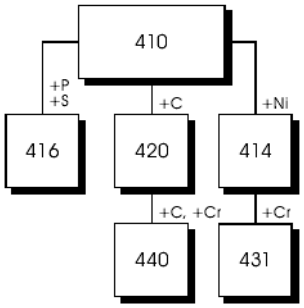
% 12 – 30 arasında krom ve % 0.12' den daha az karbon içeren bu çelikler, ferritik (HMK, α-demiri) mikroyapıdadır. Üstün korozyon direncine ve orta derecede şekillenebilme kabiliyetine sahip olup, nikel içermediğinden nispeten ucuzdur.[1]



Şekil 2.1. Ferritik Paslanmaz Çelik Grubu [2]

2.2. Martensitik Paslanmaz Çelikler

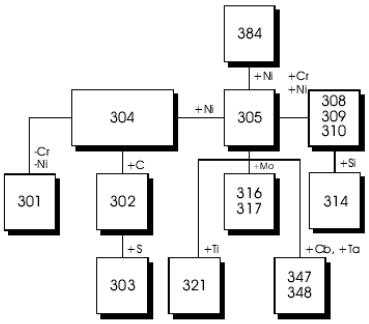
% 12 – 17 krom ve % 0.15 – 1.0 karbon içeren paslanmaz çelik türüdür. Bu çeliklere ostenit sahasından havada su verilerek martensitik mikroyapı kazandırılabilir. Uygulanan ısıl işlem, esas olarak alaşımsız ve az alaşımlı çeliklere uygulanan ısıl işlemle aynı olup, su verme sonrasında tokluğu arttırma amacıyla temperleme işlemine tabi tutulur. Martensitik paslanmaz çelikler ferritik ve ostenitik paslanmaz çeliklere nazaran daha düşük korozyon direncine sahiptirler. [1]



Şekil 2.2. Martensitik Paslanmaz Çelik Grubu [2]

2.3. Ostenitik Paslanmaz Çelikler

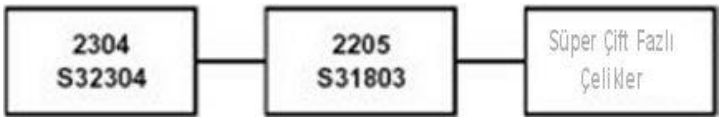
Bu çelikler esas itibarı ile Demir-Krom-Nikel üçlü alaşımıdır. Nikel, Fe-C alaşımlarında ostenit sahasını genişleterek ostenitin kararlılığını artıran alaşım elementidir. Ostenitik paslanmaz çeliklerin bileşiminde % 16 – 25 krom ve % 7 – 20 nikel bulunur. Karbon içeriği % 0.03’ den az ise, yapıda karbür çökelmesi olmaz ve mikroyapı tamamen ostenitin (YMK, γ-demiri) oluşur. Ferritik ve martenzitik paslanmaz çeliklere nazaran korozyon direnci daha yüksektir. Üstün süneklik ve şekil değiştirme kabiliyetine de sahip olan ostenitik paslanmaz çeliklerin düşük sıcaklıklarda darbe direnci de yüksektir. Yüksek oranda nikel içermeleri bu çeliklerin pahalı olmasına neden olur.[1]



Şekil 2.3. Ostenitik Paslanmaz Çelik Grubu [2]

2.4.Çift Fazlı Paslanmaz Çelikler

Bu çelikler esas itibarı ile Krom-nikel-molibden üçlü alaşımıdır. Ostenit ve ferrit karışımından oluşan yapıya sahiptir ve manyetik özelliktedir. Çift fazlı yapı, ostenitik ve ferritik paslanmaz çeliklere göre gerilmeli korozyon çatlamasına karşı daha dirençlidir ve daha iyi dayanıma sahiptir. 2205 tipi paslanmaz çelik bu gruba örnek olarak verilebilir. Çift fazlı paslanmaz çelikler genellikle basınçlı kaplarda, yağ ve gaz tanklarında, ısı dönüştürücülerde kullanılır. [3]



Şekil 2.4. Çift Fazlı Paslanmaz Çelik Grubu [2]

2.5. Çökelme ile Sertleşen Paslanmaz Çelikler

Bu çeliklerin kimyasal bileşimi, aluminyum, niyobyum veya tantalyum içermeleri dışında ostenitik paslanmaz çeliklerle hemen hemen aynıdır. Çökelme sertleşmesi uygulanabilen paslanmaz çeliklerden düşük karbon içerdiklerinde bile üstün mekanik özellikler elde edilebilir. Tipik 17-7 PH kalite paslanmaz çeliğin ısıl işlemi; 760-955 ^{0}C'de ostenitleme, su verme ve 500-600 ^{0}C'de yaşlandırma olmak üzere üç kademede gerçekleştirilir. Yaşlandırma, ostenit bölgesinden su verilerek elde edilen martensitik yapıda Ni_3Al ve diğer metallerarası bileşiklerin çökelmesini sağlar. Düşük yaşlandırma sıcaklıklarında daha yüksek mukavemet değerleri elde edilir.[1]

3. PASLANMAZ ÇELİKLERİN KOROZYON VE AŞINMA ÖZELLİKLERİ

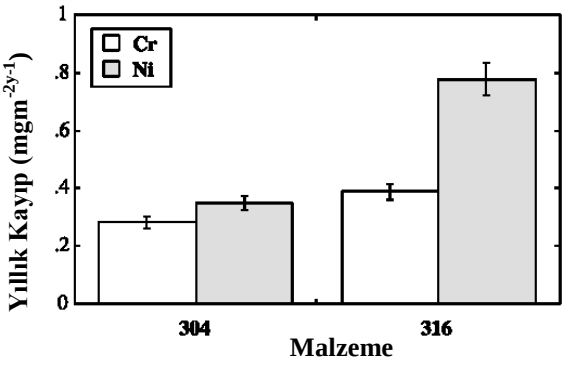
3.1. Paslanmaz Çeliklerin Korozyon Özellikleri

Paslanmaz çelikler daha önceki bölümde belirtildiği gibi minimum % 11 krom içerirler. Artan krom miktarına ve yapıdaki diğer elementlerin durumuna bağlı olarak paslanmaz çelikler korozyon dayanımı gelişmektedir. Paslanmaz çelikler, kimya, petrokimya, enerji, gıda, ilaç gibi endüstri dallarında kullanım olanakları bulurlar.

Krom; pasif film oluşturmada esas elementtir. Diğer elementler sadece kromun pasif film oluşturmadaki etkinliğini arttırıcı yönde etkide bulunurlar. Film oluşumu % 10.5 Cr mertebelerinde başlar, fakat bu orandaki krom ancak yumuşak (mild) atmosferlerde kullanıma elverişlidir. % 17-20 Cr mertebelerinde ostenitik, % 26-29 Cr mertebelerinde ferritik paslanmaz çelik yapıları ortaya çıkar. Sonuç olarak krom oranı arttıkça, pasif filmin stabilitesi artar.

Nikel; ostenitik yapının stabil halde olmasını sağlar. Bu durum ise paslanmaz çeliğin mekanik özelliklerini arttırıcı yönde etkide bulunmaktadır. % 8-10 Ni mertebelerinde paslanmaz çeliğin gerilmeli korozyon çatlamasına karşı direnci oldukça düşüktür. % 30 Ni oranlarında bu durum tersine döner.[3]

Inger Odnevall ve arkadaşları[4] 304 ve 316 tip paslanmaz çeliklerde bölgesel iklim koşullarında bir yıllık süre içerinde meydana gelen krom ve nikel kayıplarını incelemişlerdir. 316 kalite paslanmaz çelikte krom ve nikel kaybı 304'e göre daha fazladır. Normal şartlar altında 316 kalite paslanmaz çelik 304 kalite paslanmaz çeliğe göre korozyon direnci daha yüksek olmalıdır. Her ne kadar krom ve nikel kaybı 316 kalitede fazla olsa da toplam malzeme kaybının 316 kalitede daha az olduğu tespit edilmiştir. 304 kalite paslanmaz çelikten yıllık kayıp 0.25-0.3 $mgCr/m^2$, 0.3-0.4 $mgNi/m^2$, 316 kalite paslanmaz çelikten yıllık kayıp 0.35-0.4 $mgCr/m^2$, 0.7-0.8 $mgNi/m^2$ olarak hesaplanmıştır(Şekil 3.1).



Şekil 3.1.Bölgesel iklim koşullarında 304 ve 316 kalite paslanmaz çeliklerin yıllık krom ve nikel kaybı değişimi [4]

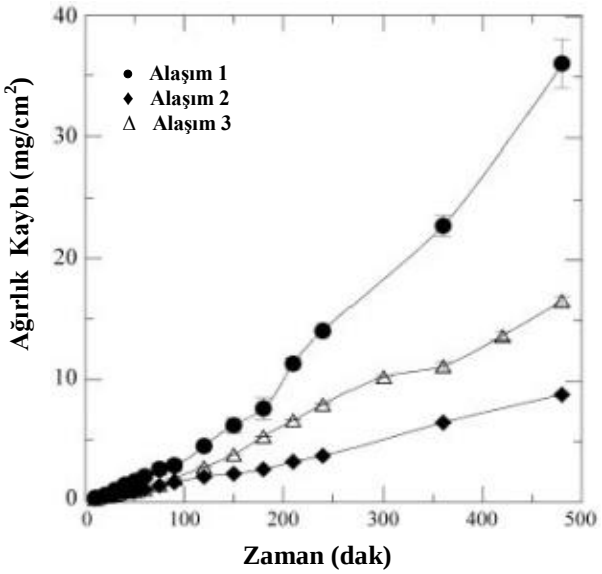
Molibdenin, krom ile etkili uyumu paslanmaz çelik yüzeyindeki pasif filmin stabilitesini arttırır. Molibden özellikle oyuklanma ve aralık korozyonuna karşı mükemmel bir dayanım gösterir.

Neusa Alonso-Falleiros ve Stephan Wolynec[5] tarafından 430 kalite paslanmaz çeliğin 0.5 M H_2SO_4 ortamında korozyon direncine molibden ve niyobyumun etkisi üzerine yaptıkları çalışmada kullanılan alaşımların kimyasal kompozisyonları Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. 0.5M H_2SO_4 ortamındaki korozyon deneyinde kullanılan alaşımların kimyasal kompozisyonları [5]

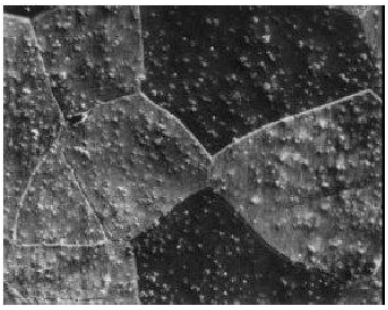
Element	**Alaşımlar**					
	1	2	3	4	5	6
C	0.02	0.03	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
N	0.0062	na	na	na	na	na
Si	0.20	0.13	0.20	0.11	0.11	0.12
Mn	0.21	0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	0.02
P	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
S	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Cr	17.2	15.8	16.8	16.5	16.3	16.3
Ni	0.71	1.06	0.73	0.72	0.73	0.70
Mo	-	0.93	-	-	-	-
Nb	-	-	0.31	0.58	1.12	1.62

Çalışmada, 400 dakika deney süresinde alaşımlarda meydana gelen ağırlık kayıpları tespit edilmiştir(Şekil 3.2). Buna göre, molibden içerikli Alaşım 2 korozyona dayanımı en yüksek malzeme olarak gözükmektedir. Alaşım 1 ise dayanımı en az olandır. Niyobyum içerikli Alaşım 3 orta mertebelerde korozyon dayanımı göstermektedir. 4,5,6 no' lu alaşımlar ise Alaşım 3 ile benzer davranış göstermişlerdir.

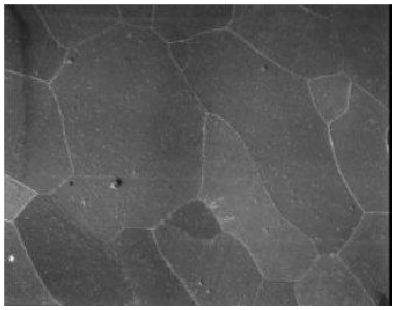


Şekil 3.2. 1, 2, 3 nolu alaşımlarının 0.5M H_2SO_4' teki ağırlık kayıplarının deney süresince değişimi [5]

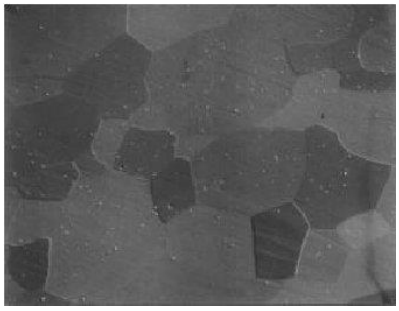
Yapılan araştırmalar molibdenin malzeme yüzeyinde amorf ve çözünmeyen asidik ürünler oluşturarak saldırgan etkilere karşı koruduğunu göstermiştir. Korozyon deneyi sonucunda Alaşım 1, 2 ve 5'in mikroyapıları incelendiğinde malzemelerde meydana gelen korozyon ürünleri net bir şekilde görülmektedir. İncelemeler sonucunda alaşımlarda meydana gelen ana korozyon ürünleri Alaşım 1 için; S, P, Cr ve Ni(Şekil 3.3.a), Alaşım 2 için; Cr ve Mo(Şekil 3.3.b), Alaşım 5 için Nb (Şekil 3.3.c) olarak belirlenmiştir.



(a)



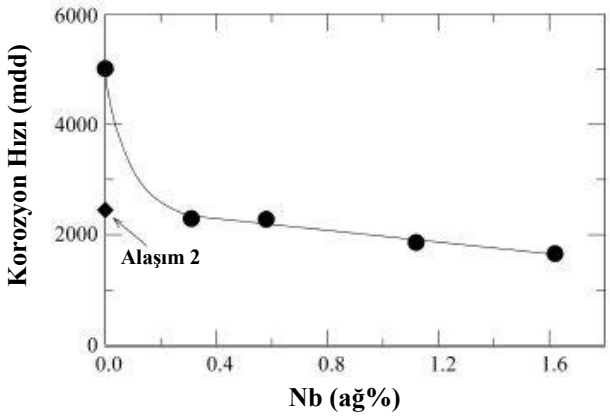
(b)



(c)

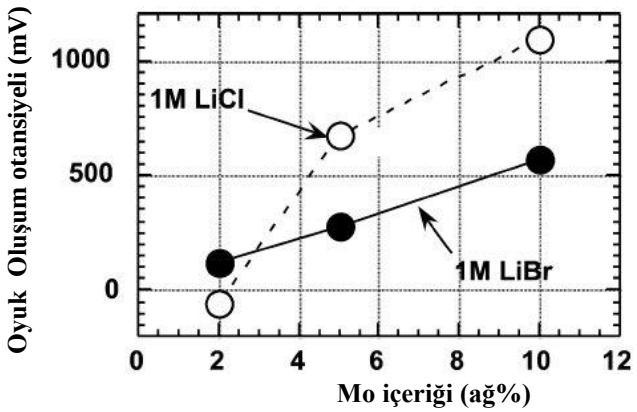
Şekil 3.3.(a)Yeniden kristalize olmuş ferrit taneleri ile bir çok sayıdaki inklüzyon tane sınırlarında çökelmiştir. Bu inklüzyonlar Si ve Al oksitler ve MnS' dür. (b) İnklüzyon olarak Al ve Si oksitler görülmektedir. Mn içeriğinin çok düşük olması nedeniyle MnS görülmemektedir. (c) İnklüzyonlar çevresinde ferrit taneleri ile birlikte Fe_2Nb intermetalik bileşikler görülmektedir [5]

Ayrıca, 3, 4, 5, 6 no' lu alaşımlar arasındaki niyobyum içeriğine bağlı olarak korozyon hızının değişimi Şekil 3.4'te verilmiştir. Buna göre; Nb oranı arttıkça korozyon hızı azalmaktadır. Mo içeriğine sahip Alaşım 2'nin sabit bir değerde kaldığı tespit edilmiştir.

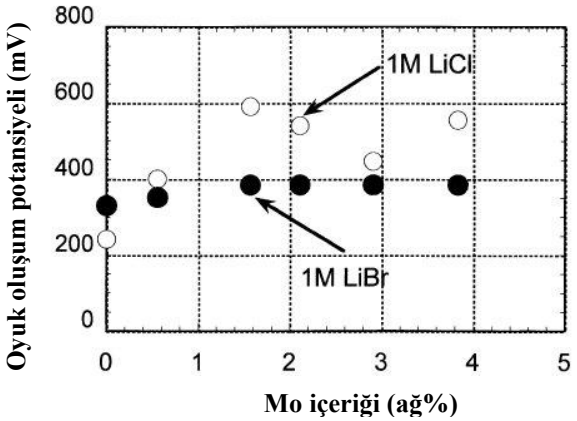


Şekil 3.4. 0.5M H_2SO_4 ortamında Nb içeriğine bağlı olarak Alaşım 2 ve3-4-5-6'nın korozyon hızının değişimi [5]

M. Kaneko ve H. S. Isaacs [6] ferritik (Fe-18%Cr-x%Mo) ve ostenitik (Fe-18%Cr-12-15%Ni-x%Mo) paslanmaz çeliklerin bromidli ve kloridli çözeltilerde oyuk oluşumu üzerine molibdenin etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda 1M LiBr ve 1M LiCl çözeltilerinde ferritik paslanmaz çeliklerde Mo ilavesinin etkisi Şekil 3.5'te görülmektedir. LiCl çözeltisinde Mo ilavesinin oyuk oluşum potansiyelini büyük bir oranda arttırdığı, LiBr çözeltisinde bu artışın daha az olduğu gözlemlenmiştir. Ostenitik paslanmaz çelikte Mo ilavesinin oyuk oluşum mekanizmasına etkisi ise Şekil 3.6' da verilmiştir. Ostenitik paslanmaz çeliklerde ise Mo konsantrasyonunun artması ile oyuk oluşum potansiyelinin önemli derecede arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.5. 1M LiBr ve 1M LiCl çözeltilerinde Mo konsantrasyonunun ferritik paslanmaz (Fe-18%Cr-x%Mo) çelikte oyuk oluşum potansiyeline etkisi [6]



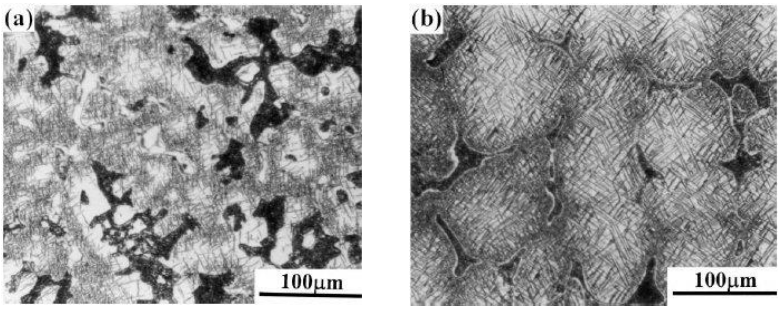
Şekil 3.6. Mo konsantrasyonunun Ostenitik paslanmaz çelikte oyuk oluşum potansiyeli üzerine etkisi [6]

Y. G. Zheng, Z. M. Yao ve W. Ke [7] saldırgan ortamlara dayanıklı alaşım geliştirme üzerine yaptıkları araştırmada kullanmış oldukları malzemelerin kimyasal bileşimleri ve sertlik değerleri Tablo 3.2' de verilmiştir. Saldırgan ortam olarak ise %10 H_2SO_4 kullanılmıştır.

Tablo 3.2. %10 H_2SO_4 ortamındaki korozyon deneyinde kullanılan alaşımların kimyasal kompozisyonları ve sertlik değerleri [7]

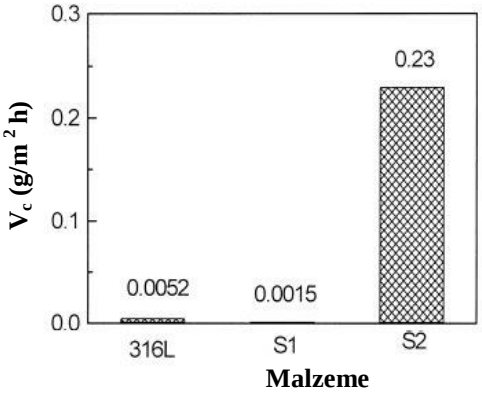
Malzeme	Ağ%				Sertlik HB (Hv)
	C	Cr	Ni	Mo	
316L	0.024	17.32	14.24	3.10	156 (165)
S1	0.035	25.66	24.67	4.88	351 (356)
S2	< 0.2	30	22	3	363 (370)

S1 ve S2 malzemeleri ısıl işlem uygulanarak yapıda sigma fazı oluşmuştur; buradaki amaç malzemelerin daha sert hale getirilmesidir.Dolayısıyla, 316L'ye göre daha yüksek sertliğe sahiptirler. S1 ve S2 malzemelerinin yaşlandırma işlemi sonrası mikroyapıları Şekil 3.7'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi S1 ve S2 ostenitik yapıdadır. Diğer bileşimler ise $M_{23}C_6$ formunda çökeltiler oluşmuştur. Sigma fazı oranının S2 yapıda daha fazla olduğu gözükmektedir.



Şekil 3.7. (a)S1 ve (b)S2 malzemelerinin mikroyapıları [7]

Çalışmanın sonucunda, 316L ve S1' in üstün korozyon direncine sahip oldukları tespit edilmiştir(Şekil 3.8). S1 çeliğinin üstün korozyon direnci göstermesinin nedeni olarak yüksek oranda Cr, Ni ve Mo içermesidir. Fakat S2 çeliğinde korozyona dayanıklı alaşım elementi oranının yüksek olmasına rağmen yüksek oranda sigma fazı içermesi korozyon hızını arttırıcı yönde etkide bulunmuştur. Bu nedenle; sigma fazının paslanmaz çeliklerde optimum bir değerde olması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil3.8. S1, S2 ve 316L kalite paslanmaz çeliklerin %10 H_2SO_4 ortamındaki ağırlık kayıpları [7]

R. Merello ve arkadaşları[8], Çift fazlı paslanmaz çeliklerin oyuklanma korozyon direncine kimyasal kompozisyonun etkisini incelemişlerdir. Çift fazlı paslanmaz çelikler düşük oranda nikel, yüksek oranda azot ve manganez içerirler. Çift fazlı paslanmaz çeliklerin mikroyapıları ferrit ve ostenit içermektedir. Yapı içerisinde bu iki faz hacimsel olarak %50 oranındadır [9,10]. Çalışmada kullanılan çift fazlı paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu Tablo 3.3' te verilmiştir. Değişken element olarak Cr, Mo, N ve Ni alınmıştır.Korozif çözelti olarak NaCl kullanılmıştır.

Tablo 3.3.Standartsız çift fazlı paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu [8]

%α									
	Si	Mn	Ni	Cu	Cr	Mo	C	S	N
40–60	0.5	8	0.5–2.7	1	18–24	0.3–4	⩽0.03	⩽0.002	0.09–0.34

Yapılan çalışmanın neticesinde;

- Çift fazlı paslanmaz çeliklerin klorlu ortamlarda, ostenitik ve ferritik paslanmaz çeliklere nazaran daha iyi dayanım gösterdiği,
- Oyuklanma direncine karşı daha iyi bir direnç göstermesi için Mo içeriğinin % 1'den fazla olması gerektiği, ve en iyi sonucun % 3-4 Mo aralığında sağlandığı belirlenmiştir..

Xin-Chun Lu ve Shizhuo Li [11] 1M H_2SO_4 ortamında paslanmaz çeliklerin korozyon davranışına sigma fazının etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında kullanmış oldukları paslanmaz çeliklerin kompozisyonu Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. 1M H_2SO_4 ortamındaki korozyon deneyinde kullanılan paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonu [11]

	C	Cr	Ni	Mo	Cu	Si	Mn	Nb	N	Fe	Co
1	0.06	25.5	5.49	2.09	3.08	1.50	0.67	0.2	0.15	Bal.	–
2	–	30.88	Bal.	3.29	3.02	2.86	2.87	–	–	18.75	4.58

1 no'lu alaşım değişik sıcaklıklarda yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda alaşımların korozyon hızları ve korozyon potansiyelleri (E_{kor}) Tablo 3.5' te verilmektedir. Alaşım 1 ve 2' de değişik sıcaklıklarda yaşlandırma işlemleri sonrası yapıda oluşan sigma fazının etkisi incelenmiştir. 850^0C'deki ısıl işlem sonrası yapıda 550^0C'deki ısıl işlem sonrası yapıya göre tane sınırlarında daha fazla sigma fazı oluştuğu ve korozyon hızına karşı daha iyi bir direnç gösterdiği tespit edilmiştir.

Tablo 3.5. Uygulanan farklı ısıl işlemler sonucunda alaşımların korozyon potansiyelleri ve korozyon hızlarının değişimi [11]

Alaşım	**Durum**	**E_{kor}(mV)**	**Korozyon Hızı (mm/yıl)**
1	Yaşlandırılmış (550°C)	−264	0.012
	Yaşlandırılmış (850°C)	−246	0.010
2	Döküm	−167	0.050
	Çözeltiye Alınmış	−124	0.010

J. S. Kim ve arkadaşları[12], paslanmaz çeliklerin pasivasyon davranışına alaşım elementlerinin etkisini incelemişlerdir. Paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımı ve yüzeyde oluşan pasif filmin tipik özellikleri büyük ölçüde alaşım elementlerine ve özellikle de krom, molibden ve azot içeriğine bağlıdır[13,14]. Çalışmada, bu alaşım elementlerinin etkilerini oyuklanma direnci eşdeğer sayısı (pitting resistance equivalent number) kullanarak incelemişlerdir.

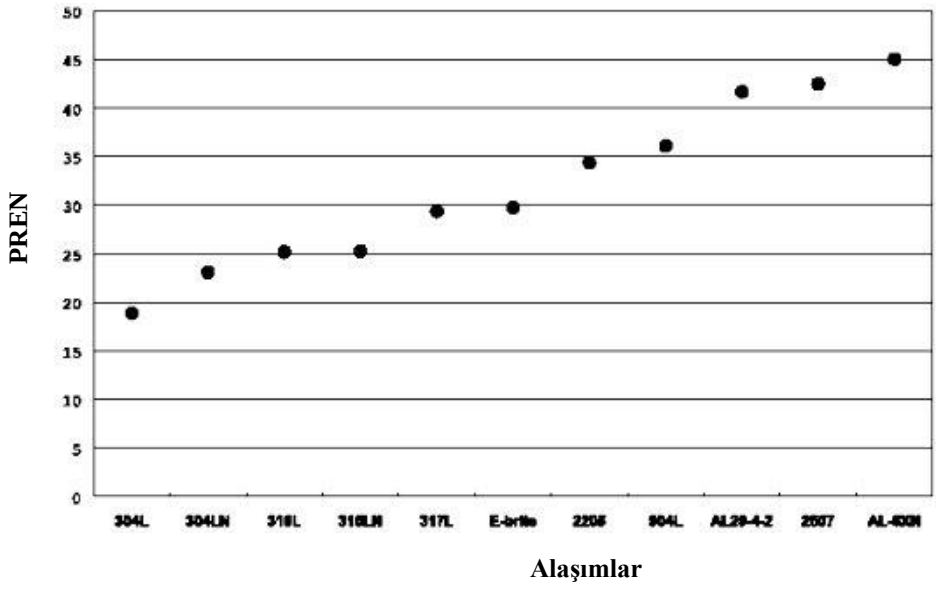
$$PREN = \%Cr + 3.3\%Mo + k\%N \qquad (1)$$

k değeri 16 veya 30 olarak seçilebilir[15]. Bu çalışmada k=16 olarak alınmıştır. Çalışmada kullanılan malzemeler ostenitik, ferritik ve çift fazlı paslanmaz çeliklerdir. Bu malzemelerin kimyasal bileşimleri Tablo 3.6' da verilmiştir.

Tablo 3.6. Paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonları [12]

Alaşımlar	Cr	Mo	N	Ni	Mn	Si	C	
304L/S30403	18.24	–	0.04	10.17	1.15	0.58	0.021	–
304LN/S30453	19.8	0.4	0.124	8.8	1.8	0.45	0.034	Cu, Co
316L/S31603	17.33	2.09	0.06	10.62	1.61	0.43	0.024	Cu, Co
316LN/S31653	16.52	2.08	0.119	10.15	1.77	0.56	0.03	Cu, Co
317L/S31703	18.09	3.07	0.072	13.68	1.86	0.43	0.024	Cu, Co
E-brite/S44627	26.3	0.99	0.0128	0.14	0.1	0.23	0.01	Cu, Ni
SAF 2205/S31803	21.97	2.99	0.16	5.85	1.49	0.59	0.024	Cu, Co
904L/N08904	20.9	4.44	0.035	24.45	1.67	0.49	0.024	Cu, Co
AL29-4-2/S44800	28.9	3.83	0.0076	2.42	0.1	0.11	0.02	Cu
SAF 2507/S32750	25.08	3.82	0.3	6.86	0.81	0.21	0.022	Cu, Co, Nb, Al, Sn, Ti
AL-6XN/S08367	20.83	6.22	0.23	23.75	0.23	0.33	0.024	Cu

(1) no'lu denklem kullanılarak paslanmaz çeliklerin PREN değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 3.9'da verilmektedir. Buna göre; Cr, Mo ve N miktarları arttıkça paslanmaz çeliklerin oyuklanma direncinin arttığını belirlemişlerdir.



Şekil 3.9. Paslanmaz çeliklerin Cr, Mo ve N içeriklerine göre belirlenmiş PREN değerleri [12]

J. M. Bastidas ve arkadaşları[16], 304L ve 316L kalite ostenitik paslanmaz çeliklerin klorlu ortamlardaki pasivasyon davranışına molibdenin etkisini araştırmışlardır. Yapılan araştırmalar sıvı ortamlarda paslanmaz çelikler üzerinde pasif film oluşmasının nedenini; demir ve kromoksit bileşiklerinin meydana gelmesine bağlamaktadır. Molibden pasif filmin gelişmesinde ve zenginleştirilmesinde rol oynamaz[17]. Yapılan çalışma sonucunda, %5 NaCl çözeltisinde pasif bölgedeki akım yoğunluğunun 316L kalite paslanmaz çelikte 304L' ye göre daha düşük olduğu (0.01 ve 1 $\mu A\ cm^{-2}$) ve bu nedenle 316L kalite paslanmaz çelikte meydana gelen pasif alan 304L' ye göre 0.08 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir

3.2.Paslanmaz Çeliklerin Aşınma Davranışları

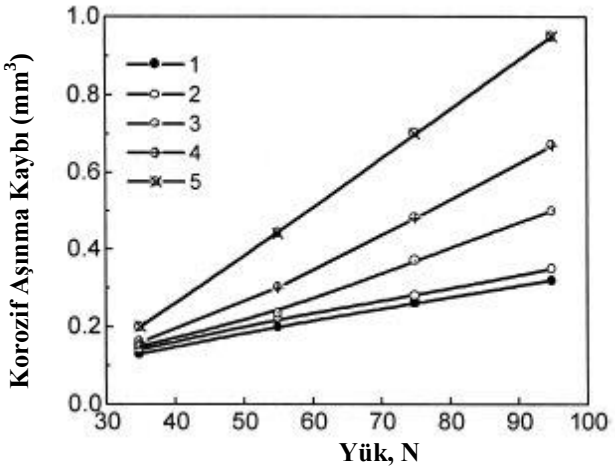
Paslanmaz çelikler esas itibariyle korozif saldırıların çokça olduğu ortamlarda kullanılmak amacıyla geliştirilmişlerdir. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi korozif ortamlara karşı dayanımı arttırmak amacıyla krom ve nikel oranlarının yüksek seviyelerde olması hedeflenir [3].

Li Shizhuo ve arkadaşları[18], 304 ve çift fazlı paslanmaz çeliklerin klor içeren asidik ortamlardaki korozif aşınma davranışlarını incelemişlerdir. H_2SO_4 çözeltisindeki Cl^- oranı 500 mg/l' den 2000'e veya 4000 mg/l' ye arttırıldığı zaman 304 kalite paslanmaz çeliğin korozif aşınma hızının %104-178 katlarda arttığı görülmüştür(Tablo 3.7).

Tablo 3.7. 304 kalite paslanmaz çeliğin 1mol/l H_2SO_4 ortamındaki korozif aşınma hızının değişimi [18]

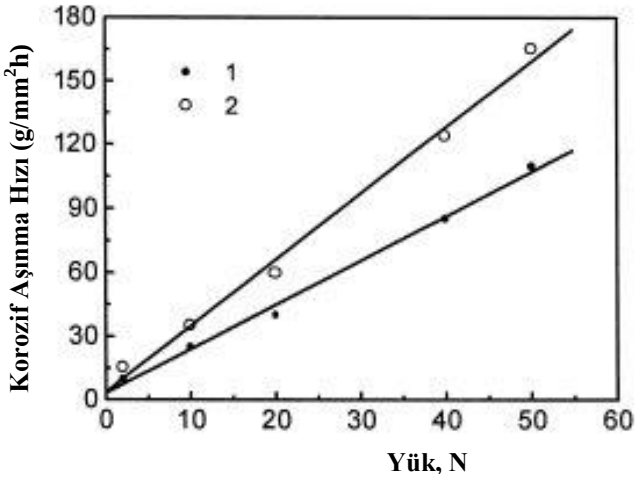
Klor İçeriği		500 ppm	2000 ppm	4000 ppm
Korozif Aşınma Hızı (mm^3/h)		0.077	0.157	0.214

Çift fazlı paslanmaz çeliklerde NaCl ve Cl^- içeriğine ve yüke bağlı olarak korozif aşınma hızının değişimi Şekil 3.10 ve 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.10. Çift fazlı paslanmaz çeliklerin farklı ortamlardaki korozif aşınma kaybının yüke göre değişimi (pin-on-ring, 0.025 m/s) [18]

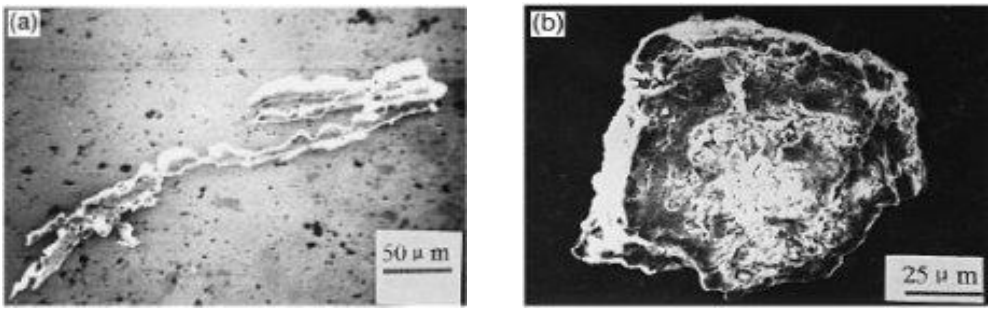
1. %69 H_3PO_4
2. %69 H_3PO_4 + 250mg/l Cl^-
3. %69 H_3PO_4 + 500mg/l Cl^-
4. %69 H_3PO_4 + 1000mg/l Cl^-
5. %69 H_3PO_4 + 5000mg/l Cl^-



Şekil 3.11. Çift fazlı paslanmaz çeliklerin farklı ortamlardaki korozif aşınma hızının yüke bağlı olarak değişimi(pin-on-ring, 0.03m/s, 1 saat) [18]

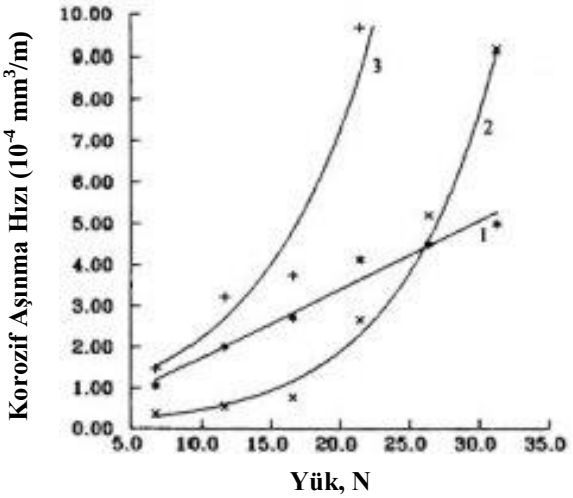
1. 0.5 mol/l H_2SO_4
2. 0.5 mol/l H_2SO_4 + 3.5% NaCl

Şekil 3.10'da çift fazlı paslanmaz çelikte,çözeltideki Cl içeriğindeki artışa bağlı olarak korozif aşınma hızının arttığı tespit edilmiştir. Şekil 3.11'de ise çift fazlı paslanmaz çelikte çözeltiye NaCl ilavesi ile korozif aşınma hızının arttığı belirlenmiştir. %69 H_3PO_4 ve %69 H_3PO_4 + 5000mg/l Cl^- ortamlarında 95N yük ve 0.025 m/s aşınma hızlarında korozif aşınma sonrası çift fazlı paslanmaz çeliklerde aşınma debrislerinin SEM görüntüleri de Cl- ilavesi ile aşınma yüksek boyutlara ulaştığını göstermektedir(Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Çift fazlı paslanmaz çeliklerin 95N yük ve 0.025 m/s aşınma hızlarında aşınma ürünlerinin SEM görüntüleri [18]
(a) %69 H_3PO_4
(b) %69 H_3PO_4 + 5000mg/l Cl^-

Xin-Chun Lu ve arkadaşları[19], 1mol/l H_2SO_4 çözeltisinde ostenitik, ferritik, ve çift fazlı paslanmaz çeliklerin korozif aşınma davranışına yüzey deformasyonunun etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarına ön hazırlık olarak yaptıkları araştırmada korozif aşınmanın endüstrideki toplam aşınma oranının %5'inden fazlasını kapsadığını tespit etmişlerdir[20]. Korozif aşınma deneyi için pin-on-ring tipi aşınma cihazından faydalanmışlardır. 1mol/l H_2SO_4 çözeltisinde ve 0.19 m/s kayma hızlarında 5N - 25N yük aralıklarında deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Şekil 3.13 paslanmaz çeliklerin korozif aşınma hızlarının 1 mol/l H_2SO_4 çözeltisinde yükle olan ilişkisini göstermektedir. Çift fazlı paslanmaz çeliklerin(1) korozif aşınma hızları yük ile lineer olarak artmaktadır. Ostenitik(2) ve ferritik(3) paslanmaz çeliklerin korozif aşınma hızı yük ile üstel bir artış göstermektedir. Yüksek yüklerde (>25N) korozif aşınma hızının sırası ostenitik>ferritik>çift fazlı paslanmaz çelik şeklinde değişmektedir. Daha düşük yüklerde, ostenitik>çift fazlı>ferritik paslanmaz çelik şeklinde gerçekleştiği sonucuna varmışlardır.

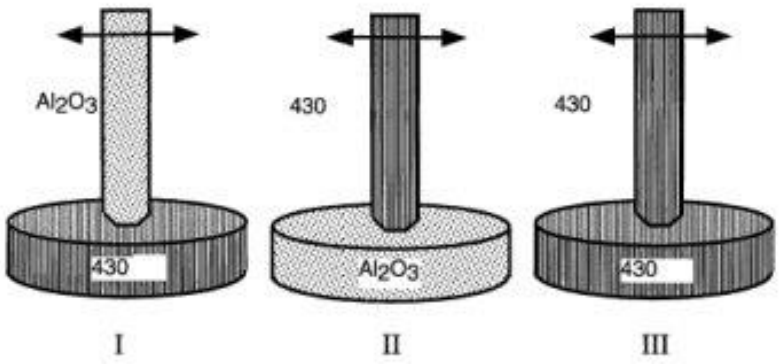


Şekil 3.13. (1) Çift Fazlı, (2) Ostenitik, (3) Ferritik, paslanmaz çeliklerin 1mol/l H_2SO_4 çözeltisinde ve 0.19 m/s kayma hızlarında korozif aşınma hızının yük ile değişimi [19]

Ostenitik paslanmaz çeliklerde martensitik dönüşümün yüzey deformasyonuna neden olduğu ve yüzeyi sert ve gevrek hale getirdiği; ferritik paslanmaz çeliklerde ise ince, sert ve gevrek bir tabaka oluştuğunu tespit etmişlerdir. Hem ostenitik hem de ferritik paslanmaz çeliklerde bu yapıların yüksek yüklerde zayıf korozif aşınma direnci gösterdiğini belirlemişlerdir. Çift fazlı paslanmaz çeliklerde ise korozif aşınma durumunda, uygun miktarda ostenit fazının kullanılmasının korozif aşınma direncini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Tribokorozyon mekanik aşınma ve korozyonun etkileşimi sonucu ortaya çıkan bir prosestir. Pasif metaller özellikle tribokorozyona karşı hassastır çünkü sürtünme, pasif filmin uzaklaştırılarak koruyucu özelliğini yok eder[21,22].

M. Stemp ve S. Mischler[23] Paslanmaz çeliklerin tribokorozyon davranışına temas konfigürasyonun etkisi üzerine yaptıkları çalışmada, üç temas konfigürasyonu belirlemişlerdir.Şekil 3.14). Çalışmalar 0.5M H_2SO_4 ortamında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14. 0.5M H_2SO_4 ortamında gerçekleştirilen aşınma deneylerinde kullanılan 3 farklı temas konfigürasyonu [23]

Çalışmanın sonunda; aşınma hacmi ve sürtünme katsayısı incelendiği zaman I ve II no' lu konfigürasyonların benzer davranış gösterdiği, III no'lu konfigürasyonda 4 katı daha fazla aşınma hacmi ve sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir(Tablo 3.8).

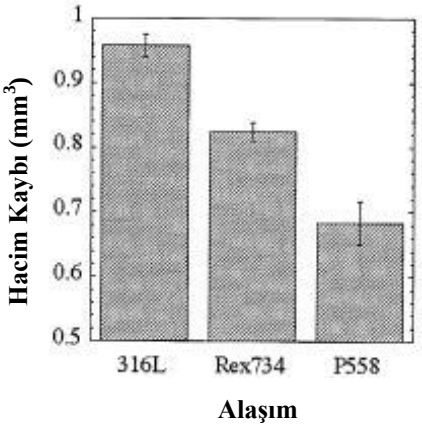
Tablo 3.8.İncelenen malzemelerin aşınma hacimleri ve sürtünme katsayısı sonuçları [23]

Konfigürasyon	Toplam Aşınma Hacmi (mm^3)	Sürtünme Katsayısı
I	0.017	0.35-0.39
	0.016	0.32-0.38
II	0.010	0.30-0.34
	0.015	0.26-0.37
	0.017	0.29-0.34
III	0.075	0.36-0.40
	0.069	0.36-0.41

Ostenitik paslanmaz çelikler uzun yıllardır implant malzemesi olarak kullanılmaktadır. Fakat 316L kalite ostenitik paslanmaz çelik ortopedik implant malzemesi olarak kullanılmasına rağmen vücut içerisinde korozyona uğrayıp, krom, nikel ve demir kayıplarına neden olmaktadır[24].

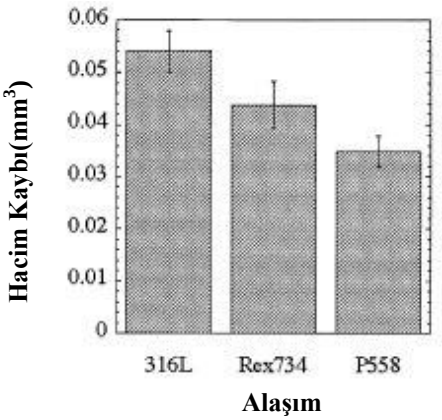
Urs I. Thomann ve Peter J. Uggowitzer[25], ostenitik paslanmaz çeliklerin tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında kullanılan malzemeler 316L, REX 734 ve PANACEA P558 kalite ostenitik paslanmaz çeliklerdir.

Kuru ortamdaki aşınma davranışları incelendiğinde P 558 kalite paslanmaz çeliğin aşınma direncinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir(Şekil 3.15).



Şekil 3.15. 3 farklı kalitedeki paslanmaz çeliklerin kuru ortamdaki Pin-on-drum aşınma cihazındaki hacim kayıplarının deney süresince değişimi(334 dak) [25]

% 22 NaCl çözeltisinin paslanmaz çeliklerin korozif aşınma davranışlarını incelemek için uygun bir korozif ortam olduğu belirlenmiştir. Fakat bu çözeltinin çalışmada kullanılan 3 farklı kalitedeki paslanmaz çeliğin korozif aşınma davranışına yeterli etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. % 22 NaCl çözeltisindeki aşınma deneyleri sonuçları Şekil 3.16'da verilmiştir. Buna göre; P 558 kalite paslanmaz çeliğin korozif aşınma direncinin diğer kalitelerdeki paslanmaz çeliğe göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Kuru ortamdaki aşınma deneylerindeki hacim kaybının, % 22 NaCl çözeltisindeki hacim kaybına göre yaklaşık 18 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.16. 3 farklı kalitedeki paslanmaz çeliklerin %22 NaCl çözeltisinde, Pin-on-drum aşınma cihazındaki hacim kayıplarının deney süresince değişimi(334 dak) [25]

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Malzemeler

Bu çalışmada, altı farklı kalitede paslanmaz çelik kullanılmış olup, bunların kimyasal bileşimi Tablo 4.1'de verilmiştir. İncelenen malzemelerin $Cr_{eş}$ ve $Ni_{eş}$ değerlerini hesaplama yöntemi Denklem 4.1 ve 4.2'de verilmiştir

Tablo 4.1. Paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri (%Ağ)

	C	**Si**	**S**	**P**	**Mn**	**Ni**	**Cr**	**Mo**	**Nb**
316	0.078	1.03	0.012	0.020	0.62	11.10	19.10	2.38	-
316L	0.018	0.44	0.019	0.023	1.46	10.86	17.25	2.04	-
304L	0.037	0.59	0.003	0.032	1.68	8.90	18.24	-	-
304E	0.022	0.41	0.025	0.028	1.04	10.26	18.25	-	-
22-13-5	0.018	0.29	0.003	0.021	3.32	18.75	26.74	2.65	0.11
PH 17-4	0.05	0.63	0.020	0.019	0.60	4.02	15.40	0.19	0.28

$$Ni_{eş} = \%Ni + 30.\%C + 0.5.\%Mn + 11.5.\%N \quad (4.1)$$

$$Cr_{eş} = \%Cr + \%Mo + 1.5.\%Si + 2.\%Nb + 3.\%Ti \quad (4.2)$$

Tablo 4.2. Paslanmaz çeliklerin $Cr_{eş}$ ve $Ni_{eş}$ değerleri

Malzeme	**Creş**	**Nieş**
22-13-5	30.45	20.95
PH 17-4	17.10	5.82
316L	19.96	12.13
304E	18.87	11.43
316	23.02	13.75
304L	19.13	10.84

4.2. Mikroyapısal Karakterizasyon

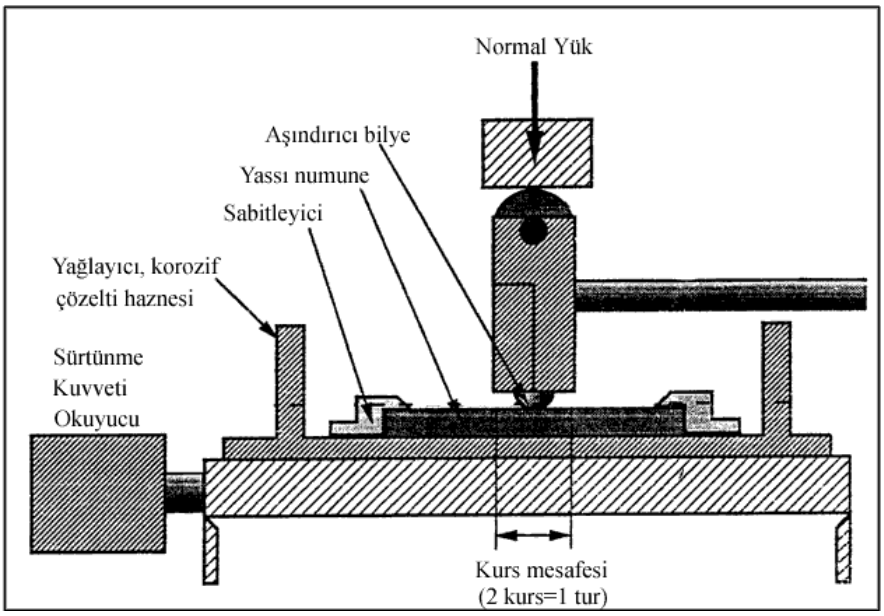
Numuneler mikroyapısal incelemeler için standart metalografik yöntemlerle hazırlanmıştır. Reçineye alınan numuneler sırasıyla 180, 400, 600, 800, 1200 mesh zımpara kademelerinde zımparalanmış ve parlatma çuhası üzerinde Al_2O_3 ile parlatılmıştır. Mikroskobik incelemeler; hazırlanan numuneler üzerinde elektrolitik dağlama(%10 oksalik asit) işlemi ile dağlandıktan sonra Zeiss marka optik mikroskopla yapılmıştır.

Metalografik numunelerin sertlik ölçümleri, Tucon Model LL Knoop mikrosertlik cihazında gerçekleştirilmiştir. Paslanmaz çeliklerin sertlikleri 100 g yük altında Knoop ucu ile ölçülmüştür. Sertlik değerleri en az 10 ölçüm gerçekleştirerek tespit edilmiştir.

4.3. Aşınma Deneyleri

Farklı ortamlarda paslanmaz çeliklerin oda sıcaklığındaki aşınma davranışını incelemek amacıyla salınım hareketi yapan karşı yüklemeli (Reciprocating) aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinin yapıldığı cihaz Şekil 4.1'de görülmektedir. Karşı malzeme olarak 10 mm çapındaki Al_2O_3 bilya kullanılmış ve 150 g sabit yük altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Paslanmaz çelikler, 0.02 m/s kayma hızı ile 480 m toplam kayma mesafesinde toplam 360 dak. aşındırılmıştır. Deneyler belli sürelerde (35, 90, 180 ve 270 dak.) durdurularak numune ve bilyada oluşan aşınma izlerinin profili ve mikroskobik görünümleri alınmıştır. Aşınma izlerinin profili Perthometer S8P marka cihazda yapılmıştır. Aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısı değerleri sürekli olarak kaydedilmiştir.

Aşınma deneyleri kuru ortam, deniz suyu (marmara denizi), %50 ve %90 konsantrasyonlarda H_2SO_4, ve %10 konsantrasyonda $FeCl_3$(Demir Klorür) olmak üzere 5 farklı ortamda gerçekleştirilmiştir. Kuru ortam aşınma deneyleri sırasında bağıl nem % 42 ila % 44 aralığında tutulmuştur. Aşınma deneyleri sonrasında aşınma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir.



Şekil 4.1. Reciprocating Aşınma Cihazı

4.4. Korozyon Deneyleri

Korozyon deneyi için numuneler sırasıyla 180, 400, 600, 800, 1200 mesh zımpara kademelerinde zımparalanmış ve parlatma çuhası üzerinde Al_2O_3 ile parlatılmıştır. Korozif çözelti olarak %10 $FeCl_3$(Demir Klorür) kullanılmıştır. Numunelerin daldırıldığı çözeltinin hacmi (V) numunelerin yüzey alanına (A) hesaplanmıştır

$$V\ (ml) = 0.3\ ml/mm^2 \times A\ (mm^2) \tag{4.3}$$

Korozyon deneyi toplam 1440 dak yapılmış olup, belli sürelerde (35, 90, 180, 270, 360, 720 ve 1080) numuneler çözeltiden çıkarılmış, saf su ve alkol ile temizlendikten sonra ağırlık kayıpları 0.1 mg hassasiyetle ölçülmüştür. Korozyon deneyi sonrası numunelerin yüzeyleri optik mikroskopta incelenmiştir.

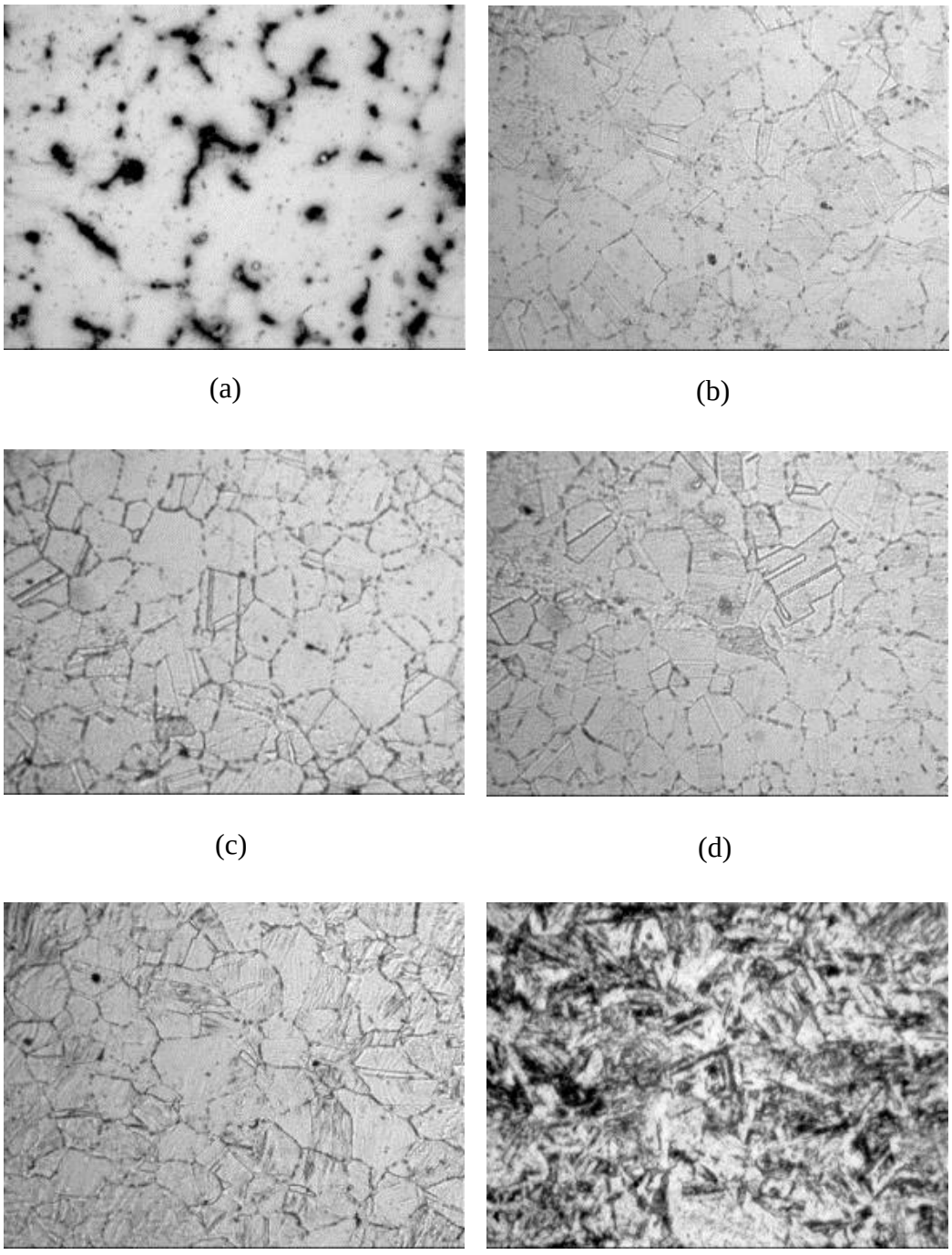
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

5.1. Mikroyapısal Karakterizasyon Sonuçları

İncelenen paslanmaz çeliklerin Knoop Sertlik değerleri Tablo 5.1, mikroyapıları ise Şekil.5.1'de verilmiştir. Mikroskobik incelemelerden 22-13-5, 316L, 304L, 304E, ostenitik, PH 17-4 'ün ise martensitik mikroyapıya sahip olduğu görülmüştür. 316 kalite paslanmaz çelik döküm yapısındadır.

Tablo 5.1. Paslanmaz çeliklerin mikrosertlik değerleri.

Malzeme	**Sertlik $HK_{0.1}$ (kg/mm^2)**
22-13-5	467
PH 17-4	352
316L	259
304E	230
316	201
304L	182



Şekil 5.1. Bu çalışmada incelenen paslanmaz çeliklerin (a) 316 (b)304L (c) 316L (d) 304E (e) 22-13-5 (f) PH 17-4 mikroyapıları(X200).

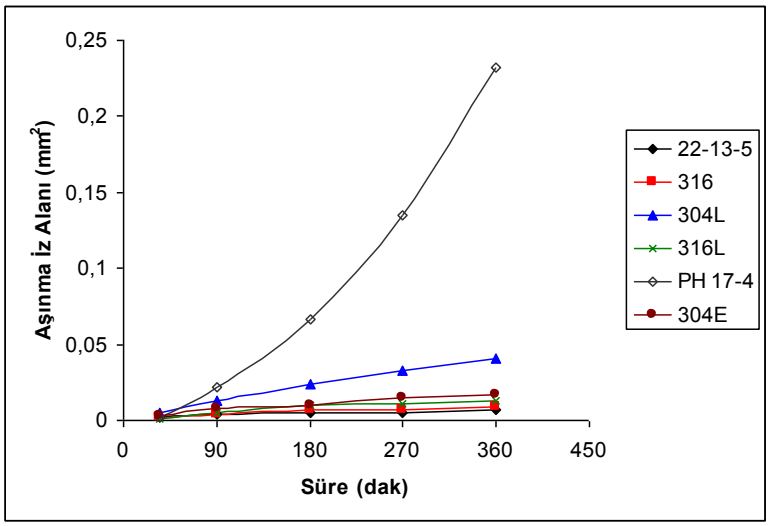
5.2. Aşınma Deneyi Sonuçları

5.2.1. Kuru Ortam Aşınma Deneyi Sonuçları

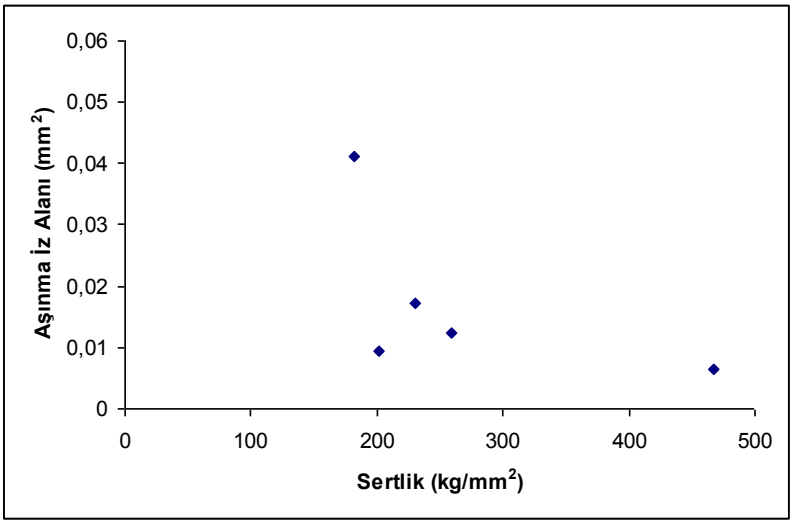
Kuru ortamda yapılan aşınma deneyleri sırasında oluşan aşınma izlerinin 3 boyutlu profilleri Şekil A1-A2'de verilmiştir. Bu profillerden ölçülen aşınma iz alanlarının deney süresince değişimi Şekil 5.2'de görülmektedir. Buna göre incelenen paslanmaz çelikler, artan aşınma dirençlerine göre PH 17-4, 304L, 304E, 316L, 316, 22-13-5 olarak sıralanabilir.

İncelenen paslanmaz çeliklerin aşınma miktarı ile sertlikleri arasındaki ilişki Şekil 5.3'de görülmektedir. Buna göre sertlik artışı ile aşınma azalmaktadır Ancak çökelme ile sertleştirilen PH 17-4 kalite paslanmaz çelikte, sertlik yüksek olmasına rağmen daha düşük aşınma direnci elde edilmiştir.

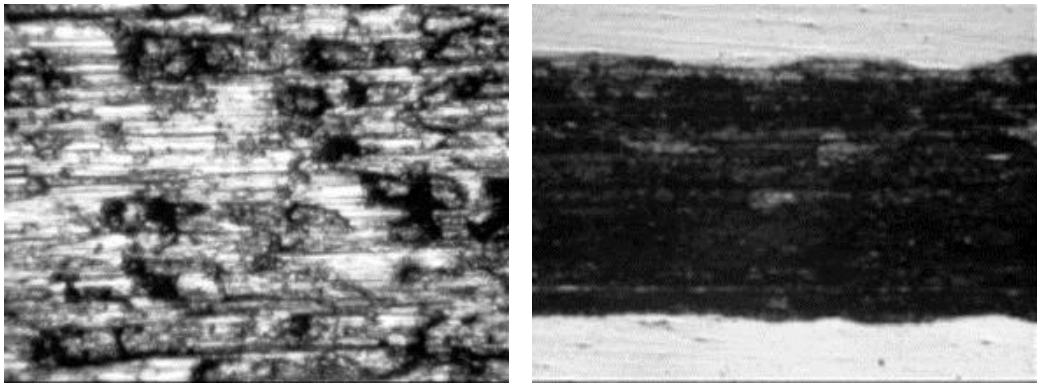
Kuru ortam aşınma deneylerinde yüksek ve düşük aşınma direnci gösteren paslanmaz çeliklerin aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri sırası ile Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de verilmiştir. Şekil C.1'de ise deney süresinde aşınma izlerini gösteren optik mikroskop görüntüleri yer almaktadır. Düşük aşınma direnci sergileyen PH 17-4 kalite paslanmaz çeliğin yüzeyinde oluşan aşınma izi geniş ve oldukça pürüzlüdür.



Şekil 5.2. Kuru ortamdaki aşınma deneyi sırasında incelenen paslanmaz çeliklerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin deney süresince gelişimi

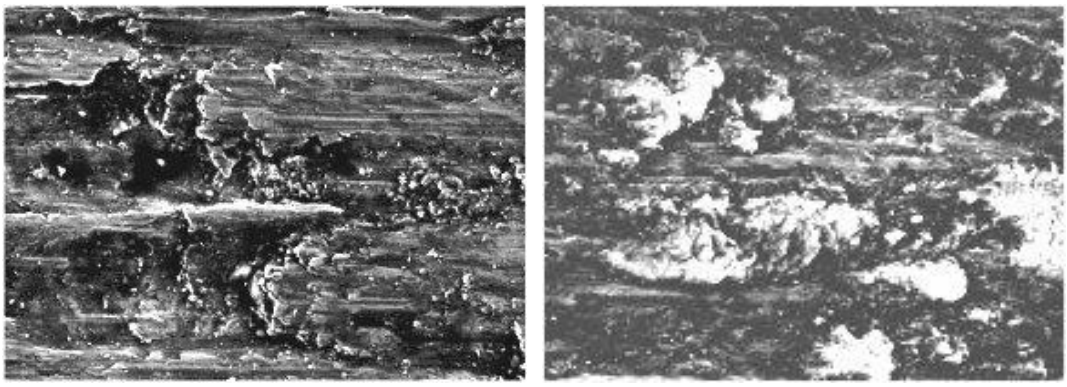


Şekil 5.3. İncelenen paslanmaz çeliklerin Aşınma İz Alanı-Sertlik değişimi



(a) (b)

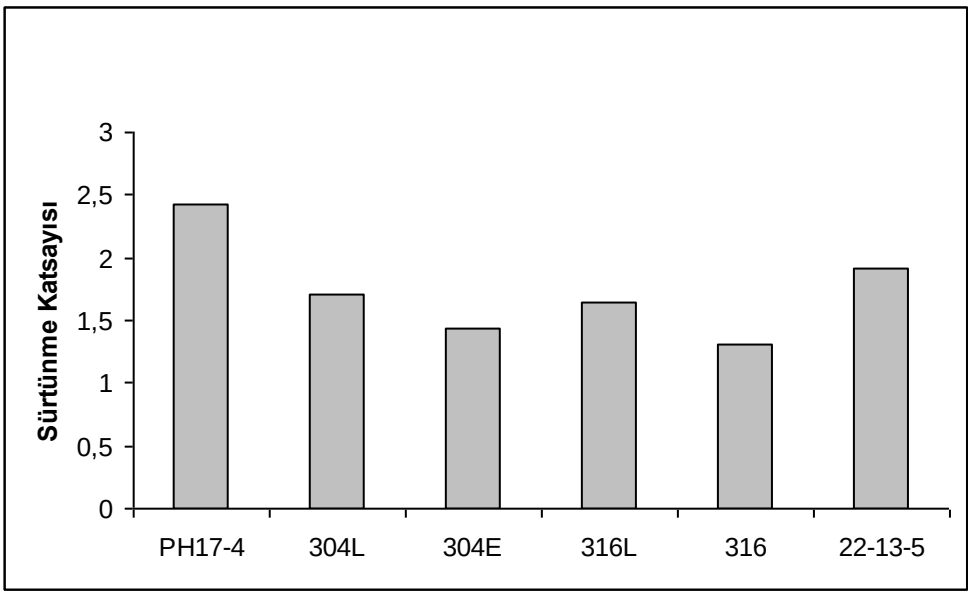
Şekil 5.4. (a) PH 17-4 ve (b) 22-13-5 kalite paslanmaz çeliklerin kuru ortamdaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri(X50).



(a) (b)

Şekil 5.5. (a) PH 17-4 ve (b) 22-13-5 kalite paslanmaz çeliklerin kuru ortamdaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri(X700).

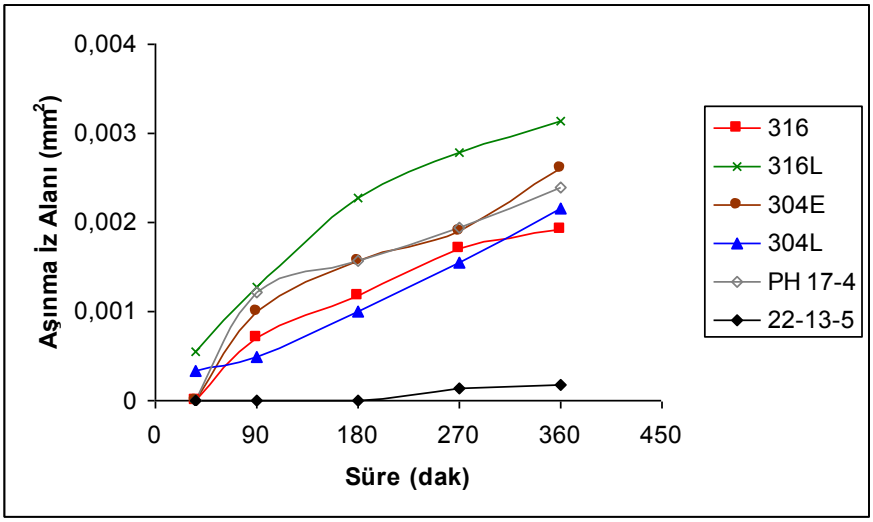
İncelenen paslanmaz çeliklerde kuru aşınma deneyleri süresince sürtünme katsayılarının değişimi Şeki B1'de verilmiştir. Deney süresince sürtünme katsayısısın sabit kaldığı değer kararlı durum sürtünme katsayısı olarak tanımlanmış olup, Şekil 5.6'da verilmiştir. Diğerlerine nazaran daha çok aşınan PH 17-4, en yüksek kararlı durum sürtünme katsayısına sahiptir.



Şekil 5.6. İncelenen paslanmaz çeliklerin kuru aşınma deneyi sırasındaki kararlı durum sürtünme katsayıları.

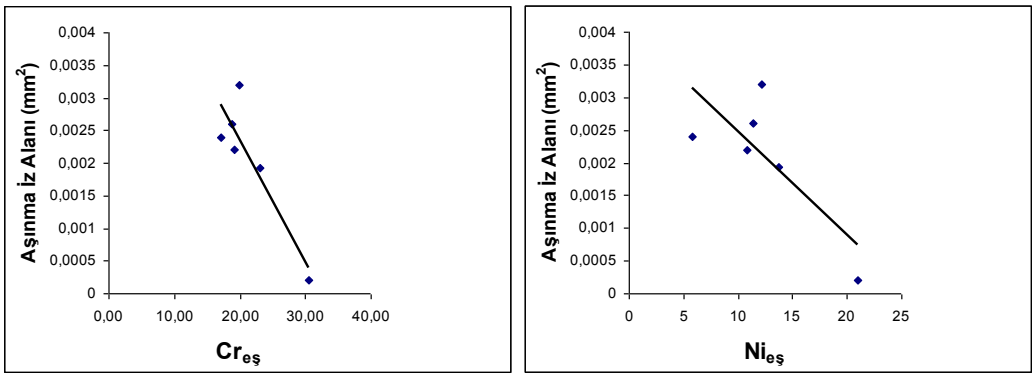
5.2.2 Deniz Suyu (Marmara Denizi) Aşınma Deneyleri Sonuçları

Deniz suyundaki aşınma deneyleri esnasında meydana gelen aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri Şekil A3-A4'de verilmiştir. Aşınma iz alanlarının değişimi Şekil 5.7'da görülmektedir. Buna göre incelenen paslanmaz çelikler artan aşınma dirençlerine göre; 316L, 304E, PH 17-4, 304L, 316, 22-13-5 şeklinde sıralanabilir.



Şekil 5.7. Deniz suyundaki aşınma deneyleri sırasında paslanmaz çeliklerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin deney süresince gelişimi

İncelenen paslanmaz çeliklerin deniz suyundaki aşınma davranışlarının, kimyasal bileşimleri açısından değerlendirilmesi amacıyla, Şekil 5.8'deki grafikler çizilmiştir. Bu diyagramlarda 360 dak deney süresi sonunda oluşan aşınma iz alanlarının $Cr_{eş}$ ve $Ni_{eş}$ değerine göre değişimi verilmiştir. Gerek $Cr_{eş}$ ve gerekse $Ni_{eş}$ değerinin artması ile aşınma iz alanı azalmış yani paslanmaz çeliklerin deniz suyundaki aşınma direnci artmıştır. Aşınma direnci üzerinde krom, nikele nazaran daha belirgin bir etkiye sahiptir.

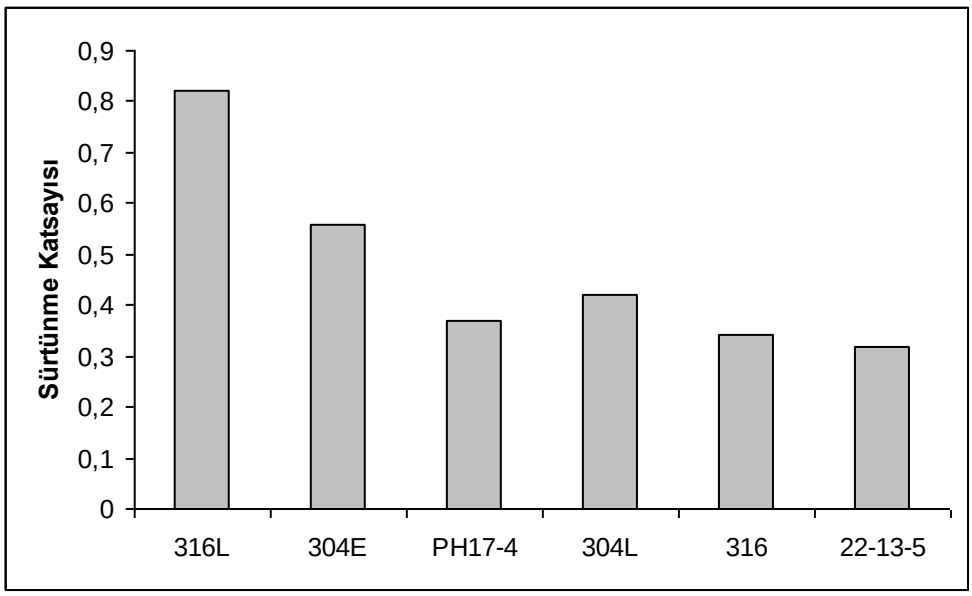


(a) (b)

Şekil 5.8. İncelenen paslanmaz çeliklerin yüzeyinde deniz suyunda oluşan iz alanına (a) $Cr_{eş}$ ve (b) $Ni_{eş}$ değerinin etkisi (Deney süresi 360 dak)

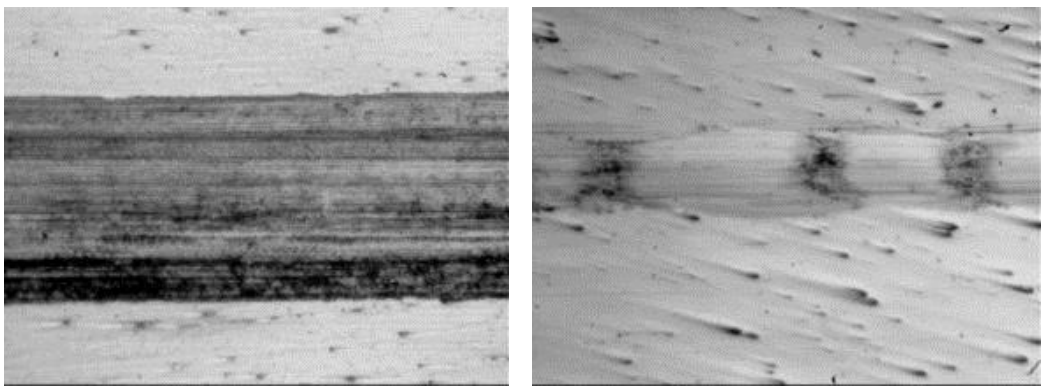
İncelenen paslanmaz çeliklerin deniz suyunda yapılan aşınma deneyleri sırasındaki sürtünme katsayısının deney süresince değişimi Şekil B2'de kararlı durum sürtünme katsayıları ise Şekil 5.9'da verilmiştir. Deniz suyunda en çok aşınan 316 L kalite

paslanmaz çelik en yüksek sürtünme katsayısı en az aşınan 22-13-5 kalite paslanmaz çelik ise en düşük sürtünme katsayısı sergilemiştir.



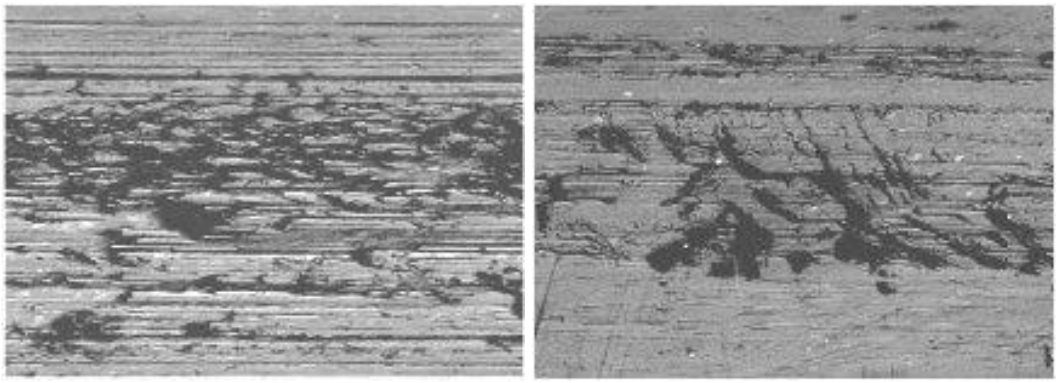
Şekil 5.9. Deniz suyunda yapılan aşınma deneyleri sırasında incelenen paslanmaz çeliklere ait kararlı durum sürtünme katsayıları.

Paslanmaz çeliklerin aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.10 ve Şekil C2'de verilmiştir. Şekil 5.11 ise deniz suyunda en çok ve en az aşınan paslanmaz çeliklerin yüzeylerindeki aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu görüntülerini göstermektedir. Paslanmaz çeliklerin deniz suyundaki aşınma deneyi sonrası 316L kalite paslanmaz çeliğin yüzeyi daha pürüzlü ve yüzeyden daha fazla partikül kalkmıştır.



(a) (b)

Şekil 5.10. (a) 316L ve (b) 22-13-5 kalite paslanmaz çeliklerin deniz suyu ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri(X50).



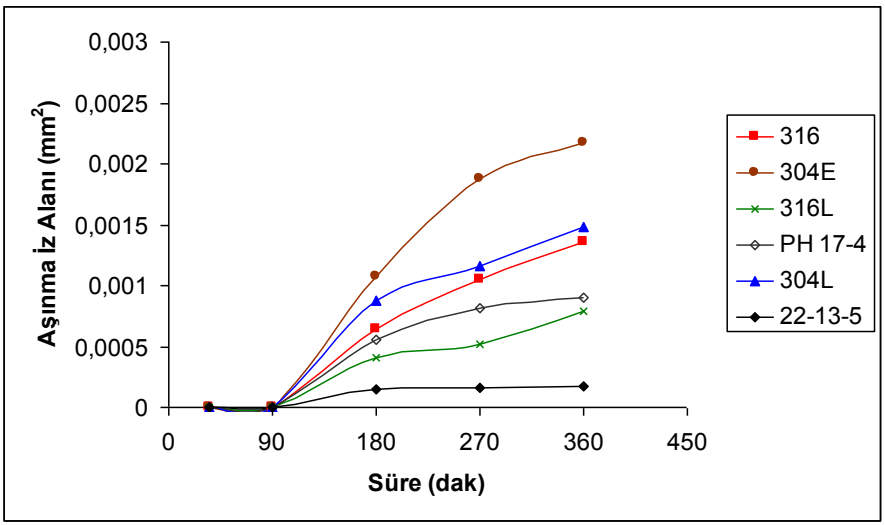
(a) (b)

Şekil 5.11. (a) 316L ve (b) 22-13-5 kalite paslanmaz çeliklerin deniz suyu ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri(X700).

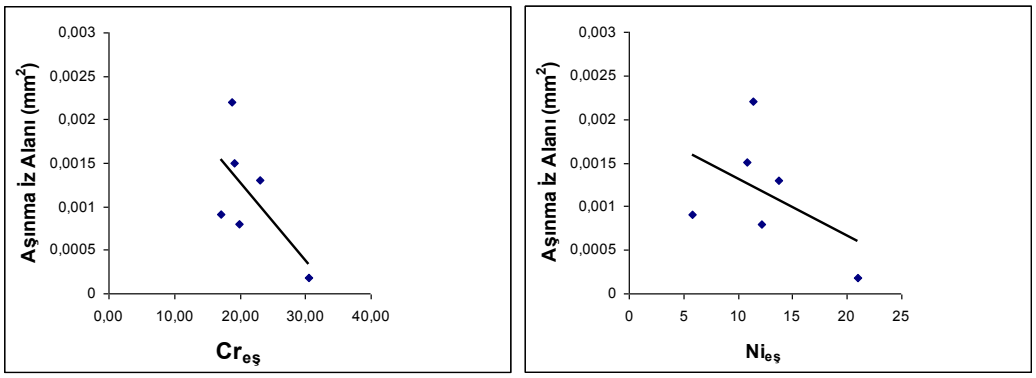
5.2.3 Sülfürik Asitteki (H_2SO_4) Aşınma Deneyi Sonuçları

5.2.3.1. %50 H_2SO_4 Konsantrasyonundaki Aşınma Deneyi Sonuçları

Paslanmaz çeliklerin %50 H_2SO_4 konsantrasyonundaki aşınma deneyi sırasında oluşan 3 boyutlu profillerinden elde edilen aşınma alanlarının değişimi Şekil 5.12 ve Şekil A5-A6'da verilmiştir. Buna göre, incelenen paslanmaz çelikler artan aşınma dirençlerine göre; 304E, 316, 304L, PH 17-4, 316L, 22-13-5 şeklinde sıralanabilir. İncelenen paslanmaz çeliklerin %50 H_2SO_4'teki aşınma davranışlarının, kimyasal bileşimleri açısından değerlendirilmesi amacıyla, Şekil 5.13'deki grafikler çizilmiştir. Bu diyagramlarda 360 dak deney süresi sonunda oluşan aşınma iz alanlarının $Cr_{eş}$ ve $Ni_{eş}$ değerlerine göre değişimi verilmiştir. Gerek Creş ve gerekse Nieş değerinin artması ile aşınma iz alanı azalmış yani paslanmaz çeliklerin %50 H_2SO_4 çözeltisinde aşınma direnci artmıştır. Aşınma direnci üzerinde krom, nikele nazaran daha belirgin bir etkiye sahiptir. Nikelin aşınma iz genişliği üzerindeki etkisi, iz alanını azaltma eğiliminde olmasına rağmen, Şekil 5.13 b' deki saçılım çok fazladır.



Şekil 5.12. %50 H_2SO_4 çözeltisindeki aşınma deneyleri sırasında paslanmaz çeliklerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin deney süresince gelişimi.

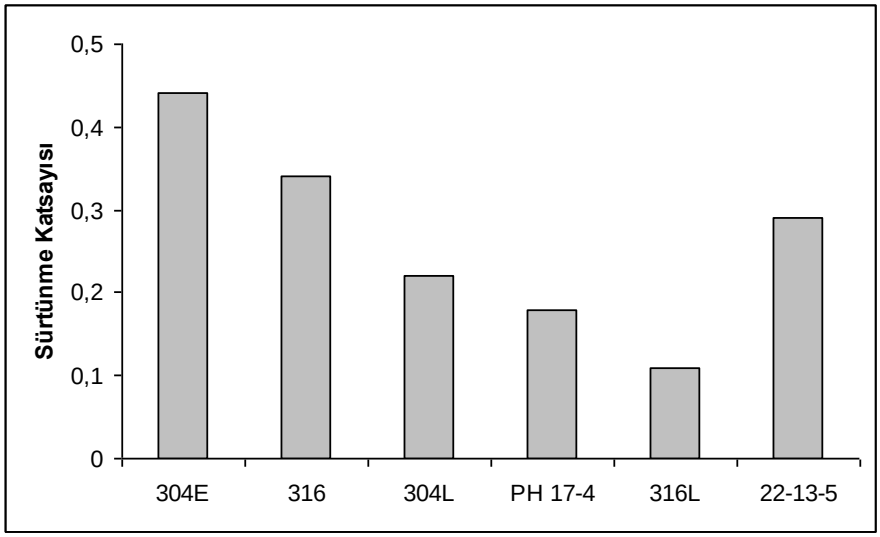


(a) (b)

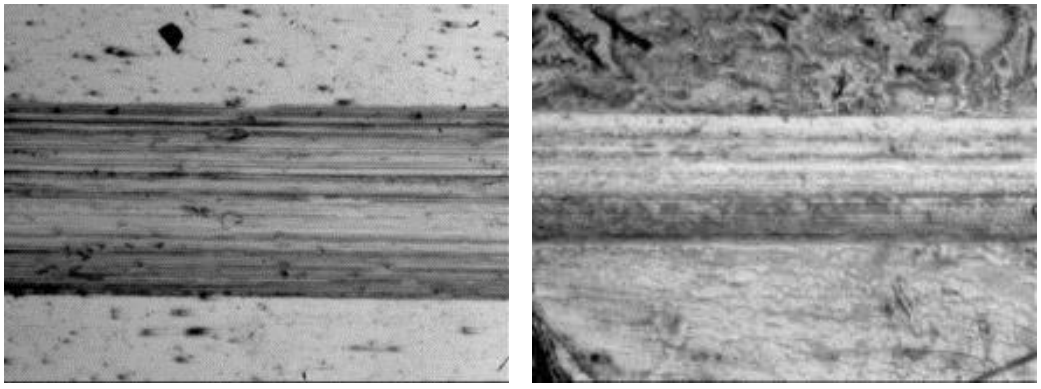
Şekil 5.13. İncelenen paslanmaz çeliklerin yüzeyinde %50 H_2SO_4 ortamında oluşan iz alanına (a) $Cr_{eş}$ ve (b) $Ni_{eş}$ değerinin etkisi (Deney süresi 360 dak)

İncelenen paslanmaz çeliklerin %50 H_2SO_4 ortamındaki aşınma deneyi sırasında kaydedilen sürtünme katsayılarının deney sürenci değişimi Şekil B3'te, kararlı durum sürtünme katsayıları ise Şekil 5.14'te görülmektedir. Buna göre %50 H_2SO_4 çözeltisinde en çok aşınan 304 E kalite paslanmaz çelikte en yüksek sürtünme katsayısı elde edilmiştir.

Paslanmaz çeliklerin en çok ve en az aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.15 ve Şekil C3'te taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ise Şekil 5.16'da verilmiştir. 304E kalite paslanmaz çelikte aşınma yüzeyinde izler daha belirgindir ve bazı bölgelerde çatlaklar tespit edilmiştir.

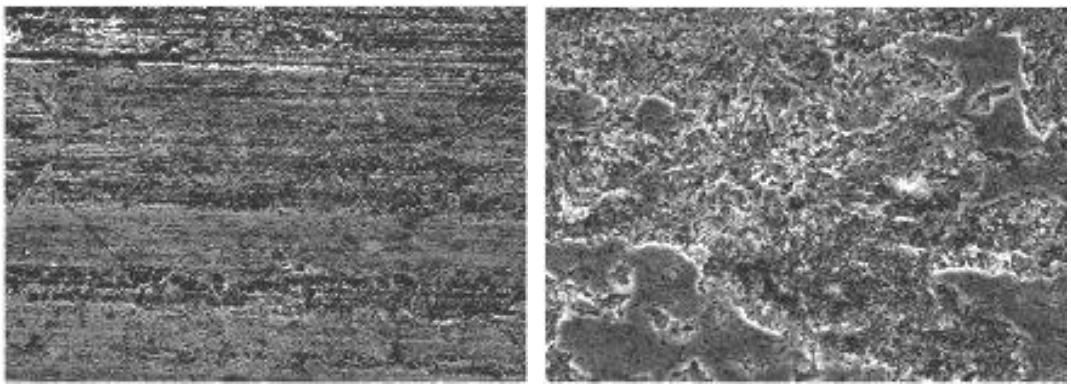


Şekil 5.14. %50 H_2SO_4 çözeltisinde yapılan aşınma deneyleri sırasında incelenen paslanmaz çeliklere ait kararlı durum sürtünme katsayıları.



(a) (b)

Şekil 5.15. (a) 304E ve (b) 22-13-5 kalite paslanmaz çeliklerin %50 H_2SO_4 ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri(X50).

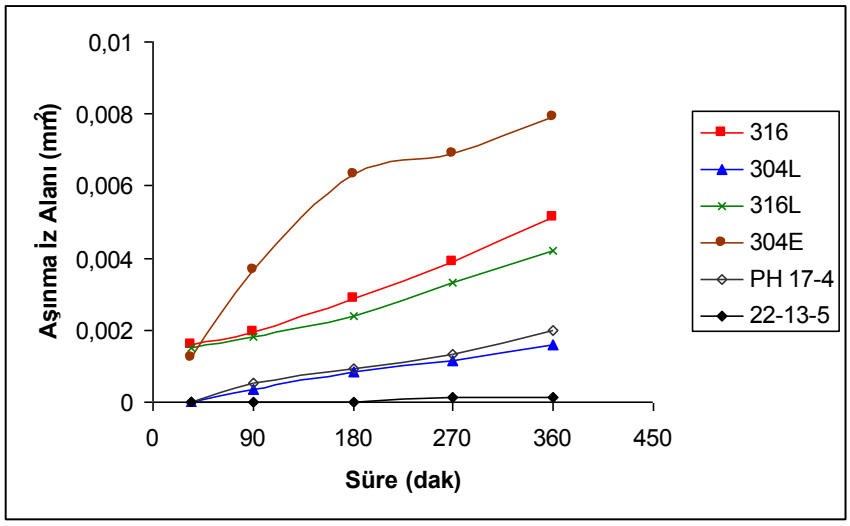


(a) (b)

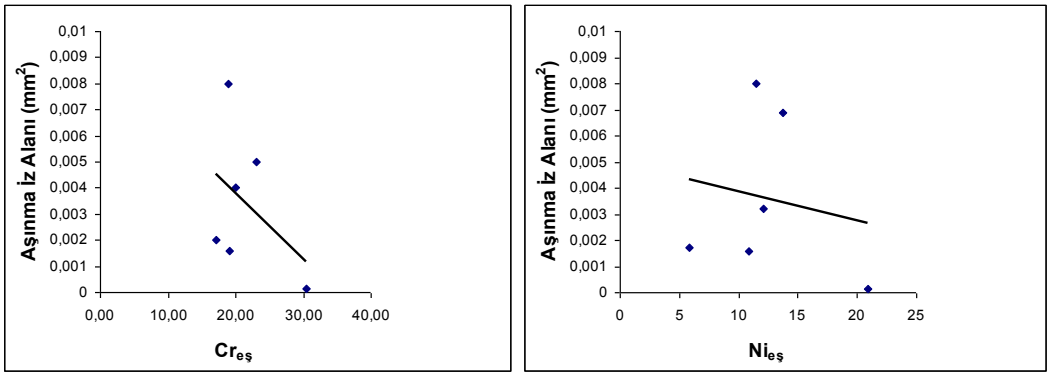
Şekil 5.16. (a) 304E ve (b) 22-13-5 kalite paslanmaz çeliklerin %50 H_2SO_4 ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri(X700).

5.2.3.2. %90 H_2SO_4 Konsantrasyonundaki Aşınma Deneyi Sonuçları

% 90 H_2SO_4 ortamında yapılan aşınma deneyleri sırasında oluşan aşınma izlerinin 3 boyutlu profilleri Şekil A7-A8'de verilmiştir. Bu profillerden ölçülen aşınma alanlarının deney süresince değişimi Şekil 5.17'de görülmektedir. Buna göre; incelenen paslanmaz çelikler artan aşınma dirençlerine göre; 304E, 316, 316L, PH 17-4, 304L, 22-13-5 olarak sıralanabilir. İncelenen paslanmaz çeliklerin %90 H_2SO_4'teki aşınma davranışlarının, kimyasal bileşimleri açısından değerlendirilmesi amacıyla, Şekil 5.18'deki grafikler çizilmiştir. Bu diyagramlarda 360 dak deney süresi sonunda oluşan aşınma iz alanlarının $Cr_{eş}$ ve $Ni_{eş}$ değerine göre değişimi verilmiştir. $Cr_{eş}$ değerinin artması ile aşınma iz alanı azalmış yani paslanmaz çeliklerin %90 H_2SO_4 çözeltisinde aşınma direnci artmıştır. $Ni_{eş}$'in aşınma direnci çok belirgin olmasa da artan $Ni_{eş}$ ile aşınma direnci artma eğilimindedir. Aşınma direnci üzerinde krom, nikele nazaran daha belirgin bir etkiye sahiptir.



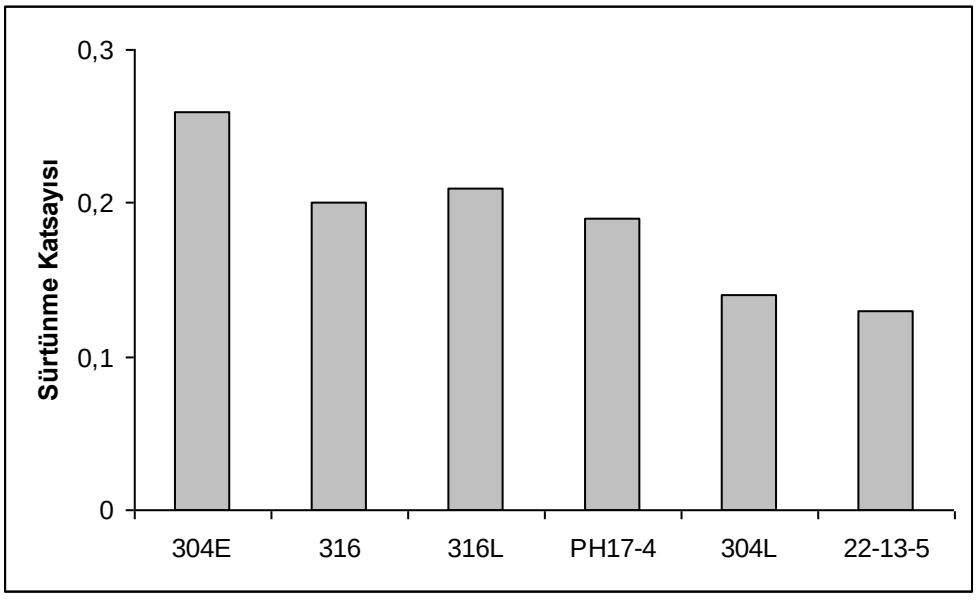
Şekil 5.17. %90 H_2SO_4 çözeltisindeki aşınma deneyleri sırasında paslanmaz çeliklerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin deney süresince gelişimi.



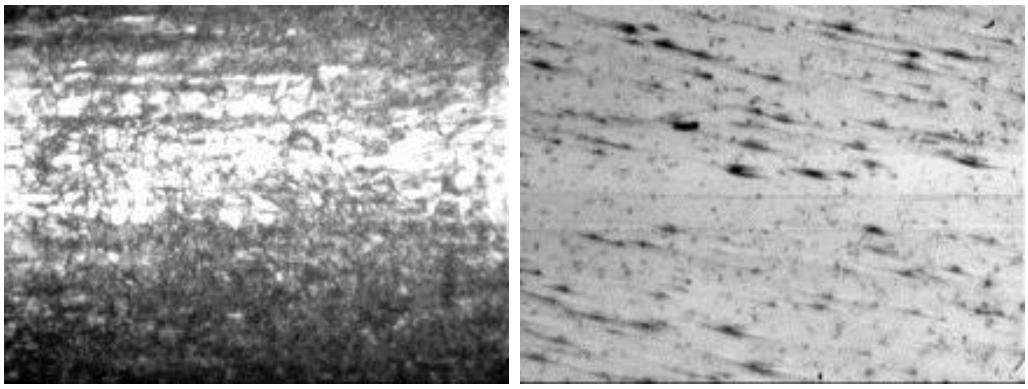
Şekil 5.18. İncelenen paslanmaz çeliklerin yüzeyinde %90 H_2SO_4 ortamında oluşan iz alanına (a) $Cr_{eş}$ ve (b) $Ni_{eş}$ değerinin etkisi (Deney süresi 360 dak)

İncelenen paslanmaz çeliklerin %90 H_2SO_4 ortamındaki aşınma deneyi sırasında kaydedilen sürtünme katsayılarının deney sürenci değişimi Şekil B4'te kararlı durum sürtünme katsayıları ise Şekil 5.19'da görülmektedir. Bu göre %90 H_2SO_4 çözeltisinde en çok aşınan 304 E kalite paslanmaz çelikte en yüksek sürtünme katsayısı elde edilmiştir.

Paslanmaz çeliklerin aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.20 ve Şekil C5'te, taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ise Şekil 5.21'de verilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde 304E kalite paslanmaz çelikte aşınma izlerinin daha derin olduğu ve çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir Şekil 5.22.'de 304E kalite paslanmaz çelikte çatlak oluşumu görülmektedir.

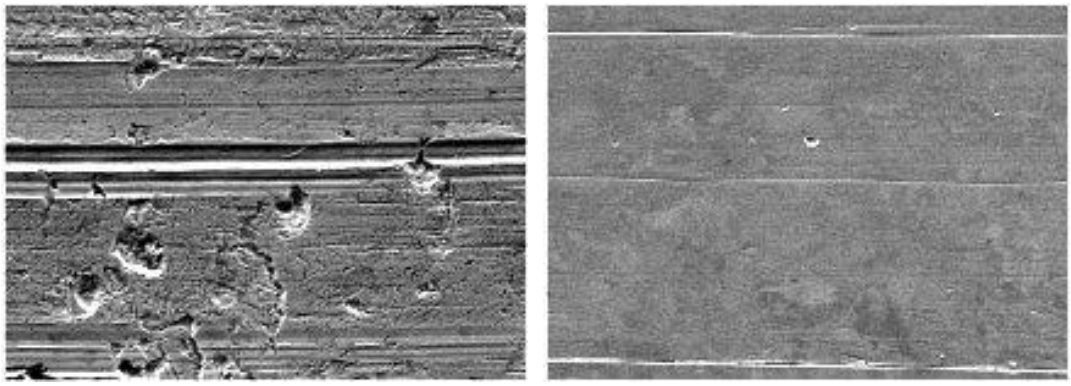


Şekil 5.19. %90 H_2SO_4 çözeltisinde yapılan aşınma deneyleri sırasında incelenen paslanmaz çeliklere ait kararlı durum sürtünme katsayıları.



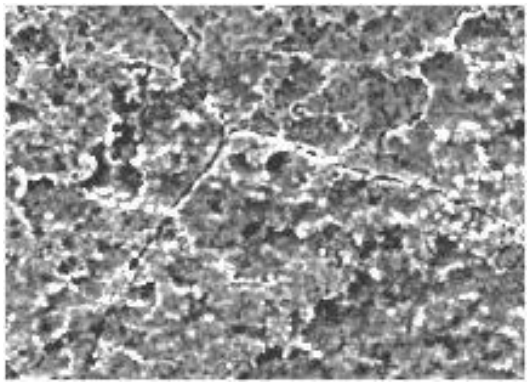
(a) (b)

Şekil 5.20. (a) 304E ve (b) 22-13-5 kalite paslanmaz çeliklerin %90 H_2SO_4 ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri(X50).



(a) (b)

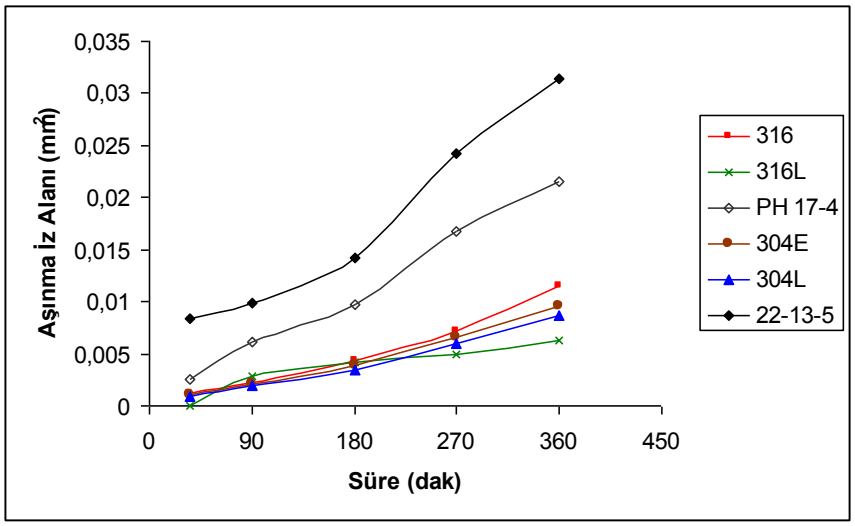
Şekil 5.21. (a) 304E ve (b) 22-13-5 paslanmaz çeliklerin %90 H_2SO_4 ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (X700)



Şekil 5.22. 304E kalite paslanmaz çelikte %90 H_2SO_4 ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izinde çatlak oluşumu.(X2500)

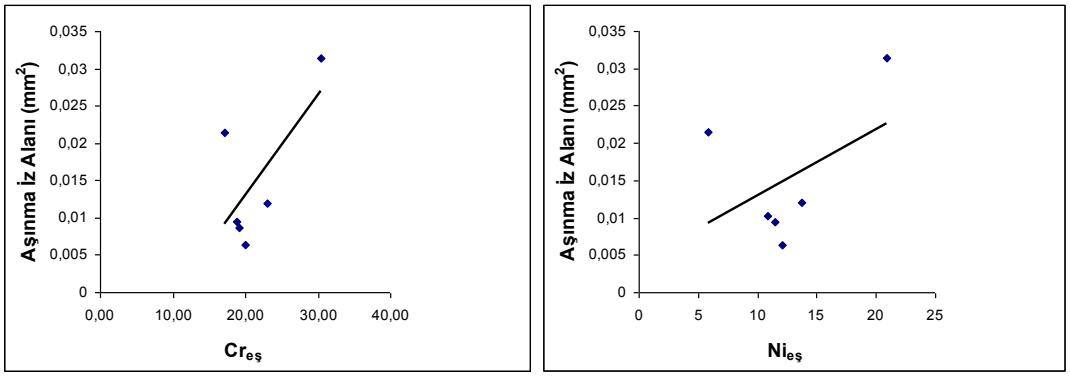
5.2.4. %10 $FeCl_3$ (Demir Klorür)'deki Aşınma Deneyi Sonuçları

%10 $FeCl_3$ çözeltisinde gerçekleştirilen aşınma deneyi sonrası oluşan aşınma izlerinin 3 boyutlu profilleri Şekil A9-A10'da verilmiştir. Bu profillerden elde edilen Aşınma Alanlarının süre ile değişimi Şekil 5.23'de verilmiştir. Buna göre, paslanmaz çelikler artan aşınma dirençlerine göre; 22-13-5, PH 17-4, 316, 304L, 304E, 316L şeklinde sıralanabilir.



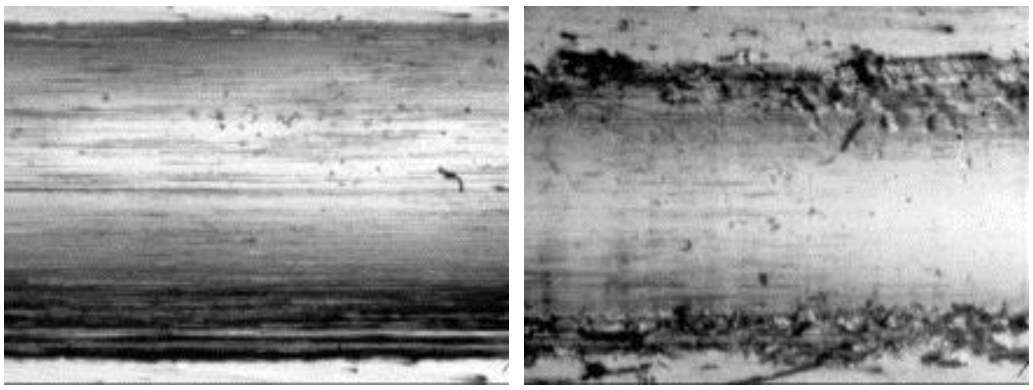
Şekil 5.23. %10 $FeCl_3$ çözeltisindeki aşınma deneyleri sırasında paslanmaz çeliklerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin deney süresince gelişimi.

İncelenen paslanmaz çeliklerin %10 $FeCl_3$'teki aşınma davranışlarının, kimyasal bileşimleri açısından değerlendirilmesi amacıyla, Şekil 5.24'deki grafikler çizilmiştir. Bu diyagramlarda 360 dak deney süresi sonunda oluşan aşınma iz alanlarının $Cr_{eş}$ ve $Ni_{eş}$ değerine göre değişimi verilmiştir. Gerek $Cr_{eş}$ ve gerekse $Ni_{eş}$ değerinin artması ile aşınma iz alanı artmış yani paslanmaz çeliklerin %10 $FeCl_3$ çözeltisinde aşınma direnci azalmıştır.



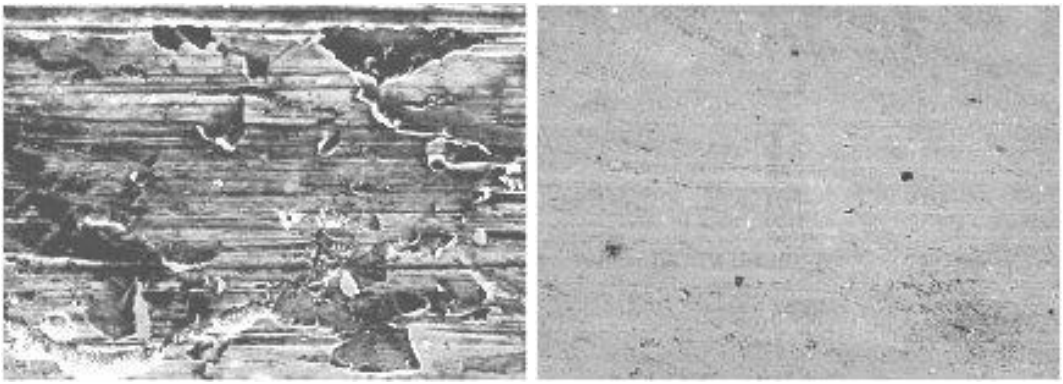
Şekil 5.24. İncelenen paslanmaz çeliklerin yüzeyinde %10 $FeCl_3$ ortamında oluşan iz alanına (a) $Cr_{eş}$ be (b) $Ni_{eş}$ değerinin etkisi (Deney süresi 360 dak).

İncelenen paslanmaz çeliklerin %10 $FeCl_3$'teki aşınma deneyi sonucunda oluşan aşınmış yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.25 ve Şekil C4'te, taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 5.26'da verilmiştir. 22-13-5 kalite paslanmaz çelikte aşınma yüzeyindeki deformasyonun daha fazla olduğu ve derin oyukların oluştuğu gözlemlenmiştir.



(a) (b)

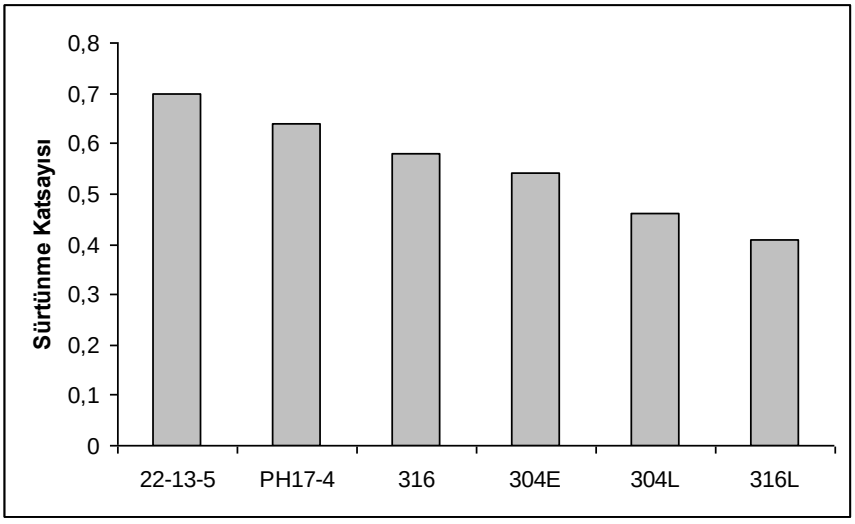
Şekil 5.25. (a) 22-13-5 ve (b)316L kalite paslanmaz çeliklerin %10 $FeCl_3$ ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri(X50).



(a) (b)

Şekil 5.26. (a) 22-13-5 ve (b) 316L kalite paslanmaz çeliklerin %10 $FeCl_3$ ortamındaki aşınma deneyi sonrası aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri(X700).

İncelenen paslanmaz çeliklerin %10 $FeCl_3$ ortamındaki aşınma deneyi sırasında kaydedilen sürtünme katsayılarının deney sürenci değişimi Şekil B5'te karalı durum sürtünme katsayıları ise Şekil 5.27'de görülmektedir. Bu göre %10 $FeCl_3$ çözeltisinde en çok aşınan 22-13-5 kalite paslanmaz çelikte en yüksek sürtünme katsayısı elde edilmiştir.



Şekil 5.27. %10 $FeCl_3$ çözeltisinde yapılan aşınma deneyleri sırasında incelenen paslanmaz çeliklere ait kararlı durum sürtünme katsayıları

5.3. Ortamın Aşınma Miktarına Etkisi

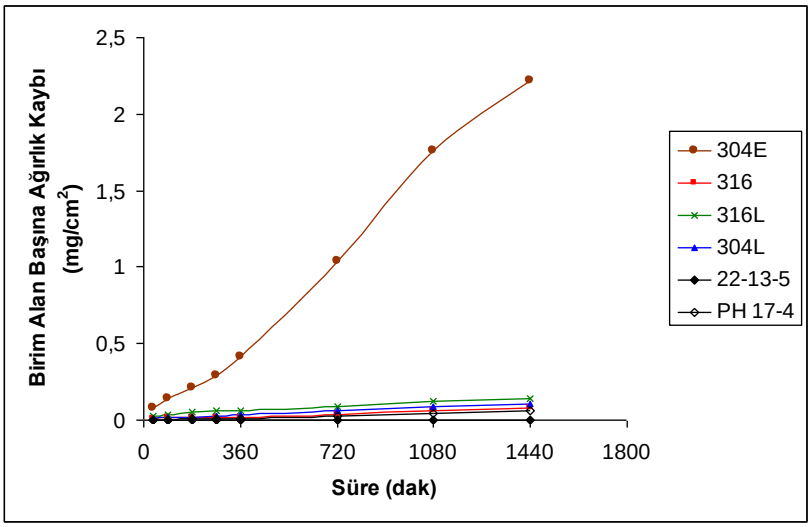
Tablo 5.2'de çeşitli deney ortamlarında 360 dak süre sonunda incelenen paslanmaz çeliklerin yüzeylerinde oluşan iz alanları verilmiştir. En büyük iz alanı kuru aşınma koşullarında PH17-4 kalite paslanmaz çelikte elde edilmiştir. En çok aşınan ve Tablodaki iz alanı en büyük olan PH 17-4 kalite çeliğe ait kuru ortam (atmosferik) aşınma miktarı 100 kabul edilerek, diğer kaliteler ve aşınma ortamları için rölatif aşınma miktarı hesaplanmış olup bunlar Tablo 5.2'de gösterilmiştir. Buna göre en fazla aşınma atmosferik koşullarda ve % 10 $FeCl_3$ çözelti içinde yapılan deneylerde elde edilmiştir. Diğer korozif ortamlarda yapılan aşınma deneylerinde çözelti yağlayıcı vazifesi görerek aşınmanın kuru ortama göre azalmasına sebep olmuştur. Korozif çözeltilerin incelenen paslanmaz çelik üzerindeki korozyonlu aşınma etkileri % 10 $FeCl_3$, %90 H_2SO_4, deniz suyu ve % 50 H_2SO_4 sırasında azalmaktadır.

Tablo 5.2. Çeşitli deney ortamlarında 360 dak süre sonunda incelenen paslanmaz çeliklerin yüzeylerinde oluşan iz alanı ve aşınma miktarlarının değişimi

Malzeme	Deney Ortamı	360 dak' daki İz Alanı (mm^2)	Aşınma Miktarı (%)
22-13-5	Atmosferik	0,0065	2,837
	Deniz suyu	0,000172	0,07
	% 50 H_2SO_4	0,00018	0,08
	% 90 H_2SO_4	0,00013	0,06
	% 10 $FeCl_3$	0,032	13,91
PH 17-4	Atmosferik	0,23	100,00
	Deniz suyu	0,0024	1,04
	% 50 H_2SO_4	0,0009	0,39
	% 90 H_2SO_4	0,0016	0,70
	% 10 $FeCl_3$	0,021	9,13
316 L	Atmosferik	0,012	5,22
	Deniz suyu	0,0032	1,39
	% 50 H_2SO_4	0,0009	0,39
	% 90 H_2SO_4	0,0032	1,39
	% 10 $FeCl_3$	0,0063	2,74
304 E	Atmosferik	0,017	7,39
	Deniz suyu	0,0026	1,13
	% 50 H_2SO_4	0,0022	0,96
	% 90 H_2SO_4	0,008	3,48
	% 10 $FeCl_3$	0,0095	4,13
316	Atmosferik	0,0094	4,09
	Deniz suyu	0,002	0,87
	% 50 H_2SO_4	0,0014	0,61
	% 90 H_2SO_4	0,007	3,04
	% 10 $FeCl_3$	0,012	5,22
304 L	Atmosferik	0,04	17,39
	Deniz suyu	0,0021	0,91
	% 50 H_2SO_4	0,0003	0,13
	% 90 H_2SO_4	0,0016	0,70
	% 10 $FeCl_3$	0,01	4,35

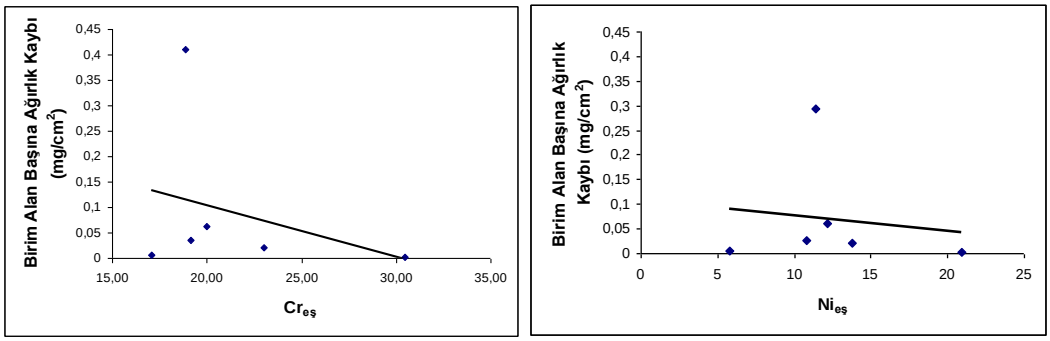
5.4. Korozyon Deneyi Sonuçları

%10 $FeCl_3$ çözeltisinde gerçekleştirilen korozyon deneyi sonucunda paslanmaz çeliklerin birim alan başına ağırlık kaybının süre ile değişimi Şekil 5.28'de verilmiştir. İncelenen paslanmaz çelikler artan korozyon direncine göre; 304E, 316L, 304L, 316, PH 17-4, 22-13-5 şeklinde sıralanabilir.



Şekil 5.28. İncelenen paslanmaz çeliklerin korozyon deneyi sırasında ağırlıklarının değişimi.

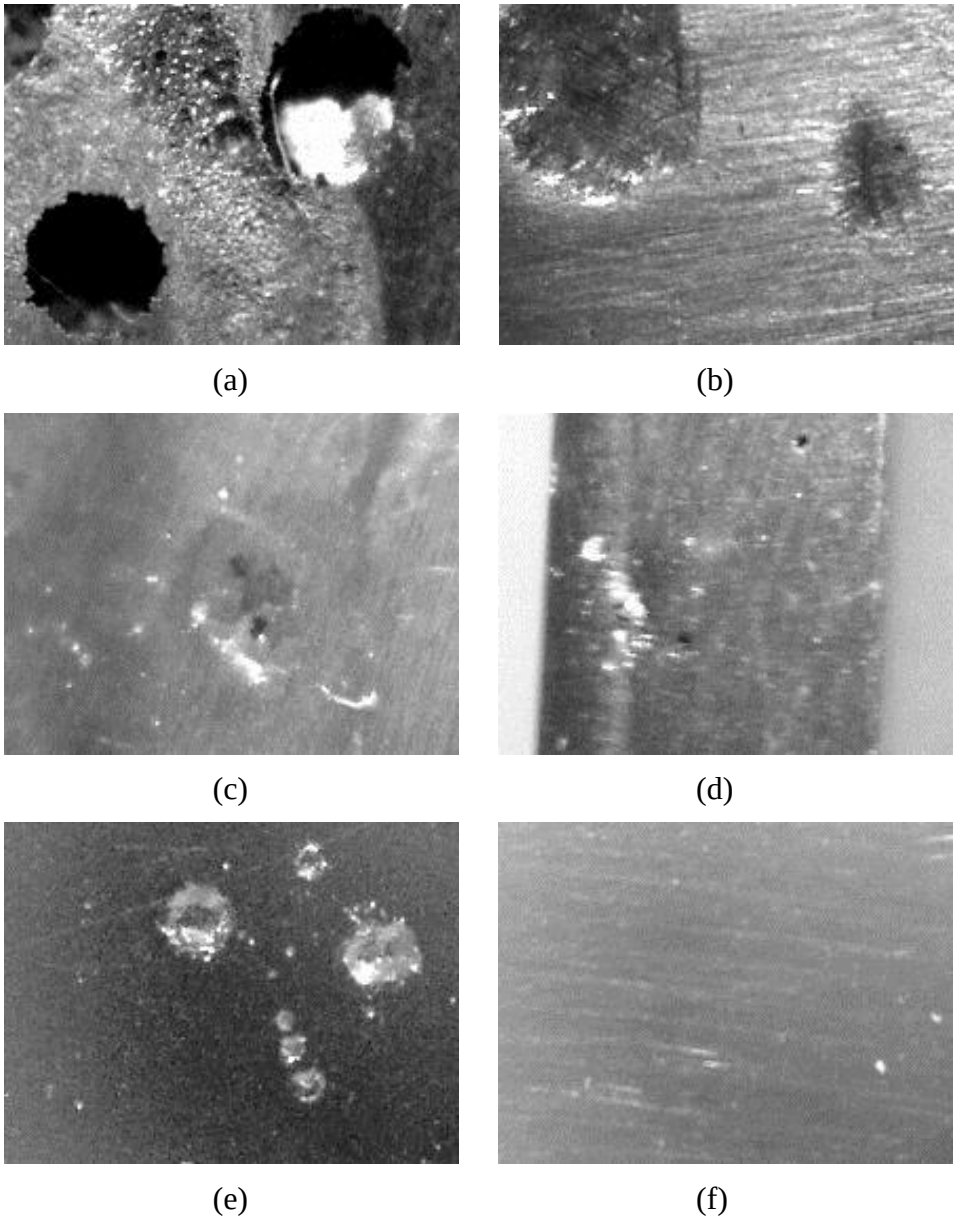
İncelenen paslanmaz çeliklerin %10 $FeCl_3$'deki korozyon davranışlarının, kimyasal bileşimleri açısından değerlendirilmesi amacıyla, Şekil 5.29'deki grafikler çizilmiştir. Bu diyagramlarda 1440 dak deney süresi sonunda oluşan ağırlık kayıplarının $Cr_{eş}$ ve $Ni_{eş}$ değerine göre değişimi verilmiştir. Gerek $Cr_{eş}$ ve gerekse $Ni_{eş}$ değerinin artması ile ağırlık kaybı azalmış yani paslanmaz çeliklerin %10 $FeCl_3$ çözeltisinde korozyon direnci artmıştır.



Şekil 5.29. İncelenen paslanmaz çeliklerde %10 $FeCl_3$ ortamında ağırlık kaybına (a) $Cr_{eş}$ ve (b) $Ni_{eş}$ değerinin etkisi (Deney süresi 1440 dak).

Paslanmaz çeliklerin korozyon deneyi sonrası yüzeylerinin mikroskobik görünümleri Şekil 5.30'de ve Şekil D1'deverilmiştir. Korozif ortamda ağırlık kaybı yüzeyde oyuk oluşumu ile meydana gelmiş, en çok korozyona uğrayan çelikte daha fazla ve iri oyuklar oluşmuştur.

Korozyon ve aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar (sırası ile Şekil 5.24 ve Şekil 5.29) kıyaslandığında bileşimde bulunan Cr ve Ni miktarının artışı (özellikle Cr) korozif aşınma direncini azaltırken korozyon direncini artırmıştır. Buna göre yüksek Cr' lu paslanmaz çeliklerin yüzeyinde oluşan tabakanın korozyon direncini artırdığı ancak bu tabakanın aşınma deneyleri sırasında tahrip olması nedeniyle korozif ortamdaki aşınmanın arttığı söylenebilir.



Şekil 5.30. Paslanmaz çeliklerin korozyon deneyi sonrası yüzeylerinde meydana gelen korozyon ürünlerinin optik mikroskop görüntüleri.(a) 304E, (b) 316, (c) 316L, (d) 304L, (e) PH 17-4, (f) 22-13-5.

6. GENEL SONUÇLAR

Ostenitik mikroyapıdaki 316, 316L, 304L, 304E, 22-13-5 kalite ve martensitik mikroyapıdaki PH 17-4 kalite paslanmaz çeliklerle normal atmosferik koşulda ve farklı çözeltiler (deniz suyu, % 50 H_2SO_4, % 90 H_2SO_4 ve % 10 $FeCl_3$) içinde yapılan aşınma deneylerinde aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir.

1. Kuru ortamda yapılan aşınma deneyinde, en çok aşınan PH 17-4, en az aşınan 22-13-5 kalite, paslanmaz çeliklerdir.
2. Deniz suyundaki aşınma deneyinde, en zayıf aşınma direncine 316L, en iyi aşınma direncine 22-13-5 kalite paslanmaz çelik sahiptir.
3. %50 ve %90 H_2SO_4 konsantrasyonlardaki aşınma deneylerinde en çok aşınma miktarı 304E, en az aşınma miktarı 22-13-5 kalite paslanmaz çelik göstermiştir.
4. %10 konsantrasyondaki $FeCl_3$ çözeltisinde 22-13-5 kalite paslanmaz çelikte en düşük aşınma direnci, 316L kalite paslanmaz çelikte en yüksek aşınma direnci elde edilmiştir.
5. Korozif çözeltilerin incelenen paslanmaz çelik üzerindeki korozyonlu aşınma etkileri % 10 $FeCl_3$, %90 H_2SO_4, deniz suyu ve % 50 H_2SO_4 sırasında azalmaktadır. Kuru ortamda yapılan aşınma deneylerinde elde edilen iz alanları % 10 $FeCl_3$ çözeltisinden bir miktar yüksektir.
6. Paslanmaz çeliklerin bileşiminde bulunan kromun artışı ile deniz suyu ve sülfürik asit çözeltilerinde aşınma dayanımı artarken.%10 konsantrasyondaki $FeCl_3$ çözeltisinde azalmaktadır.
7. Paslanmaz çelikleri %10 konsantrasyondaki $FeCl_3$ çözeltisinde daldırarak gerçekleştirilen korozyon deneyinde en yüksek korozyon direnci krom içeriği en yüksek olan 22-13-5, en düşük korozyon direnci ise krom miktarı en az olan 304E kalite paslanmaz çelikte elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] **Çimenoğlu, H. ve Geçkinli, E.,** 2001.Çelik ve Dökme Demirlerin Metalograsfisi ve Mekanik Muayenesi, Metalurji Mühendisleri Odası KOSGEB İMES İstanbul.

[2] **Lefevre, J.,** 1993.Stainless Steel Selection Criteria for Different Applications, Stainless Steels, Les Editions de Physique, p 919-937.

[3] **Davis, J.R.,** ASM Speciality Handbook, Stainless Steels 1994.Materials Park, OH.

[4] **Wallinder, I.O., Lu, J., Bertling, S. and Leygraf, C.,** 2002. Release rates of chromium and nickel from 304 and 316 stainless steel during urban atmospheric exposure- a combined field and laboratory study, Corrosion Science, **44**, 2303-2319.

[5] **Alonso-Fallerios, N., Wolynec, S.,** 1998. Effect of niobium on corrosion resitance to sulfuric acid of 430 ferritic stainless steels, Materials Research, Vol 1, No 1, 39-45.

[6] **Kaneko, M., Isaacs, H.S.,** 2001. Effects of molybdenum on the pitting of ferritic and austenitic stainless steels in bromide and chloride solutions,Corrosion Science, **44**, 1825-1834.

[7] **Zheng, Y.G., Yao, Y.M., Ke, W.,** 2000. Erosion-corrosion resistant alloy development for aggressive slurry flows,Corrrosion Science, **46**, 362-368.

[8] **Merello, R., Botana, F.J., Botella, J., Matres, M.V., Marcos, M.,** 2002.Influence of chemical composition on the pitting corrosion resistance of non-standart low Ni high Mn-N duplex stainless steels,Corrosion Science, **45**, 909-921.

[9] **Urrutia, I.G., San Juan Nunez, J.M.,** Quimica e Industria, Quibal, 1990 pp 90

[10] **Di Caprin, G.,** Grupinex, Barcelona, 1999, pp89.

[11] **Lu, X.C., Li, S., Jiang, X.,** 2001. Effects of sigma phase in stainless steels on corrosive wear behavior in sulfuric acid, Wear, **251**, 1234-1238.

[12] **Kim, J.S., Peelen, W.H.A., Hemmes, K., Makkus,** R.C.,2002. Effect of alloying elements on the contact resistance and the passivation behavior of stainless steels,Corrosion Science, **44**, 635-655.

[13] **Charles, J.,** Structure and mechanical properties of duplex stainless steels, 4th International Conferencess on Duplex Stainless steels, paper KI, Glasgow, Scotland,1994.

[14] **Kim, J.S., Kwen, H.S.,** 1999. Typical properties of passive films on stainless steels, Corrosion, 55, 512.

[15] **Bojinov, M., Betova, Z., Raicheff, R., Laitienen, T.,**1998. Passivation mechanism of iron in concentrated phospheric acid, Proceedings of EUROCORR, Utreeth, Netherlands.

[16] **Bastidas, J.M., Torres, C.L., Cano, E., Polo, J.L.,** 2002. Influence of molybdenum on passivation of polarised stainless steels in a chloride environment, Corrosion Science, **44**, 625-633

[17] **Marcus, P., Olefjord, I.,** 1988. Influence of molybdenum on the corrosion resistance of stainless steels, Corrosion Science, **28**, 589

[18] **Shizhuo, Li., Xiaoxia., Hongyun, B., Shu, L.,**1999. Effect of environmental embrittlement on wear resistance of alloys in corrosive wear,Wear, **225-229**, 1025-1030.

[19] **Chun Lu, X., Shi, K., Li, S.Z., Jiang, X.X.,** 1999. Effects of surface deformation on corrosive wear of stainless steels in sulfuric acid solution, Wear, **225-229**, 537-543.

[20] **Stott, F.H., Breakell, I.E.,** 1989. The influence of corrosion on the wear of cast iron in sulfuric acid solutions, Wear, **135**, 119-134.

[21] **Beck, T.R.,** Electrochemical Data,**18**, pp807, 1993.

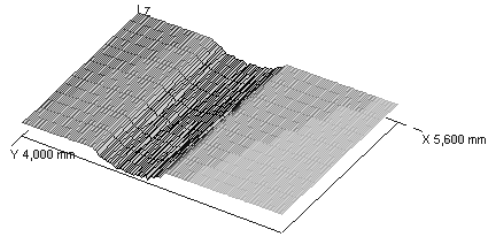
[22] **Burstein G.T., Gao, G.,** Electrochemical Society, **138**, pp2627, 1991

[23] **Stemp, M., Mischler, S., Landolt, D.,** 2002. The effect of contact configuration on the tribocorrosion of stainless steels in reciprocating sliding under potentiostatic control, Corrosion Science, **45**, 625-640.

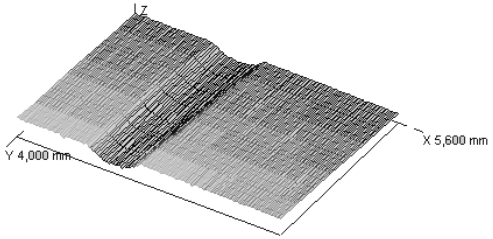
EK A

KURU ORTAM

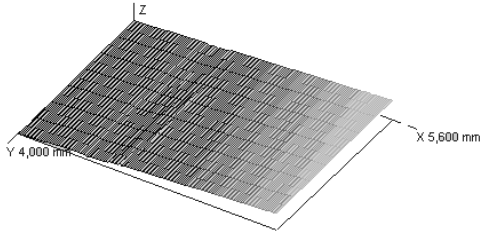
PH 17-4 **304L** **316**



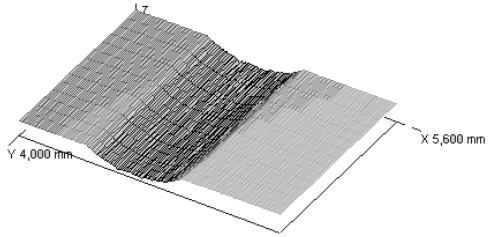
(a)



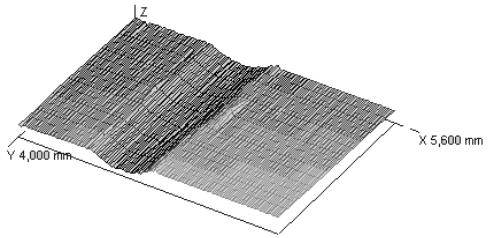
(b)



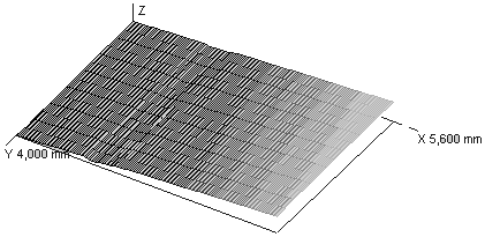
(c)



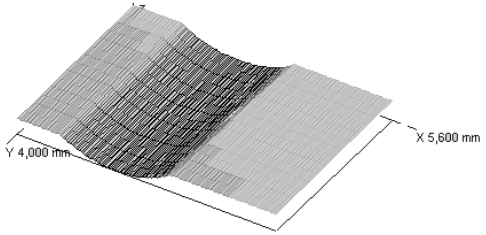
(d)



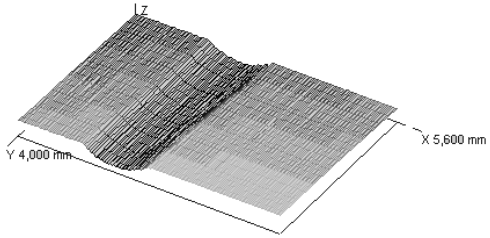
(e)



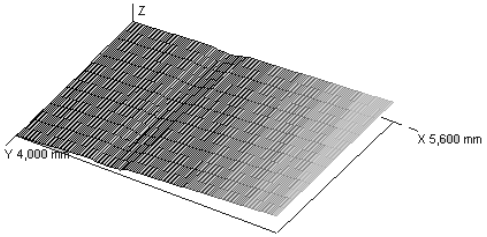
(f)



(g)



(h)

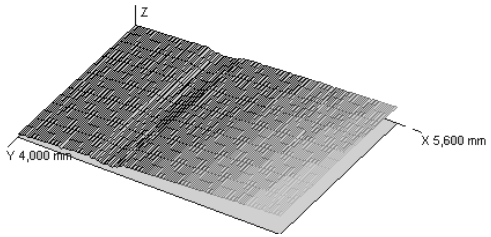


(i)

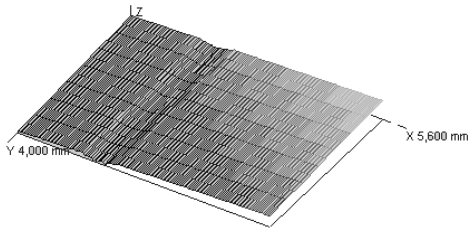
Şekil A.1. Kuru ortamdaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri (a-c) 180, (d-f) 270, (g-h) 360dak

KURU ORTAM

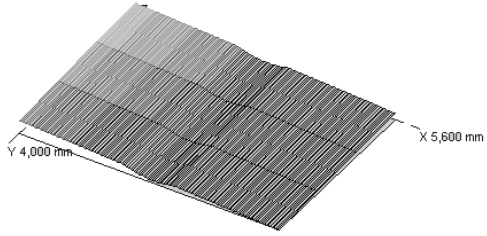
316L **304E** **22-13-5**



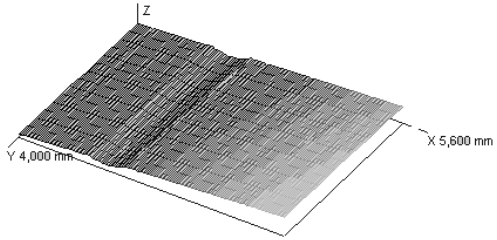
(a)



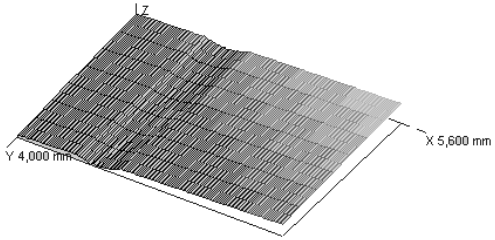
(b)



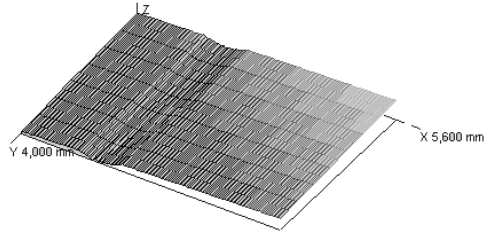
(c)



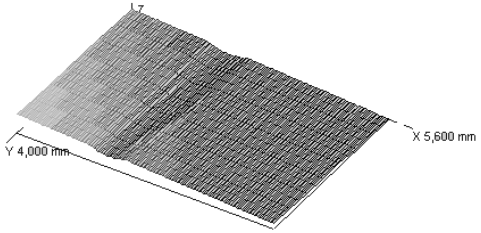
(d)



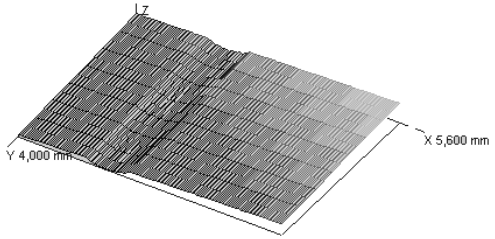
(e)



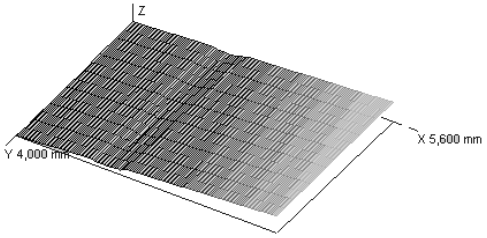
(f)



(g)



(h)

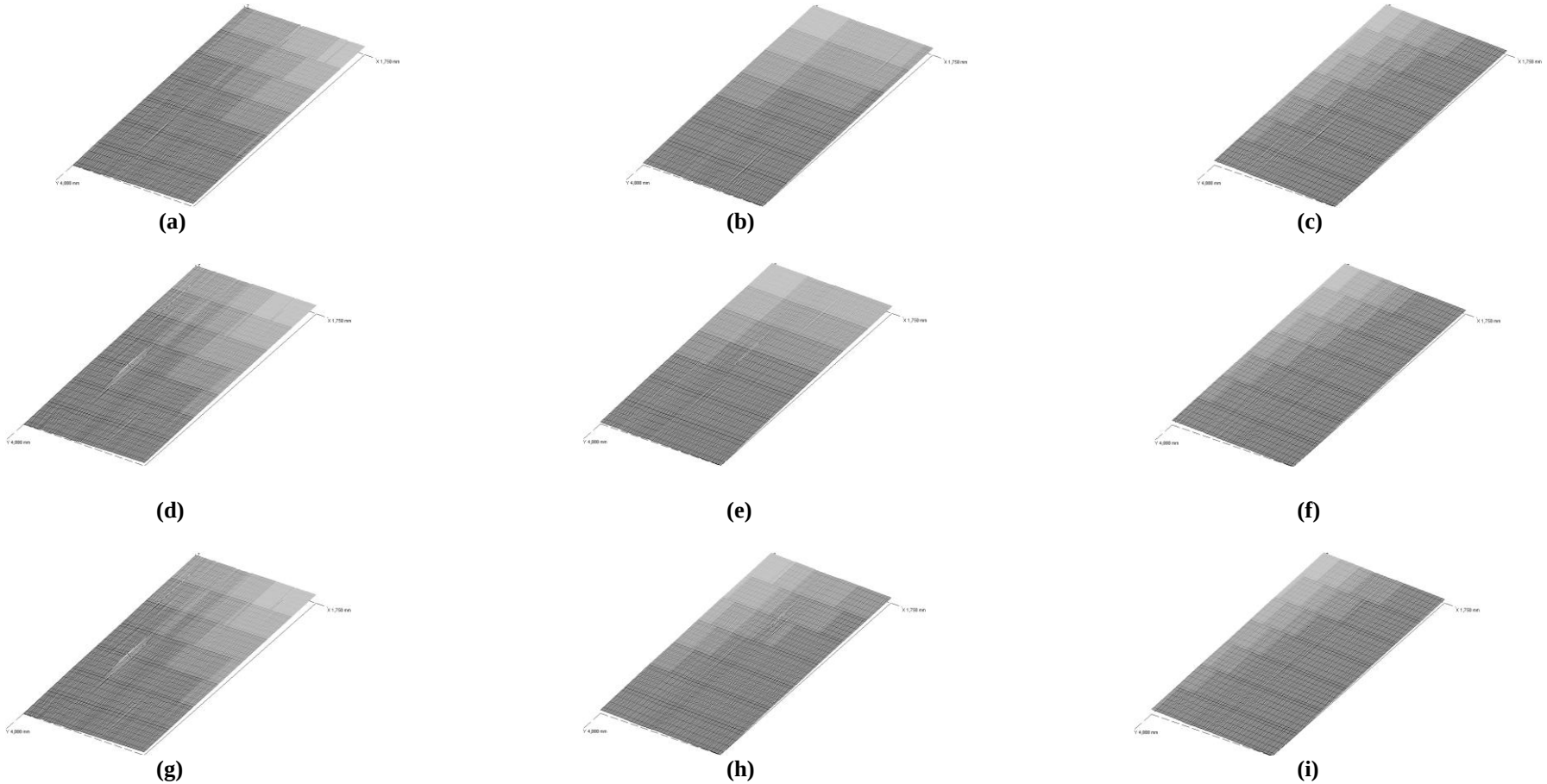


(i)

Şekil A.2. Kuru ortamdaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri (a-c) 180, (d-f) 270, (g-h) 360dak

DENİZ SUYU

PH 17-4 **304L** **316**



(a) **(b)** **(c)**

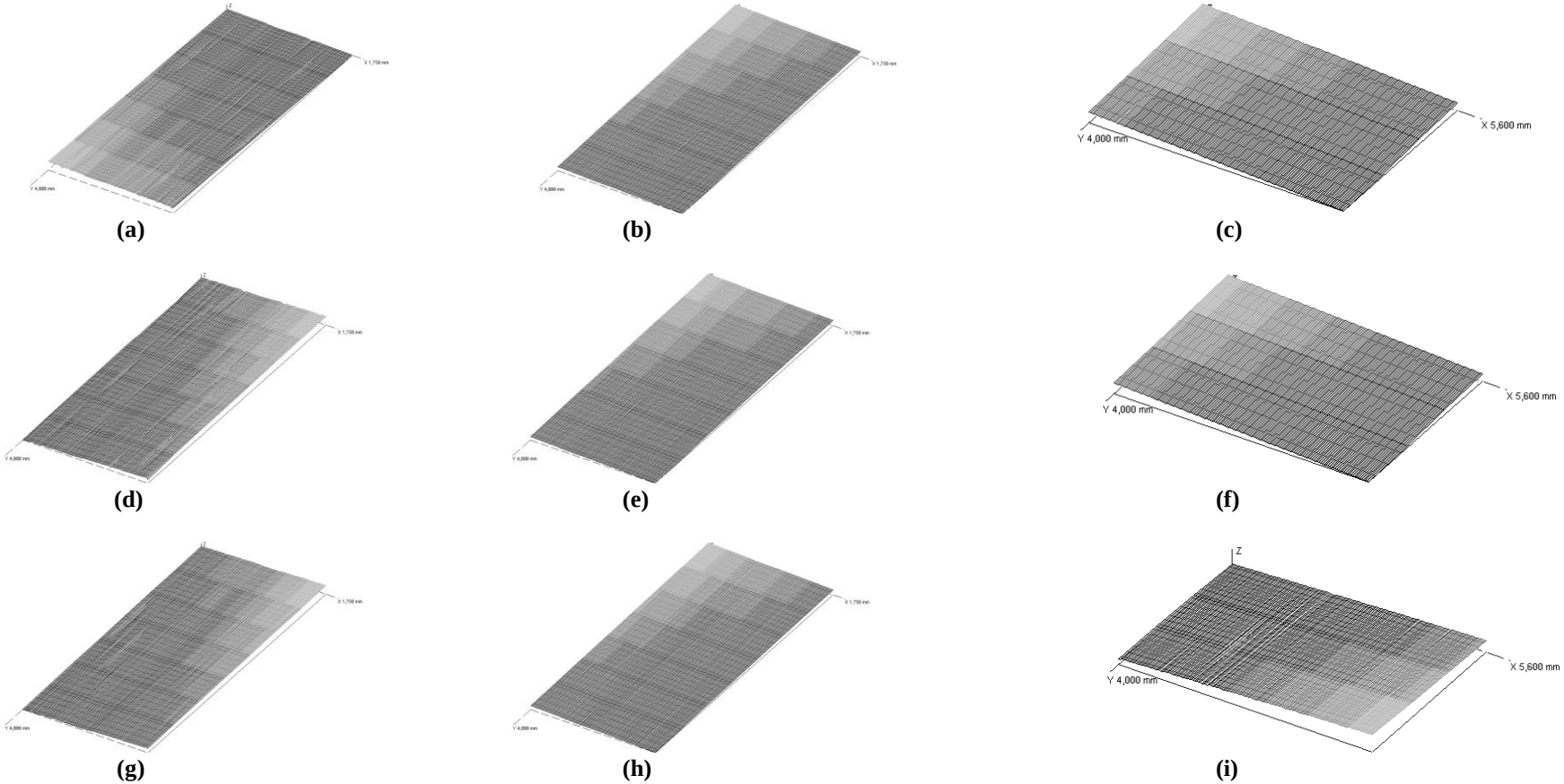
(d) **(e)** **(f)**

(g) **(h)** **(i)**

Şekil A.3. Deniz suyu ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri (a-c) 180, (d-f) 270, (g-h) 360dak

DENİZ SUYU

316L **304E** **22-13-5**



(a) **(b)** **(c)**

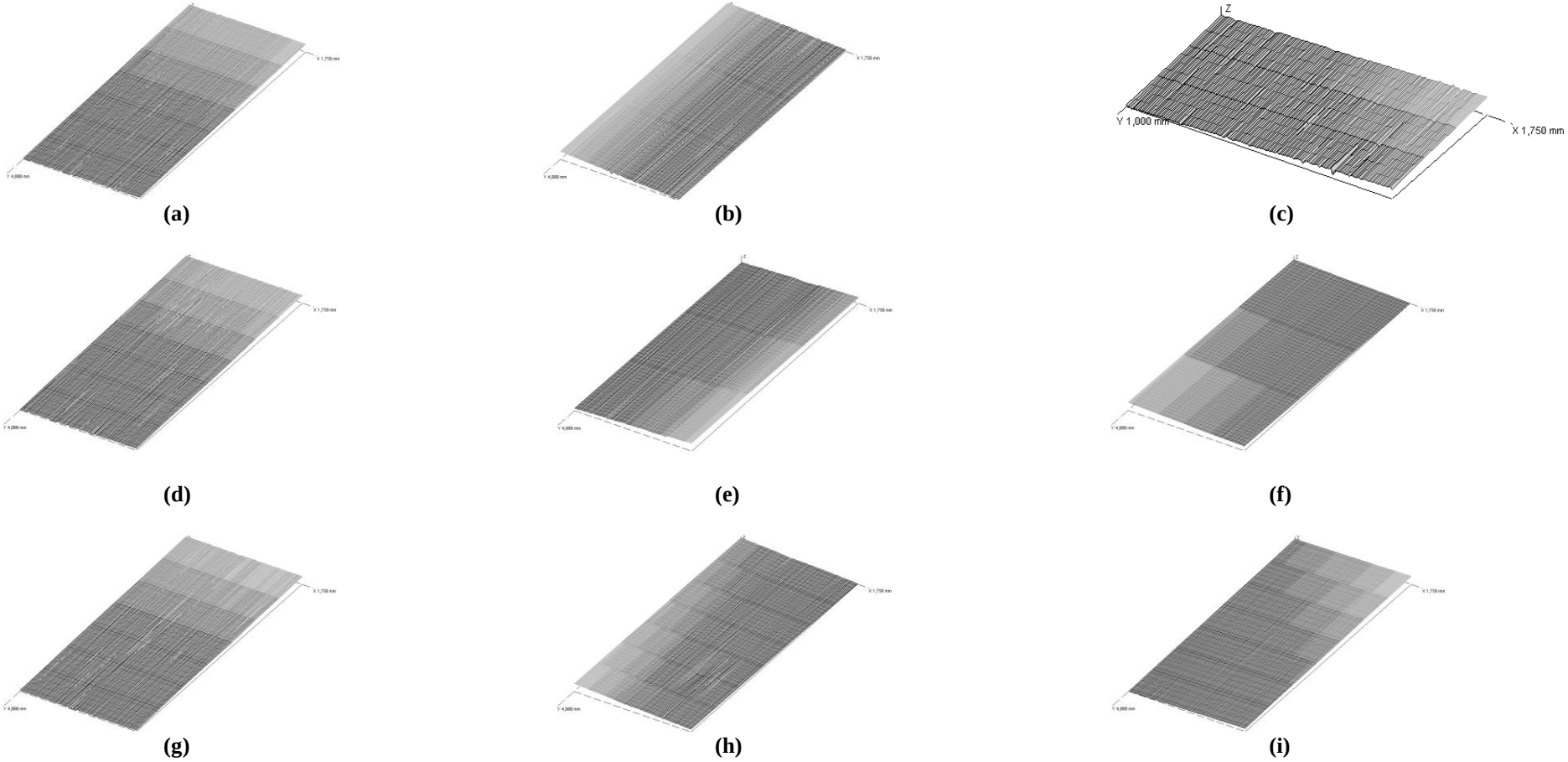
(d) **(e)** **(f)**

(g) **(h)** **(i)**

Şekil A.4. Deniz suyu ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri (a-c) 180, (d-f) 270 (g-i) 360dak

%50 H_2SO_4

PH 17-4 **304L** **316**



(a) **(b)** **(c)**

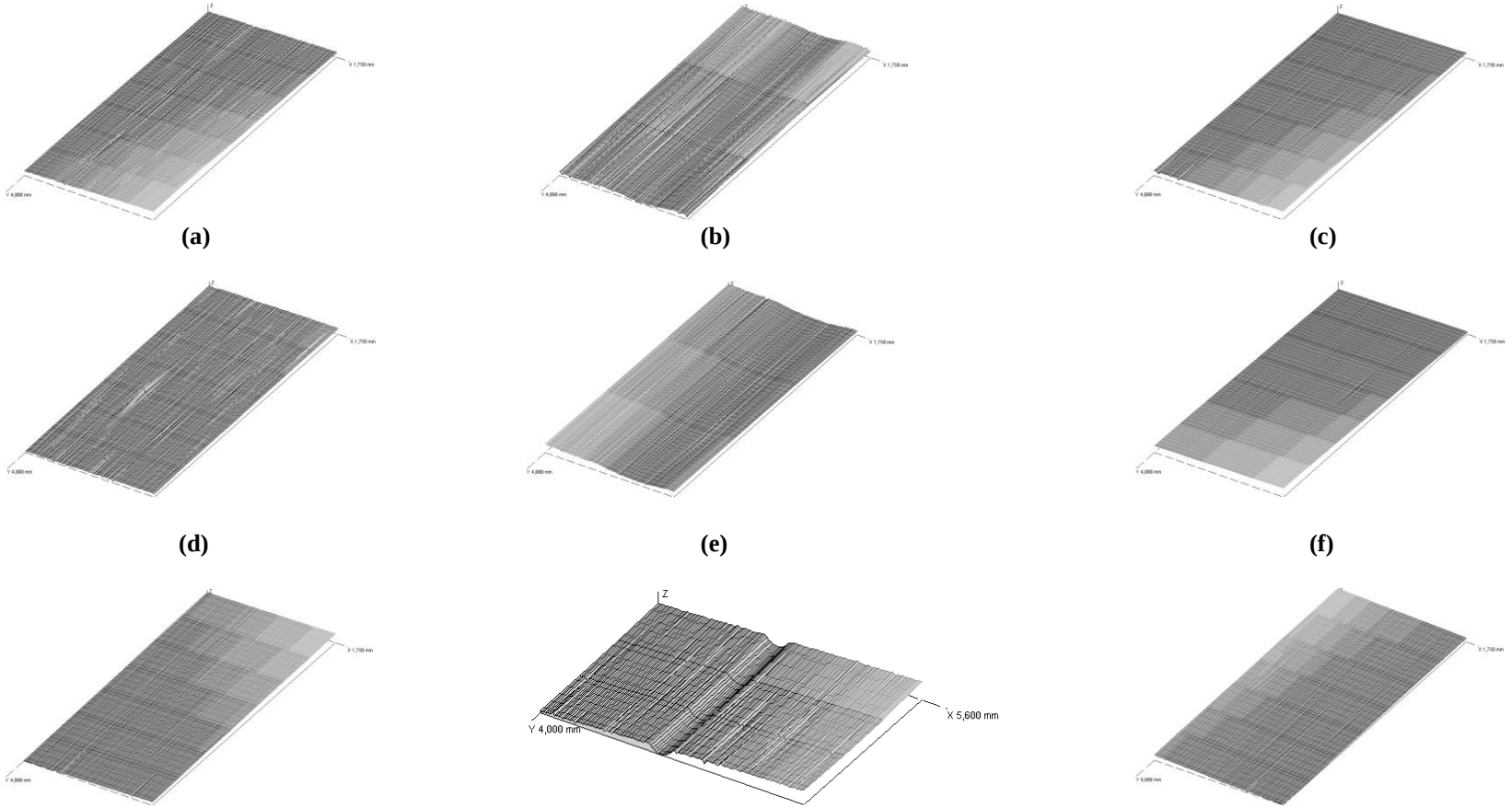
(d) **(e)** **(f)**

(g) **(h)** **(i)**

Şekil A.5. %50 H_2SO_4 ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri (a-c) 180, (d-f) 270 (g-i) 360dak

%50 H_2SO_4

316L **304E** **22-13-5**

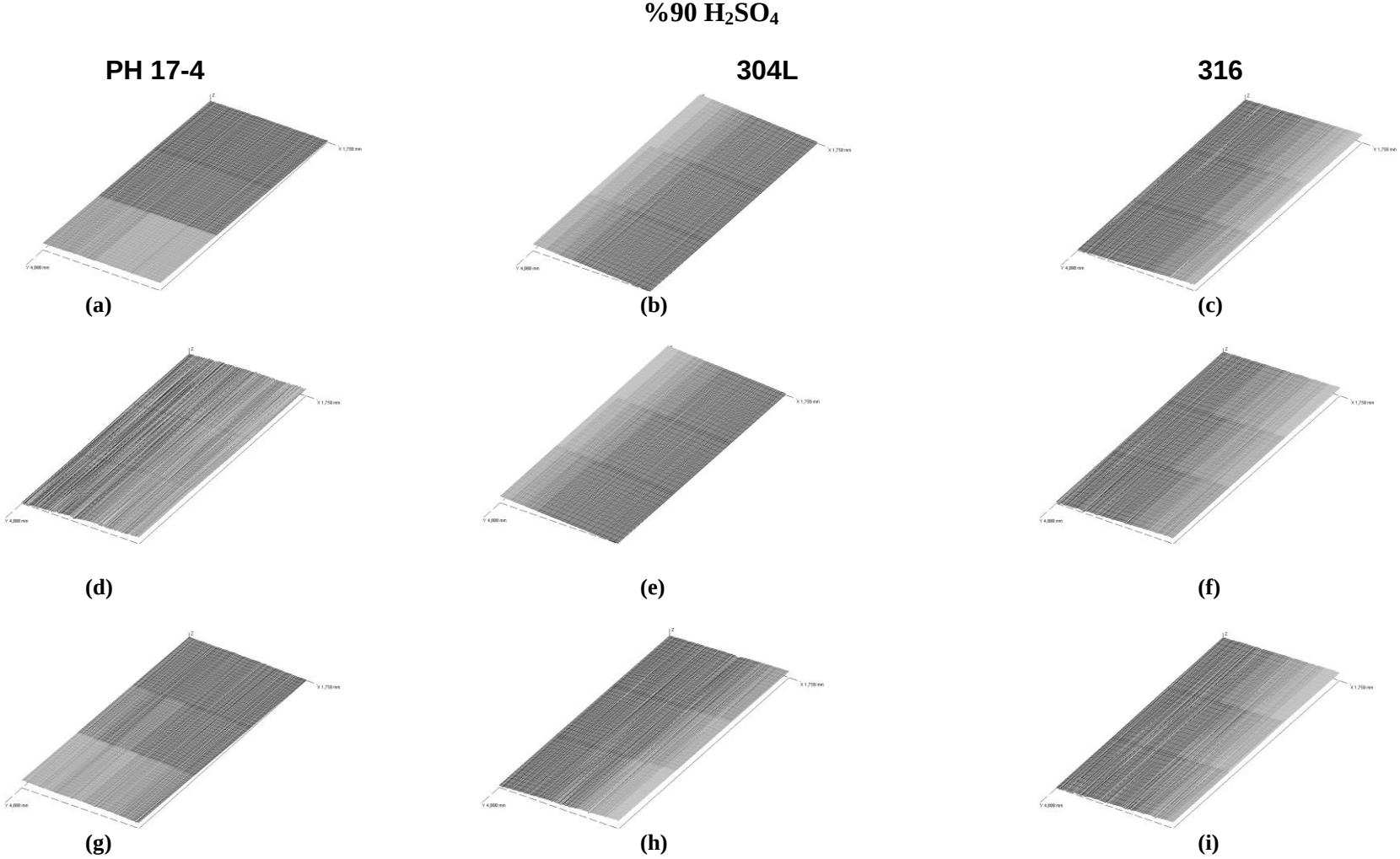


(a) **(b)** **(c)**

(d) **(e)** **(f)**

(g) (h) (i)

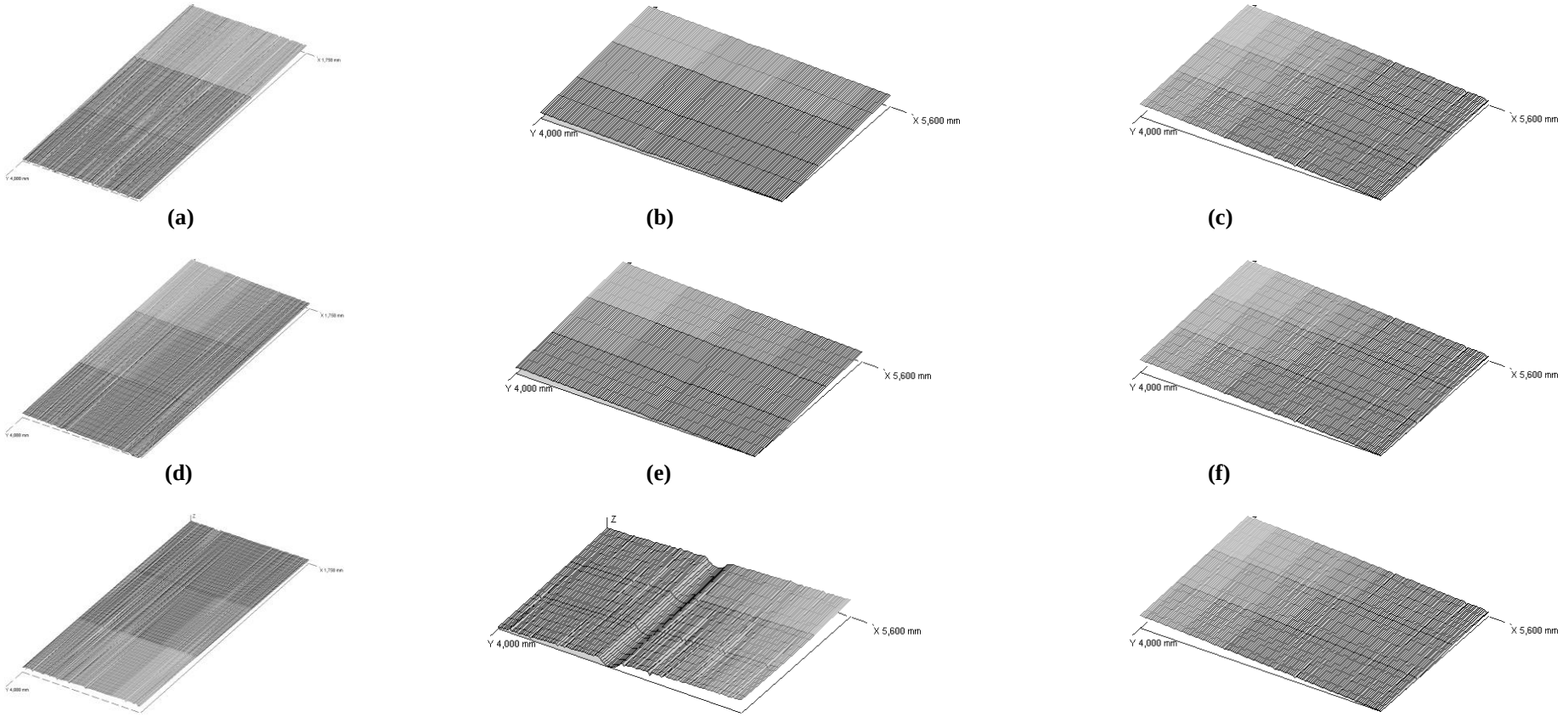
Şekil A.6. %50 H_2SO_4 ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri (a-c) 180, (d-f) 270 (g-i) 360dak



Şekil A.7. %90 H_2SO_4 ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri (a-c) 180, (d-f) 270 (g-i) 360dak

%90 H_2SO_4

316L **304E** **22-13-5**



(a) **(b)** **(c)**

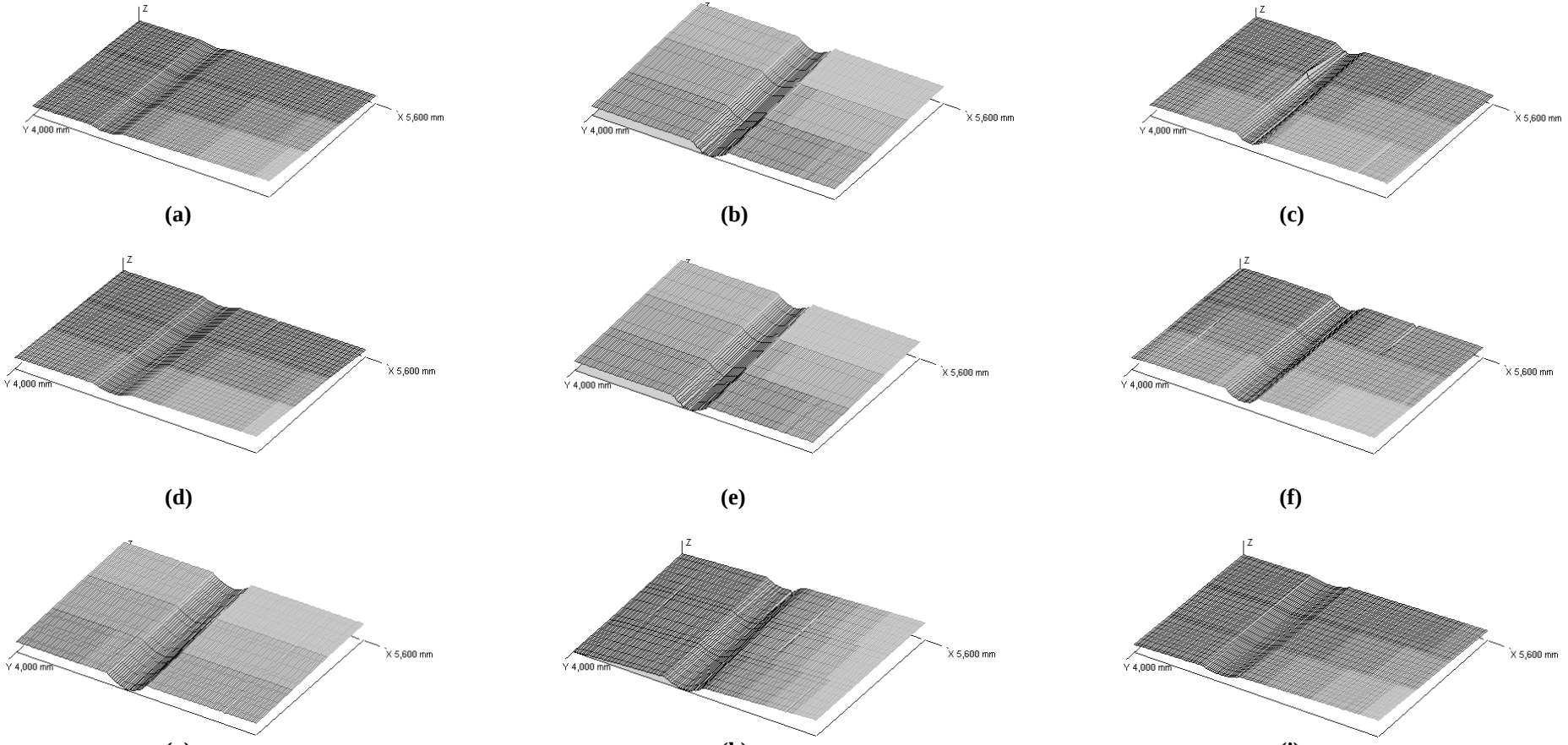
(d) **(e)** **(f)**

(g) **(h)** **(i)**

Şekil A.8. %90 H_2SO_4 ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri (a-c) 180, (d-f) 270 (g-i) 360dak

%10 DEMİR KLORÜR

PH 17-4 **304L** **316**



(a) **(b)** **(c)**

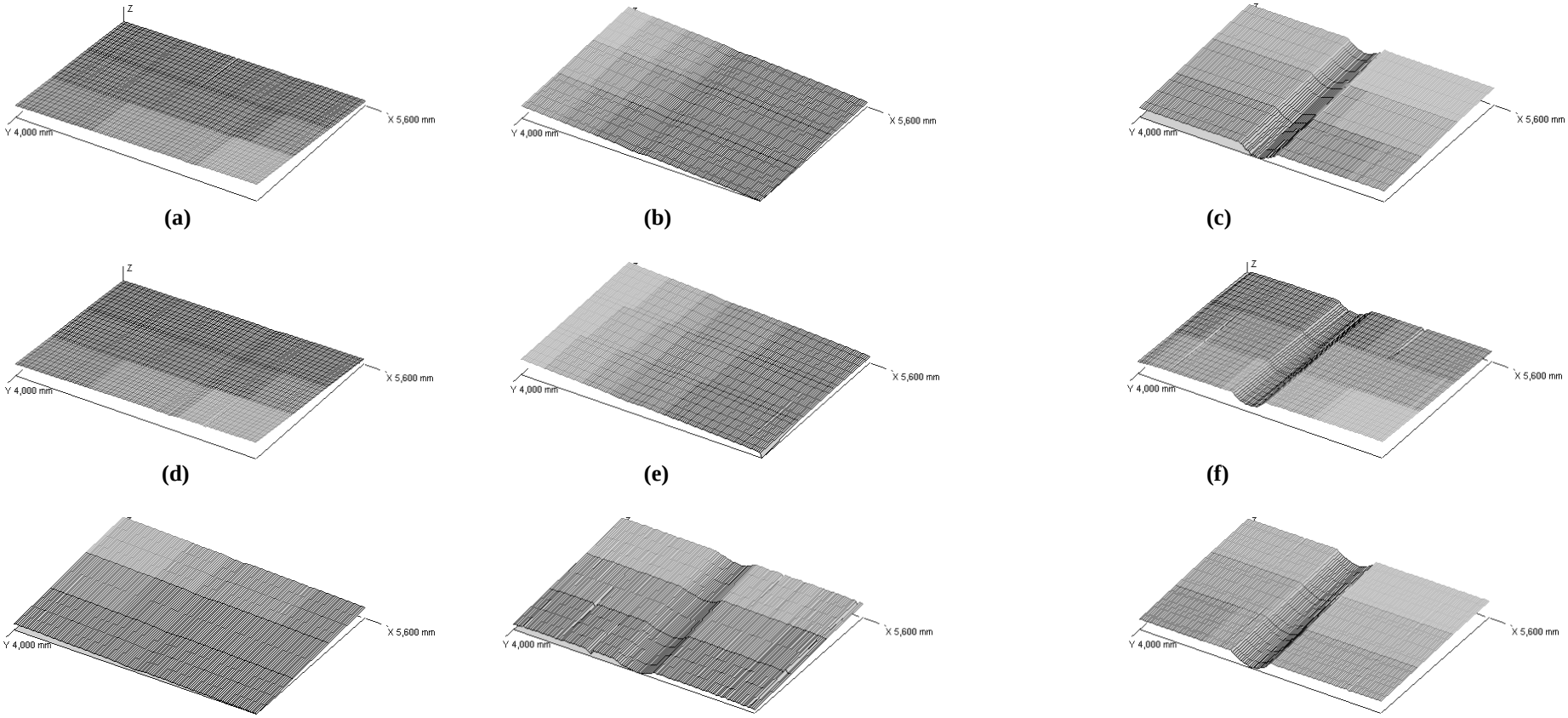
(d) **(e)** **(f)**

(g) **(h)** **(i)**

Şekil A.9. %10 $FeCl_3$ ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri (a-c) 180, (e-f) 270, (g-i) 360

%10 DEMİR KLORÜR

316L **304E** **22-13-5**



(a) **(b)** **(c)**

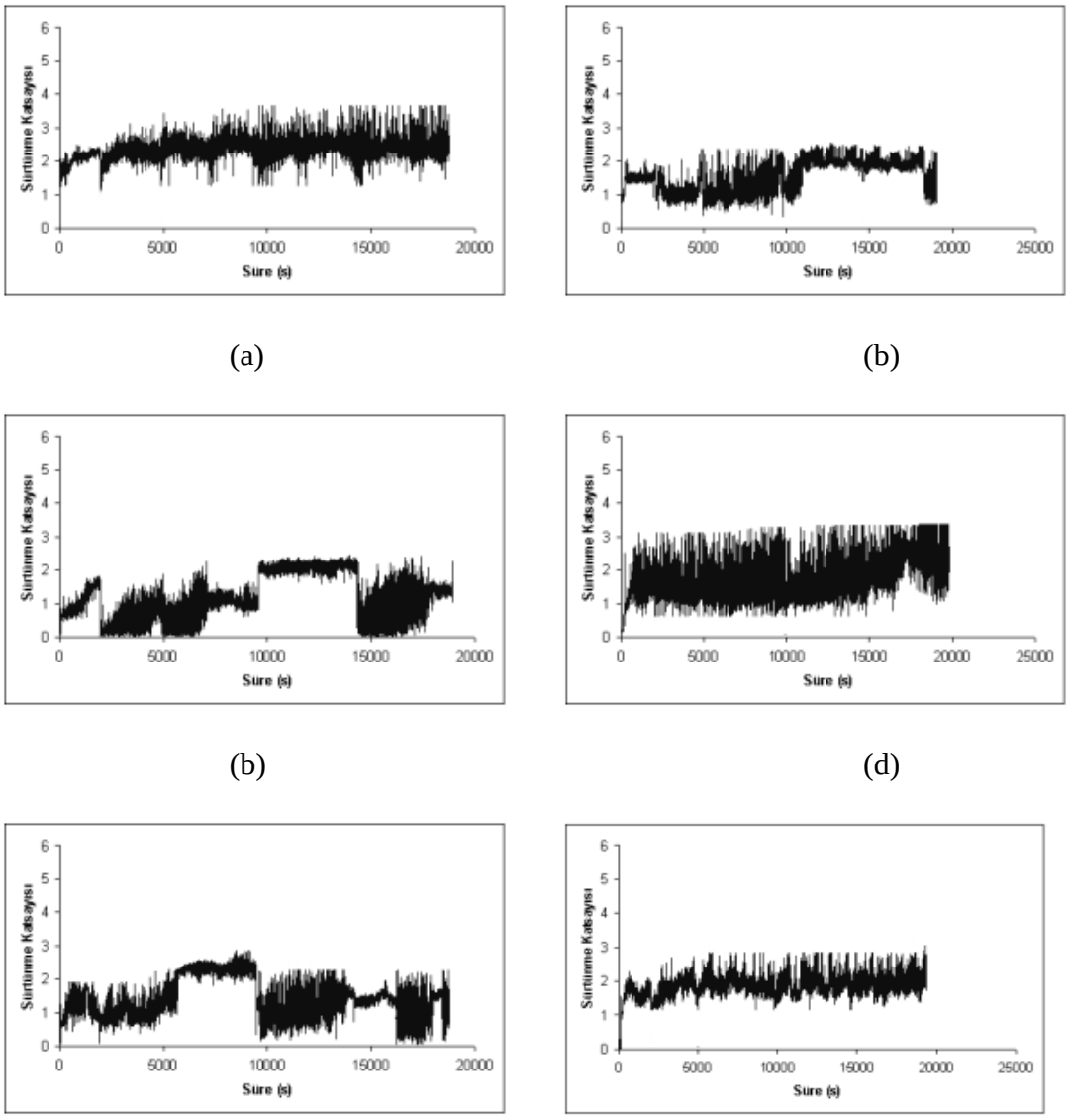
(d) **(e)** **(f)**

(g) **(h)** **(i)**

Şekil A.10. %10 $FeCl_3$ ortamındaki aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri (a-c) 180, (e-f) 270, (g-i) 360

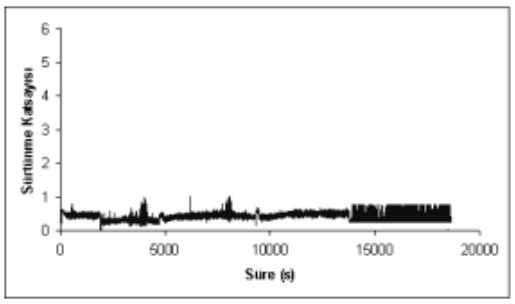
EK B

KURU ORTAM

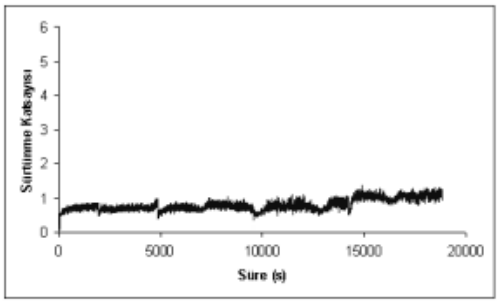


Şekil B1. Kuru ortamdaki aşınma deneyleri süresince sürtünme katsayılarının değişimi. (a)PH 17-4, (b) 316L, (c) 316, (d) 304L, (e) 304E, (f) 22-13-5

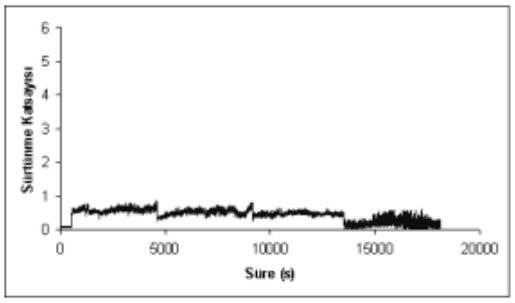
DENİZ SUYU



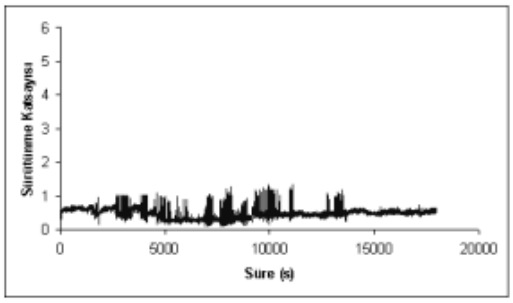
(a)



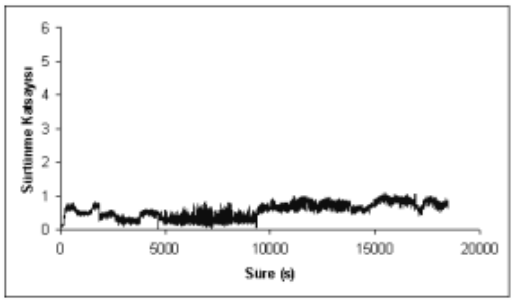
(b)



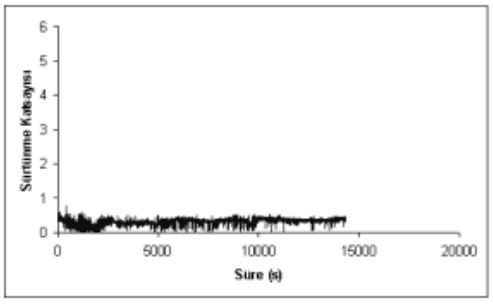
(b)



(d)



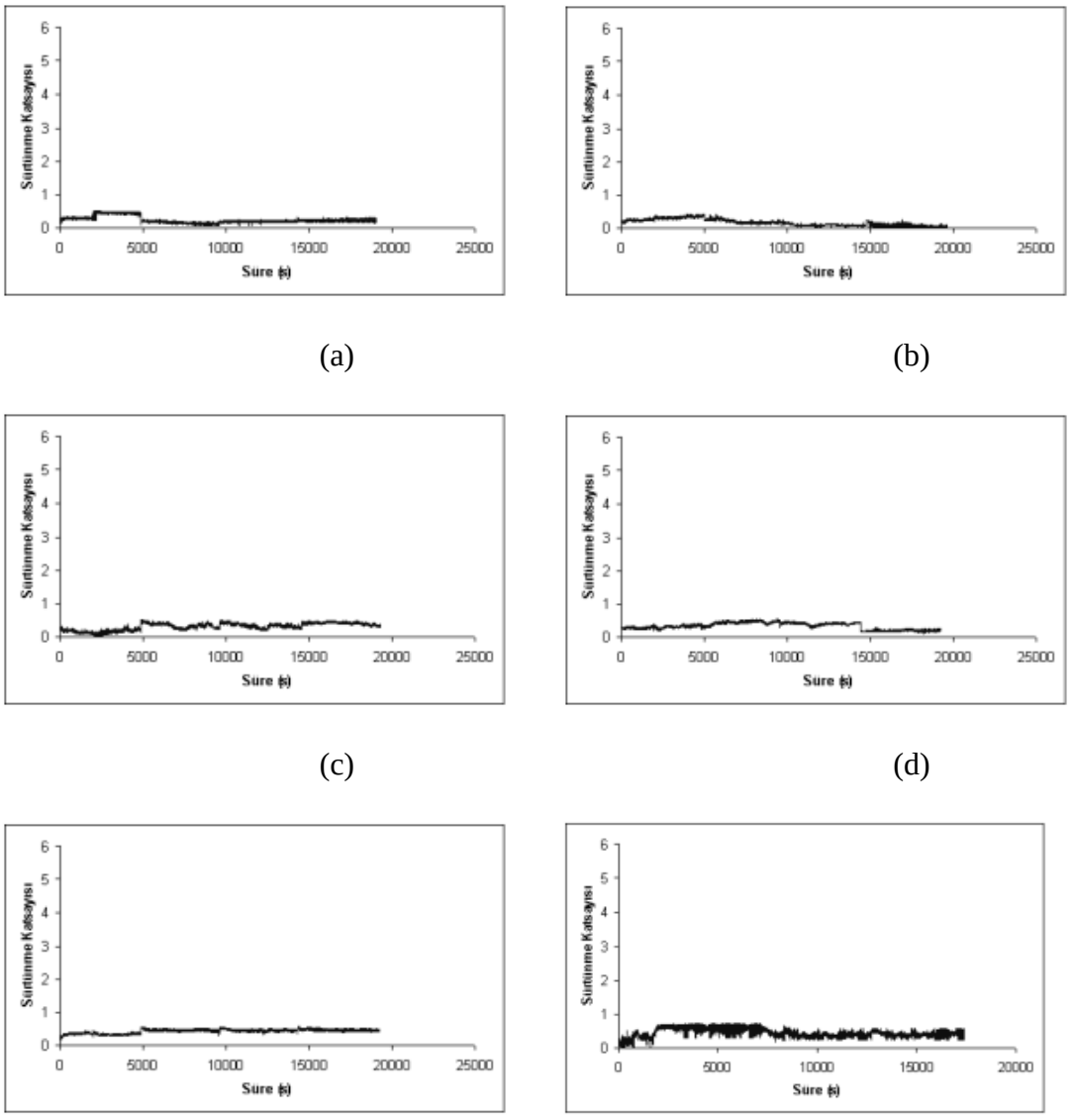
(e)



(f)

Şekil B2. Deniz suyu ortamdaki aşınma deneyleri süresince sürtünme katsayılarının değişimi. (a)PH 17-4, (b) 316L, (c) 316, (d) 304L, (e) 304E, (f) 22-13-5

%50 H_2SO_4



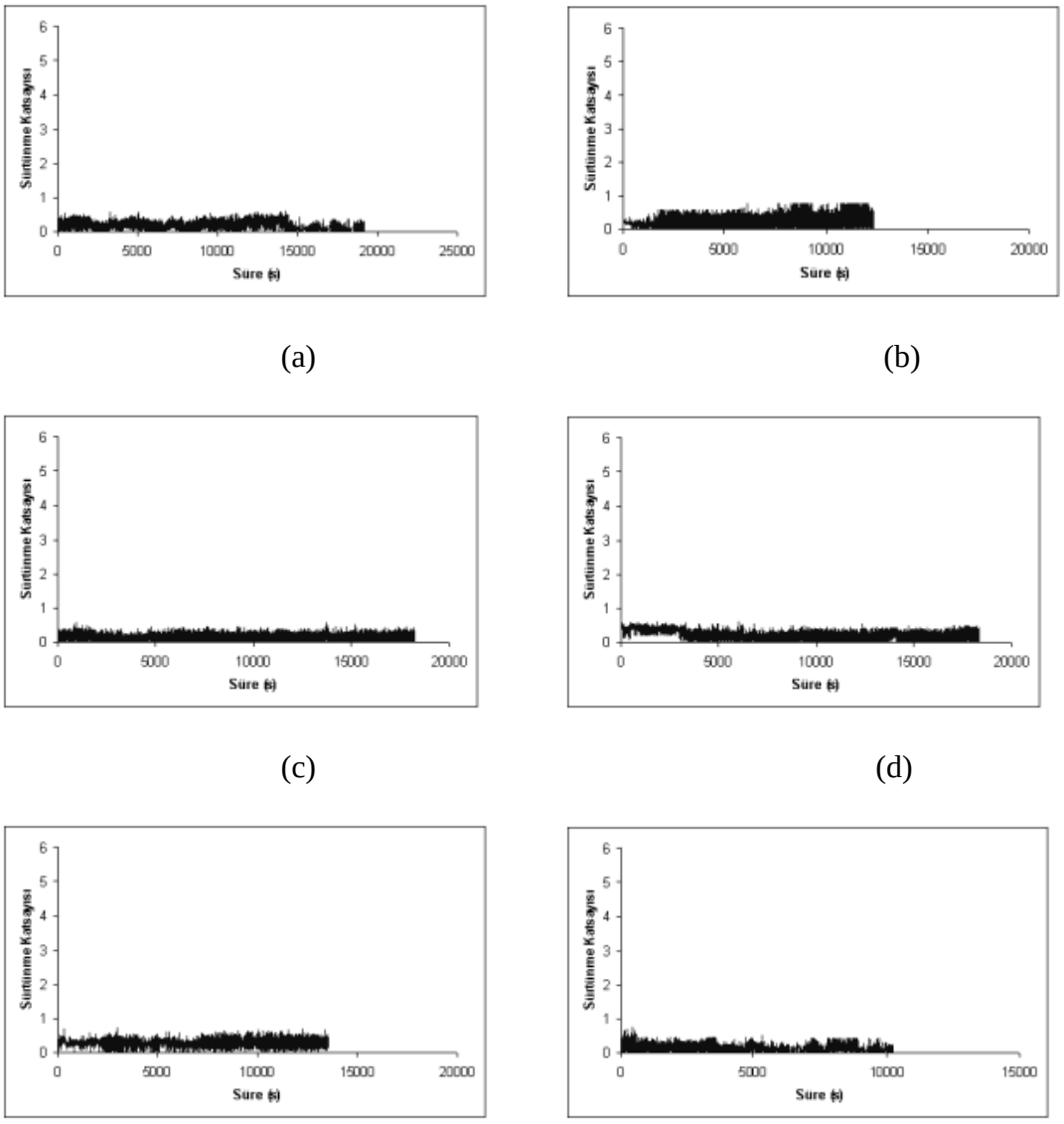
(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

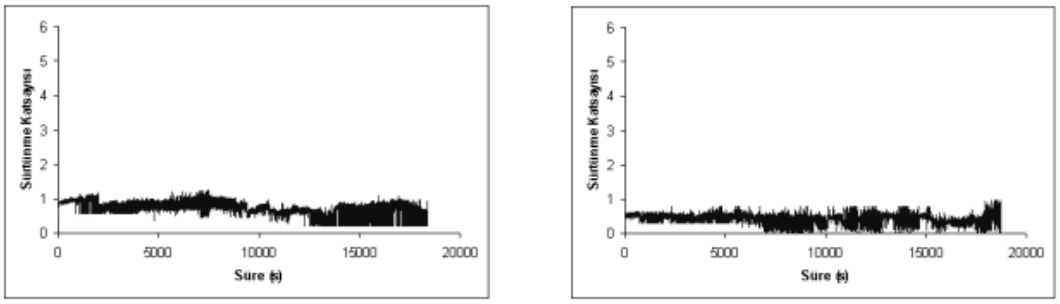
Şekil B3. %50 H_2SO_4 ortamdaki aşınma deneyleri süresince sürtünme katsayılarının değişimi. (a)PH 17-4, (b) 316L, (c) 316, (d) 304L, (e) 304E, (f) 22-13-5

%90 H_2SO_4

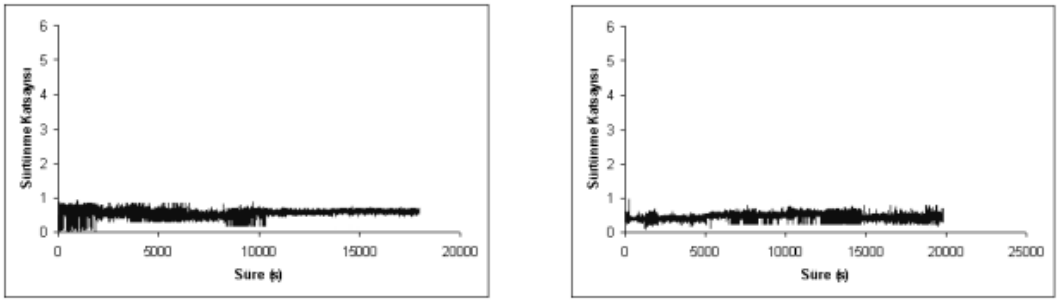


Şekil B4. %90 H_2SO_4 ortamdaki aşınma deneyleri süresince sürtünme katsayılarının değişimi. (a)PH 17-4, (b) 316L, (c) 316, (d) 304L, (e) 304E, (f) 22-13-5

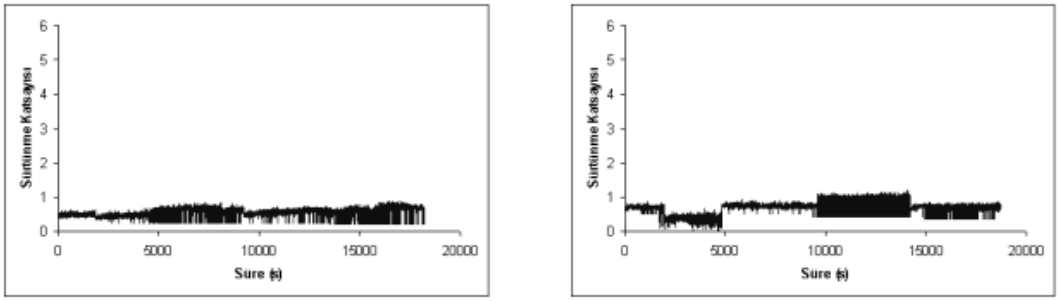
%10 DEMİR KLORÜR



(a) (b)



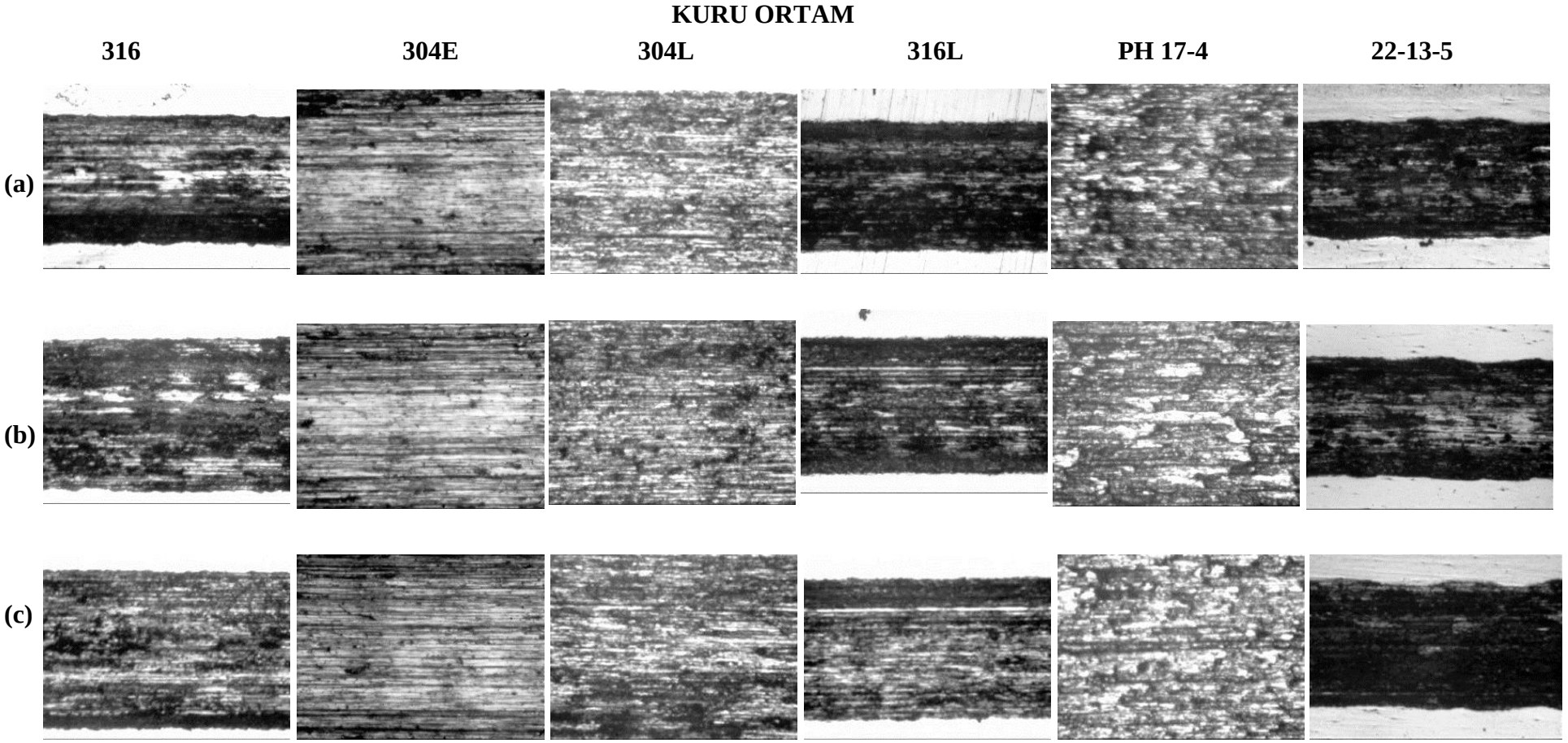
(c) (d)



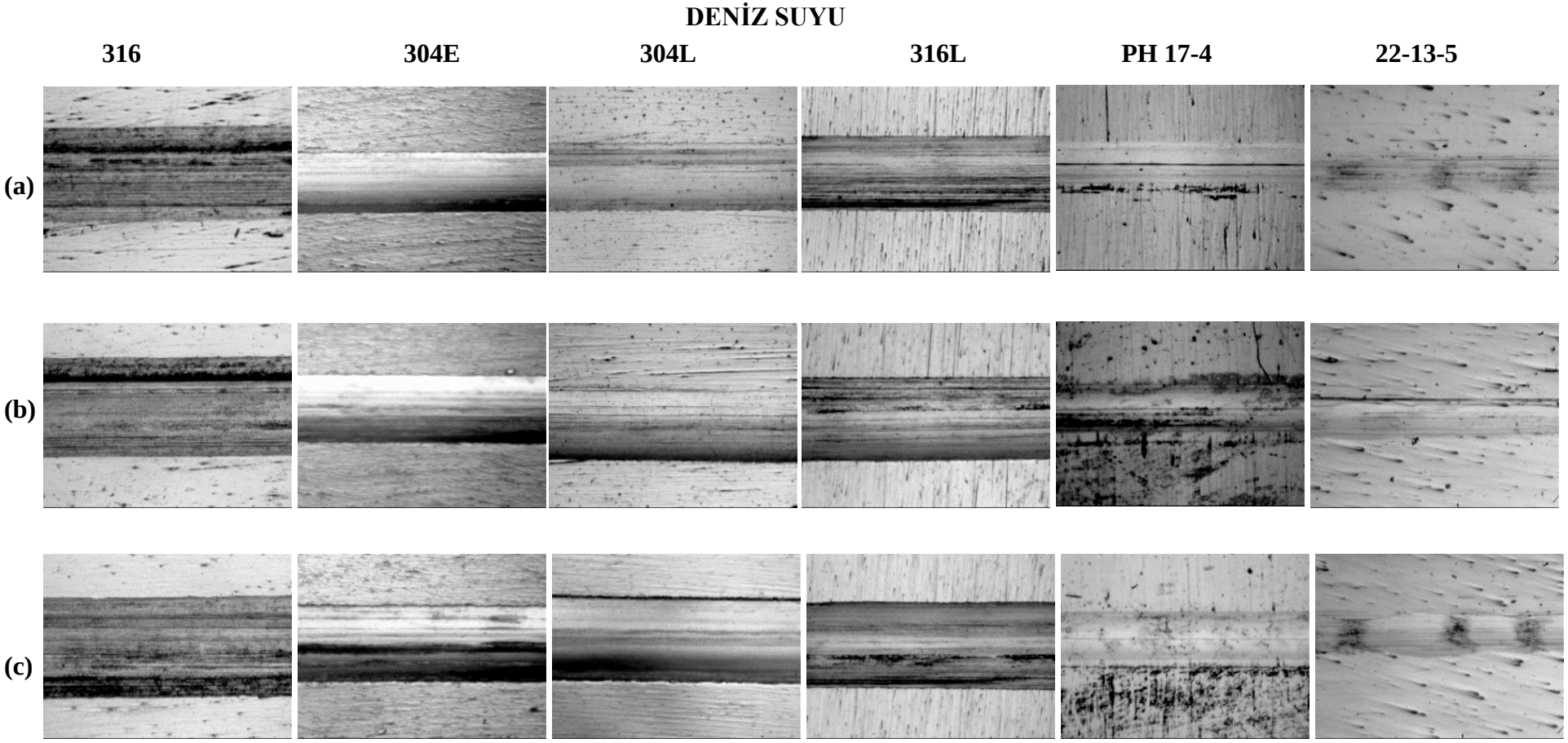
(e) (f)

Şekil B5. %10 $FeCl_3$ ortamdaki aşınma deneyleri süresince sürtünme katsayılarının değişimi. (a)PH 17-4, (b) 316L, (c) 316, (d) 304L, (e) 304E, (f) 22-13-5

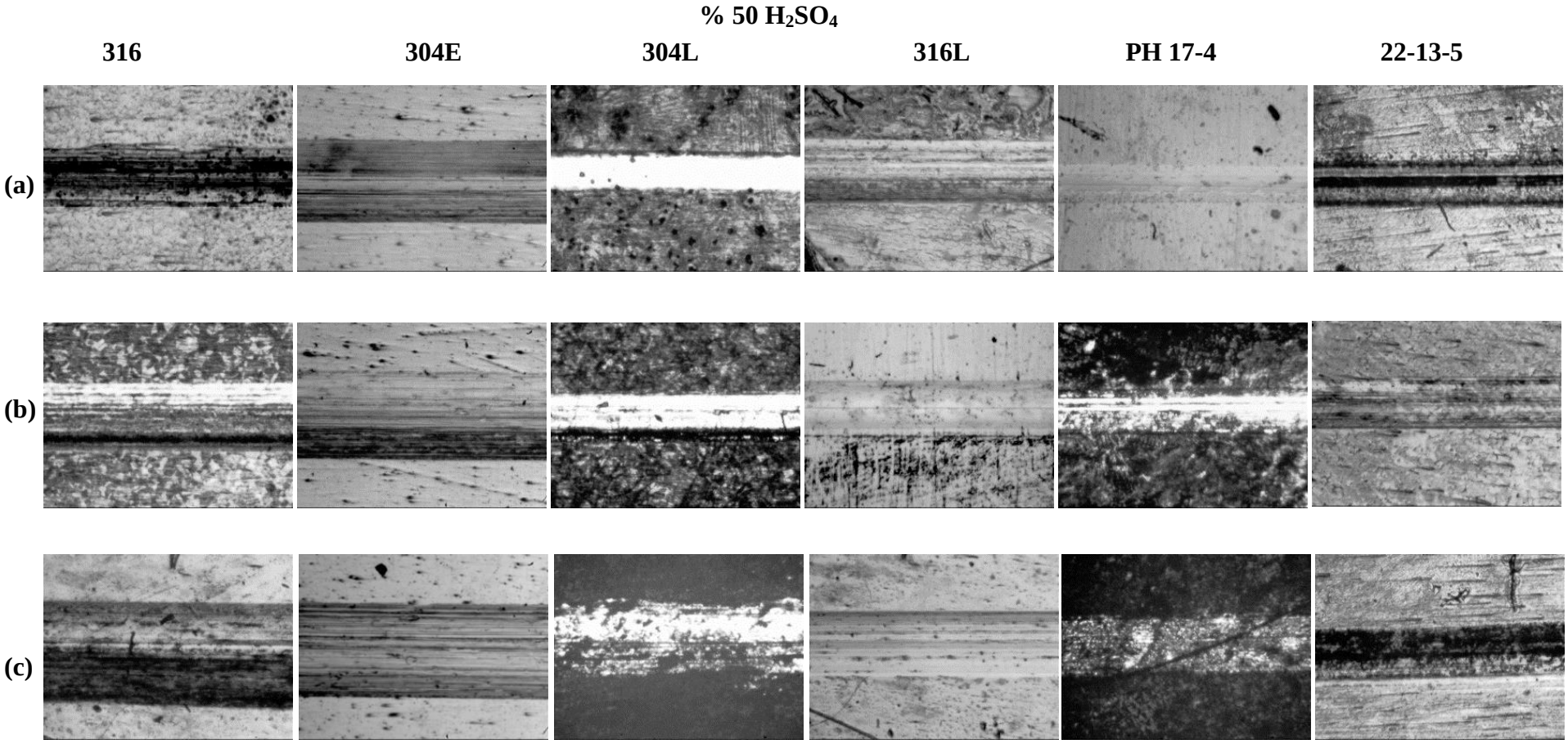
EK C



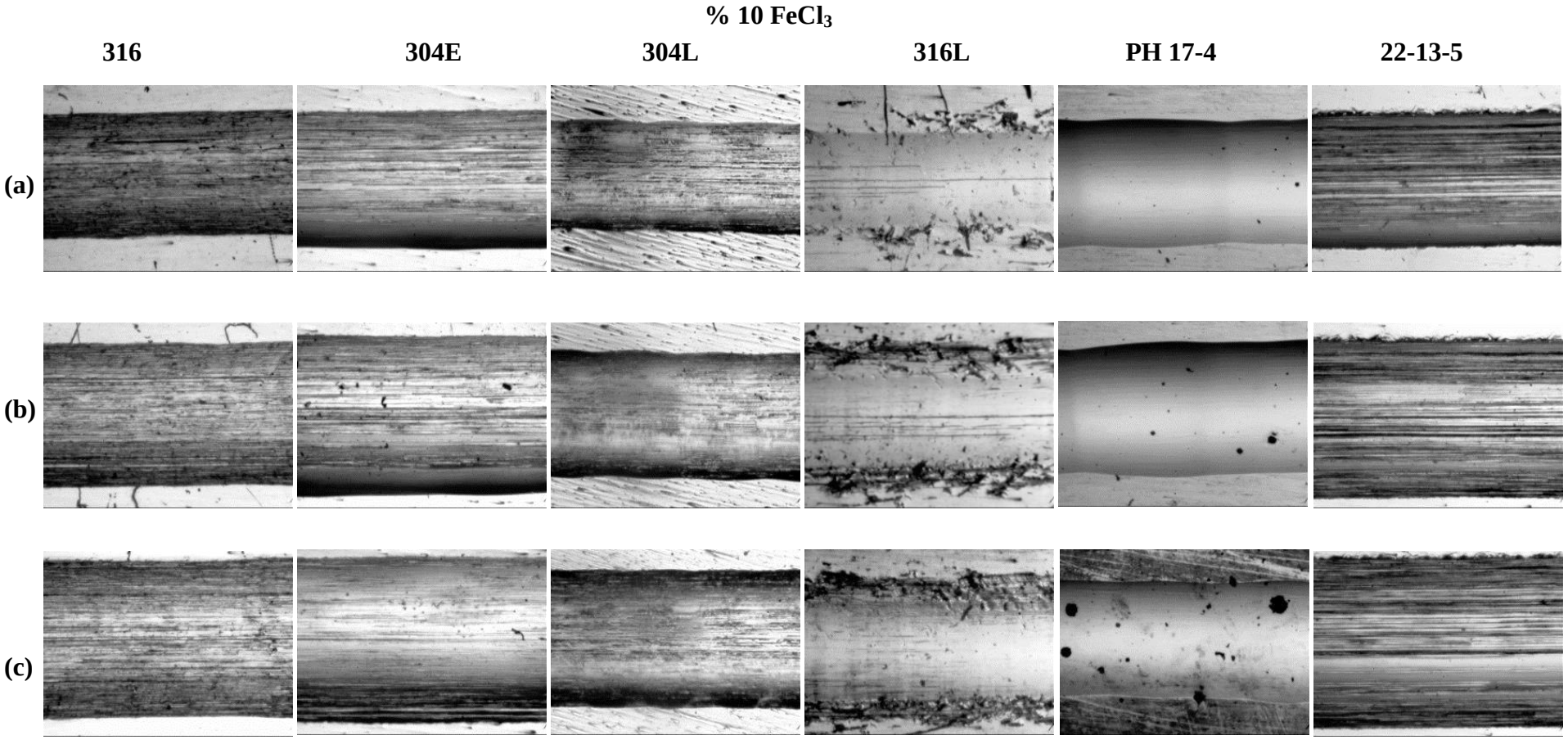
Şekil C1. Kuru ortamdaki aşınma deneyi sonrası paslanmaz çeliklerin aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri(X50).(a) 180 (b) 270 (c) 360 dak.



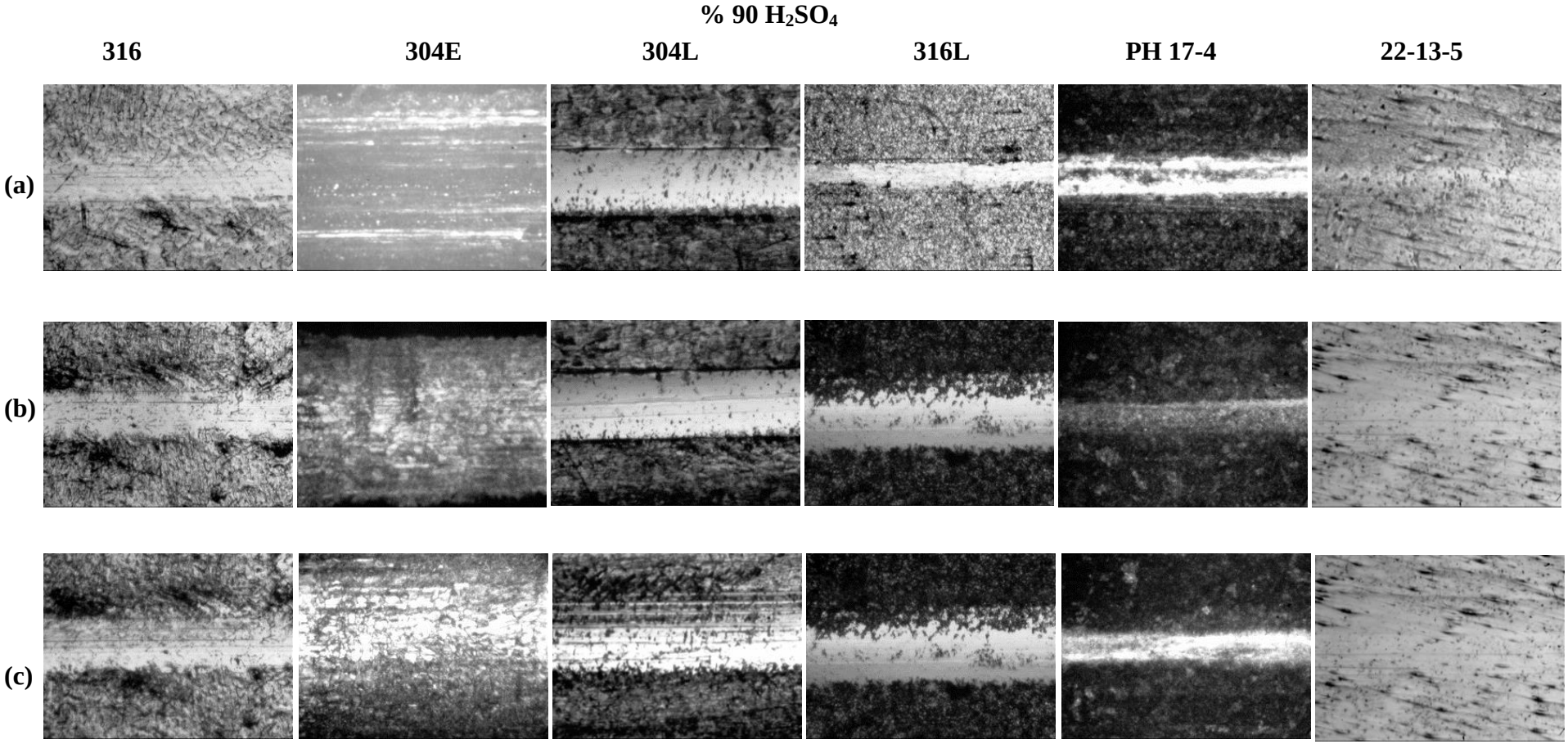
Şekil C2. Deniz suyu ortamdaki aşınma deneyi sonrası paslanmaz çeliklerin aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri(X50). (a) 180 (b) 270 (c) 360 dak.



Şekil C3. %50 H_2SO_4 ortamındaki aşınma deneyi sonrası paslanmaz çeliklerin aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri(X50). (a) 180 (b) 270 (c) 360 dak.

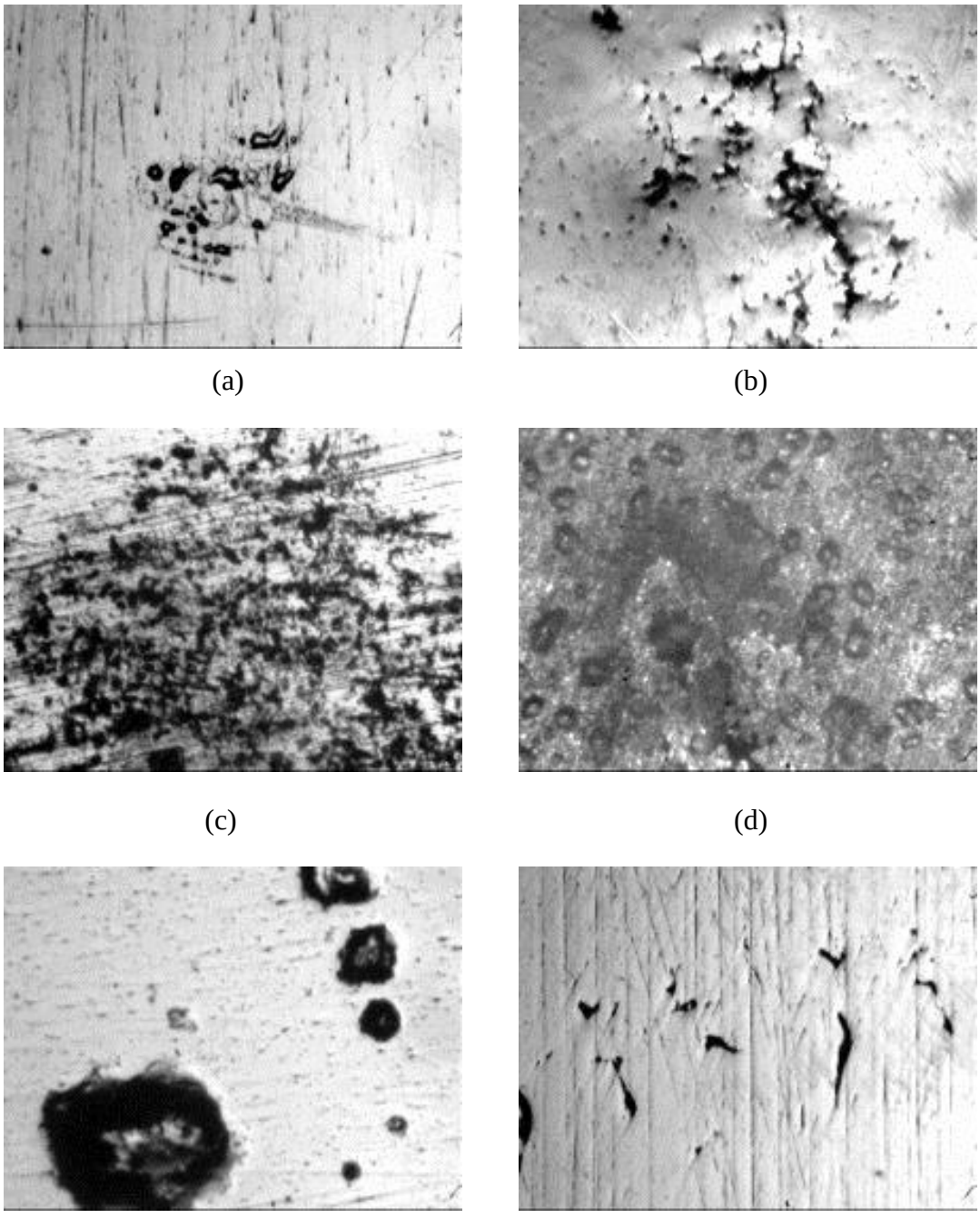


Şekil C4. %10 $FeCl_3$ ortamındaki aşınma deneyi sonrası paslanmaz çeliklerin aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri(X50). (a) 180 (b) 270 (c) 360 dak.



Şekil C5. %90 H_2SO_4 ortamındaki aşınma deneyi sonrası paslanmaz çeliklerin aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri(X50). (a) 180 (b) 270 (c) 360 dak.

EK D



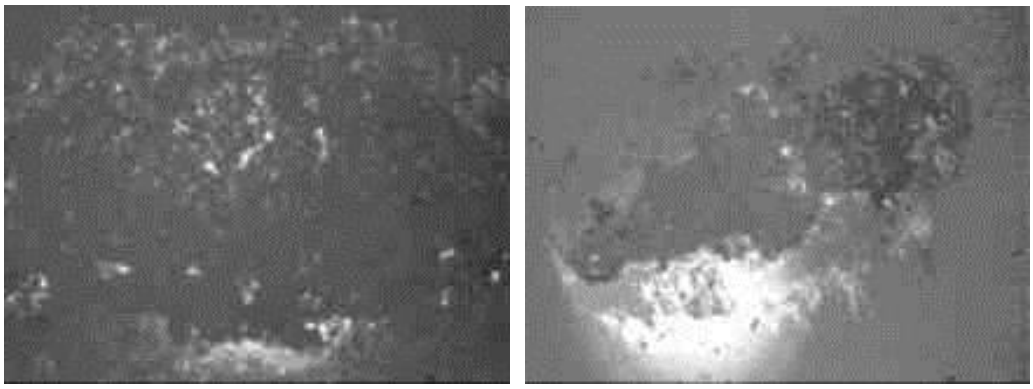
(a) (b)

(c) (d)

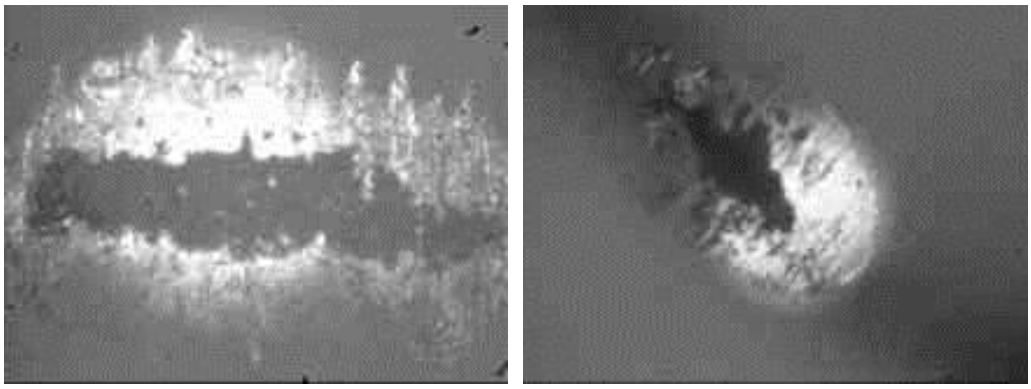
(e) (f)

Şekil D.1. (a) 304L (b) 316 (c) 304E (e) 316L (f) PH 17-4 (g) 22-13-5 paslanmaz çeliklerin %10 $FeCl_3$ çözeltisinde gerçekleştirilen korozyon deneyi yüzey görüntüleri(X50).

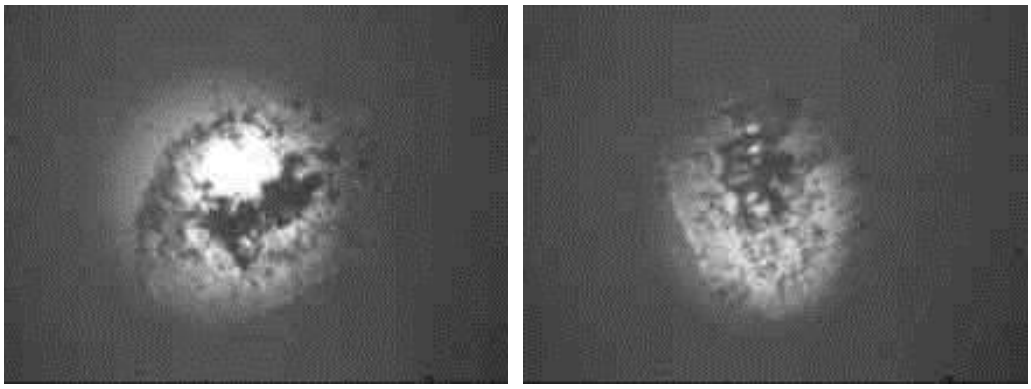
EK E



(a) (b)



(c) (d)



(e) (f)

Şekil E1: Kuru ortamdaki aşınma deneyi sonrası aşındırıcı bilyelerin optik mikroskop görüntüleri(X50).

Malzeme	Bilyede Oluşan Aşınma İz Alanı (mm^2)

PH 17-4	1.04
304L	0.61
304E	0.4
316	0.17
22-13-5	0.089
316L	0.076

Şekil E2. Kuru ortamdaki aşınma deneyi sonrası bilyelerde oluşan aşınma iz alanları.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında İskenderun' da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kdz. Ereğli'de tamamladı. 1996 yılında TED Kdz. Ereğli Koleji Vakfı Özel Lisesinden mezun oldu. 1996 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğine girdi. 2000 yılında Lisans öğrenimini tamamlayarak İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilimdalı Malzeme Programına girmeye hak kazandı.