

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜK TAŞIMA HALATLARININ FARKLI ÇEVRE
ŞARTLARINDAKİ DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Haşim Fırat KARASU

Aralık, 2022

İZMİR

YÜK TAŞIMA HALATLARININ FARKLI ÇEVRE ŞARTLARINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon-İmalat Programı

Haşim Fırat KARASU

Aralık, 2022

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

HAŞİM FIRAT KARASU, tarafından **PROF.DR. MİNE DEMİRİSOY** yönetiminde hazırlanan “**YÜK TAŞIMA HALATLARININ FARKLI ÇEVRE ŞARTLARINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mine DEMİRİSOY

Yönetici

Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Evren Meltem TOYGAR

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Mehmet GAVGALI

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Uğur ÇAVDAR

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Çalışmamın başlangıcından sonuna kadar bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren, akademik olarak yetişmemi sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Mine DEMİRSOY'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu süre zarfında, görüş ve önerileriyle bu çalışmaya koydukları olumlu yönde katkılarından dolayı, tez izleme komitesi üyeleri değerli hocam Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU'ya ve değerli hocam Prof. Dr. Uğur MALAYOĞLU'na teşekkür ederim.

Gerilmeli korozyon test cihazının üretimi ve çelik halatların piyasadan temin edilmesinde emeği geçen Aymas Makina çalışanlarına, Sayın Aytekin YELEKÇİOĞLU'na ve Sayın Çağatay Yeldar YILDIRIM'a teşekkür ederim. Deneylerim aşamasında elinden gelen tüm yardımı gösteren Tekniker Dalyan ÖZKAN'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Dokuz Eylül Üniversitesi 2021.KB.FEN.003 numaralı BAP projesi tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden ötürü Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi üyelerine teşekkür ederim.

Yoğun çalışmalarım boyunca yanımda sabır ve anlayışla yer alan, zorlu doktora sürecini beraber yaşadığımız sevgili eşim Canan PARILDAR KARASU'ya ve eşimin değerli ailesi; annem Nalan PARILDAR'a ve babam Mehmet PARILDAR'a teşekkür ederim.

Doktora süresi boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen annem Güneş KARASU'ya ve mühendislik eğitimi almamın ve akademisyen olmamın en büyük mimarı olan babam Hayri KARASU'ya kendisini saygıyla ve rahmetle anarak teşekkür ediyorum.

Haşim Fırat KARASU

YÜK TAŞIMA HALATLARININ FARKLI ÇEVRE ŞARTLARINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZ

Bu tez kapsamında, limanlardaki ve gemilerdeki krenler, okyanuslarda bulunan petrol platformları ve madenler gibi farklı çevre ve çalışma şartlarına maruz kalan sistemlerde kullanılan farklı tiplerdeki yük taşıma halatları incelenmiştir. Farklı kordon tipinde ve farklı çekirdek malzemelerinden üretilen halatların değişken çevre şartları karşısındaki davranışları araştırılmış ve bu ortamlarda çalışmaya en uygun halat tipleri belirlenmiştir. Bu davranışlara göre iyileştirmeler yapılarak çevre şartlarına olan dayanımı araştırılmıştır.

Bu çalışmada, korozyon davranışı, malzeme kütleindeki değişim, mekanik deneyler, elektrokimyasal yöntemler, gerilmeli korozyon ve yüzey karakterizasyonu olmak üzere beş temel başlık altında incelenmiştir. Farklı halat tiplerine uygun olarak tasarlanıp üretilen gerilmeli korozyon test cihazı ile halatların ön gerilmeli korozyon testleri yapılmıştır. Ön gerilmeli korozyon testleri maden ortamındaki halatlar düşünülerek sülfürik asit içeren solüsyon ile de tekrarlanmıştır. Bulunan verilere göre korozyona karşı uygun iyileştirme yöntemleri uygulanmıştır.

Sonuç olarak; korozyonun olduğu ortamlarda, yük taşıma halatı eğer kendiri özlü seçilecekse Seale tip halatın alınmasının uygun olacağına, eğer çelik özlü seçilecekse ortamdaki gerilmenin varlığına göre karar vermek gerektiğine ulaşılmıştır. Ortamda gerilme yoksa ya da sınırlıysa Warrington Seale tip halat, ortamda gerilmeli korozyon varsa ve halatlar yer üstündeki krenlerde çalışacaksa Standart tip halat, asit etkisinin yoğun olduğu yer altındaki maden yataklarında çalışacaksa Warrington Seale tipi halat seçilmelidir.

Anahtar kelimeler: Yük taşıma halatı, Tafel ekstrapolasyon yöntemi, gerilmeli korozyon çatlaması, elektrokimyasal yöntemler

INVESTIGATION OF BEHAVIOR IN DIFFERENT ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF HOISTING ROPES

ABSTRACT

Within the scope of this thesis, different types of hoisting ropes used in systems exposed to different environmental and operating conditions such as cranes in ports and ships, oil platforms in the oceans and mines were examined. Behaviors of ropes made of different cord types and different core materials against changing environmental conditions were investigated and the most suitable rope types for working in these environments were determined. Improvements were made according to these behaviors and its resistance to environmental conditions was investigated.

In this study, corrosion behavior was investigated under five main headings: change in material mass, mechanical experiments, electrochemical methods, stress corrosion and surface characterization. Pre-stressed corrosion tests of the ropes were carried out with the stress corrosion test device designed and produced in accordance with different rope types. Pre-stress corrosion tests were also repeated with a solution containing sulfuric acid, considering the ropes in the mine environment. According to the data found, appropriate improvement methods were applied against corrosion.

As a result; in environments where corrosion is present, it has been reached that if the hoisting rope is to be selected with hemp core, it will be appropriate to take Seale type rope, and if steel core is to be selected, it is necessary to decide according to the presence of stress in the environment. If there is no or limited stress in the environment, Warrington Seale type rope should be chosen, if there is stress corrosion in the environment and the ropes will work in overhead cranes, Standard type rope should be selected and if it will work in underground mineral deposits where the acid effect is intense, Warrington Seale type rope should be selected.

Keywords: Hoisting rope, Tafel extrapolation method, stress corrosion cracking, electrochemical methods

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
SEMBOLLER LİSTESİ	xv
KISALTMALAR	xvi
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
1.1 Giriş.....	1
1.2 Literatür İncelemesi.....	2
1.3 Amaç ve Kapsam.....	15
1.4 Tez Planı.....	17
BÖLÜM İKİ – YÜK TAŞIMA HALATLARI	19
2.1 Giriş.....	19
2.2 Yük Taşıma Halatlarının Yapısı.....	20
2.3 Yük Taşıma Halatlarının Sınıflandırılması	22
2.3.1 Tel Malzemesine Göre Yük Taşıma Halatları	23
2.3.2 Çekirdek (Öz) Yapısına Göre Yük Taşıma Halatları	24
2.3.3 Kesit Şekillerine Göre Yük Taşıma Halatları	25
2.3.4 Tel ve Kordon Dizilimlerine Göre Yük Taşıma Halatları	25
2.3.5 Sarım Yönüne Göre Yük Taşıma Halatları	28
2.4 Yük Taşıma Halatlarının Hesabı	29
2.5 Yük Taşıma Halatlarının Seçim Kriterleri	32

BÖLÜM ÜÇ – KOROZYON 34

3.1 Giriş	34
3.2 Gerilmeli Korozyon Çatlaması.....	36
3.2.1 Ortam GÜDÜMLÜ Çatlamalar	36
3.2.2 Gerilmeli Korozyon Çatlaması Mekanizması	37
3.2.3 Gerilmeli Korozyon Çatlaması Test Yöntemleri.....	39
3.2.3.1 Ön Gerilmeli Korozyon Çatlaması Testi	39
3.2.3.2 Yavaş Deformasyon Hızıyla Çekme Testi.....	40
3.3 Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi ile Korozyon Hızının Tahmini	42

BÖLÜM DÖRT – DENEYSEL YÖNTEMLER 46

4.1 Giriş	46
4.2 Yük Taşıma Halatlarının Seçilmesi.....	47
4.3 Metot 1: Yük Taşıma Halatlarının Malzeme Kütlesindeki Değişim Yöntemi ile Korozyon Dayanımlarının İncelenmesi	50
4.3.1 Materyal ve Metot	50
4.3.2 Sonuçlar	52
4.4 Metot 2: Yük Taşıma Halatlarının Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi ile Korozyon Dayanımlarının İncelenmesi	55
4.4.1 Materyal ve Metot	55
4.4.2 Sonuçlar	56
4.5 Metot 3: Yük Taşıma Halatlarının Mekanik Deneyler ile Korozyon Dayanımlarının İncelenmesi	59
4.5.1 Materyal ve Metot	59
4.5.1.1 Halatlarda Yapılan Modifikasyonlar.....	59
4.5.1.2 Deneylerin Gerçekleştirilmesi	62
4.5.2 Sonuçlar	63
4.6 Metot 4: Yük Taşıma Halatlarının Gerilmeli Korozyon Çatlaması Testleri ile Korozyon Dayanımlarının İncelenmesi	65
4.6.1 Materyal ve Metot	65

4.6.1.1 Ön Gerilmeli Korozyon Test Cihazı	65
4.6.1.2 Ön Gerilmeli Korozyon Test Cihazında Yapılan Modifikasyonlar ..	67
4.6.1.3 Gerilmeli Korozyon Çatlama Testlerinin Planlanması ve Numunelerin Hazırlanması	70
4.6.1.4 Deneylerin Gerçekleştirilmesi	72
4.6.2 Sonuçlar	75
4.7 Metot 5: Yük Taşıma Halatlarının Yüzey Karakterizasyonu ile Korozyon Dayanımlarının İncelenmesi	85
4.7.1 Materyal ve Metot	85
4.7.2 Sonuçlar	87
BÖLÜM BEŞ – SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR.....	92
5.1 Sonuçlar.....	92
5.2 Gelecek Çalışmalar için Öneriler	96
KAYNAKLAR	99
EKLER.....	108
EK 1: Yayınlar.....	108

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Mısır hiyerogliflerinde halat uygulaması 19
Şekil 2.2	İlk üretilen halat tipi olan “Albert Halatı” 20
Şekil 2.3	Bir çelik halatın yapısı..... 22
Şekil 2.4	Çelik halatların sınıflandırılması..... 22
Şekil 2.5	Farklı çelik halat tipleri (Ç.Ö.: Çelik özlü, K.Ö.: Kendir özlü) 26
Şekil 2.6	Çelik halatlarda farklı sarım tipleri: a) zZ b) sS c) sZ d) zS 28
Şekil 3.1	Malzeme hasarına yol açan etmenlerin etkileşimi (A: Ortam güdümlü çatlama, B: Korozyon, oksitlenme, C: Yorulma, kırılma) 36
Şekil 3.2	Ortam güdümlü çatlamların sınıflandırılması 36
Şekil 3.3	Ön gerilmeli test düzenekleri: a) U-eğme, b) C-halka, c) Eğme plağı, d) Çekme çubuğu..... 40
Şekil 3.4	Korozyon akım yoğunluğunun (I_{corr}) belirlenmesi için anodik ve katodik Tafel eğrilerinin korozyon potansiyeline (E_{corr}) ekstrapolasyonu 45
Şekil 4.1	Korozyon davranışını inceleme yöntemleri..... 46
Şekil 4.2	Çalışmada kullanılan çelik tel halatların ve kordonlarının kesit görünümleri 48
Şekil 4.3	Kullanılan yaşlandırma test cihazı..... 50
Şekil 4.4	Halatların test kabini içindeki yerleşimleri..... 51
Şekil 4.5	Yaşlandırma öncesinde (a) ve sonrasında (b) halatların durumu 52
Şekil 4.6	Halat çapındaki incelme 53
Şekil 4.7	Çekirdek tabakasının açığa çıkması 53

Şekil 4.8	Yaşlandırma işlemi sonrası kendir özlü çekirdek ile çelik özlü çekirdeğin karşılaştırılması: a) Çelik özlü halat b) Kendir özlü halat.....	53
Şekil 4.9	Zımparalama ve parlatma sonucu elde edilen halat numuneleri: a) Çelik özlü halat numuneleri b) Kendir özlü halat numuneleri.....	55
Şekil 4.10	Elektrokimyasal test düzeneği: a) %3,5 NaCl çözeltisinin manyetik karıştırıcı ile hazırlanması b) Üçlü elektrot sisteminin cam kap içerisindeki görünümü c) Luggin kılcalının konumu.....	56
Şekil 4.11	Farklı halat numunelerinin yapılan elektrokimyasal deneyler sonucu elde edilen Tafel eğrileri a) Çelik özlü Standart halat, b) Çelik özlü Seale halat, c) Çelik özlü Warrington Seale halat, d) Kendir özlü Standart halat, e) Kendir özlü Seale halat, f) Kendir özlü Warrington Seale halat.....	57
Şekil 4.12	Çinko döküm ve bağ teli yöntemiyle halat numunesinin hazırlanması.	59
Şekil 4.13	Sırasıyla uygulanan halat numuneleri.....	60
Şekil 4.14	Çekme testleri sonrası halat numuneleri.....	60
Şekil 4.15	Yeni tip halat numunesine uygun tasarlanıp üretilen çekme çenesi.....	61
Şekil 4.16	a) Eski tip halat numunesinin çekme test cihazındaki görünümü b) Yeni tip halat numunesinin tasarlanıp üretilen yeni çenelerle beraber çekme test cihazındaki görünümü	62
Şekil 4.17	Yeni tip halat numunesinin çekme testinden önceki (a) ve sonraki (b) durumu	63
Şekil 4.18	Halatların çekme deneyleri sonucu elde edilen Hooke diyagramları a) Çelik özlü Standart halat, b) Çelik özlü Seale halat, c) Çelik özlü Warrington Seale halat, d) Kendir özlü Standart halat, e) Kendir özlü Seale halat, f) Kendir özlü Warrington Seale halat.....	64
Şekil 4.19	Tasarlanan ön gerilmeli korozyon test cihazı	67

Şekil 4.20	Gerilmeli korozyon test cihazının tasarım değişikliği sonucu oluşan son hali	68
Şekil 4.21	Tasarlanan ön gerilmeli korozyon test cihazının izometrik görünümü .	69
Şekil 4.22	Üst halat tutucu, alt halat tutucu ve elektrokimyasal hücre kabına ait detay görünüm	70
Şekil 4.23	Çelik tel halatların korozyon tedbirleri bakımından karşılaştırılması a) Galvanizlenmemiş b) Sıcak daldırmayla galvanizlenmiş c) Epoksi astar ile boyanmış	71
Şekil 4.24	Çelik halatların çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanması..	72
Şekil 4.25	Ön gerilmeli korozyon test cihazı.....	73
Şekil 4.26	Sızdırmazlık için kullanılan keçe	73
Şekil 4.27	Ön gerilmeli korozyon test cihazında oluşturulan elektrokimyasal hücre	74
Şekil 4.28	Ön gerilmeli korozyon test cihazındaki deney sonrası Tafel eğrisinin elde edilmesi	74
Şekil 4.29	%3,5 NaCl çözeltisi için Standart halat Tafel diyagramları a) Standart halat, çelik özlü, galvanizlenmemiş b) Standart halat, çelik özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş c) Standart halat, çelik özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış d) Standart halat, kendir özlü, galvanizlenmemiş e) Standart halat, kendir özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş f) Standart halat, kendir özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış	76
Şekil 4.30	%3,5 NaCl çözeltisi için Seale halat Tafel diyagramları a) Seale halat, çelik özlü, galvanizlenmemiş b) Seale halat, çelik özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş c) Seale halat, çelik özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış d) Seale halat, kendir özlü, galvanizlenmemiş e) Seale	

- halat, kendir özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş f) Seale halat, kendir özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış 77
- Şekil 4.31 %3,5 NaCl çözeltisi için Warrington Seale halat Tafel diyagramları a) W. Seale halat, çelik özlü, galvanizlenmemiş b) W. Seale halat, çelik özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş c) W. Seale halat, çelik özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış d) W. Seale halat, kendir özlü, galvanizlenmemiş e) W. Seale halat, kendir özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş f) W. Seale halat, kendir özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış 78
- Şekil 4.32 %5 H₂SO₄ çözeltisi için Standart halat Tafel diyagramları a) Standart halat, çelik özlü, galvanizlenmemiş b) Standart halat, çelik özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş c) Standart halat, çelik özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış d) Standart halat, kendir özlü, galvanizlenmemiş e) Standart halat, kendir özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş f) Standart halat, kendir özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış 79
- Şekil 4.33 %5 H₂SO₄ çözeltisi için Seale halat Tafel diyagramları a) Seale halat, çelik özlü, galvanizlenmemiş b) Seale halat, çelik özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş c) Seale halat, çelik özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış d) Seale halat, kendir özlü, galvanizlenmemiş e) Seale halat, kendir özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş f) Seale halat, kendir özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış 80
- Şekil 4.34 %5 H₂SO₄ çözeltisi için Warrington Seale halat Tafel diyagramları a) W. Seale halat, çelik özlü, galvanizlenmemiş b) W. Seale halat, çelik özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş c) W. Seale halat, çelik özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış d) W. Seale halat, kendir özlü, galvanizlenmemiş e) W. Seale halat, kendir özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş f) W. Seale halat, kendir özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış 81

Şekil 4.35	%3,5 NaCl çözeltisi için çelik halatların korozyon hızlarının karşılaştırılması (S: Standart, S: Seale, WS: Warrington Seale, ÇÖ: Çelik özlü, KÖ: Kendir özlü).....	82
Şekil 4.36	%5 H ₂ SO ₄ çözeltisi için çelik halatların korozyon hızlarının karşılaştırılması (S: Standart, S: Seale, WS: Warrington Seale, ÇÖ: Çelik özlü, KÖ: Kendir özlü).....	84
Şekil 4.37	Halat numunelerinin epoksi kalıplara alınması	86
Şekil 4.38	Nikon Eclipse ME600 optik mikroskobu	87
Şekil 4.39	Halat numunelerinin 5x büyütme oranındaki görüntülerinin karşılaştırılması	88
Şekil 4.40	Halat numunelerinin 10x büyütme oranındaki görüntülerinin karşılaştırılması	89
Şekil 4.41	Halat numunelerinin 20x büyütme oranındaki görüntülerinin karşılaştırılması	90
Şekil 4.42	Halat numunelerinin 50x büyütme oranındaki görüntülerinin karşılaştırılması	91

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Çelik tel halatların kimyasal bileşimi.....	23
Tablo 4.1 Deneylerde kullanılan çelik tel halat tipleri	47
Tablo 4.2 Standart kordon ve halat: Ana geometrik-yapısal özellikler	49
Tablo 4.3 Seale kordon ve halat: Ana geometrik-yapısal özellikler.....	49
Tablo 4.4 Warrington Seale kordon ve halat: Ana geometrik-yapısal özellikler ..	49
Tablo 4.5 Çelik tel halatlar için kullanılan C83 çeliğinin nominal kimyasal bileşimi	50
Tablo 4.6 Uygulanan yaşlandırma prosesleri	51
Tablo 4.7 Halatlarda yaşlandırma testi sonrası görülen kütle artışları	54
Tablo 4.8 Halat numunelerinin deneyler sonucu elde edilen E_{corr} , I_{corr} ve korozyon hızı değerleri.....	58
Tablo 4.9 Halat numunelerinin çekme deneyleri sonucu elde edilen mukavemet değerleri.....	64
Tablo 4.10 Halatların korozyon hızlarının ve korozyon dirençlerinin karşılaştırılması (KH: Korozyon hızı, KD: Korozyon direnci, St: Standart, S: Seale, WS: Warrington Seale)	65
Tablo 4.11 Gerilmeli korozyon test cihazı parça listesi	68
Tablo 4.12 Her bir halat grubu için uygulanan test sayıları (%3,5 NaCl çözeltisi ve %5 H_2SO_4 için ayrı ayrı olacak şekilde)	71
Tablo 4.13 %3,5 NaCl çözeltisi için Tafel diyagramlarından elde edilen E_{corr} , I_{corr} ve korozyon hızı değerleri.....	82
Tablo 4.14 %5 H_2SO_4 çözeltisi için Tafel diyagramlarından elde edilen E_{corr} , I_{corr} ve korozyon hızı değerleri.....	84

SEMBOLLER LİSTESİ

$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece
NaCl	: Sodyum klorür
H_2SO_4	: Sülfürik asit
ÇÖ	: Çelik özlü
KÖ	: Kendir özlü
St	: Standart halat
S	: Seale halat
WS	: Warrington Seale halat
E_{corr}	: Korozyon potansiyeli
I_{corr}	: Korozyon akım yoğunluğu
HNO_3	: Nitrik asit
HCl	: Hidroklorik asit
KCl	: Potasyum klorür
Hg/HgCl	: Cıva/Cıva klorür
Hg/HgSO_4	: Cıva/Cıva sülfat

KISALTMALAR

DEÜ	: Dokuz Eylül Üniversitesi
BAP	: Bilimsel Araştırma Projesi
GKÇ	: Gerilmeli korozyon çatlaması
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
EDS	: Enerji dağılım spektroskopisi
EDX	: Enerji dağılımlı X-ray spektroskopisi
EIS	: Elektrokimyasal empedans spektroskopisi
XRD	: X-ışınları difraksiyonu
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
SSRT	: Yavaş deformasyon hızıyla çekme testi
OCP	: Açık devre potansiyeli
KH	: Korozyon hızı
KD	: Korozyon direnci
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Giriş

Yük taşıma halatları, limanlardaki ve gemilerdeki krenlerde (vinçlerde), okyanuslarda bulunan petrol platformlarında ve madenlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu ortamlarda bulunan halatlar, çalışma ömürleri boyunca neme ve deniz tuzuna maruz kalmaktadırlar. Eğer bu ortamda oluşan korozyonun halat üzerindeki etkisi göz ardı edilirse yüksek yük taşıma kapasitelerindeki bu elemanlar için ciddi derecede yüksek bir risk faktörü ortaya çıkmaktadır. Bunun önlenmesi için öncelikle korozyonun halatta meydana getirdiği etkileri iyi bir şekilde gözlemlemek gerekmektedir.

Yük taşıma halatları; yükün durumuna veya krenin bulunduğu çevresel şartlara göre farklı kompozisyonlarda üretilmektedir. Standart, Seale, Warrington, Warrington Seale gibi ifade edilen kompozisyonlar dışında ayrıca çekirdek yapısının kendiri ya da çelik olmasına göre de sınıflandırılabilir. Tez kapsamında krenlerde sıklıkla kullanılan bu yük taşıma halatları incelenerek korozyon performansları karşılaştırılmıştır.

Krenler de diğer iş makinelerinde olduğu gibi belirli bir günlük çalışma saatine sahiptir. Geri kalan zamanlarda halatlar boşta durmaktadır. Bu nedenle korozyonun halat üzerindeki etkisi her iki durum için de incelenecektir. Çalışma durumunda etki eden korozyon gerilmeli korozyon iken, boş halde ise homojen korozyon etki etmektedir. Tez çalışması kapsamında gerilmeli korozyon çatlaması testlerinin gerçeğe en yakın sonuçlarla alınabilmesi için gerilmeli korozyon test düzeneği tasarlanıp üretilmiştir.

Çalışmada istenilen sonuçların alınması ile transport ve iletim sektöründe yer alan kamu şirketleri ve özel şirketler çok önemli bir maliyet kalemi olan halatları daha uzun

süre kullanarak sosyoekonomik fayda sağlayacaklardır. Bunun da orta ve uzun vadede ülke ekonomisi için ciddi bir getirisi olacaktır.

1.2 Literatür İncelemesi

Değişken halat tiplerinin farklı konstrüksiyonlardaki uygulandığı veya korozyonun halatlar üzerinde yarattığı tahribat ve bunun azaltılmasına yönelik tedbirler birçok araştırmacı tarafından uzun süredir çalışılmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda kısaca gözden geçirilmiştir.

Torkar ve Arzensek (2002) yaptıkları çalışmada, kırılan bir halat kordonunun hasar analizini yapmışlardır. Bunun için 12 ay boyunca kullanılmış 7 kordonlu bir halat incelenmiştir. Kırık yüzeyler SEM ve optik mikroskop ile incelenmiştir. Ayrıca mekanik özellikleri çekme ve eğme makineleriyle test edilmiştir. Bu testler sonucunda merkezdeki kordon hemen kırılmış, testte ise dış kordonlardan rastgele seçilen 3 tanesi kullanılmıştır. Yorulma kırılması ise beklendiği gibi tel yüzeylerindeki çatlaklardan başlamıştır. Sonuç olarak halat hasarlarının ana sebepleri, yorulma ve muayene yetersizliği olarak görülmüştür.

De Silva ve Fong (2002) çalışmalarında, 6 kordonlu çelik halatı abrazyon aşındırmaya maruz bırakmışlar ve bu aşınmanın halatın çekme mukavemeti üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlara göre, artan miktarlarda dış aşındırıcı, aşınma altında tel halatta iki kat fazla mukavemet azalmasına neden olmakta ve bu rejimlerin başlangıcını işaret eden test parametre seviyelerine yönelmektedir.

Singh vd. (2004) yaptıkları çalışmada, çelik tellerin manyetik ölçümlerinde sıcaklığın, korozyona uğrayan malzeme kalınlığının ve malzeme bileşiminin etkileri üzerine çalışmışlardır. Malzemeye üç elektrotlu korozyon hücresi uygulanmış ve sonuçlar kurulan sistem vasıtasıyla alınmıştır. Farklı sıcaklıklar için Tafel eğrileri çizdirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deney numunesi 1140 mm uzunluğunda olup deneyler öncesinde yüzey temizliği yapılmış ve ortasındaki 50 mm'lik bölüm hariç geri kalan yerleri vernikle kaplanmıştır. Korozyon 50 mm'lik kaplanmamış kısımdan

uygulanmıştır. Deney sonucunda farklı sıcaklıklar için korozyona uğramış yüzey kalınlığına bağlı olarak histerezis eğrileri çıkarılıp karşılaştırılmıştır. Ayrıca EDS ve Raman spektroskopisi eğrileri elde edilmiştir.

Deflorian vd. (2004) karayollarında bariyer olarak kullanılan halatlarda korozyonun etkisini incelemiştir. 6x7 ve 6x19 geometrilerinde iki halat tipi belirlenerek bu halatlara Zn ve Zn-Al (%95 Zn, %5 Al) kaplama uygulanmış ve ASTM B117 standardına uygun olarak tuzlu su spreyine maruz bırakılmıştır. Yazarlar 500 saatlik korozyon testiyle Zn-Al kaplı halatların Zn kaplı halatlara göre korozyondan daha az etkilendiklerini görmelerine rağmen iki geometrik halat formu arasında ciddi bir fark bulamadıklarından elektrokimyasal yöntemlere başvurmuşlardır.

Shih vd. (2005), tavlınmış ve tavlınmamış farklı tane boyutlarına sahip 316L paslanmaz çelik çubukların korozyon davranışlarını araştırmışlardır. Bunun için Ringer solüsyonunda yaklaşık yarım saat bekletilmiş çubuklara elektrokimyasal yöntem uygulamışlardır. Referans elektrot olarak seçilen doymuş kalomel elektrodun, karşıt elektrot olarak platinyumun, çalışma elektrodu olarak ise farklı tane boyutlarına sahip çelik tel çubukların kullanıldığı standart üç elektrotlu sistem kullanılmıştır. Döngüsel voltametri ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) uygulanarak döngüsel voltamogramlar ve Nyquist diyagramları çıkarılmıştır. SEM ile de çubukların yüzey karakterizasyonları karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda geniş tane büyüklüğünün ve tavlama işleminin korozyonu artırıcı yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.

McCafferty (2005), korozyon hızının tayini için elektrokimyasal bir metot olan Tafel ekstrapolasyon metodu ile kimyasal metotları karşılaştırmıştır. Bunun için geçmiş çalışmalarını baz alarak hidroklorik asit içinde demir, %3,5 NaCl içindeki demir ve kaynayan 1 M sülfürik asit içindeki titanyum olmak üzere 3 örnek korozyon olayı belirlemiştir. HCl çözeltisi içindeki demir örneğinde, 24 saatlik daldırma sonrası potansiyostatik metot ile oluşturulan Tafel eğrisinden $i_{corr} = 30 \mu A/cm^2$ olarak belirlenmiştir. Kimyasal olarak korozyon oranını bulmak için dört farklı yol izlenebilir. Bunlar: (1) metalik demir numunesinin ağırlık kaybını ölçerek korozyona

bağlı olarak kaybedilen katı demir miktarını belirlemek, (2) çözelti içindeki çözünmüş Fe^{+2} iyonlarının konsantrasyonunu ölçmek, (3) Korozyon reaksiyonunda üretilen hidrojen gazı miktarını belirlemek, (4) H^+ iyonlarının harcanması sonucu çözeltideki pH değişimlerini belirlemek. Bunlardan ikinci yöntem belirlenmiş ve kolorimetrik analiz ile korozyon hızı $0,665 \mu\text{mol Fe}^{+2}/\text{cm}^2\text{h}$, buradan da Faraday kanunu ile $36 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ bulunmuştur. Bu sonuç Tafel ekstrapolasyon yöntemindeki sonuçla uyumludur. İkinci olarak, açık havada bulunan %3,5 NaCl içeren demirdeki korozyon incelenmiştir. 24 saatlik daldırma süresi sonrası Tafel polarizasyon eğrileri verilmiştir. $i_{\text{corr}} = 25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Bu değer Faraday kanununa göre 12 mpy'ye eşittir. Karbon çeliğinin standartlara göre korozyon hızı ilk yıl için 15 mpy olmakta ve 1000 günden sonra 5 mpy'ye düşmektedir. Bu sonuç da Tafel ekstrapolasyon yöntemindeki sonuçla uyumludur. Üçüncü örnek korozyon olayı olarak kaynayan sülfürik asit içindeki titanyum incelenmiştir. Titanyum düşük korozyon hızına sahip olmasına rağmen sıcak asit çözeltilerinde bu tam tersidir. Elektrokimyasal olarak korozyon akım yoğunluğu $1,9 \text{ mA}/\text{cm}^2$ bulunmuştur. Kolorimetrik analiz ile korozyon hızı $2 \text{ mg}/\text{cm}^2\text{h}$, buradan da Faraday kanunu ile $2,2 \text{ mA}/\text{cm}^2$ bulunmuştur. Bu sonuç da Tafel ekstrapolasyon yöntemindeki sonuçla uyumludur.

Diğer bir çalışmada Gorbato vd. (2007), seçtikleri Warrington Seale 6x36 çelik tel halat için iki farklı organik çekirdek (kenevir ve jüt) ile iki farklı koruyucu bileşik (E-1 yağı ve ASKM bileşiği) denemişlerdir. Çalışma sonucunda ASKM emdirilmiş jüt çekirdeğe sahip halatın, E-1 emdirilmiş kenevir çekirdeğe sahip halattan daha yüksek çalışma ömrüne sahip ve daha kaliteli olduğu belirlenmiştir.

Farklı bir çalışmada Kurashov vd. (2008), çeşitli organik halat çekirdeği yağlayıcılarının çelik halatların korozyon direncine ve organik çekirdeğin mukavemetine etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, ASKM-1A denilen çelik halatın korozyona etkisini arttıran ve çevreye herhangi bir zararı olmayan korozyon önleyici bir malzeme geliştirmişlerdir. ASKM-1A bileşiği, Almanya ve Rusya'daki laboratuvarlarda kapsamlı testlere tabi tutulmuş ve Rus halat endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Çalışmada, %10 bakır naftenat (CN) içeren E-1 tipi yağlayıcılarla %3 oranında ASKM-1A içeren SK-1 tipi yağlayıcılar karşılaştırılmıştır.

Korozyon testleri yapıldığında SK-1 tipi yağlayıcının kullanıldığı halatın korozyon hızının diğerine oranla 50 kat daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Piskoty vd. (2009) ise çalışmalarında halat tabanlı sistemlerde 4 farklı halat kaynaklı kaza örneğini ele almışlardır. Her bir kazanın nedenleri ve önlemek için yapılabilecekler açıklanmıştır. Bunlardan en çok üstünde durulan ise bir teleferik kazasıdır. Teleferik sisteminin ana halatı 61 kordondan oluşmakta, dış kısmında ise Z telleri yer almaktadır. Kazanın nedeni bu Z tellerinin kopmasıdır. Çalışmada bu tellerin yüzeyleri manyetik partikül yöntemiyle test edilmiştir.

Díaz vd. (2009), sıcak sülfürik asitle aşındırılmış ve ardından çinko fosfat ve nitrat banyosuna daldırılmış çelik tele elektrokimyasal korozyon uygulamışlardır. Bu şekilde oluşturulan film, esas olarak çinko fosfat, atmosferik korozyona karşı birincil koruma sağlar ve ardından gelen soğuk çekme işlemini geliştirir. Çalışmadaki amaç, ön gerilmeli beton yapılarda en sık görülen hata şekli olan stres korozyon çatlamasının başlangıç sürecini etkileyen olası faktörleri ortaya koymaktır. Soğuk çekilmiş çelik tellere maksimum gerilme mukavemetinin %70'inde sabit gerilim uygulanmış ve pasifleştirici tabakanın stabilitesini incelemek için aşındırıcı ortamlara maruz bırakılmıştır. Klorür konsantrasyonu, sıcaklık, oksijen varlığı ve ultrasonik dalgaların neden olduğu kaviteasyonun etkileri araştırılmıştır. Bu parametrelerin pasif tabakanın oluşumu üzerindeki etkilerini incelemek için iki farklı teknik (döngüsel voltametri ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi) kullanılmıştır. Ayrıca fosfatla kaplanmış yüzeyin enerji dağılımlı X-ray spektroskopisi (EDX) ile kimyasal analizi yapılmıştır. Sonuç olarak, farklı sıcaklıklar için kordonun Tafel eğrileri ve Nyquist diyagramları elde edilmiştir. 0,01 M NaCl içeren oda sıcaklığındaki kordonun döngüsel voltamogram eğrileri maksimum çekme mukavemetine bağlı olarak elde edilmiştir. Sonuçlar, incelenen parametrelerdeki değişikliklerin, çok düşük klorür konsantrasyonlarında bile pasifleştirici tabakanın bozulmasını arttıracaklarını göstermektedir.

İmrak ve Salman (2010), çelik tel halatların, kordon ve tellerinin çekme deneylerini yaparken kullanılabilecek en uygun aparatın seçimi üzerinde durmuşlardır. Yapılan

deneyler sonucu, halat çekme testlerinde uygulanacak en uygun yöntemin halat uçlarına çinko döküm yapılması ve o kısımlardan uygun çekme çeneleri aracılığıyla çekilmesi olduğu belirlenmiştir. Kordon ve tellerin çekme testlerinde ise, kordon veya telin bir makara etrafında döndürülerek çekilmesinin uygun olduğu tespit edilmiştir.

Bir diğer çalışmada Songquan vd. (2011) madenlerdeki korozyon ortamının yük taşıma halatları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yüzey işlemleri yapılmamış tel, yüzey işlemleri yapılmış (zımparalanmış ve parlatılmış) tel ve yağ kaplı tel ayrı ayrı elektrokimyasal yöntemlerle incelenmiş ve aralarındaki farklar belirtilmiştir. Deneyler, 6x19 tipinde halattan alınan tellerin madendeki korozyon ortamını gerçekçi bir şekilde yansıtabilmek için CaSO_4 , MgSO_4 , KCl , Na_2SO_4 ve diğer kimyasallar kullanılarak pH'ı 3,5 olan asidik bir çözelti içine daldırılmasıyla yapılmıştır. Elektrokimyasal test düzeneğinde, Pt yardımcı elektrotu, Ag-AgCl referans elektrotu ve çelik tel numuneleri çalışma elektrotu alınarak üçlü elektrot sistemi kullanılmıştır. Testler sonunda 3 farklı çelik tel için daldırma zamanına bağlı olarak Tafel eğrileri, E_{corr} (korozyon potansiyeli) ile I_{corr} (korozyon akım yoğunluğu) eğrileri ayrı ayrı gösterilmiştir. Sonuç olarak araştırmacılar, yüzey işlemleri yapılmış telin en kötü korozyon direncine sahip tel olduğunu, yağ kaplı telin ise en iyi korozyon direncine sahip tel olduğunu kanıtlamışlardır. Yüzey işlemleri yapılmamış çelik tel üzerindeki yağ kaplaması, çelik tellerin yüzeyinde koruyucu bir etki sağlamaktadır.

Stanova vd. (2011), başlangıç parametreleri tanımlanmış tek katlı ve çift katlı tel halatların matematiksel ve geometrik modellerini oluşturup karşılaştırmışlardır. Türetilmiş geometrik analitik modelin uygulaması sayısal örneklerle gösterilmiştir. Parametrik denklemlerin somut formları türetilmiştir. Türetilmiş matematiksel modelin uygulanması ve çekme testleri altındaki çok katmanlı telin sayısal simülasyonu için bir sonlu eleman modelinin geliştirilmesi çalışmanın bir diğer kısmını oluşturmaktadır.

Liu vd. (2011), 6x19 geometrisine sahip bir çelik halatın tellerini alkali çözelti ile yağlayarak çelik tellerin sürtünmeli korozyon aşınma davranışlarını araştırmışlardır. Sonuçlar, alkali çözelti ile yağlanan tellerin sürtünme katsayılarının yüklemelerden

çok az etkilendiğini, sürtünme çiftlerinin yüzeylerinde var olan elektrokimyasal korozyondan ise büyük ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Çelik tellerin korozyon aşınmasını değerlendirmek için kullanılan aşınma izi derinliği, yükün artmasıyla artmıştır. Yazarlar, alkali çözelti ile yağlanan telin aşınma derinliğinin, kuru sürtünme koşulunda elde edilenden daha fazla, aynı zamanda deiyonize su ve asit çözeltisi ile yağlandıktan daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Korozyon çözeltisinin aşınma üzerindeki etkisi, çelik tel malzemelerin korozyonundan daha güçlüdür.

Kresak, Kropuch ve Peterka (2012), sabit durumdaki çelik tel halatların en kritik yeri olarak kabul edilen bağlantı noktalarının termografik ve akustik metotlarla testlerini yapmışlardır. Yazarları bu metotlara, manyetik yöntemlerin sabit durumdaki halatlarda güvenilir olmayan sonuçlar vermesi itmiştir. Akustik metot halatlara etki eden farklı gerilmelerde, halat kesitlerindeki relatif değişimler hakkında bilgi vermektedir. Her iki yöntemin de halatlardaki kusurları belirleyebilmek için uygun olduğu görülmüştür.

Joung vd. (2013), soğuk çekilmiş ötektoid üstü çelik tellerde çekme gerilmeleri ve deformasyon sonrası tavlama koşullarının yaşlanma davranışı ve delaminasyon oluşumu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Düşük tavlama sıcaklıklarında, kısa bir tavlama süresi için artan çekme mukavemeti, deforme olmuş perlit içindeki kararsız sementitin ayrışmasından kaynaklanan yaşlanma sertleşmesine bağlanmıştır. Yüksek tavlama sıcaklığında çekme mukavemetindeki azalma, sementitin küreselleşmesi veya yeniden çökeltilmesi yoluyla ferritteki karbon içeriğinin azalmasından ve ferritin geri kazanılması veya yeniden kristalleşmesine atfedilecek olan yaşlanma yumuşamasından kaynaklanmaktadır.

Wang vd. (2013) çalışmalarında, kaldırma halatlarının enine kesitleri üzerindeki sürtünme yorulma parametrelerinin ve gerilme dağılımlarının araştırılması ve üç katmanlı halatların sonlu eleman analizleri üzerinde durmuşlardır. Analizlerdeki modeller hem farklı gerilme dağılımlarını hem de aşınma yorulma parametrelerini işaret etmektedir. Yazarlar, çelik tellerin sürtünme aşınma derinliklerini Abaqus ve

ProEngineer ile hesaplamışlar ve deneysel sonuçlarla iyi bir uyum gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Kim vd. (2014) çalışmalarında, korozyona maruz bırakılmış tel halatların eğme yorulması karakteristiklerini araştırmışlardır. Tel halatlarda korozyon nedeniyle iki tip yorulmayla karşılaşılır. İlki, bir korozyon ortamında tekrar eden yüklemeler nedeniyle düşen yorulma dayanımı sonucu oluşan korozyon yorulmasıdır. İkincisi ise, sürtünme ve aşınma nedeniyle oluşan erozyon korozyonudur. Sonuçta, korozyon yorulması halatın kırılmasına neden olur. Araştırmacılar çalışmalarında, 10 mm çapında 8x19 tel halatın %5 NaCl solüsyonu içeren tuzlu su kabinde 5, 15 ve 30 günlük periyotlarda yüzey korozyonunu incelemişlerdir. Tel halat malzemesi yüksek karbonlu çelik tel çubuktan üretilmiş olup çekirdek malzemesi ise Sisal isimli kenevire benzeyen Agavaceae familyasından doğal bir bitki lifidir. Korozyona uğratılan halatların eğme yorulması test cihazında 4 farklı çekme yükünde ve 5 farklı hızda deneyleri yapılmış daha sonra SEM’de kırılma yüzeyleri incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, kırılma mukavemeti değerlerinin 15. güne kadar yavaş bir şekilde azaldığı, 15. ve 30. günler arasında ise hızlı bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Diğer yandan, 30 günlük korozyona maruz bırakılan halattaki kopan tel sayısının, 5 günlüktekine oranla 9 kat fazla olduğu bulunmuştur. Tel halatlar, Sisal çekirdekteki yağlayıcılardan dolayı korozyon direncine sahiptir, ancak teller aşınmaya başladıktan sonra bu direnç hızlı bir şekilde azalmıştır.

Mallick vd. (2014) yaptıkları çalışmada, FLC (Full Locked Coil) olarak tabir edilen dış kısmı Z-profilinden oluşan çelik halatlardaki korozyon davranışını incelemişlerdir. Bu halatlar etkili bir bağlama sistemine sahip olmaları ve kullanım ömrü boyunca aşınmayı minimuma indiren yapıları nedeniyle teleferiklerde, madenlerde çalışan iletim sistemlerinde ve asma köprü halatlarında kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada, madende kullanılan bir sistemdeki farklı yerlerden alınan 24 mm çapındaki 5 halat numunesi çaptaki azalma metodu kullanılarak incelenmiştir. İlk başta halatın her bir tabakasındaki tellerin yapısı hakkında bilgi verilmiş, daha sonra 5 ayrı numunenin her bir tabakası ve çekirdeği için ilk durumundakine göre tel çaplarının kıyaslaması yapılmıştır. Tel halatların uygun koşullarda çalışabilmesi için çapta en fazla %10’luk

bir azalma kabul edilmektedir. Araştırma sonucunda iç kısımdaki tabakalarda (en fazla %3,90) dış kısımdakilere göre (en fazla %2,40) çapta daha fazla azalma olduğu tespit edilmiştir. İç kısımdaki tellerin dış kısımdakilere göre korozyona doğrudan maruz kalmamasına rağmen bu düşüşün nedeni araştırmacılar tarafından teller arasındaki sürtünme ve tabakalar arasındaki yağlama olarak gösterilmiştir.

Peterka vd. (2014), bir sondaj kulesinde kullanılan ve çok kısa bir sürede zarar gören halatın neden bu kadar kısa sürede zarar gördüğünü araştırmışlardır. Olayda sadece üst katmandaki teller zarar görmüştür. Mekanik ve metalografik testlerin ardından halatın mukavemet değerinin üreticinin belirttiği katalog değerinden farklı olması nedeniyle tellerin koptuğu sonucuna varılmıştır.

Bir başka çalışmada Loeve vd. (2014) paslanmaz çelik tel halatların kauçuk dış koruyucusuyla temasından kaynaklanan statik sürtünmeyi incelemişlerdir. Bunun için 1x7, 1x19 ve 7x7 kordon geometrisinde ve 0,18, 0,27 ve 0,45 mm olmak üzere 3 farklı çapta halat ile lateks, nitril ve silikon kauçuk dış koruyucu arasındaki statik sürtünme ölçülmüştür. 3 farklı kauçuk tipinin tasarlanan aparat ile Shore sertliği ölçülmüş ve ortalama yüzey serbest enerjileri bulunmuştur. Lateks kauçuğun en uygunu olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile amaç, özellikle endoskopi ve kolonoskopi gibi tıp uygulamalarında çelik tel halatların burularak organa zarar vermesinin önüne geçmektir.

Kastratovic vd. (2014), çoğunlukla sapan halat olarak kullanılan 7×19 Warrington Seale tipi halatın sonlu eleman modellemesinin bazı yönlerini araştırmaktadırlar. Sayısal analiz sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar mevcut literatürden hesaplanan çözümlerle karşılaştırılmıştır. Son olarak, sapan tel halatlarının mekanik davranışının daha iyi anlaşılmasını ve dolayısıyla tahmin edilmesini sağlamak için yazarlar, gelişmiş modelleme tekniklerini kullanarak, 7×19 halatın parametrik 3B modelini de sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz etmişlerdir.

Peng ve Wang (2015), dış yüzeyi plastikle kaplanmış çelik tel halatlardaki gözle görülmeyen bozulmaların radyasyon testleriyle ve elektromanyetik testlerle incelenmesi üzerine çalışmışlardır. Radyasyon testlerinde belirlenmiş parametreler; yoğunluk, uzaklık ve zamandır. Elektromanyetik testlerde ise çelik halat kalınlığı ile yoğunluk x zaman ilişkisi üzerinde durulmuştur. Yapılan testlerle özellikle asma köprülerdeki halatların güvenliğinin sağlanmasında bu yöntemlerin mühendislere oldukça yardımcı olduğu görülmüştür.

Meknassi vd. (2015), aynı halat tipine ait tek bir teli H_2SO_4 çözeltisine yatırmışlar ve sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Yapılan çekme testleri sonucu korozyona uğrayan halat tellerinin korozyona maruz kalmamış halat telleriyle karşılaştırılması grafiksel olarak ve çaptaki kayıp oranı ile beraber sayısal olarak verilmiştir. 40 saatlik bir yaşlandırma işlemi sonrası tel çapında %80'e varan bir azalma olduğu görülmüştür.

Fontanari vd. (2015), Warrington Seale kordonlarının ve ayrıca polimerik fiber çekirdekli bir Warrington Seale halatının mekanik davranışını incelemişlerdir. Hem Warrington Seale kordonları hem de halatlar üzerinde çekme testleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlara dayanarak doğrulanan sayısal simülasyonlar, yükün teller arasında nasıl dağıldığını göstermektedir.

Fontanari vd. (2015) bir başka çalışmalarında, inşaat ve teleferik uygulamaları için kullanılan çelik halatların yangın direncini belirlemek için bir yöntem geliştirmek amacıyla yangın koşulları altındaki tel halatların mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Yangın senaryolarını temsil eden şiddetli termal geçişlere maruz kalan halatların davranışları, sayısal ve deneysel analizlerle incelenmiştir. Bu amaçla hem tam kilitli hem de Warrington Seale halatlarının termo-mekanik tepkisini simüle edebilen parametrik sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir.

Meknassi vd. (2016) yaptıkları bir diğer çalışmada ise, sülfürik aside maruz bırakılan tel halat kordonlarındaki korozyon etkisinin deneysel incelemesini yapmışlardır. Amaçları, madenlerde bulunan iletim sistemlerindeki çelik halatların çalıştığı asitli ortamı deneysel olarak oluşturup bu ortamın halatlar üzerindeki

etkilerini araştırmaktır. Test numunesi olarak 8 mm çapında 19x7 dönmez halattan alınan kordon kullanılmıştır. Bu kordon 300 mm uzunluğunda ve 7 çelik telden oluşmaktadır. Kordonun 100 mm'lik kısmı oda sıcaklığında %30'luk H₂SO₄ çözeltisine yatırılmıştır. Araştırmacılar 8, 16, 24 ve 32 saatlik daldırma süreleri belirlemişlerdir. Yapılan çekme testleri sonucu korozyona uğrayan kordonların korozyona maruz kalmamış kordonlarla karşılaştırılması grafiksel ve sayısal olarak verilmiştir.

Baoyu vd. (2016), %3,5 NaCl içeren solüsyonda, yüzey kaplaması yapılmış tellere elektrokimyasal testler uygulamışlardır. 0,5 mm çapında Q195 çelik teller, yeni geliştirilmiş sürekli kaplama prosesi ile (Zr_{41.2} Ti_{13.8} Cu_{12.5} Ni₁₀ Be_{22.5})_{100-x} Nb_x (x=0,3,5,8) metalik cam alaşımıyla kaplanmış ve Nb içeriğinin korozyondaki etkisi incelenmiştir. Bunun için bir potansiyodinamik polarizasyon yöntemi olan Tafel ekstrapolasyon yöntemi kullanılmıştır. Bunun sonucunda Tafel eğrileri ve E_{corr}, I_{corr}, E_{pit} değerleri bulunmuştur. Ayrıca enerji dağılımı spektroskopisi (EDS) ile çukurlardaki element dağılımları, X-ışınları difraksiyonu (XRD) ile faz analizleri ve SEM ile de yüzey morfolojisi incelenmiştir. Yazarlar çalışma sonucunda, alaşımdaki Nb miktarının arttıkça I_{corr} değerinin azalacağını dolayısıyla korozyon direncinin artacağını tespit etmişlerdir.

Singh vd. (2016), yeraltı kömür madenlerinde kullanılan çelik halatların arıza davranışları üzerine çalışmışlardır. Bunun için yazarlar, iki farklı Hint kömür madeninden iki tel halat alıp arıza nedenlerini incelemişlerdir. Tel halatlar yüksek gerilme seviyelerinde çalışmakta ve neredeyse her zaman değişken yüklere maruz kalmaktadır. Operatif hizmetlerden etkilenen tel halatın sürekli bozulması, sonuçta arızaya yol açacaktır. Bu çalışma için incelenen parametreler; fiziksel muayene, aşınma ve korozyon, yağlama, makro ve mikro inceleme ve kimyasal bileşimden oluşmaktadır. Araştırma, arızanın ana nedeninin aşırı aşınma ve korozyon nedeniyle halat çapında %50-90 arasında değişen azalma ve tel halatın zayıf yağlama koşulundan kaynaklandığını ortaya koymaktadır.

Molnár vd. (2017), denizcilikte kullanılan çelik halatların ömürlerini belirleyebilmek için %3,6 NaCl içeren tuzlu su solüsyonunda bekletilen halatların ve halat tellerinin mekanik testlerle korozyon davranışını incelemişlerdir. Halat çapı 18 mm, tel çapı 0,8 mm, çekirdek malzemesi polipropilen olan 6x37 Standart tipi halat seçilmiştir. Numuneler 16, 32, 48 ve 64 günlük periyotlarla korozyona maruz bırakılmıştır. Yüzeydeki korozyon etkisi 16 gün sonra gözle görülür hale gelmiştir. Son olarak halat için çekme testi, teller için de çekme, eğme ve burulma testleri yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları ile hesaplanan kopma mukavemeti değerleri karşılaştırılarak kritik değerin altında kalan süreler halatın ve tellerin ömürlerinin belirlenmesinde temel alınmıştır.

Uslu vd. (2017), farklı alaşımların korozyon davranışlarını elektrokimyasal yöntemlerle incelemişlerdir. Elektrokimyasal ölçümler %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde potansiyostat/galvaniyostat cihazında 1 mV/s tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen Tafel eğrilerinden I_{corr} ve buna bağlı olarak korozyon hızı değerleri bulunarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlardan, alaşımlardaki farklı bileşiklerin korozyon direncine yaptıkları etkiler ve oluşan mikro galvanik yapı değerlendirilmiştir.

Peterka vd. (2017), teleferik çekme halatlarındaki dayanıklılık üzerine çalışmışlardır. Halat dayanıklılığı, kren operatörünün temel bir gereksinimidir. Halatların tahribatsız testlerini gerçekleştirmek, operasyonlar sırasında halatların gerçek durumunu tespit etmenin en iyi yoludur. Ek olarak, halat yükü parametrelerini de gözlemlemek mümkündür. Bu veriler, spesifik çekme halatı işini ifade etmek için kullanılabilir. Bu parametre, halat uzunluğu yoğunluğu ile ilgili olarak yapılan işin miktarını verir. Böylece, izlenen belirli aralıklardan sonra çekici halat işi emilimini değerlendirmek mümkündür. Bu çekici halat işi ifadesi, dolaylı olarak halat yapım kalitesinin, halat çekirdeğinin ve kullanım ömrünün birlikte değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Ayca ve Onur (2018), sıklıkla asansörlerde kullanılan 6x19 Standart halat için 3 farklı hasar tipi belirleyerek her biri için çekme testleri yapmışlardır. Testler sonucu halatların çekme mukavemetlerindeki düşüş karşılaştırılıp asansörler için halat seçim

kriterleri üzerinde durulmuştur. En kritik hasar tipi, 16 saat boyunca H_2SO_4 solüsyonunda korozyona maruz kalma olarak tespit edilmiştir.

El-Amoush ve Al-Duheisat (2018), farklı ön gerilme şartları altındaki beton yapılar da kullanılan çelik tellerin katodik polarizasyon davranışlarını incelemiştir. Çelik tel çekme numunelerine elektrikli bir fırında $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 30 dakika gerilim giderme tavı uygulanmış ve ardından maksimum çekme mukavemetinin %20, %40, %60 ve %80'i oranında ön gerilme uygulanmıştır. Elektrokimyasal deneyler için hazırlanan elektrokimyasal hücrede çalışma elektrodu olarak çelik tel numunesi, karşıt elektrot olarak platinyum, referans elektrot olarak doymuş kalomel seçilmiştir. Deneyler sonucu elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrilerine göre ön gerilme miktarı arttıkça korozyon akım yoğunluğu artmakta, dolayısıyla korozyon hızı da artmaktadır. Bir sonraki aşamada, %80 ön gerilmeye sahip numunelere -500, -1000, -1250 ve -1500 mV değerlerinde katodik polarizasyon uygulanıp çekme testine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen Hooke diyagramları sonucu, katodik polarizasyon potansiyelinin düşmesi ve ön gerilme miktarının artmasıyla yapısal çelik tellerin mekanik özellikleri ve korozyon dayanımları düşmektedir.

Wu vd. (2018) yaptıkları çalışmada, zemin destek sisteminde kullanılan yüksek karbonlu çelik kablo cıvatalarındaki çevresel faktörlerin gerilmeli korozyon çatlaması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Hidrojen sülfür kullanılarak oluşturulan korozyon ortamının malzemede hidrojen gevrekliğine yol açtığı tespit edilmiştir. Kablo cıvatalarının galvanizle kaplanmasının ise gerilmeli korozyon çatlamasına karşı ciddi bir koruma sağladığı sonucuna varılmıştır.

Bir diğer çalışmada ise Fujii vd. (2019), 304 tipi östenitik paslanmaz çelikten pürüzsüz bir yüzey üzerinde taneler arası gerilmeli korozyon çatlamasını araştırmak için kristalografik ve mekanik analizler kullanmışlardır. Korozyon ortamı için pH'ı 3 olan %1 tetrasyonat solüsyonu kullanılmıştır. GKÇ için helisel çeki yaylı bir düzenek tasarlanmış ve testler bir yük hücresine sahip olan bu cihazda yapılmıştır.

Chang vd. (2020) çalışmalarında, farklı korozyon türlerinin (tatlı su, deniz suyu ve seyreltik sülfürik asit) tel halatın sürtünme, aşınma ve dayanım özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Ayrıca korozyon ve aşınmanın halat numunelerinin artık mukavemeti üzerindeki etkileşimlerini analiz etmişlerdir. Deniz suyu korozyonunun, tel halatın yorulma direncini azalttığını ve tel halatın sülfürik asit korozyonu ile aşınmasının da aynı kayma koşulları altında en şiddetli korozyona neden olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuçlar, korozyonun, tel halatın sürtünme katsayısı ve sıcaklık artışı üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu göstermektedir. Ek olarak, yüzey korozyonu halatın aşınma önleyici özelliklerini ve yorulma direncini azaltmıştır.

Chang vd. (2022) bir diğer çalışmalarında, bir kaldırma sisteminde kullanılmakta olan çelik halatın tribolojik özelliklerini belirleyebilmek için, farklı yağlama ve korozyon koşullarına sahip tel halatın sürtünme katsayısı, sürtünme sıcaklık artışı ve yüzey aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Deneyler tatlı su (pH 7), %3,5 tuzlu su (pH 8) ve seyreltik sülfürik asit (pH 3,5) çözeltileri için yapılmıştır. Sonuçlar, yağlanmış tel halatların sürtünme parametrelerinin nispeten küçük olduğunu ve bu parametrelerin kayma stroğu ve hızından açıkça etkilendiğini göstermiştir. Halat numunesi deniz suyu ve seyreltik sülfürik asit çözeltisi ile aşındığında, yağla yağlanan tel halatın sürtünme sıcaklığı büyük ölçüde artmıştır. Sonuç olarak, seyreltik sülfürik asit çözeltisi, tel halat için kullanılan yağlama gresinin ve yağının azalmasına neden olmuştur. Bu nedenle aşınma direnci en düşük olan ortam sülfürik asit çözeltisidir. Bunu deniz suyu çözeltisi ve tatlı su çözeltisi izlemiştir.

Yang vd. (2022) çalışmalarında, farklı korozyon derecelerine sahip 6×19 çelik halatların monotonik çekme ve histeretik davranışlarını analiz ederek deniz suyuyla aşındırılan tel halatın makroskopik mekanik davranışlarını araştırmışlardır. İlk olarak, tel halat numuneleri tam daldırma elektrokimyasal korozyon deneyine tabi tutulmuş, bu da korozyon dağılımının düzensiz olduğunu ve korozyonun tel halattaki yarıklar yoluyla dış tellerden iç tellere doğru ilerlediğini ortaya çıkarmıştır. Taramalı elektron mikroskobu ile korozyondaki artışın tel halatın yüzeyindeki mikroskobik çatlakların sayısını, uzunluğunu ve derinliğini arttırdığını tespit etmişlerdir. Korozyon arttıkça, taşıma ve deformasyon kapasiteleri önemli ölçüde azalır ve kırılma modu sünek

kırılmadan gevrek kırılmaya değişir. Çalışmada, korozyona uğramış bir tel halatın sabit gerilme-gerinim dngsnn mekanik özelliklerine ve etki faktörlerine dayanarak, yükleme ve boşaltma eğrisinden oluşan histeretik bir mekanik model önerilmiştir. Önerilen model deneysel veriler kullanılarak doğrulanmış ve korozyon derecesinin ve yükleme genliğinin bir tel halatın histeretik özellikleri üzerindeki etkisini doğru bir şekilde yansıtılmıştır.

Zhang vd. (2022), yüzeyinde belirli miktarda klorür iyonu bulunan Galfan kaplı tam kilitli bobin halatının korozyonunu simüle etmek için sabit sıcaklık ve nem korozyon testleri yapmışlar ve erken korozyon hızlarını elde etmişlerdir. Daha sonra, havuz ortamında bobin halatının korozyon hızını tahmin etmek için nötr tuz püskürtme ile hızlandırılmış korozyon testi yapılmıştır. Numuneler, gerilimsiz korumasız kaplama kablosu, yüksek gerilimli korumasız kaplama kablosu ve yüksek gerilimli korumalı kaplama kablosu içermektedir. Sonuçlar, yüksek gerilmenin korozyonu hızlandıracağını ve koruyucu bir kaplamanın korozyonu etkili bir şekilde önleyebileceğini göstermektedir.

1.3 Amaç ve Kapsam

Literatürdeki çalışmalara benzer şekilde, bu tezde sunulan araştırma çalışması, yük taşıma halatlarının nem, tuzlu su, asit gibi korozif ortamlardaki davranışlarına ve bu ortamlardaki olumsuz etkilerin nasıl azaltılabileceği konularına odaklanmaktadır.

Bu tezde sunulan araştırma çalışması ile temel olarak;

- Çevresel korozyona açık ortamlarda kullanılan krenlerdeki yük taşıma halatlarında oluşan korozyonu tespit etmek,
- kaplama, boya gibi yöntemlerle korozyon direncini yükseltmek,
- mekanik testler ile halat mukavemetindeki değişimi belirlemek,

- gerilmeli korozyon test cihazının tasarımının yapılıp üretiminin sağlanması,
- halatlarda meydana gelecek gerilmeli korozyon çatlamasını gerçeğe en yakın koşullarda elektrokimyasal olarak test edebilmek,
- madencilik sektöründe kullanılan halatlar da korozyona maruz kaldığı için buradaki ortam düşünülerek H_2SO_4 etkisi altında korozyon testlerinin yapılıp incelenmesi amaçlanmıştır.

Yukarıda belirtilen amaçlardan hareketle sunulan tez kapsamında aşağıdaki araştırma çalışmaları yapılmıştır:

Tez çalışmasının ilk basamağında; korozyon davranışı, malzeme kütleindeki değişim, mekanik deneyler, elektrokimyasal yöntemler ve yüzey karakterizasyonu olmak üzere dört temel başlık altında incelenmiştir. Çelik halatların korozyona maruz kaldıktan sonra; mekanik deneyler ile halat mukavemetindeki kayıp, malzeme kütleindeki değişim ile ilk duruma göre halat tellerindeki çap incelmesi, elektrokimyasal yöntem (Tafel ekstrapolasyon yöntemi) ile de doğrusal korozyon hızındaki değişim bulunmak istenmiştir.

Tez çalışmasının ikinci basamağında; belirlenen halat tiplerine gerilmeli korozyon çatlaması (GKÇ) uygulanmıştır. Seçilen halat tiplerine uygun olarak tasarlanıp üretilen bir gerilmeli korozyon test cihazı ile halatların ASTM G49 standardı baz alınarak ön gerilmeli korozyon testleri yapılmıştır.

Tez çalışmasının üçüncü ve son basamağında; birinci ve ikinci basamakta elde edilen verilere göre halatlara korozyona karşı uygun iyileştirme yöntemleri uygulanmıştır. Uygulanan bu yöntemlerin sonuçları ilk durumdaki sonuçlarla karşılaştırılarak korozyona karşı yapılan iyileştirmenin derecesi belirlenmiştir.

Tez çalışmasının sonuçlanması ile kısa vadede; transport ve madencilik sektörlerinde faaliyet gösteren özel ve kamu şirketlerinin korozyon direnci daha

yüksek olan halat tiplerini tercih etmesi hedeflenmektedir. Bu da yapılan deneylerin çıktıları ile mümkün olacaktır. Tüm halat tiplerine sırasıyla hızlı yaşlandırma test cihazında yaşlandırma testi, Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile elektrokimyasal korozyon testi, mekanik testler ve gerilmeli korozyon testleri uygulanmıştır. Bu deneylerin sonuçlarının sentezi ile halatların farklı koşullardaki korozyon ömürleri karşılaştırılmıştır.

Orta vadedeki hedef; firmaların tercih ettikleri halat tiplerine korozyona dirençli boya ve sıcak daldırma galvanizle kaplama uygulanarak halatların korozyon dirençlerinin artırılmasıdır. Yani birinci aşamada belirlenen korozyon direnci yüksek halatların, ek tedbirler ile mevcut direncinin artırılarak korozyona karşı yüksek dayanıklı hale getirilmesidir. Burada aynı zamanda çinko oranı yüksek boya ile sıcak daldırma galvanizle kaplamanın korozyona karşı etkilerinin karşılaştırılması da amaçlanmıştır.

Uzun vadede ise; bu yapılan uygulamalar neticesinde korozyon nedeniyle oluşan maliyetlerin azaltılarak firmaların ve ülke ekonomisinin ekonomik kazanç elde etmesi hedeflenmektedir.

1.4 Tez Planı

Sunulan tez, aşağıdaki şekilde düzenlenen beş adet bölümden ve bir adet ekten oluşmaktadır:

- Birinci bölümde, tezin amaç ve kapsamı üzerinde durulmuş olup ayrıca tez konusu ile ilgili literatürde yapılmış ulusal ve uluslararası çalışmalara yer verilmiştir.
- İkinci bölümde, yük taşıma halatlarından bahsedilmiştir. Bölüm, çelik tel halatların tarihsel gelişimi ile başlayıp sırasıyla yapısı, elemanları, farklı özelliklerine göre sınıflandırılması ve tel halat hesabı konu edilmiştir.

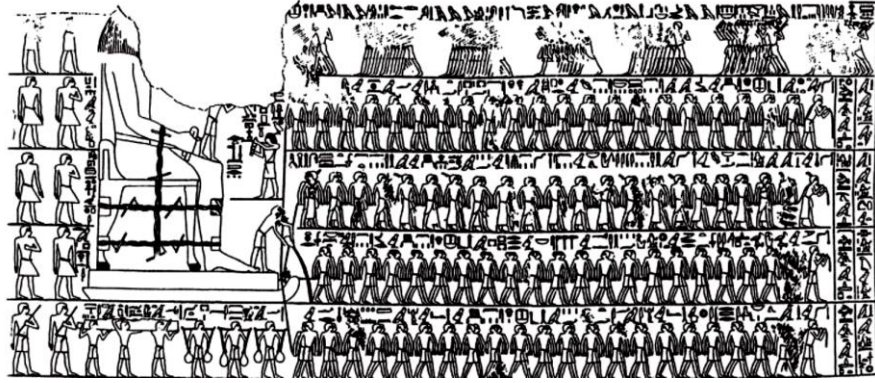
- Üçüncü bölümde, malzemelerin korozyonu üzerine değinilmiştir. Korozyonun tanımı yapıp etki mekanizmasından bahsedildikten sonra özellikle gerilmeli korozyon çatlaması üzerinde detaylıca durulmuştur. Ayrıca farklı elektrokimyasal yöntemler açıklanıp tezde sıklıkla bahsedilen Tafel ekstrapolasyon yöntemi üzerine değinilmiştir.
- Dördüncü bölümde, bu tez çalışması kapsamında uygulanan deneysel yöntemler materyal-metot ve sonuçlar başlıkları altında ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu yöntemler sırasıyla, malzeme kütlesindeki değişim yöntemi ile korozyon dayanımının incelenmesi, Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile korozyon dayanımının incelenmesi, mekanik deneyler ile korozyon dayanımının incelenmesi, gerilmeli korozyon çatlaması ile korozyon dayanımının incelenmesi ve yüzey karakterizasyonu ile korozyon dayanımının incelenmesidir.
- Beşinci bölümde, araştırma çalışması genel hatlarıyla özetlenmiş, önemli bulgular vurgulanmış ve gelecekteki araştırmalar için bazı öneriler sunulmuştur.
- Ek-1’de, bu tez çalışmasından yapılmış yayınlara yer verilmiştir.

BÖLÜM İKİ

YÜK TAŞIMA HALATLARI

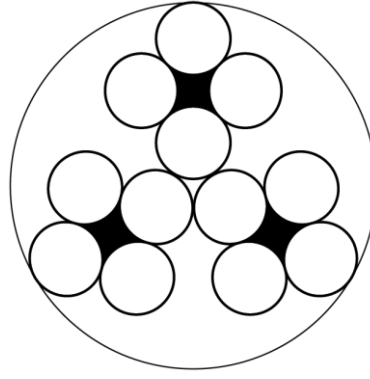
2.1 Giriş

Medeniyet tarihinin ilk aletlerinden biri olan halatlar ilk olarak saçtan ve farklı bitkilerin malzemelerinden yapılmıştır. Halatların en eski örnekleri yaklaşık MÖ 12000-9000'e tarihlendirilmiştir. Finlandiya'da bulunan halatların kalıntılarının Orta Taş Devri'nden (M.Ö. 9000-3000) kaldığı, Mısır'da bulunan ve deve tüyünden yapılan örneklerin ise 4000 yıldan daha eski olduğu varsayılmaktadır. Mısır'daki Şekil 2.1'de görüldüğü gibi bazı duvar resimleri palmiye, deri ya da papirüs elyafından halatların üretiminin yapıldığını göstermektedir (Verreet, 2018).



Şekil 2.1 Mısır hiyerogliflerinde halat uygulaması (Verreet, 2018)

Bugün kullanılan halatlara en yakın örnek, Almanya'da maden mühendisi Wilhelm Albert tarafından 1834'te üretilmiştir. Şekil 2.2'de kesit görünümü verilen bu ilk halat, günümüzdeki gibi kordonların örülmesiyle elde edilmiştir. Bu halatın üretilmesi için yapılan araştırmalarda, halatın yeteri kadar elastik ve yüksek mukavemetli olması, aynı zamanda sürekli tekrarlanan bükülmeye karşı da dayanıklı olması amaçlanmıştır. Bu amaçla üretilen ilk tel halat konstrüksiyonu, dörder telden oluşan üç kordonun bir araya getirilmesi ile sağlanmış ve daha çok kömür madenlerinde kullanılmıştır. Bu halat literatüre Albert halatı olarak geçmiştir (Ernst, 1973).



Şekil 2.2 İlk üretilen halat tipi olan “Albert Halatı”

1840 yılında, İskoç Robert Stirling Newall süreci daha da geliştirmiştir. Muhtemelen tel halatın en önemli gelişimi, 1884'te Tom Seale tarafından paralel döşemeli kordonun icadıdır. Tom Seale, California valisi Leland Stanford'a ait San Francisco Teleferiği'nin müdürü olup mucidi olduğu kordonu bu işletmede kullanmıştır. California Street Line isimli bu teleferik halen faaliyettedir. İcat edilen kordon tipi de Seale olarak literatüre geçmiştir. Ardından Büyük Britanya'nın Warrington şehrinde John Roebling tarafından Warrington kordon tipi oluşturulmuştur. Bu girişimler neticesinde Amerika'da çeşitli gelişmeler kaydedilerek tel halatların asma köprülerde ve sanayinin her alanında kullanılmasının önü açılmıştır (Verreet, 2018).

2.2 Yük Taşıma Halatlarının Yapısı

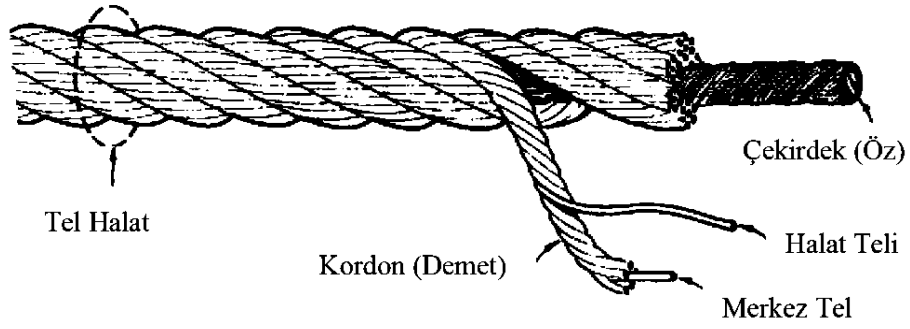
Transport ve kaldırma makinelerinde en fazla zorlanan eleman, yük taşıma elemanlarıdır. Bu amaçla kaldırma makinelerinde çelik tel halatlar daha önceleri sıklıkla kullanılan zincirlerin yerini almıştır. Zincirlere nazaran tel halatların ağırlıkları azdır ve yüksek hızlarda kullanılabilmelerine rağmen gürültüsüz çalışırlar. Çelik halatlarda, zincirlerdeki gibi ani kopmalar olmadığından dolayı ve ilk başta kordonun veya halatın tamamı yerine tek tek tellerin kopması nedeniyle tel halatların mukavemetleri daha yüksektir. Zincirlere göre olumsuz yönü ise, halatların daha büyük sarılma çaplarına ihtiyaç duymalarıdır (Ernst, 1973).

Yük taşıma sistemlerinde zincir sistemlerinden halat sistemlerine geçişte ilk tercih edilen halat tipi kendir halat olmuştur. Kendir halatların yük taşıma gücü azdır. Orta işletmelerde bile büyük çaplara ve bu nedenle uzun tamburlara ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle günümüzde sadece el palangalarında, hafif çıkırıklarda ve küçük asansörlerde kullanılmaktadırlar. Ancak yapıları nedeniyle yükleri bağlamaya ve kancaları asmaya çok elverişlidirler (Çiçekoğlu, 1972).

Günümüzde artık kaldırma ve iletim sistemlerinin tamamına yakınında kullanılan çelik tel halatların en önemli avantajı, eğilme ve burulma rijitliklerinin oldukça düşük olması nedeniyle büyük eksenel kuvvetleri kolaylıkla taşıyabilmeleridir. Tahrik sistemlerinin farklı zorlanmalara ne derece maruz kaldığını belirtmek için yük kolektifi kavramından yararlanılmaktadır. Yük kolektifine göre iletim sistemleri hafif işletme, orta işletme ve ağır işletme şartlarına uygun olacak şekilde üç kısımda incelenmektedir. Son teknolojik imkanlarla üretilen çelik tel halatlar bu üç işletme tipinin tümüne uygun şekilde tasarlanmaktadır.

Çalışma sırasında ortaya çıkan aşınma ve korozyon olayının dışında yorulma ve nemin etkisi ile mukavemetlerinden pek bir şey kaybetmemektedirler. Yükün halat içindeki çok sayıda tele dağılması nedeniyle oldukça emniyetlidirler. Tel halatlar yüksek çalışma hızlarında çalıştırılabilirler, kendi ağırlıkları ile taşıma kapasiteleri arasında uygun bir oran mevcuttur ve büyük bir elastik uzama miktarına sahiptirler. İşletme sırasında kolaylıkla gözle kontrol edilmeleri mümkündür. Tel halatların taşıma kapasiteleri ve çalışma özellikleri düşük sıcaklıklarda değişmemektedir. Yalnız lif çekirdekli halatlarla 100 °C, çelik çekirdekli halatlarla ise 250 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çalışılmamalıdır. Alçak ve yüksek sıcaklıklarda halat ucu bağlantısının kontrolü çok dikkatli yapılmalıdır (Demirsoy, 2015).

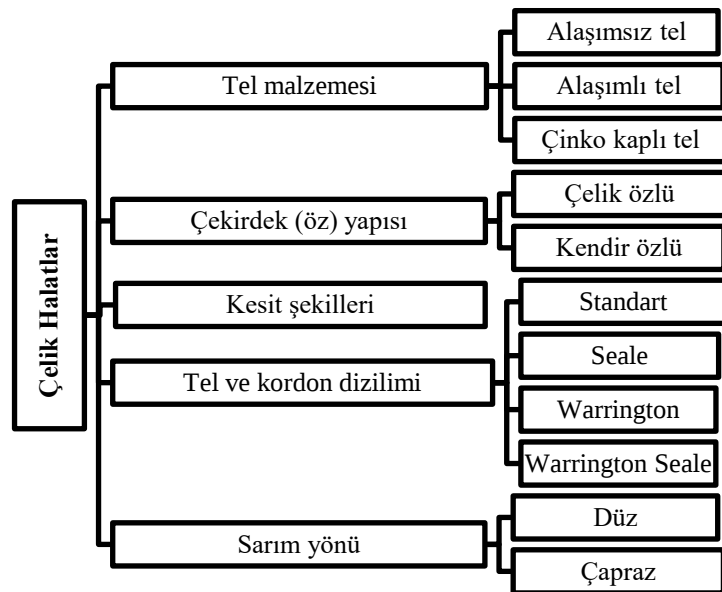
Şekil 2.3'te bir çelik halatın yapısı görülmektedir. Teller bir merkez (öz) tel etrafında bir araya gelerek kordonları, kordonlar ise bir çekirdek etrafında helis şeklinde dolanarak halatları meydana getirmektedir.



Şekil 2.3 Bir çelik halatın yapısı (Hardin, 1998)

Yük taşıma halatları yüksek mukavemetli ince çelik tellerden oluşmaktadır. Kullanılan çelik teller, oksijen çeliğinden veya Siemens Martin çeliğinden üretilmektedir. Siemens Martin çeliği hurda malzemenin geri dönüştürülmesiyle elde edilmektedir ve uygulanan yöntem de yine bu isimle anılmaktadır. Teller, çapları 5,5 mm ile 16 mm aralığında değişen yüksek karbonlu filmaşınlerden imal edilmektedirler. Filmaşın, sıcak haddeleme yöntemiyle üretilen ve çoğunlukla yuvarlak malzemelerin üretiminde kullanılan kangal şeklinde kullanıcılara sunulan yarı mamül malzemedir. Filmaşınlerin saflık derecesi, kullanılacağı yerin özelliklerine göre seçilmektedir.

2.3 Yük Taşıma Halatlarının Sınıflandırılması



Şekil 2.4 Çelik halatların sınıflandırılması

Yük taşıma halatlarını tek bir başlık altında sınıflandırmak yerine 5 ana başlık altında sınıflandırmak çelik halatların farklı fonksiyonlarını anlamlandırmak adına daha uygun olacaktır. Bu ana başlıklar; tel malzemesine göre yük taşıma halatları, çekirdek (öz) yapısına göre yük taşıma halatları, kesit şekillerine göre yük taşıma halatları, tel ve kordon dizilimlerine göre yük taşıma halatları ve sarım yönüne göre yük taşıma halatlarıdır. Bunlar Şekil 2.4’te detaylı olarak gösterilmiştir.

2.3.1 Tel Malzemesine Göre Yük Taşıma Halatları

Çelik halatlar tel malzemelerine göre; alaşımsız tel, alaşımlı tel ve çinko kaplı tel olmak üzere 3 kısımda incelenirler. Alaşımsız tel, yapısında %0,4 - %0,9 oranında karbon bulundurmakla beraber mangan, silisyum, fosfor ve kükürt elementlerinden oluşurlar. İçeriğinin büyük bir kısmını Mn ve Si oluşturmaktadır. Artan karbon miktarı ile telin mukavemeti artmakta, ancak elastik uzaması ile eğilme ve burulma kabiliyeti azalmaktadır (Demirsoy, 1999). Parlak alaşımlı tel, bu elementlerle beraber krom, nikel, molibden, titanyum gibi alaşım elementlerini de bünyesinde bulundurmaktadır. Bu elementler halatın korozyona, ısıya ve aşınmaya dayanıklı bir yapı sergilemesini sağlarlar. Çinko kaplı teller ise, korozyon dayanımını arttırabilmek için tellerin üzerinin son çekme işleminden sonra çinko ile kaplanmasıyla elde edilirler. Günümüzde üretilen çelik tel halatların kimyasal bileşimleri yaklaşık olarak Tablo 2.1’de verilmiştir. Bu tabloya bakarak çelik halatların çoğunlukla karbon, mangan ve silisyum elementlerinden oluşan bir yapıya sahip olduğunu söyleyebiliriz.

Tablo 2.1 Çelik tel halatların kimyasal bileşimi (Chang vd., 2020)

Karbon	%0,40 - %0,90
Mangan	%0,30 - %0,70
Silisyum	%0,10 - %0,30
Kükürt	maksimum %0,04
Fosfor	maksimum %0,04
Krom + Nikel + Bakır	maksimum %0,25

Tel çapları 0,4 mm ile 2,4 mm aralığında değişmektedir. Halatın esnekliği, tellerin çapı ile yakından ilgilidir. İnce telli bir halat, kalın telli bir halattan çok daha esnek ve

eğilmeye elverişlidir. Bu bakımdan daha küçük çaplı bir makara veya tambur üzerine kolayca ve bir zarara uğramadan sarılabilir.

2.3.2 Çekirdek (Öz) Yapısına Göre Yük Taşıma Halatları

Halat çekirdeği, etrafına bir halatın kordonlarının helisel olarak sarıldığı halatın merkezi elemanıdır. Kaldırma ve iletim sistemlerinde kullanılan çelik halatlarda, öz malzemesi olarak çelik veya fiber (elyaf) teller kullanılmaktadır.

Fiber özler; doğal fiberlerden veya sentetik fiberlerden yapılabilir. Fiber çekirdekler, nispeten büyük miktarda yağlayıcı depolayabilme avantajına sahiptir. Kordonlar yumuşak bir şekilde desteklenir. Elyaf çekirdeği iyi yuvarlatılmış ve düğümsüz olmalıdır. Bir tel halatın ömrü boyunca, fiber çekirdeğin çapı azalacaktır. Çap kaybı doğal ve polipropilen fiber özler için yaklaşık %3 - %5 ve poliamid fiber özler için yaklaşık %0,5 - %1'dir. Bu nedenle, teller arasındaki boşluk, aralarında herhangi bir güçlü basınç oluşmasını önleyecek kadar büyük olmalıdır. Tel halatın dayanıklılığı büyük ölçüde lif çekirdeğinin boyutundan ve biçiminden etkilenir (Feyrer, 2015). Doğal fiber olarak günümüzde daha çok kendir kullanılmaktadır.

Çelik tel kordon özleri, bir veya daha fazla sayıdaki tellerden oluşmaktadır. Çelik çekirdekler, bir tel halat veya normalde bağımsız bir tel halat olarak düzenlenmiş çelik tellerden yapılır. Çelik tel halat çekirdeği, fiberlerle veya katı polimerle kaplanabilir. Tel halat çekirdekleri ayrıca dış teller ile paralel olarak kapatılabilir ve bu paralel kapalı halatlar genellikle "çift paralel halatlar" olarak adlandırılır.

Fiber çekirdekli tel halatların aksine, bağımsız çelik çekirdekli tel halatlar, halat kasnakların üzerinden geçerken yanal halat hareketlerini önlemek için dış halatlar arasında yalnızca çok az açıklığa sahip olmalıdır. Polimer ile kaplanmış çelik özlü tel halatlar ve çelik çekirdekli dış halatlara sarılmış tel halatlar, kaplanmamış bağımsız tel halat özlü tel halatlardan daha iyi bükülme dayanıklılığına sahiptir. Burada, dış teller arasında sadece küçük bir açıklığa sahip olmak gerekli değildir. Bunun nedeni, bu durumda dış şeritlerin, lif özlerinde olduğu gibi çekirdek tarafından çok iyi

yataklanmış olmasıdır (Feyrer, 2015). Tel özlü halatlar, fiber özlü halatlara göre ani yüklere karşı dayanımları düşüktür ve daha düşük rezilyans değerlerine sahiptirler.

Çelik halatlarda korozyonun etkisi göz önüne alındığındaysa çekirdek malzemesine göre sınıflandırma önemli rol oynamaktadır. Çünkü kendir (lif) ve çelik özün nemi tutma oranları farklıdır.

2.3.3 Kesit Şekillerine Göre Yük Taşıma Halatları

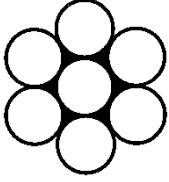
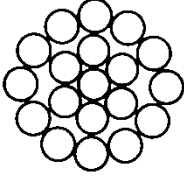
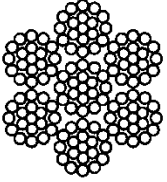
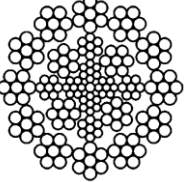
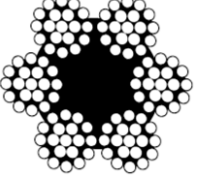
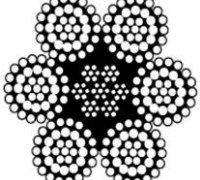
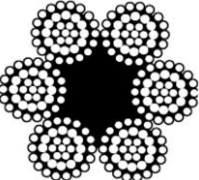
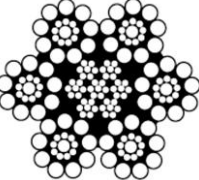
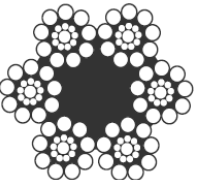
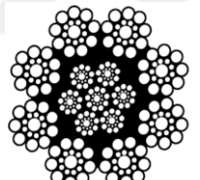
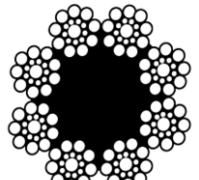
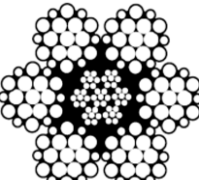
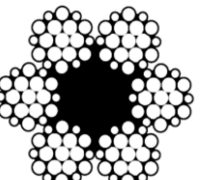
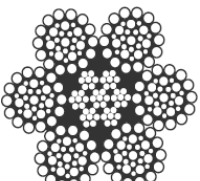
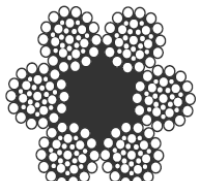
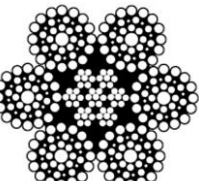
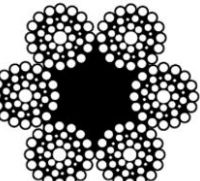
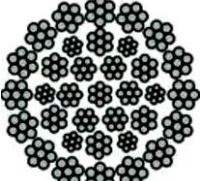
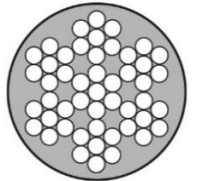
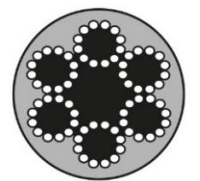
Çelik halat tellerinin kesit şekilleri bulundukları ortama ve konstrüksiyona göre değişmektedir. Başlıca tel çeşitleri; yuvarlak tel, Z (S) teli, kama (trapez) tel, üçgen tel, birleştirilmiş üçgen tel, I teli, yassı tel ve oval teldir. Ancak günümüzde asansörlerde ve krenlerde sıklıkla kullanılan tel kesit şekli yuvarlak teldir.

2.3.4 Tel ve Kordon Dizilimlerine Göre Yük Taşıma Halatları

Kordonlar farklı formlarda imal edilmektedir. Yassı kesitli, üçgen kesitli ve yuvarlak kesitli kordonlar bunların belli başlıcalarıdır. Üçgen kordon, üçgen çekirdek etrafına yuvarlak tellerin birkaç kat sarılması ile oluşmaktadır. Yassı kordonda ise, öz malzemesi olarak yassı lifler kullanılmaktadır.

Kordonlar sarım biçimlerine göre genel olarak dört farklı kompozisyonda yapılırlar. Bunlar; Standart, Seale, Warrington ve doldurma tellidir. Bunların ortak noktası, öz malzemesinin yuvarlak bir telden oluşması ve bu telin etrafına iki kat tel sarımının uygulanmasıdır. Diğer kordon tipleri ise bu dört temel kompozisyonun çeşitlendirilmesiyle oluşturulmuştur.

Günümüzde kullanılan çelik halat kordon tiplerinin birçoğu Şekil 2.5'te verilmiştir. 6x7, 8x19 veya 6x36 gibi örneklerde olduğu gibi ilk sayı kordon sayısını, ikinci sayı ise her kordondaki tel sayısını ifade etmektedir. Yani bu iki sayının çarpımı halattaki toplam tel sayısını vermektedir. Kordon tipine göre halatların sınıflandırılmasındaki temel fark ise her bir kordondaki tellerin sıralanış biçimleri ve çaplarındaki farklılıktır.

1 × 7 Monotoron	1 × 19 Monotoron	7 × 19 Ç.Ö.	24 × 7 Ç.Ö.
			
6 × 7 Ç.Ö.	6 × 7 K.Ö.	6 × 19 Standart Ç.Ö.	6 × 19 Standart K.Ö.
			
6 × 37 Standart Ç.Ö.	6 × 37 Standart K.Ö.	6 × 19 Seale Ç.Ö.	6 × 19 Seale K.Ö.
			
8 × 19 Seale Ç.Ö.	8 × 19 Seale K.Ö.	6 × 19 Warrington Ç.Ö.	6 × 19 Warrington K.Ö.
			
6 × 36 W.Seale Ç.Ö.	6 × 36 W.Seale K.Ö.	6 × 41 W.Seale Ç.Ö.	6 × 41 W.Seale K.Ö.
			
35 × 7 W.Dönmez	19 × 7 Yarı Dönmez	PVC Kaplı Halat Ç.Ö.	PVC Kaplı Halat K.Ö.
			

Şekil 2.5 Farklı çelik halat tipleri (Ç.Ö.: Çelik özlü, K.Ö.: Kendir özlü)

Standart kordon tipi, aynı çaplı tellerden oluşmuştur. Bütün tabakalardaki teller kordon eksenine göre eşit sarım açısındadır. Seale kordon tipinde, çekirdek etrafına sarılan her kattaki tel sayısı birbirine eşittir. Dış katta bulunan tel çapları, iç kattaki tellere göre daha kalındır. Dış kattaki teller, iç kattakilerin yivlerine oturmaktadır. Aynı kattaki tel çapları birbirlerine eşittir. Warrington kordon tipinde, iç kattaki tel çapları birbirlerine eşittir. Dış kattaki tel sayısı ise içtekilerin iki katı olup, bir ince bir kalın tel olacak şekilde sarılmışlardır. Warrington Seale kordon tipinde, dış kattaki teller Seale, alt kattaki teller ise Warrington dizilimine sahiptir. Doldurma telli kordon tipinde ise, iç kattaki tel sayısı dış kattakinin yarısı kadardır. İç tellerin yiv boşluklarına ince doldurma telleri yerleştirilmiştir. Bunların oluşturduğu yivlere ise dış kat telleri oturtulmuştur.

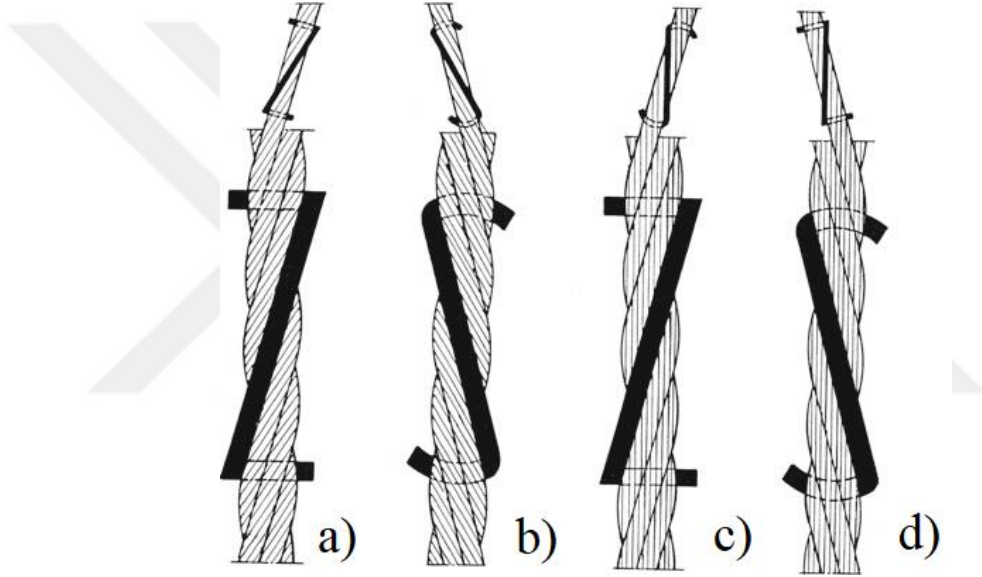
Çelik halatlar, her bir kordondaki tel sayısına göre de sınıflandırılabilirler. 7 telli (Warrington dönmez), 19 telli (Standart, Seale, Warrington), 25 telli (Standart), 31 telli (Warrington), 36 telli (Warrington Seale), 37 telli (Standart), 41 telli (Warrington Seale) ve 49 telli (Seale) kombinasyonlar en sık kullanılanlarıdır.

Krenlerde ve iletim sistemlerinde, kaldırma halatı olarak paralel sarımlı Warrington ve Warrington Seale tipli halatlar daha çok tercih edilmektedir.

Tek katlı yuvarlak halat dışında ayrıca kullanım yerine göre tasarlanan farklı konstrüksiyonlara sahip halatlar geliştirilmiştir. Şekil 2.5'te gösterilen dönmez halatlar da bunlardandır. Bu halatlarda halat dönmesi önlenmiştir. Yine Şekil 2.5'te görülen bazı PVC kaplı halatlarda da halatın esas taşıyıcı telleri korozyon etkisinden korunmuştur. Bu özellik, bazı halat tiplerinde dıştaki tellere uygun formun verilmesi ve bu sayede kapalı bir halat formunun elde edilmesi ile sağlanmıştır. Yüksek yüzey basınçlarında çalışan çelik halatlarda ise basma yüzeyini arttırabilmek için yassı kordonlu çelik tel halatlar ile üçgen kesitli çelik tel halatlar kullanılabilir (Demirsoy, 2015).

2.3.5 Sarım Yönüne Göre Yük Taşıma Halatları

Daha önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi halatlar bir çekirdek etrafına kordonların helisel olarak sarılmaları ile oluşturulur. Dış kordonların helis yönü, halatın sarım yönü olarak isimlendirilir. Standartlarda, dış kordonların halat üzerine sarılışında helis yönü sağa dönüşlü ise Z, sola dönüşlü ise S harfi kullanılmaktadır. Tellerin sarılıp kordonları meydana getirmesinde ise teller sağa dönüşlü ise z, sola dönüşlü ise s harfi kullanılmaktadır. Kısa gösterimlerde, zZ ve sS sarılışına düz sargı, zS ve sZ sarılışına ise çapraz sargı denmektedir.



Şekil 2.6 Çelik halatlarda farklı sarım tipleri: a) zZ b) sS c) sZ d) zS (Feyrer, 2015)

Şekil 2.6’da tüm sarım tipleri şekilsel olarak gösterilmiştir. Düz sargıda halatı meydana getiren kordonlarla kordonları meydana getiren tellerin sarım yönleri birbirleriyle aynıdır. Çapraz sargıda ise, halatı meydana getiren kordonlarla kordonları meydana getiren tellerin sarım yönleri birbirlerine terstir.

Tek katlı, yuvarlak kordonlu tel halatlar yük altında dönerek helisel yapılarını bozmaya çalışırlar. Yükün kalkmasıyla da sahip oldukları iç enerjileri nedeniyle tekrar eski konumlarına gelmek için ters yönde dönerler. Bu nedenle özellikle serbest asılı halat uzunluğunun halat çapına göre büyük olduğu yerlerde dönmeyen halat tipleri

tercih edilmektedir. Bu tip halatlarda, dış kordonlar sağ yönlü çapraz sargı, iç kordonlar da sol yönlü düz sargılı yapılarak dönme önlenebilmektedir (Demirsoy, 2005).

Düz sargılı halatlar, çapraz sargılı halatlardan daha fazla dönmeye çalışırlar. Bunun nedeni, düz sargılı halatların eğilme kabiliyetinin daha fazla olmasıdır. Ancak dönme kabiliyeti de yüksek olduğundan daha çok asansörler gibi dönmeye izin verilmeyen kapalı alanlarda kullanıma uygundur. Ayrıca, makaraların ve tamburların yivlerine daha rahat otururlar. Bunun nedeni de düz sargılı halatlarda, halat ile makara veya tambur yivleri arasındaki temas yüzeyinin, çapraz sargılı halatlardakine göre daha büyük olduğundan halat tellerinde meydana gelen yüzey basıncının daha küçük olmasıdır. Bundan dolayı düz sarımlı halatlar, çapraz sarımlı halatlardan daha az aşınırlar. Çapraz sargılı halatlar ise kendi etrafında dönmediklerinden daha çok dış ortamda kullanılan kaldırma makinelerinde tercih edilirler.

2.4 Yük Taşıma Halatlarının Hesabı

Yük taşıma halatlarının hesaplanmasındaki amaç, hesaplanan çalışma ömrüne sahip uygun çelik halatı seçebilmektir. Halatın çalışma ömrüne; halatın çalışma sınıfı, halatta oluşan dinamik yükler, halatta meydana gelen çekme ve eğilme gerilmeleri, halat ile yiv arasındaki yüzey basıncı, halat malzemesi ve halatın yağlanması gibi faktörler etki etmektedir.

Helisel sarımlı olmaları nedeniyle çelik tel halatların gerçek zorlanmalarının tam olarak belirtilmesi ve eksiksiz hesaplanması oldukça zordur. İşletme esnasındaki çekme zorlanmasında, çekme kuvvetinin ince teller üzerindeki dağılımı da yeterince belli değildir. Tellerin eksenlerinin, tel halat eksenine paralel olmayışı ve her bir telin yanındaki diğer tellerle temas halinde olması ve sürtünmesi nedeniyle farklı zorlanmalara uğramalarından dolayı bunların hepsini içeren tam bir hesap yapmak mümkün değildir. Ancak belli katsayılar kullanılarak hesaplar yapılabilir.

DIN normlarına göre (DIN 15020) kaldırma sistemlerinde kullanılabilecek en küçük halat çapının formülü şu şekildedir:

$$d_{min} = c \cdot \sqrt{F_{S,max}} \quad (2.1)$$

Burada d_{min} en küçük halat çapı, $F_{S,max}$ maksimum halat çekme kuvveti, c ise DIN normlarında belirtilen katsayıdır. c katsayısı, halatın tipine, halatın çalıştığı işletme şartlarına ve tellerin nominal mukavemetlerine göre seçilir.

Halatın emniyet katsayısı, halatın kopma kuvveti F_B 'nin, halat çekme kuvveti F_S 'ye oranından hesaplanır ve çalışma sınıfına bağlı olarak 4...12 arasında değişen bir değer almaktadır.

$$S = \frac{F_B}{F_S} = \frac{k \cdot q_m \cdot \sigma_z}{F_S} = \frac{k \cdot f \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sigma_z}{4 \cdot F_S} \quad (2.2)$$

Buradan halat çapı şu şekilde olmaktadır:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S \cdot F_S}{k \cdot f \cdot \pi \cdot \sigma_z}} = c \cdot \sqrt{F_S} \quad (2.3)$$

Formül düzenlenerek c katsayısı elde edilir:

$$c = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{k \cdot f \cdot \pi \cdot \sigma_z}} \quad (2.4)$$

Burada q_m tel halatın metal kesit alanını, f halat doldurma faktörünü, k sarım faktörünü, d halatın DIN normlarında verilen nominal çapını, σ_z tek bir telin çekme gerilmesini belirtmektedir.

İvme kuvvetleri, halatın çekme kuvvetini yaklaşık %10 kadar artırır. Buna göre halat hesabında kullanılacak nominal çekme kuvveti şu şekilde hesaplanır:

$$F_S = \frac{1,1.G}{z.\eta_s} = \frac{1,1.(G_L+G_O)}{z.\eta_s} = \frac{1,1.(m_L+m_O).g}{z.\eta_s} \quad (2.5)$$

Burada G_L yük kuvvetini, G_O kanca ve makara takımlarının ağırlık kuvvetini, m_L faydalı yükün kütlesini, m_O kanca ve makara takımlarının kütlesini, g yerçekimi ivmesini, z makara takımını taşıyan halatların sayısını, η_s halat sisteminin verimini ifade etmektedir.

Halatın her bir telinde meydana gelen çekme gerilmesi ise teorik olarak şu formülle bulunur:

$$\sigma_z = \frac{4.F_S}{i.\delta^2.\pi} \quad (2.6)$$

Burada δ halat telinin çapını, i ise halattaki tel sayısını belirtmektedir. Tambur ve makaralardaki yön değiştirmeler nedeniyle halatta meydana gelen eğilme gerilmesi ise teorik olarak şu şekildedir:

$$\sigma_b = \frac{E.\delta}{D} \quad (2.7)$$

Burada σ_b eğilme gerilmesini, E elastisite modülünü ve D makara çapını ifade etmektedir. Çelik halatta çekme ve eğilme gerilmeleri nedeniyle meydana gelen toplam gerilme değeri ise şu şekildedir:

$$\sigma_{top} = \sigma_z + \sigma_b < \sigma_{em} \quad (2.8)$$

Bu formül teorik hesaplamalar için uygun olup pratikte halat tellerinin eşit miktarda yüklenmemesi nedeniyle oluşan halat gerilmesi, hesaplanan toplam gerilme değerinden daha büyük olacaktır. Ayrıca iletim makinelerinin her zaman dinamik zorlanma etkisi altında kalacağı unutulmamalıdır. Bu nedenlerle halatın emniyetle çalışabilmesi için $\sigma_{em} = 1600 \text{ N/mm}^2$ mukavemete sahip tel halatlarda emniyet

katsayısı, çalışma sınıfı da göz önünde tutularak $S = 4 \dots 12$ aralığında, $\sigma_{em} = 1800 \text{ N/mm}^2$ mukavemete sahip tel halatlarda ise $S = 4,4 \dots 14$ aralığında alınır. Tehlikeli maddelerin iletiminde ise emniyet katsayısı daha da arttırılmalıdır (Demirsoy, 1999). Ayrıca kaldırma ve iletim sistemlerinde palanga sistemi kullanılması da zorunludur. Bu sayede taşınması gereken yük halatlara eşit miktarda dağıtılacaktır ve ayrıca tamburların ve motorların konstrüksiyon büyüklüğü azalacaktır.

2.5 Yük Taşıma Halatlarının Seçim Kriterleri

Kaldırma sistemlerinde kullanılan yük taşıma halatlarının görevlerini eksiksiz olarak yerine getirebilmesi için halatlardan beklenen belli nitelikler vardır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir (Demirsoy, 2005):

- a) Halat, maksimum işletme yükünü taşıyabilecek çapta seçilmelidir.
- b) Halat malzemesi yüksek karbon ve manganez alaşımlı olmalıdır.
- c) Yüksek kaliteli çelik kullanılmalıdır ve ısıt işlem yapılmalıdır.
- d) Çelik halat konstrüksiyonu ve çekirdek malzemesi uygun seçilmelidir.
- e) Halat seçiminde çevresel şartlara dikkat edilmelidir.
- f) Halat, aşırı yüklemelere maruz bırakılmamalıdır.
- g) Soğuk havalarda ani yüklemelerden kaçınılmalıdır.
- h) Donmuş halat kullanımından kaçınılmalıdır.
- i) Halat eğilmelere karşı dayanıklı olmalıdır ve eğilme nedeniyle teller yorulmaya uğramamalıdır.
- j) Halat, aşınmaya karşı dayanıklı olmalıdır.
- k) Çelik halatın yön değiştirdiği yerlerin keskin köşelerde olmamasına dikkat edilmelidir.
- l) Halatın darbeli yüklemesinden kaçınılmalıdır.
- m) Depolanan çelik halat, temiz ve kuru yerde saklanmalıdır.
- n) Tambur ve makara, kaldırma makinesinin konstrüksiyonuna uygun olacak şekilde yeteri kadar büyük çapta seçilmelidir.
- o) Çalışma esnasında halat titreşimi düzenli olarak kontrol edilmelidir.

- p) Tambur yivleri halata uygun olmalıdır.
- q) Halatın tambura sarımı en fazla iki kat olacak şekilde ayarlanmalıdır. Aksi takdirde en alt katta kalan halatlarda ezilme oluşmaktadır.
- r) Halatın gerektiği ölçüde ve düzenli bir şekilde yağlanması sağlanmalıdır.
- s) Çelik halat üzerindeki bölgesel aşınmalar ve tellerde oluşan kırılmalar düzenli olarak kontrol edilmelidir.
- t) Dış ortamlarda kullanılan halat, kolaylıkla dönmeyecek şekilde üretilmelidir.
- u) Halat, korozyona karşı dayanıklı olmalıdır.



BÖLÜM ÜÇ

KOROZYON

3.1 Giriş

Korozyon, metallerin çevresindeki malzemelerle oluşturdıkları kimyasal ve elektrokimyasal tepkimeler sonucu uğradıkları tahribattır. Sıklıkla karıştırılan paslanma kavramı, demir ve demir temelli malzemelerin korozyonu olup pas ise aynı tür malzemelerden kaynaklanan korozyon ürünüdür.

Korozyonu engellemek genelde olanaksızdır. Endüstriyel malzemelerin tamamı doğadaki kararlı halleri olan bileşik halindedir. Üretim metalurjisinin enerji harcayan redükleyici yöntemleri ile bunlar metal haline döndürülür. Doğada metaller oksit ve sülfür bileşikleri halinde bulunurlar. Ortamdaki oksijen metal ve alaşımları oksitleyip bileşik haline döndürmeye çalışır.

Korozyon temel olarak kimyasal korozyon ve elektrokimyasal korozyon olarak iki başlık altında incelenir. Kimyasal korozyon daha çok metal ve alaşımlarının bir gaz ortamı altında oksitlenmesidir ve kuru korozyon olarak da adlandırılır. Elektrokimyasal korozyon ise metal ve alaşımlarının bir sıvı ortam içindeki bozunmalarıdır ve bu da ıslak korozyon olarak nitelendirilir. İki korozyon türü arasında mikro ve makro görünümünden performans kayıplarına kadar belirleyici farklar olmasına karşın her ikisi de elektrokimyasal mekanizma ile oluşmaktadır (Doruk, 2014).

Korozyon, bir diğer şekilde, malzemelerin kararlı hale dönme davranışı olarak da açıklanabilir. Metal ve alaşımların kararlı halleri olan bileşik haline dönme eğilimleri yüksektir. Bunun sonucu olarak metaller içinde bulundukları ortamın elemanları ile reaksiyona girerek, önce iyonik hale ve ondan da ortamdaki başka elementlerle birleşerek bileşik haline dönmeye çalışırlar; yani kimyasal değişime uğrarlar ve bozunurlar. Sonuçta metal veya alaşımın fiziksel, kimyasal, mekanik veya elektriksel özelliği istenmeyen değişikliklere uğrar. Bazı soy metaller hariç teknolojik öneme sahip bütün metal ve alaşımlar korozyona uğrayabilir.

Korozyon her yıl global ekonomiye doğrudan ve dolaylı olarak büyük bir zarar vermektedir. Korozyon nedeniyle verilen kayıplara sektör bazında bakıldığında enerji, genel mühendislik ve taşımacılık başı çekmektedir. Örneğin, ABD’de otomobil egzoz sistemlerindeki korozyon nedeniyle oluşan kayıp yılda 500 milyon dolara varmaktadır. Bunun için tasarımlar korozyona dayanıklı hale getirilmelidir. Korozyon altında çalıştırılması gereken metalik malzemelerin yeterli pas payı ile tasarlanmaları zorunludur. Homojen dağılımlı korozyonun temel alındığı bu yaklaşımda, taşıyıcı kesitler cidar kalınlığına pas payı eklenerek büyütülmelidir (Doruk, 2014).

Malzemenin korozyon nedeniyle kullanılamaz hale gelmeden önce ne kadar ömrü kaldığı bilinip ona göre tedbir alınmalıdır. Bunun için malzemedeki korozyon ilerlemesinin takip edilmesi gerekmektedir. Burada birtakım kavramlarla karşılaşılmaktadır:

Korozyon kaybı: Birim yüzey alanda oluşan malzeme kaybıdır.

Korozyon hızı: Birim sürede birim yüzey alanda oluşan malzeme kaybıdır.

Doğrusal korozyon hızı: Birim süre içinde metal yüzeyinden uzaklaştırılan tabaka kalınlığıdır.

Korozyon direnci: Birim kalınlıkta tabakanın metal yüzeyinden uzaklaştırılması için gereken süredir.

Literatürde daha çok doğrusal korozyon hızı temel alınarak farklı malzemeler arasındaki veya şartlar altındaki korozyon karşılaştırılmaktadır:

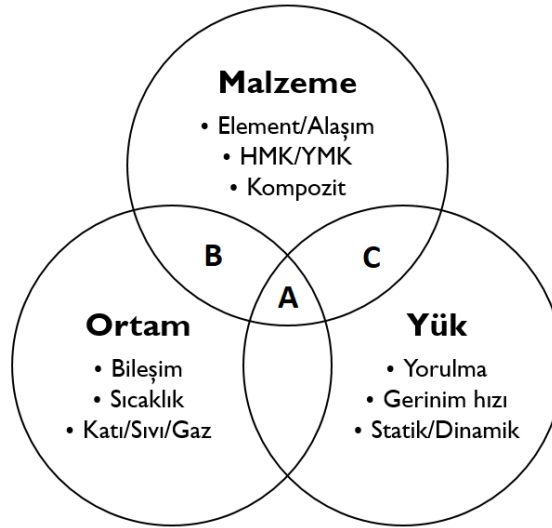
- Doğrusal korozyon hızı $< 0,13$ mm/yıl: Korozyon direnci yüksektir.
- Doğrusal korozyon hızı $= 0,13 - 1,3$ mm/yıl: Korozyon direnci orta düzeydedir.
- Doğrusal korozyon hızı $> 1,3$ mm/yıl: Korozyon direnci düşüktür.

Yük taşıma halatlarının korozyon davranışının tespitinde Şekil 1’de görülen yöntemler ön plana çıkmaktadır. Çelik halatların korozyona maruz kaldıktan sonra; mekanik deneyler ile halat mukavemetindeki kayıp, malzeme kaybı ile ilk duruma göre halat kütleindeki azalma veya halat tellerindeki çap incilmesi, elektrokimyasal yöntem ile de doğrusal korozyon hızındaki değişim bulunmak istenmektedir.

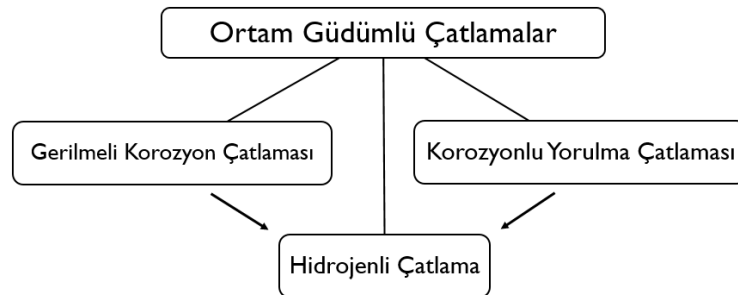
3.2 Gerilmeli Korozyon Çatlaması

3.2.1 Ortam Güdümlü Çatlamalar

Ortam güdümlü çatlamlar, ortamda bulunan mekanik ve çevresel etkilerin birbirlerinin etkilerini güçlendirerek neden oldukları hasar tipleridir. Şekil 3.1’de bu etkilerin etkileşimi görülmektedir. Ortam güdümlü çatlamlar; gerilmeli korozyon çatlaması, korozyonlu yorulma çatlaması ve hidrojenli çatlama olarak üç ana sınıfta Şekil 3.2’deki gibi incelenebilir. Gerilmeli korozyon çatlaması ve korozyonlu yorulma çatlamasında korozyon, çatlama mekanizması üzerinde direk rol oynar. Hidrojenli çatlama ise korozyon tepkimesi sonucu üretilen atomsal hidrojen nedeniyle meydana gelir.



Şekil 3.1 Malzeme hasarına yol açan etmenlerin etkileşimi (A: Ortam güdümlü çatlama, B: Korozyon, oksitlenme, C: Yorulma, kırılma)



Şekil 3.2 Ortam güdümlü çatlamların sınıflandırılması (Doruk, 2014)

3.2.2 Gerilmeli Korozyon Çatlama Mekanizması

Gerilmeli korozyon çatlama için birtakım koşullara ihtiyaç vardır. Bunlar; ortam koşullarına duyarlı bir malzeme, malzemenin bulunduğu etken bir ortam, çekme gerilmesi ve zamandır. Ayrıca ortam sıcaklığı da gerilmeli korozyon çatlama hızını belirlediği için önemlidir.

Kırılma zamanı, diğer bir ifadeyle malzeme ömrü artan gerilmeyle kısalmakta, azalan gerilmeyle uzamaktadır. Gerilmenin yüksek olduğu şartlarda gerilmeli korozyon çatlama koşullarından uzaklaşmaktadır. Bu nedenle, yüksek gerilme uygulanan kısa süreli laboratuvar deneylerinin malzemenin korozyon karşısındaki gerçek davranışını yansıtmayacağını kabullenmek gerekmektedir. Dolayısıyla, gerilmeli korozyon çatlaklarının oluşabildiği gerilme alanının alt sınırını tanımlama ihtiyacı vardır. Bu değer de “gerilmeli korozyon çatlama dayanımı ($\sigma_{GKÇ}$)” olarak ifade edilmektedir. Uygulanan çekme gerilmesinin bu değer altında tutulduğu testlerde gerilmeli korozyon çatlama beklenmez. Genellikle malzeme akma sınırının %10 ile %70 aralığında değişen gerilmeli korozyon çatlama dayanımı ortam koşullarındaki farklılaşmalara karşı oldukça duyarlıdır.

Metalürjik olarak ele alınırsa, ince taneli alaşımların kaba taneli olanlara göre gerilmeli korozyon direncinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Fakat sadece ince taneli içyapıya sahip malzeme seçerek gerilmeli korozyon çatlama dayanımını arttırmak yetmemektedir. Malzemelerin dayanımını ince taneli yapı ile elde edilen üstüne çıkarmak alaşımlama ile sağlanabilir.

Gerilmeli korozyon çatlakları çekme gerilmesine dik doğrultuda ilerlerler. Bunlar daha çok yarıma düzlemleri veya tane yüzeyleridir. Plastik deformasyonda ise çatlaklar çekme gerilmesine 45^0 açılı kayma düzlemleri üzerinde yoğunlaşır. Çekme gerilmesinin bu düzlemlere paralel bileşeni olan kesme gerilmesi, dislokasyonları harekete geçirerek kaymayı tetikler. Metalik bir malzemenin gerilmeli korozyon çatlamasından etkilenip etkilenmeyeceği, bu iki farklı mekanizmadan hangisinin diğerine göre etkili olabileceğine bağlıdır.

Gerilmeli korozyon çatlakları malzeme içinde tane içlerini veya tane sınırlarını takip ederek büyürler. Genellikle tane sınırları boyunca gelişen çatlama “taneler arası çatlama”; tane içlerinde veya düşük yoğunluklu kristal düzlemlerinde ilerleyen çatlama da “taneler içi çatlama” olarak isimlendirilir. Taneler arası çatlamaya daha sık şekilde rastlanır. Bunun nedeni, bu bölgelerde yoğunlaşan kükürt ve fosfor gibi safsızlıkların taneler arası bağı zayıflatmasıdır. Klorürlü ortamlarda çatlak oluşumunun bir diğer önemli sebebi de kayma basamağında oluşan çukurcukların tünelciklere dönüşmesidir. Tünelcik oluşumu, gerilmeli korozyon çatlaklarını kolaylaştırarak malzeme hasarına yol açmaktadır.

Gerilmeli korozyon çatlamaşı elektrokimyasal olarak ele alınırsa, testlerden gerilmeli korozyon çatlamaşı duyarlılığının aktif-pasif dönüşümünün başlayıp tamamlanmadığı veya çukurcuk oluşumuna neden olan pasif-aktif dönüşümünün gerçekleştiği potansiyel aralıklarında gerçekleştiği görülür. Bir diğer elektrokimyasal etmen de pH değeridir. Ortamın pH değeri, metallerin yüzeyinde gerilmeli korozyon çatlamaşını başlatabilecek kırılğan oksit tabakalarının oluşup oluşmayacağını belirler. Gerilmeli korozyon çatlamaşının, pH=7,5'te en üst düzeye ulaştığı deneylerle elde edilmiştir.

Sonuç olarak, metalik malzemelerde gerilmeli korozyon çatlamaşı duyarlılığı belirli koşulların sağlanması ile açığa çıkar:

- 1) Malzemenin mevcut ortamda çözünür olması,
- 2) Malzemenin yüzeyinde termodinamik açıdan kararlı bir tabakanın olmasıdır.

Çok düşük miktarlarda amonyum ve aminler içeren ortamlar %15'ten fazla çinko içeren Cu-Zn alaşımlarının çatlayarak hızla bozunmalarına yol açarlar. Koruyucu özellikteki bu filmin çatlayarak keskin bir uç oluşturmasıyla gerilmeli korozyon çatlamaşı başlar. “Elektrokimyasal bıçak” olarak adlandırılan bu oluşum, metal çözünmesinin yan yüzeyler yerine çatlak ucunda yoğunlaşmasını sağlar.

Malzemede gerilmeli korozyon çatlaması oluşma riskini düşürmek için atılacak ilk adım çekme gerilmesini azaltmak ya da konstrüksiyonu değiştirmektir. Diğer bir yol olarak ortam değişimi yapılabilir veya inhibitör ilavesi ile ve çözünmüş oksijen ve klor iyonlarından arındırılarak korozif etki azaltılabilir. Eğer çekme gerilmesi yeterince azaltılamıyorsa ve ortam koşulları değiştirilemiyorsa korozyona daha az duyarlı malzeme kullanılabilir. Katodik koruma ile de gerilmeli korozyon çatlaması riski azaltılabilir. Ancak aşırı koruma sonucu hızlanan hidrojen çıkışının, hidrojenli çatlama olasılığını arttıracak göz önünde tutulmalıdır (Doruk, 2014).

3.2.3 Gerilmeli Korozyon Çatlaması Test Yöntemleri

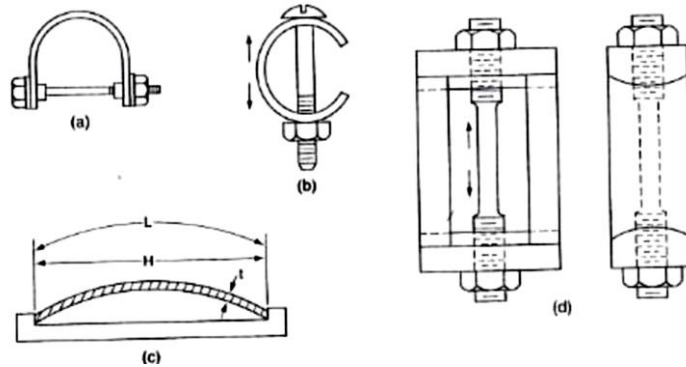
Ortam güdümlü çatlamlara uygulanan test yöntemleri; ön gerilmeli örneklerle yapılan testler ve yavaş deformasyon (gerinim) hızıyla çekme testi (SSRT, Slow Strain Rate Test) olmak üzere iki temel başlık altında incelenir.

3.2.3.1 Ön Gerilmeli Korozyon Çatlaması Testi

Deneylerle saptanan çatlama süreleri genellikle oluşma ve büyüme aşamalarını beraber kapsamaktadır. Ancak çatlakların oluşarak büyümeye başlamaları için gereken süre oldukça uzundur. Bu nedenle, yapay işlemlerle elde edilen ön çatlaklı örneklerle deney yapmak veya deney sırasında parçaya ön gerilme vermek deney süresini kısaltarak çatlak büyüme hızları hakkında güvenilir bilgilere ulaşılmasını sağlar. Ön gerilmeli testler yükleme sistemine göre, sabit deformasyon ve sabit yük testleri olarak iki gruba ayrılırlar.

Bu testlerin amacı, malzemelerin çatlaması veya kopması için geçen sürelerin saptanması ve birbirleriyle kıyaslanmasıdır. Malzemelerden alınan numuneler aynı ortam ve yükleme koşullarında test edilirler. Bunlar arasından çatlama veya kopma süresi en fazla olanlar en yüksek çatlama direncine sahip olanlardır. Bu testler ayrıca yüzey kaplamaları ve inhibitörlerin değerlendirilmesinde de uygulanırlar.

Ön gerilmeli sabit deformasyon testlerini gerçekleştirebilmek için standartlara göre Şekil 3.3'te verilen farklı tasarımlardan yararlanılmaktadır. U-eğme test düzeneği (ASTM G30), sac veya çubuk şeklindeki numunelere Şekil 3.3a'daki gibi bir mandal üzerinde cıvatanın sıkılması ve plastik deformasyona uğratılmasıyla oluşturulur. U-eğme numune şekilleri, gerilmeli korozyon çatlağı için uygundur. En büyük dezavantajı gerilme dağılımlarının iyi olmamasıdır. Şekil 3.3b'de görülen C-halka düzeneği (ASTM G38), kalın levhalarda kullanılmakta ve cıvatanın sıkılmasıyla numunenin dış yüzeyinde çekme gerilmeleri oluşturarak yapılmaktadır. C-halkası numunesinin avantajı, uygulanan gerilmenin akma dayanımının altında veya üstünde uygulanabilir olmasıdır. Çok ince dikdörtgen kesitli saclar içinse, Şekil 3.3c'deki gibi eğme plağı test düzeneği (ASTM G39) kullanılmaktadır. Gerilme, akma dayanımının altında olduğu zaman, eğilmiş kiriş numunesinde maksimum gerilme dış yüzeyde oluşur. En karmaşık ön gerilmeli test düzeneği ise, Şekil 3.3d'de görülen çekme çubuğu test düzeneğidir (ASTM G49). Burada küçük yüklemeler, cıvata somun sistemi ile verilmektedir. Bu test düzeneği gerilmenin kontrollü olarak uygulanması, ölçülmesi ve analizi için en uygun yöntemdir. Deneyler sırasında sisteme verilen yükün bilinmesi ve deney boyunca kontrol altında tutulması için test düzeneğinde ayrıca spiral yay kullanılması önerilmektedir.



Şekil 3.3 Ön gerilmeli test düzenekleri: a) U-eğme, b) C-halka, c) Eğme plağı, d) Çekme çubuğu (Doruk, 2014)

3.2.3.2 Yavaş Deformasyon Hızıyla Çekme Testi

Yavaş deformasyon hızı testi, çevresel ortama karşı duyarlı malzemelerin çatlamasına neden olabilecek geniş bir sıcaklık ve basınç aralığında sıvı, sıvı olmayan

ve gaz içeren ortamlarda simüle edilen çeşitli metalik malzemelerin değerlendirilmesi için geçerlidir.

Deneyler, ASTM G129-00 standardına uygun olarak hazırlanan çekme deneyi numunelerinin, çok düşük deformasyon hızlarında uygun çekme cihazlarında uygulanmasıyla yapılmaktadır. Gerilmeli korozyon çatlaması, çatlaktaki gerinim hızı ile pasifleşme hızı arasında bir dengenin kurulmasını gerektirir. Bu dengenin sağlanması için optimum hız 10^{-6} m/s civarındadır. Çekme hızının bu değeri aşması durumunda gerilmeli korozyon çatlaması için gerekli olan pasif filmin oluşum hızı yeterli seviyeye ulaşamaz. Bu nedenle malzeme hasarı hava ortamında yapılan çekme testlerindeki gibi sünek kırılmayla gerçekleşir. Çekme hızının kritik hızın altında kaldığı durumda ise metal yüzeyini örten pasif film süreklilik kazanır ve önceki durumda olduğu gibi malzeme hasarı yine sünek kırılmayla gerçekleşir. Sonuç olarak, birçok alaşım için kritik hız değeri olan 10^{-6} m/s’de çekme işlemi uygulandığında gerilmeli korozyon çatlamasına özgü gevrek kırılmanın gerçekleştiği görülür.

Deneyler sonucunda hava ortamında veya farklı ortamlarda yapılan düşük deformasyon hızı testleri ile elde edilen çekme mukavemeti değerleri, kesit daralması değerleri veya uzama değerleri ile test ortamından elde edilen değerlerin birbirlerine oranı hesaplanarak farklı malzemelerin gerilmeli korozyona karşı dirençleri yani gerilmeli korozyon çatlaması indeksleri belirlenebilmektedir. Bunlar şu denklemlerde verilmiştir:

Maksimum çekme mukavemeti oranı:

$$I_{SCC,UTS} = \frac{\text{Korozyon ortamındaki hasar süresi}}{\text{Hava ortamındaki hasar süresi}} \quad (3.1)$$

% Uzama oranı:

$$I_{SCC,EL} = \frac{\text{Korozyon ortamındaki uzama oranı}}{\text{Hava ortamındaki uzama oranı}} \quad (3.2)$$

% Kesit daralması oranı

$$I_{SCC,RA} = \frac{\text{Korozyon ortamındaki kesit daralması}}{\text{Hava ortamındaki kesit daralması}} \quad (3.3)$$

Genel bir ifade vermek için denklemini şu şekilde oluşturabiliriz:

$$I_{SCC} = \frac{\text{Korozyon ortamında elde edilen değer}}{\text{Kontrollü ortamda elde edilen değer}} \quad (3.4)$$

Denklemler sonucu malzemelerin gerilmeli korozyon çatlaması indeksleri yani gerilmeli korozyon hassasiyetleri belirlenir ve indeks değeri düşük olan malzemenin gerilmeli korozyon çatlaması direncinin daha düşük olduğu ifade edilir (Doruk, 2014).

3.3 Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi ile Korozyon Hızının Tahmini

Başlangıçta korozyon hızı yalnızca kütle kaybı yöntemi ile tayin edilmekteydi. Bu yöntemde korozyon hızı ölçülecek olan metal, koroziv ortam içinde belli süre bekletilerek bu süre içinde meydana gelen kütle azalması tartılarak tayin edilir. Sonuç, birim yüzeyde ve birim zamanda meydana gelen kütle kaybı olarak verilir. Korozyon hızının tayininde günümüzde de kullanılmakta olan bu yöntemin başlıca iki sakıncası vardır. Ağırlık kaybı yöntemi ile duyarlı bir korozyon hızı tayininde çok uzun bir zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer taraftan elde edilen korozyon hızı değerleri o andaki korozyon hızını değil, başlangıçtan itibaren geçen uzun bir zaman diliminin ortalamasını vermektedir. Bu nedenlerle elektrokimyasal yöntem ön plana çıkmaktadır.

Elektrokimyadaki başlıca yasalardan biri olan Tafel kanunu; Tafel, Schmitz, Naremann ve Emmert tarafından 1905'te yayımlanmış olup günümüzde elektrokimyada en sık kullanılan yasalardan biridir. Tafel'in ampirik olarak gözlemlediği kanuna göre, elektrokimyasal reaksiyondaki akım yoğunluğunun logaritması, elektrot potansiyeli ile doğrusal olarak değişir.

Elektrot yüzeyindeki düşük hızlı reaksiyona dayanan kanun, Butler-Volmer (Erdey-Grúz-Volmer) denklemine dayanmaktadır. Örneğin demirin,



yükseltgenme reaksiyonunda, elektrot potansiyeli E, Butler-Volmer denklemi olan,

$$i = i_0 [e^{\alpha n F (E - E_0) / RT} - e^{-(1-\alpha) n F (E - E_0) / RT}] \quad (3.6)$$

ile bulunabilir. Burada akım yoğunluğu i ; transfer olan e^{-} sayısı n ; transfer katsayısı α ; akım yoğunluğu değişimi i_0 ; denge potansiyeli E_0 ile ifade edilmektedir. Ancak metallerin korozyonu göz önüne alındığında, sistemde iki ya da daha fazla yarı reaksiyon mevcuttur. Örneğin demirin asit çözeltisindeki korozyonunda indirgenme reaksiyonu,



şeklinde olmaktadır. Wagner ve Traud, 1938 yılında yayımladıkları makalede her iki yarı hücre reaksiyonunun voltaj-akım eğrisini süperpozisyon yöntemiyle bir araya getirmişlerdir:

$$|i_H^{\rightarrow}| + |i_{Fe}^{\rightarrow}| = i_H^{\leftarrow} + i_{Fe}^{\leftarrow} \quad (3.8)$$

Burada $|i_H^{\rightarrow}|$, Denklem 3'deki indirgenme reaksiyonunun hızını belirtir. Denklem 4 düzenlenirse,

$$i_{Fe}^{\leftarrow} - |i_{Fe}^{\rightarrow}| = |i_H^{\rightarrow}| - i_H^{\leftarrow} = i_{corr} \quad (3.9)$$

elde edilir. Butler-Volmer denklemi yeniden düzenlenirse,

$$i = i_{corr} [e^{\alpha n F (E - E_{corr}) / RT} - e^{-(1-\alpha) n F (E - E_{corr}) / RT}] \quad (3.10)$$

bulunur. Denklem, potansiyele göre yeniden düzenlenirse,

$$E = -\left(\frac{RT}{\alpha nF}\right) \ln i_{corr} + \left(\frac{RT}{\alpha nF}\right) \frac{1}{\ln i} \quad (3.11)$$

elde edilir. Buradan Tafel kanunu,

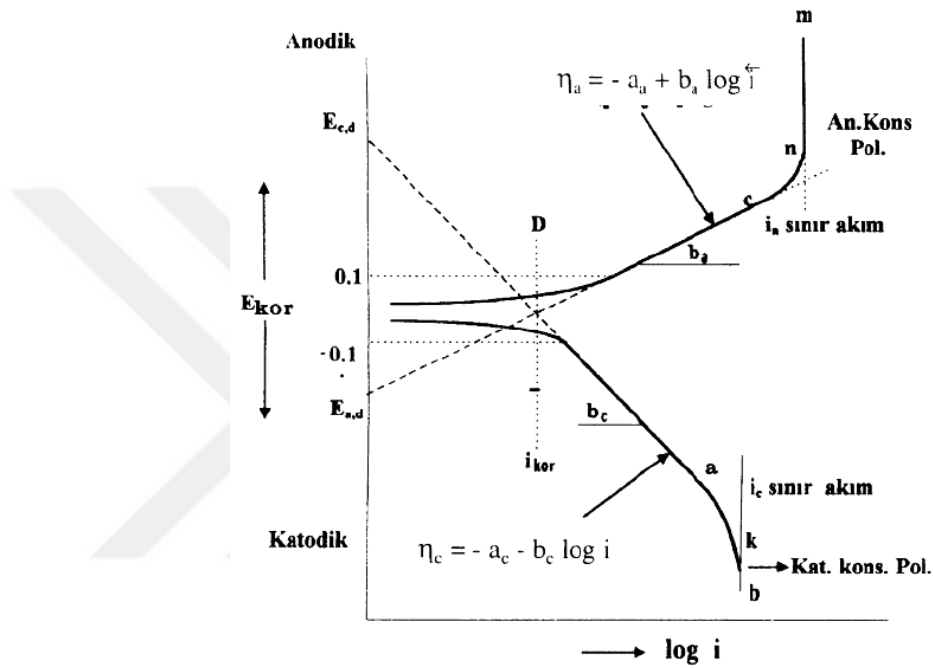
$$E = a + b \cdot \log i \quad (3.12)$$

olarak bulunur. Burada, a ve b denklemin sabitleridir. Bu denklem Tafel ekstrapolasyonu yönteminin temelini oluşturmaktadır (Mccafferty, 2005). Tafel denklemi tek bir eğriyi tanımlamaktadır. 1920'li yıllarda Evans, korozyon koşullarında aktif ve pasif davranışları daha iyi bir şekilde açıklayabilmek için polarizasyon diyagramları fikrini geliştirmiştir. Özellikle metaller için Hoar tarafından geliştirilen yöntem, anot eğrisi ile katot eğrisinin kesiştirilmesine ve buradan korozyon potansiyelinin ve akımının bulunmasına dayanmaktadır. Anot ve katot eğrilerinin bu şekilde kesiştirildiği diyagrama Evans polarizasyon diyagramı adı verilmektedir (Gabe, 2005).

Korozyon, metal ile çözelti arasında karşılıklı iki elektrokimyasal reaksiyonun dengeye gelmesi sonucu oluşur. Reaksiyonlarından biri metalin çözünmesiyle oluşan anodik reaksiyon, diğeri ise çözelti ortamında bulunan O₂ veya H⁺'nin indirgenmesi ile oluşan katodik reaksiyondur. Anodik reaksiyon sonucu açığa çıkan elektronlar katodik reaksiyonda indirgenmede kullanılır. Şekil 3.4'teki diyagramda anodik ve katodik reaksiyon eğrilerinin oluşturduğu denge hali gösterilmiştir.

Korozyona uğrayan bir elektrotta anodik ve katodik reaksiyonlar elektrot yüzeyinde aynı anda yürürler. Bu durumda elektrot potansiyeli bir karma potansiyel değerine (E_{corr}, korozyon potansiyeli) erişir. Bu potansiyele karşı gelen akıma da korozyon akımı (I_{corr}) denir. Bu iki değer yardımıyla da malzemenin Tafel eğrileri elde edilir. Bu eğrilerin çizgisel olan kısımları uzatılarak kesim noktalarından o sistem için korozyon akımı ve korozyon potansiyeli bulunur.

Denge halinde iken anodik ve katodik akım yoğunlukları birbirine eşittir ve devreden net bir akım geçmez. Bu noktada katodik akım ile anodik akım birbirine eşittir. Elektroda anodik yönde bir dış akım uygulandığında anot potansiyeli pozitif yönde artış gösterir. Katodik yönde akım uygulanması halinde de elektrot potansiyeli negatif yöne doğru kayar. Katodik yönde uygulanan dış akım yoğunluğu artırılacak olursa, metal yüzeyindeki anodik akımlar tamamen yok olur.



Şekil 3.4 Korozyon akım yoğunluğunun (I_{corr}) belirlenmesi için anodik ve katodik Tafel eğrilerinin korozyon potansiyeline (E_{corr}) ekstrapolasyonu (Doruk, 2014)

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, korozyon potansiyeli civarında lineer bir bölge bulunmaktadır. Uygulanan dış akım korozyon akımından daha büyük olacak şekilde belli bir değere eriştikten sonra polarizasyon eğrileri hafif bir şekilde bükülerek bu kez ($E - \log i$) değişimi lineer hale gelmektedir. Aşırı gerilim ile uygulanan dış akımın logaritmasının lineer olarak değiştiği bu bölgelere “Tafel bölgesi” denir. Bu bölgede Tafel doğrusunun eğimi deneysel olarak elde edilerek korozyon hızının belirlenmesinde kullanılır.

BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL YÖNTEMLER

4.1 Giriş

Literatür incelendiğinde, korozyonun malzemede oluşturduğu tahribatı değerlendirebilmek ve malzemenin korozyon direncini tespit edebilmek için çeşitli yöntemlerin uygulandığı görülmüştür. Bu yöntemler derlenerek Şekil 4.1’de gösterilen şema oluşturulmuştur. Bu yöntemlerden yük taşıma halatları için uygun olanlar incelenip uygulanmıştır. Malzeme kütleindeki değişim ile yaşlandırmaya uğratılan çelik tel halatların korozyona maruz kalmadan önceki duruma göre kütlelerindeki değişim veya halatlardaki çap incilmesi incelenmiştir. Mekanik deneyler ile halatların korozyona maruz kaldıktan sonra yapılan çekme testleriyle mukavemet kayıpları belirlenmiştir. Elektrokimyasal yöntemlerden ise en sık kullanılan metot olan Tafel ekstrapolasyon yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem ile malzemelerin doğrusal korozyon hızındaki değişim tespit edilmiştir. Çelik halatlardaki korozyonun belirlenmesinde kullanılan bir diğer yöntem ise optik mikroskop ile halat yüzeyinin incelenmesidir. Bu yöntem Şekil 4.1’de yer alan şemada yüzey karakterizasyonu yöntemleri kısmında ifade edilmiştir.



Şekil 4.1 Korozyon davranışını inceleme yöntemleri

Verilmiş olan yöntemler, bu tez çalışması kapsamında incelenmiş olan yöntemlerdir. Ancak bunlar dışında çelik halatların korozyonunun incelenmesinde kullanılan ve Şekil 4.1’de ifade edilen başka yöntemler de vardır. Bunlar; eğme ve burulma testleri gibi mekanik deneyler; elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ve döngüsel voltametri gibi elektrokimyasal yöntemler; SEM, EDS, EDX, Raman spektroskopisi ve X-ışınları difraksiyonu (XRD) gibi yüzey karakterizasyonunun incelendiği yöntemlerdir.

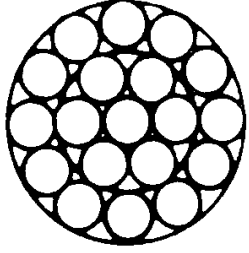
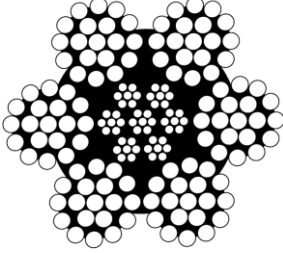
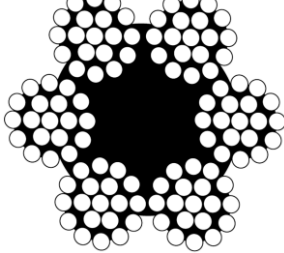
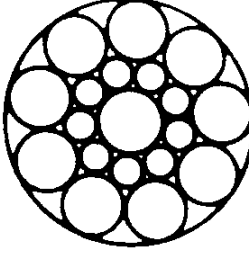
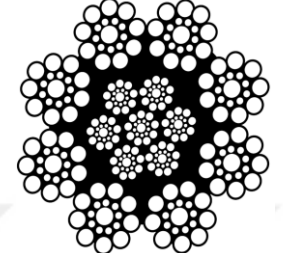
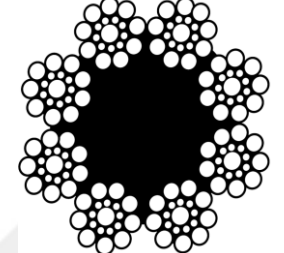
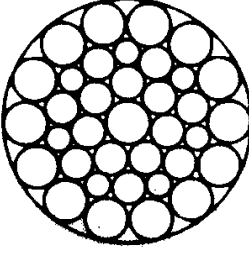
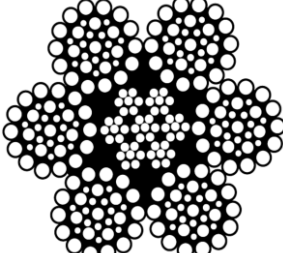
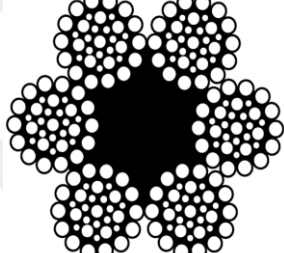
4.2 Yük Taşıma Halatlarının Seçilmesi

Deneylerde kullanılan halat tiplerinin seçiminde yük taşıma ve iletim sistemlerinde en sık kullanılan halat tipleri baz alınarak Standart, Seale ve Warrington Seale halat tipleri seçilmiştir. Bu halat tipleri kordon ve tel sayılarıyla beraber Tablo 4.1’de gösterilmiştir. Tüm halat tipleri için halat uzunluğu 300 mm ve halat çapı 8 mm seçilmiştir.

Tablo 4.1 Deneylerde kullanılan çelik tel halat tipleri

Çelik Özlü		Kendir Özlü	
Halat Tipi	Kordon x Tel Sayısı	Halat Tipi	Kordon x Tel Sayısı
Standart	6×19	Standart	6×19
Seale	8×19	Seale	8×19
Warrington Seale	6×36	Warrington Seale	6×36

Şekil 4.2’de çalışmada kullanılmak üzere belirlenen halat tiplerinin kordon ve halat kesit görünüşleri verilmiştir. İlk sütunda, seçilen 6×19 Standart, 8×19 Seale ve 6×36 Warrington Seale tipi halatların tek bir kordonlarının kesitleri görülmektedir. Standart ve Seale tipi halatların her bir kordonunda 19 adet tel, Warrington Seale tipi halatın her bir kordonunda ise 36 adet tel bulunmaktadır. Şekil 4.2’nin ikinci ve üçüncü sütunlarında ise çelik özlü ve kendir özlü olarak ayrı ayrı olacak şekilde halat kesitleri verilmiştir. Seçilen Standart ve Warrington Seale tipi halatlar 6 kordondan, Seale tipi halat ise 8 kordondan oluşmaktadır. Kordonlar, çelik veya kendir özlü çekirdek etrafında helisel olarak sarılarak halatları oluşturmaktadır.

	Kordon Kesiti	Halat Kesiti (Çelik Özlü)	Halat Kesiti (Kendir Özlü)
<i>6 × 19 Standart</i>			
<i>8 × 19 Seale</i>			
<i>6 × 36 Warrington Seale</i>			

Şekil 4.2 Çalışmada kullanılan çelik tel halatların ve kordonlarının kesit görünüşleri

Tablo 4.2, Tablo 4.3 ve Tablo 4.4’te sırasıyla çalışmada kullanılan 6×19 Standart, 8×19 Seale ve 6×36 Warrington Seale tipi halatların kordon ve halatın ayrı ayrı olmak üzere geometrik ve konstrüktif özellikleri verilmiştir. Halat kordonlarının konfigürasyonları Standart tip halatta 12+6+1; Seale tip halatta 9+9+1; Warrington Seale tip halatta 14+7/7+7+1 olarak değişmektedir. Bu standart gösterim, en dış katmandan içteki çekirdeğe kadar olan tel sayılarını ifade etmektedir. Tablolarda bunların dışında, kordonların her bir katmanında bulunan tellerin tel çapları, kordonların nominal çapları, hatve genişlikleri, ortalama sarmal çapları, kopma yükleri ile halatların nominal çapları, hatve genişlikleri, kopma yükleri gibi bazı özellikler verilmiştir.

Tablo 4.2 Standart kordon ve halat: Ana geometrik-yapısal özellikler

Kordon			
Teller	Tel çapları (mm)	Nominal çap (mm)	2.9
1	0.58	Hatve uzunluğu (mm)	25
6	0.58	Ortalama helis açısı	70 ⁰
12	0.58	Kopma yükü (kN)	75
Halat			
Kordon konfigürasyonu		St (12+6+1)	
Nominal çap (mm)		8	
Kordon hatve uzunluğu (mm)		65	
Kordondaki tellerin hatve miktarı (mm)		55	
Kopma yükü (kN)		428	

Tablo 4.3 Seale kordon ve halat: Ana geometrik-yapısal özellikler

Kordon			
Teller	Tel çapları (mm)	Nominal çap (mm)	2.6
1	0.70	Hatve uzunluğu (mm)	25
9	0.28	Ortalama helis açısı	70 ⁰
9	0.74	Kopma yükü (kN)	85
Halat			
Kordon konfigürasyonu		S (9+9+1)	
Nominal çap (mm)		8	
Kordon hatve uzunluğu (mm)		65	
Kordondaki tellerin hatve miktarı (mm)		55	
Kopma yükü (kN)		485	

Tablo 4.4 Warrington Seale kordon ve halat: Ana geometrik-yapısal özellikler

Kordon			
Teller	Tel çapları (mm)	Nominal çap (mm)	2.8
1	0.52	Hatve uzunluğu (mm)	25
7	0.48	Ortalama helis açısı	70 ⁰
7/7	0.48/0.38	Kopma yükü (kN)	80
14	0.58		
Halat			
Kordon konfigürasyonu		WS (14+7/7+7+1)	
Nominal çap (mm)		8	
Kordon hatve uzunluğu (mm)		65	
Kordondaki tellerin hatve miktarı (mm)		106	
Kopma yükü (kN)		456	

Çalışmada kullanılan halatların malzemesi, yüksek karbonlu bir çelik olan C83 alaşımsız karbon çeliğidir. Seçilen halat malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 4.5'te verilmiştir. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi seçilen halatların kimyasal bileşiminin büyük oranını karbon, mangan ve silisyum oluşturmaktadır.

Tablo 4.5 Çelik tel halatlar için kullanılan C83 çeliğinin nominal kimyasal bileşimi (Çelsan Çelik Halat, 2017)

	C	Mn	Si	P	S
%Wt	0,80	0,46	0,20	0,01	0,012

4.3 Metot 1: Yük Taşıma Halatlarının Malzeme Kütlesindeki Değişim Yöntemi ile Korozyon Dayanımlarının İncelenmesi

4.3.1 Materyal ve Metot

Döngüsel test uygulamalarından önce, bir laboratuvar da korozyon simülasyonu için uygulanan standart yöntem, geleneksel tuz spre yi (35 °C’de sürekli tuz spre yi) idi. Ancak bu yöntem dış ortamın doğal ıslak/kuru döngüsünü taklit etmekte başarısız olduğundan sıklıkla yetersiz korelasyonla sonuçlanıyordu. Günümüzde döngüsel korozyon test cihazları ile numuneler, açık havadakine benzer tekrarlayan döngülerdeki farklı ortamlara maruz kalmaktadır. Bu tip döngüler, tuzlu spre y, kurutma ve nemi bir araya getirmektedir. Deneylerde kullanılan yaşlandırma test cihazı bahsedilen döngülerle çalışan Şekil 4.3’te görülen Ascott CC1000ip marka ve model test cihazıdır. Test cihazı, 1000 L kabin hacmine ve 115 L tuzlu su bölmesi hacmine sahiptir. 4-6 bar hava basıncında ve 20-70 °C sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. Saatte 80 cm² alana 0.5-3.0 ml tuz püskürtme kapasitesi vardır.

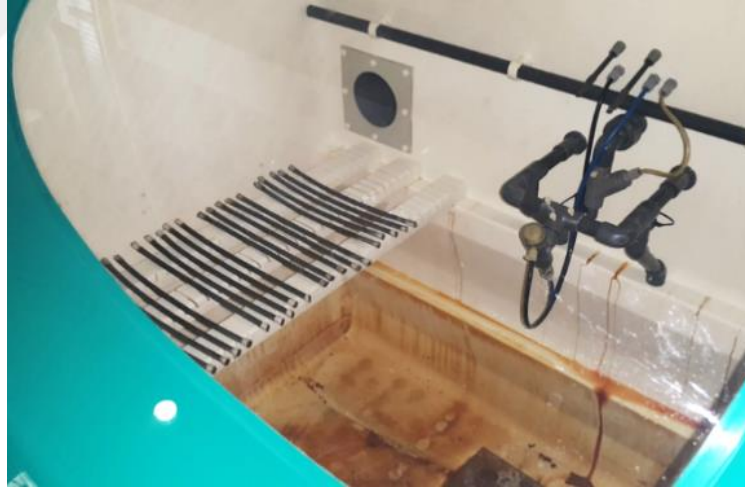


Şekil 4.3 Kullanılan yaşlandırma test cihazı (Kişisel arşiv, 2016)

Tablo 4.6’da, çalışma kapsamında uygulanan prosesler verilmiştir. 3 farklı yaşlandırma prosesi belirlenmiş olup aralarındaki temel fark korozyona maruz kalma süreleridir. Tüm prosesler 24 saatlik olup 30 günlük periyottan oluşmaktadır. Her bir proseste tuz sisi, %100 nem ve kurutma aşamalarındaki sürelerin değerleri değiştirilerek korozyona maruz kalma oranları farklılaştırılmıştır.

Tablo 4.6 Uygulanan yaşlandırma prosesleri

Proses I	8 saat tuz sisi	45 °C
	8 saat %100 nem	60 °C
	8 saat kurutma	60 °C
Proses II	4 saat tuz sisi	45 °C
	4 saat %100 nem	60 °C
	16 saat kurutma	60 °C
Proses III	2 saat tuz sisi	45 °C
	2 saat %100 nem	60 °C
	20 saat kurutma	60 °C



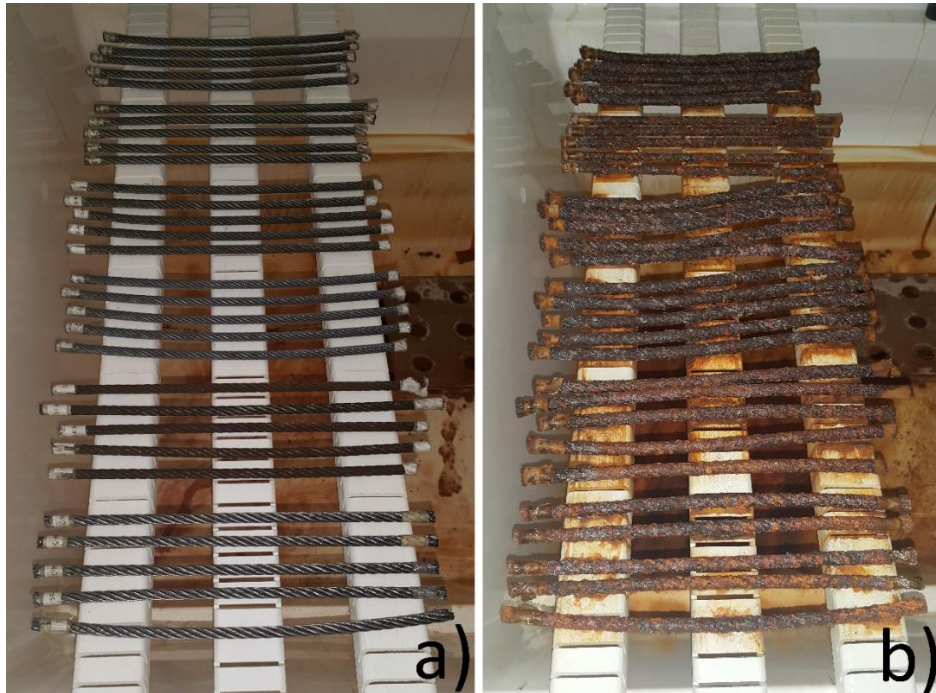
Şekil 4.4 Halatların test kabini içindeki yerleşimleri (Kişisel arşiv, 2016)

Yaşlandırma test cihazındaki işlemler ASTM B117 standardı gözetilerek yapılmıştır. Uygulanan sıcaklık değerleri, belirtilen standardın ve cihazın kullanım kılavuzundaki önerilen değerlerin beraber değerlendirilerek seçilmesiyle belirlenmiştir. Test kabini içerisinde tuzlu su çözeltisi %5 NaCl içermektedir. Tuzlu suyun kabin içinde numunelerin üzerine püskürtme şeklinde üniform damlacıklar halinde 15° ile 30° aralığındaki açı ile gelmesi sağlanır. Tuzlu su çözeltisinin pH değeri

6,6-7,1 arasında olmalıdır. Halatların test kabini içindeki yerleşimi kabin dışından Şekil 4.4'teki gibi görülmektedir. Seçilen halatlar, yaşlandırma test cihazına tüm yüzeyleri nemden ve tuzdan etkilenecek şekilde konulmuştur.

4.3.2 Sonuçlar

Halatlarda hızlı yaşlandırmanın etkisini iki şekilde görmek mümkündür. Bunlardan ilki, yaşlandırma sonrası yapılan gözle muayenedir. Şekil 4.5'te 30 gün boyunca korozyona maruz bırakılan halatların uğradığı tahribat ilk durumdaki haliyle karşılaştırılmıştır. Halatların yoğun korozyona maruz kaldığı proses I sonrası dış tabakaların dökülmesiyle halat çaplarında Şekil 4.6'daki gibi gözle görülür derecede incelme olmuş, en dış katmanlardaki kordonlarda bütünlük yok olmuştur. Halat uçlarında kordonları oluşturan teller korozyon etkisiyle Şekil 4.7'deki çelik özlü halatta olduğu gibi tamamen dökülmüş olup çekirdek (öz) tabakası açığa çıkmıştır. Yaşlandırma işlemi sonrası kendir özlü çekirdek, çelik özlü çekirdekten daha fazla nem absorbe ettiği için çapında gözle görülür artış olmuştur. Şekil 4.8'de bu durum görülmektedir. Proses II ve proses III'te korozyonun etkisi, proses I'e oranla daha az olup gözle görülen kusurlar azalmıştır.



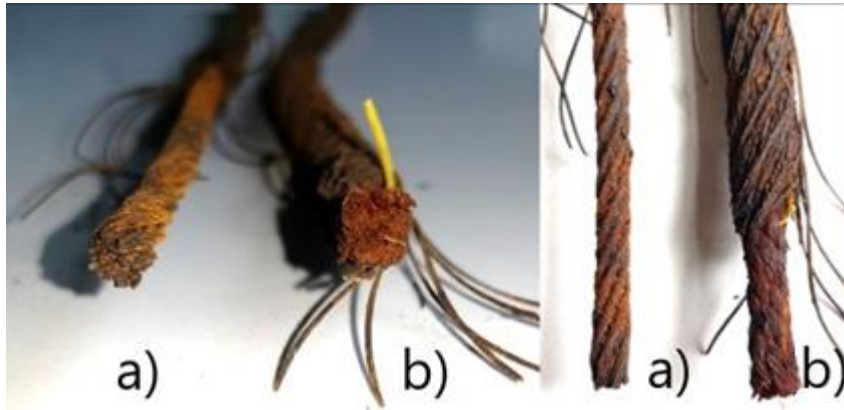
Şekil 4.5 Yaşlandırma öncesinde (a) ve sonrasında (b) halatların durumu (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 4.6 Halat çapındaki incelme (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 4.7 Çekirdek tabakasının açığa çıkması (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 4.8 Yaşlandırma işlemi sonrası kendir özlü çekirdek ile çelik özlü çekirdeğin karşılaştırılması: a) Çelik özlü halat b) Kendir özlü halat (Kişisel arşiv, 2017)

Halatlara hızlı yaşlandırma uygulamasında ikinci olarak, yaşlandırma öncesi ve sonrası halat kütlelerinin ölçülmesiyle halatlardaki korozyon etkisi incelenmiştir. Malzemelerde korozyon hızı ve korozyon direnci, kütledeki azalma ile belirlenebilir. Ancak bu daha çok yekpare malzemeler için geçerlidir. Bunlarda korozyona uğrayan kısım malzeme üzerinden uzaklaşır ve kütle azalır. Halat gibi kompleks geometrilerde

ise durum farklıdır. Çelik halatlar, kordonların çekirdek etrafına içten dışa sarıldığı katmanlı yapı nedeniyle boşlukludur. Bu boşluklar yaşlandırma işlemi sonrasında tuzu ve nemi tutmaya müsaittir. İç kısımda kalan nem ve tuz, dış kısımda gözle görülür bir korozyon belirtisi vermemesine rağmen çelik halatı işletme şartlarında içten aşındırıp mukavemetinin azalmasına yol açar. Bu nedenlerle, kütle artışı daha fazla olan halatlar, içinde daha fazla nem absorbe etmiş olup bu halatların korozyona dayanıklılığı daha düşüktür.

Proses I'e maruz bırakılan halatlarda halat deformasyonu fazla olduğundan dış katmanlarındaki kordonlar dökülmüş olup halatlar işlevlerini yitirmiştir. Bu nedenle kütle ölçümleri anlamlı bir sonuç vermeyeceğinden yapılmamıştır. Proses II ve proses III'e göre yapılan yaşlandırma testi sonrası halat kütlelerindeki artış Tablo 4.7'de verilmiştir. Verilen değerler her bir halat tipi için 5 numunenin ortalaması alınarak elde edilmiştir.

Tablo 4.7 Halatlarda yaşlandırma testi sonrası görülen kütle artışları

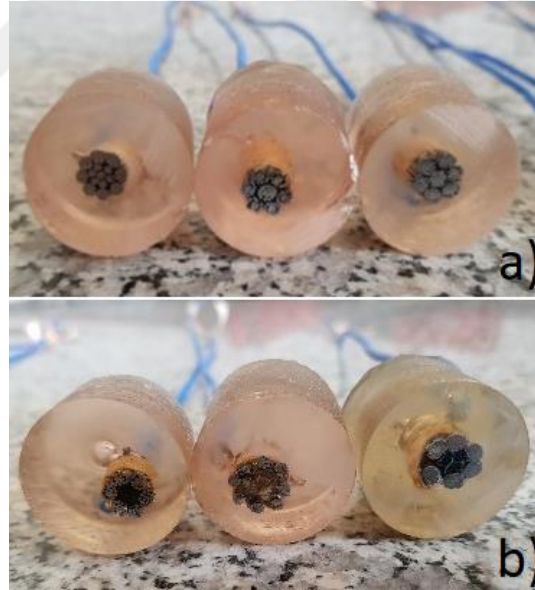
		Proses II	Proses III
Standart	Çelik Özlü	%2,76	%1,20
	Kendir Özlü	%9,78	%2,50
Seale	Çelik Özlü	%14,08	%3,62
	Kendir Özlü	%3,98	%0,74
Warrington Seale	Çelik Özlü	%0,96	%0,26
	Kendir Özlü	%4,30	%0,84

Tablo 4.7 incelendiğinde, hızlı yaşlandırma testi sonrasında oluşan yüzde kütle artışı proses II ve proses III'te farklı olduğu görülmektedir. Tüm halat tipleri için proses II sonrası oluşan kütle artışı diğer prosese göre daha fazladır. Aynı halat tipleri arasında, iki proses arasındaki fark 2 ile 4 kat aralığında değişmektedir. Çekirdek özü esas alınarak değerlendirildiğinde ise, Standart ve Warrington Seale tipi halatların kendir özlü olanlarında kütle artışı daha fazladır. Bu durum Seale tipi halat için tam tersidir. Çelik öze sahip Seale tipi halatın kütle artışı daha fazladır. Tüm halat tipleri beraber değerlendirildiğinde ise çelik özlü Warrington Seale tipi halatın yaşlandırma testi sonrası kütle artışı en az iken çelik özlü Seale tipi halatınki en fazla çıkmıştır.

4.4 Metot 2: Yük Taşıma Halatlarının Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi ile Korozyon Dayanımlarının İncelenmesi

4.4.1 Materyal ve Metot

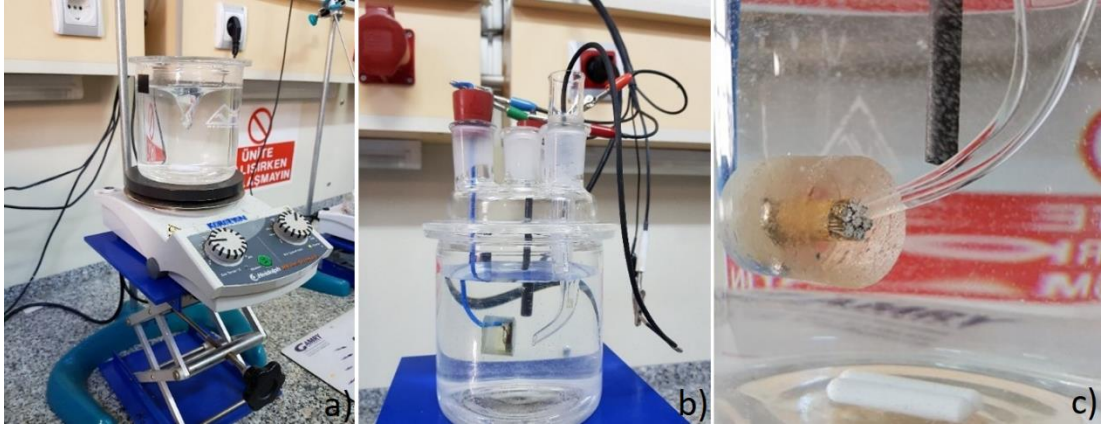
Tafel ekstrapolasyon yönteminde amaç, malzemelerin korozyon hızının gere en yakın şekilde belirlenmesidir. Bu koşulları sağlamak için de deneyler öncesinde numune hazırlıklarının standartlara bağlı kalınarak yapılması gerekmektedir. Elektrokimyasal korozyon deneyleri için başlangıçta belirlenen 2 farklı çekirdek malzemesine sahip 3 farklı halat tipi numunesi yaklaşık 10 mm kalınlığında kesilmiş, arka yüzeylerine bakır kablo lehimlenip epoksi kalıplara alınmıştır. Bir gün sonra kalıptan çıkartılan numuneler test edilecek yüzeylerine sırasıyla yapılan 400-600-800-1200 gritlik zımparalama işlemleri ardından alümina süspansiyonu ile parlatılmıştır. Elde edilen numuneler şekil 4.9’da gösterilmiştir.



şekil 4.9 Zımparalama ve parlatma sonucu elde edilen halat numuneleri: a) elik zl halat numuneleri
b) Kendir zl halat numuneleri (Kişisel arşiv, 2018)

1 litre ağırlıkça %3,5 NaCl zeltisi bir cam kapta manyetik karıştırıcıyla şekil 4.10a’daki gibi hazırlanıp içine l elektrot sistemi şekil 4.10b’deki gibi yerleştirilmiştir. Çalışma elektrodu olarak elik halat numunesi, Hg/HgCl referans elektrot ve yardımcı (karşıt) elektrot olan grafit ubuk %3,5 NaCl zeltisi içine

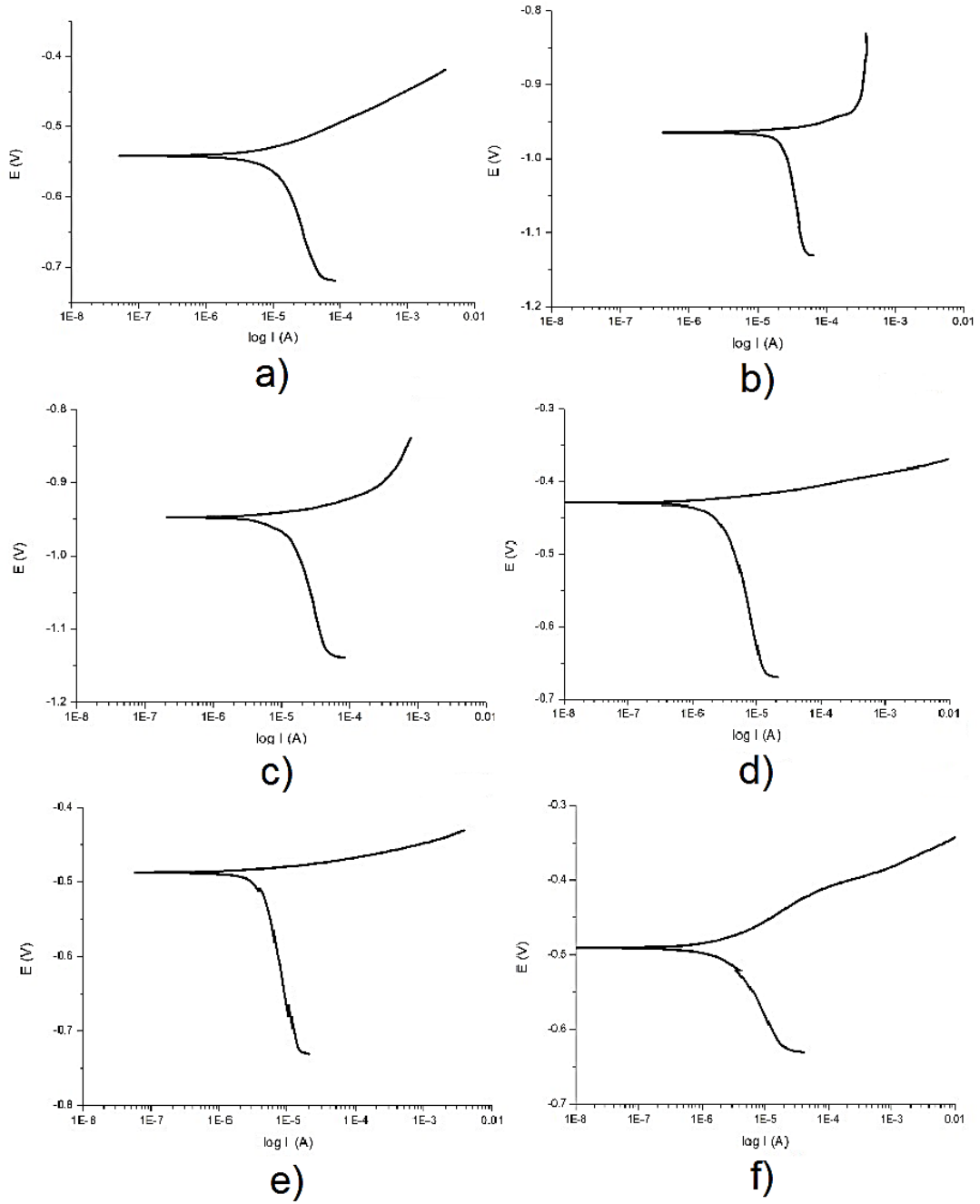
daldırılmış ve her bir elektrot kabloyla potansiyostat cihazına bağlanmıştır. Luggin kılcalının açık ucu, numune kesitine bakacak vaziyette Şekil 4.10c'deki gibi konumlandırılmıştır. Korozyon testleri öncesinde, test numunelerinin 30 dakika boyunca açık devre potansiyeli (OCP) stabilize edilmiştir. Tüm potansiyodinamik polarizasyon testleri oda sıcaklığında yapılmıştır. Deneyler, çalışma elektrodu potansiyeli 2 V'a (OCP'ye göre) ulaştığında veya mevcut yoğunluk değeri 5 mA cm^{-2} 'ye yükseldiğinde anodik polarizasyon sırasında sonlandırılmıştır. Elektrokimyasal ölçümler 0,17 mV/s tarama hızında gerçekleştirilmiş olup Gamry Framework yazılımı kullanılmıştır. Son olarak Tafel deneyi sırasında potansiyel-akım verilerinin kaydedildiği dosya Gamry Echem Analyst yazılımında açılmış ve Tafel Fit modülü kullanılarak korozyon hızı hesaplanmıştır.



Şekil 4.10 Elektrokimyasal test düzeneği: a) %3,5 NaCl çözeltisinin manyetik karıştırıcı ile hazırlanması b) Üçlü elektrot sisteminin cam kap içerisindeki görünümü c) Luggin kılcalının konumu (Kişisel arşiv, 2018)

4.4.2 Sonuçlar

Belirlenen halat tiplerinden hazırlanan numunelerin yapılan elektrokimyasal deneyler sonucu elde edilen Tafel eğrileri Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Tafel ekstrapolasyon grafiği, iki eğrinin birleşmesiyle meydana gelmektedir. Pozitif potansiyel (+V) yönünde ilerleyen eğri anodik reaksiyon eğrisini, negatif potansiyel (-V) yönünde ilerleyen eğri ise katodik reaksiyon eğrisini ifade etmektedir. Şekillerdeki Tafel eğrileri, her iki reaksiyon eğrisinin oluşturduğu denge halini göstermektedir.



Şekil 4.11 Farklı halat numunelerinin yapılan elektrokimyasal deneyler sonucu elde edilen Tafel eğrileri
a) Çelik özlü Standart halat, b) Çelik özlü Seale halat, c) Çelik özlü Warrington Seale halat, d) Kendir özlü Standart halat, e) Kendir özlü Seale halat, f) Kendir özlü Warrington Seale halat

Tafel eğrileri yardımıyla elde edilen korozyon potansiyeli (E_{corr}), korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) ve korozyon hızı değerleri Tablo 4.8’de verilmiştir. E_{corr} ve I_{corr} değerleri, anodik ve katodik Tafel eğrilerinin çizgisel olan kısımlarının uzatılıp birleştirilmesi ve elde edilen noktanın yatay ve dikey eksenlerdeki izdüşümlerinin

hesaplanmasıyla bulunmuştur. Korozyon hızları ise, I_{corr} değerlerine bağlı olarak Tafel denklemi ile elde edilmiş olup bir yıllık süreçte korozyon nedeniyle malzemede oluşan aşınmayı milimetre olarak ifade etmektedir.

Tablo 4.8 Halat numunelerinin deneyler sonucu elde edilen E_{corr} , I_{corr} ve korozyon hızı değerleri

		E_{corr} (mV)	I_{corr} (μA)	Korozyon Hızı (mmpy)
Standart	Çelik Özlü	-541	11,5	0,3217
	Kendir Özlü	-430	4,08	0,1659
Seale	Çelik Özlü	-964	27,5	0,7911
	Kendir Özlü	-487	3,61	0,1168
Warrington Seale	Çelik Özlü	-948	11,3	0,3183
	Kendir Özlü	-499	3,76	0,1237

Tablo 4.8'den elde edilen sonuçlara göre; kendir özlü halatların korozyon akım yoğunlukları ve dolayısıyla korozyon hızları çelik özlü halatlara göre daha düşüktür. Çelik özlü halatlar bazında karşılaştırma yapılacak olursa, korozyon hızı en yüksek halat tipi Seale tipi olup en düşük korozyon hızına sahip halatsa Warrington Seale'dır. Standart tip halat da ona oldukça yakın değerdedir. 0,7911 mmpy değeriyle çelik özlü Seale tipi halatın korozyon hızı oldukça yüksek çıkmıştır. Kendir özlü halatlarda ise; en yüksek korozyon hızı Standart tipi halatta, en düşük ise Seale tipi halattadır. Korozyon potansiyelleri bakımından kıyaslama yapılacak olursa, çelik özlü halatların E_{corr} değerleri kendir özlü halatların E_{corr} değerlerine oranla daha düşük çıkmıştır. Özellikle çelik özlü Seale ve Warrington Seale tipi halatların E_{corr} değerleri oldukça düşüktür. Kendir özlü halatların korozyon potansiyelleri ise birbirlerine yakın değerlerde çıkmıştır.

4.5 Metot 3: Yük Taşıma Halatlarının Mekanik Deneyler ile Korozyon Dayanımlarının İncelenmesi

4.5.1 Materyal ve Metot

4.5.1.1 Halatlarda Yapılan Modifikasyonlar

Tez planlamasında öncelikle, halatların çekme testinde çenelerden kaymadan rahatlıkla kopabilmesi için halatların uç kısmına çinko döküm yapılması öngörülmüştür. Şekil 4.12’de görülen bu yöntem, halatın önce kordonlarına ardından her bir kordonun tellerine ayrılarak uç kısmının yaklaşık 2 cm içerisinde bağ teli ile bağlanmasıyla uygulanmaktadır. Ardından bir kalıp içerisinde halat uçlarına çinko döküm yapılmaktadır. Bu yöntemde teller ayrıldığı için halatın döküm malzemeye tutunması ve çekme testinin başarıyla sonuçlanma olasılığı oldukça yüksektir. Ancak 500 adet halat numunesi üretileceği için malzeme ve işçilik ücretlerinin oldukça yüksek çıkması nedeniyle bu yöntem uygulanmamıştır.



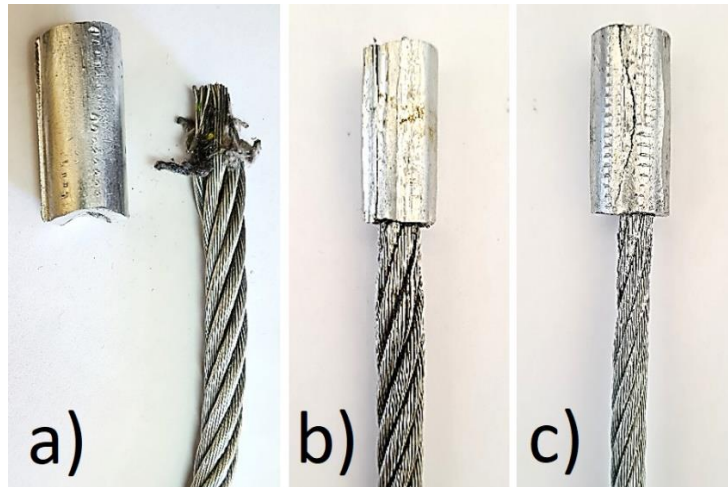
Şekil 4.12 Çinko döküm ve bağ teli yöntemiyle halat numunesinin hazırlanması (İmrak ve Salman, 2010)

Yöntem değişikliğinin zorunlu olması nedeniyle Şekil 4.13’te görülen halat numuneleri deneme yanılma yoluyla sırasıyla uygulanmıştır. İlk başta alüminyum alaşımlı bir yüksük halatın iki ucuna preslenmiş ve çekme testi yapılmıştır. Test sonucu, Şekil 4.14a’da görüldüğü gibi başarısızlıkla sonuçlanmış ve yüksklerden biri çıkmıştır. İkinci uygulamada presleme basıncı artırılarak tekrar denenmiş ancak sonuç

Şekil 4.14b’de görüldüğü gibi halatın bir tarafının yüksükten yaklaşık 1 cm kaymasıyla sonuçlanmıştır. Üçüncü uygulamada halat sapan formuna getirilmiş ve yüksüklerin dış kısmından dairesel formun kesilip atılmasıyla imal edilmiştir. Çekme testinde, Şekil 4.14c’de görüldüğü gibi halatın yine yaklaşık 1 cm sıyırmasıyla test sonlanmıştır.



Şekil 4.13 Sırasıyla uygulanan halat numuneleri (Kişisel arşiv, 2021)



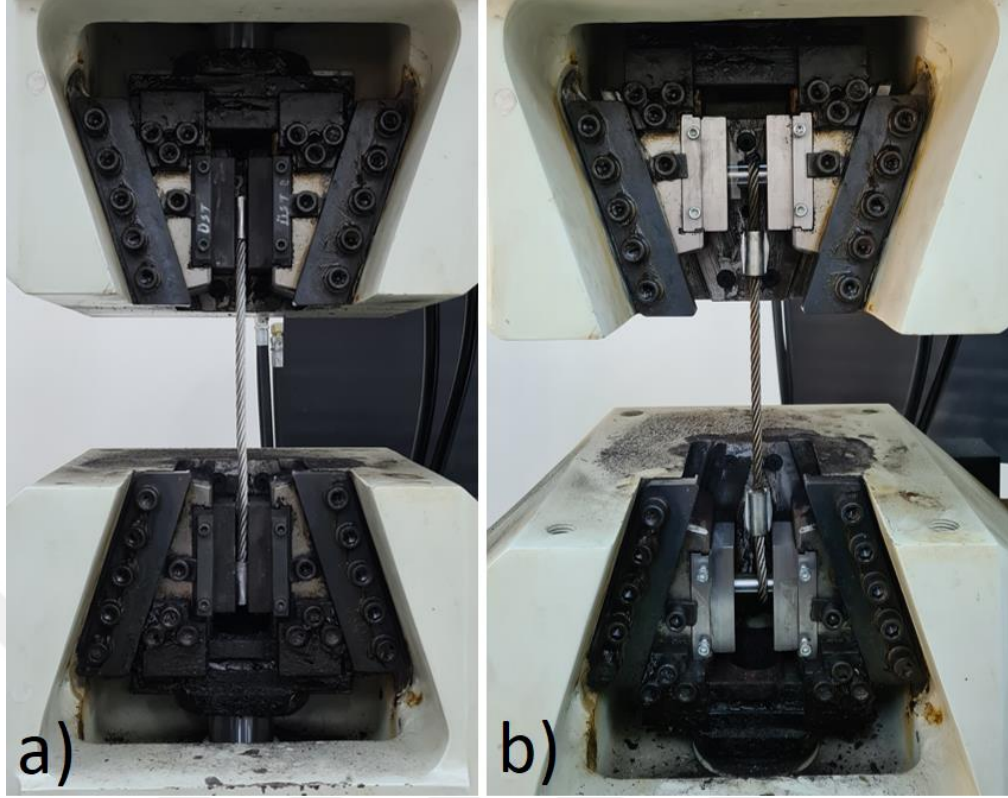
Şekil 4.14 Çekme testleri sonrası halat numuneleri (Kişisel arşiv, 2021)

Tüm bu yöntemlerin başarısızlığa uğramasının ardından Şekil 4.13'te son sırada görülen sapan sistemine geçilmiştir. Bu yöntemin bir önceki uygulanan yöntemden farkı, uç kısımlardaki dairesel formların kesilip atılmamasıdır. Halat formu değiştiği için bir sonraki yöntem için üretilecek olan gerilmeli korozyon test cihazında da değişikliğe gidilmesi gerekmiştir. Test cihazı tasarımında yapılan bu değişiklikler bir sonraki bölümde değerlendirilecektir.

Halat uçlarının yapısının değişmesiyle çekme test cihazında diğer halat numunelerinde kullanılan çenelerin uyumsuz olduğu görülmüştür. Bu nedenle sapanlı yeni tip halat numunelerine uygun yeni çeneler tasarlanıp üretilmiştir. Çenelerde dayanımın yüksek olması gerektiğinden aşınmaya dayanıklı Hardox 400 çelik malzeme seçilmiştir. Şekil 4.15'te bir çenenin montajı yapılırken çekilen fotoğrafı görülmektedir. Montaj yapılırken öncelikle halatın dairesel uç kısmı bir pim vasıtasıyla üst çeneler arasına sabitlenir. Ardından aynı işlem alt çeneler için de yapılır. Cihaz dışında yapılan bu montajların ardından montaj bütünü çekme test cihazına takılarak sabitlenir. Halat numunesinin ve üretilen çenelerin çekme test cihazına montajlanmış hali Şekil 4.16b'de verilmiş ve önceki denenilen halat numunesinin çekme test cihazında takılı iken olan durumunun verildiği Şekil 4.16a ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.15 Yeni tip halat numunesine uygun tasarlanıp üretilen çekme çenesi (Kişisel arşiv, 2021)



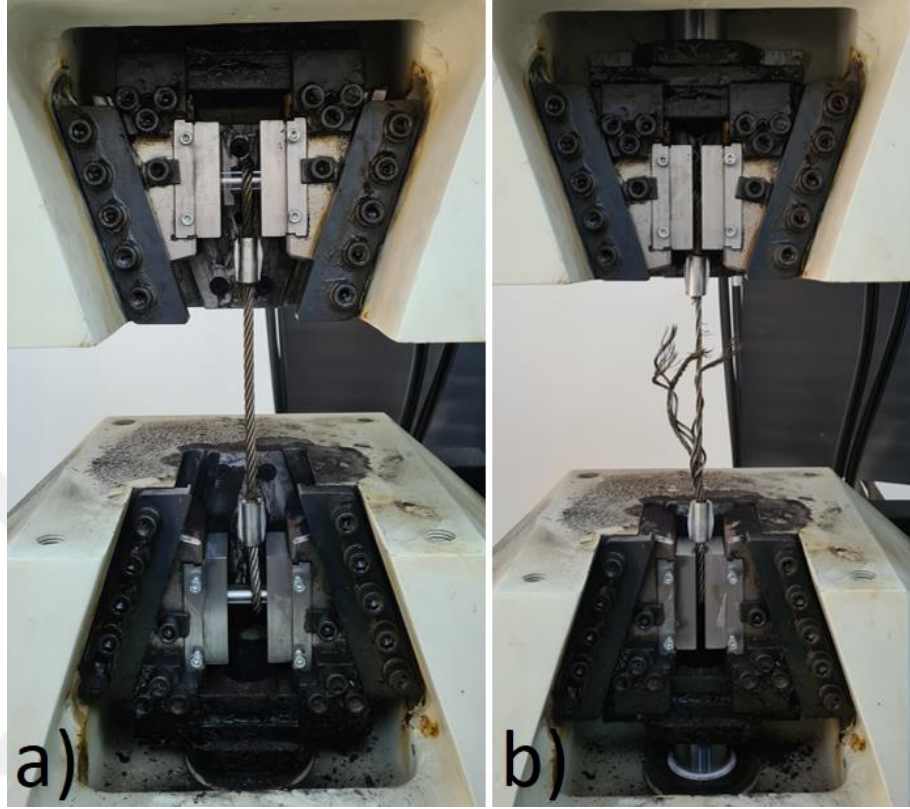
Şekil 4.16 a) Eski tip halat numunesinin çekme test cihazındaki görünümü b) Yeni tip halat numunesinin tasarlanıp üretilen yeni çenelerle beraber çekme test cihazındaki görünümü (Kişisel arşiv, 2021)

4.5.1.2 Deneylerin Gerçekleştirilmesi

Çekme deneyleri Shimadzu UH-F500kNI çekme test cihazında yapılmıştır. Denenen son tip halat numunesi herhangi bir sıyırmaya maruz kalmadan 35 kN değerinde kopmuştur. Şekil 4.17’de halatın çekme testinden önceki ve sonraki durumu verilmiştir.

Bu aşamadaki deneylerde, önceki bölümlerde bahsedilen hızlı yaşlandırma testlerinde proses III olarak ifade edilen yaşlandırma işlemine maruz bırakılan halatların, Shimadzu çekme test cihazında 2 mm/dk hızında çekme testleri yapılarak mukavemetleri karşılaştırılmıştır. Proses III’ün seçilme sebebi, bu proseste numunelere uygulanan nem ve tuz sürelerinin diğer proseslere oranla daha kısa süre olmasıdır. Bu sayede halatlara daha az korozyon etki ederek σ_{Ak} ve σ_{max} değerleri karşılaştırılabilir seviyelerde çıkmıştır. Çekme deneylerinde, tek bir kordonun

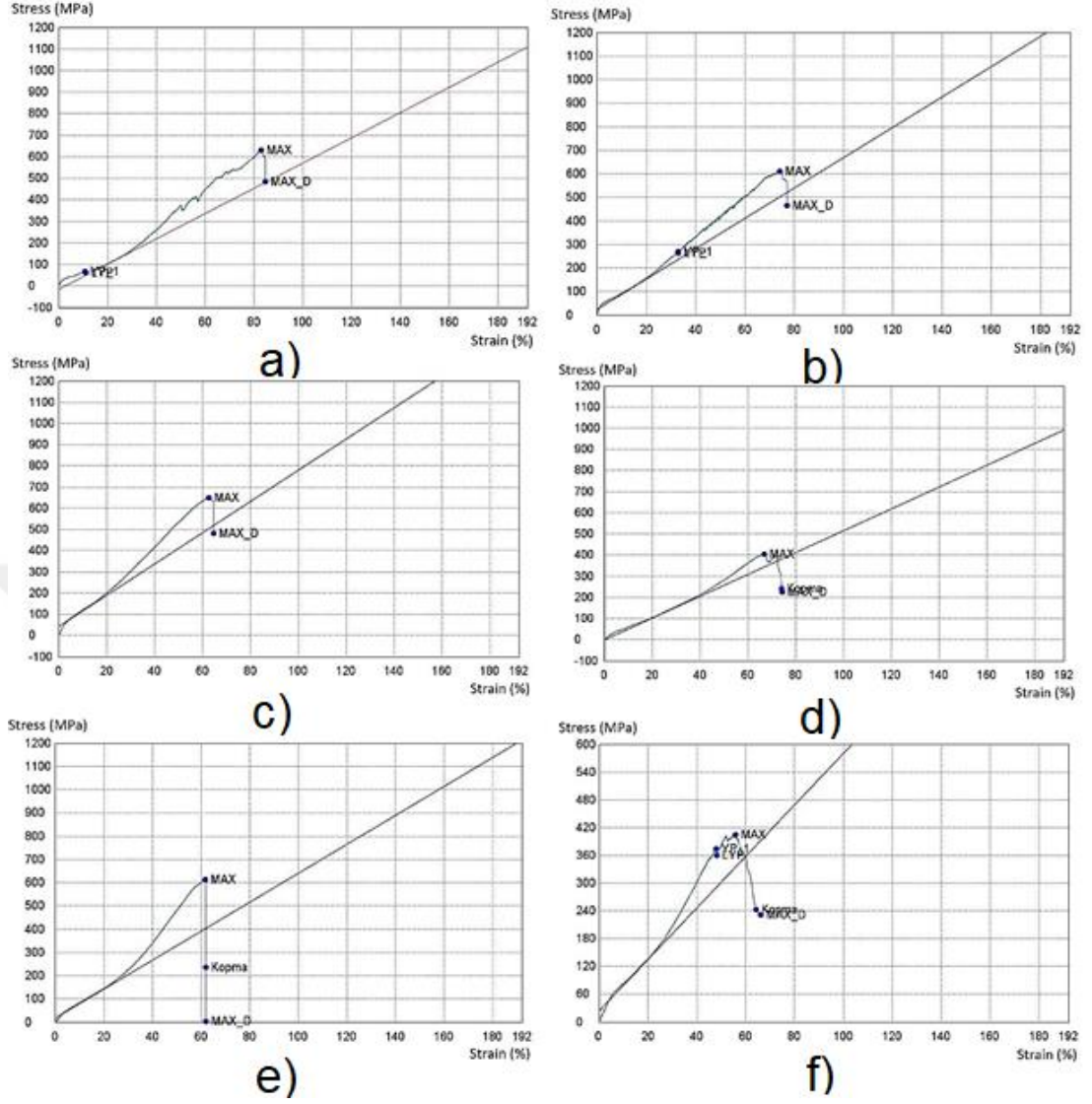
kopmasıyla başlayan test süreci, kordonların tamamının dolayısıyla halatın kopmasıyla sonuçlanmıştır.



Şekil 4.17 Yeni tip halat numunesinin çekme testinden önceki (a) ve sonraki (b) durumu (Kişisel arşiv, 2021)

4.5.2 Sonuçlar

Halatların çekme testleri sonucu elde edilen Hooke diyagramları Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Ayrıca akma gerilmesi, maksimum gerilme ve maksimum uzama değerleri Tablo 4.9’da verilmiştir. Halatların ilk durumdaki mukavemet değerleri ise kataloglardan elde edilmiş olup çelik ve kendir özlü grupların kendi içlerinde yaşlandırma öncesi akma gerilmesi ve maksimum gerilme değerleri birbirine oldukça yakındır.



Şekil 4.18 Halatların çekme deneyleri sonucu elde edilen Hooke diyagramları a) Çelik özlü Standart halat, b) Çelik özlü Seale halat, c) Çelik özlü Warrington Seale halat, d) Kendir özlü Standart halat, e) Kendir özlü Seale halat, f) Kendir özlü Warrington Seale halat

Tablo 4.9 Halat numunelerinin çekme deneyleri sonucu elde edilen mukavemet değerleri

		σ_{Ak} (MPa)	σ_{Max} (MPa)	Max Uzama (%)
Standart	Çelik Özlü	378,215	630,471	82,863
	Kendir Özlü	234,567	403,329	66,907
Seale	Çelik Özlü	367,416	609,172	77,107
	Kendir Özlü	373,019	613,821	61,750
Warrington Seale	Çelik Özlü	484,334	649,627	62,657
	Kendir Özlü	349,574	404,154	55,842

Tablo 4.9 incelendiğinde, halatlar arasında akma gerilmesi ve maksimum gerilme değerlerinin aynı oranda değiştiği görülmüştür. Kataloglar incelendiğinde seçilen çelik özlü halatların halat tipi fark etmeksizin akma gerilmesi değerlerinin 500 MPa civarında; kendir özlü halatların ise 400 MPa civarında olduğu belirlenmiştir. Proses III olarak ifade edilen hızlı yaşlandırma işlemi sonrasında çelik özlü halatlar incelendiğinde Standart ve Seale tipi halatların %27'ye varan oranda mukavemet değerlerinde azalma olduğu görülmesine rağmen Warrington Seale halatta bu oran %3 civarında kalmıştır. Kendir özlü halatlarda ise mukavemet değerlerindeki azalma oranı Standart halatta %42, Seale halatta %7 ve Warrington Seale tipi halatta %13 dolaylarındadır. Belirlenen bu azalma oranları için akma gerilmesi değerleri baz alınmıştır.

Tablo 4.9 değerlendirildiğinde halatların korozyon hızlarının ve korozyon dirençlerinin karşılaştırılması Tablo 4.10'deki gibi belirlenmiştir. Bu değerlendirme yalnızca mekanik özellikler göz önüne alınarak oluşturulmuştur.

Tablo 4.10 Halatların korozyon hızlarının ve korozyon dirençlerinin karşılaştırılması (KH: Korozyon hızı, KD: Korozyon direnci, St: Standart, S: Seale, WS: Warrington Seale)

Kendir Özlü	Çelik Özlü
$KH_{St} > KH_{WS} > KH_S$	$KH_S > KH_{St} > KH_{WS}$
$KD_S > KD_{WS} > KD_{St}$	$KD_{WS} > KD_{St} > KD_S$

4.6 Metot 4: Yük Taşıma Halatlarının Gerilmeli Korozyon Çatlama Testleri ile Korozyon Dayanımlarının İncelenmesi

4.6.1 Materyal ve Metot

4.6.1.1 Ön Gerilmeli Korozyon Test Cihazı

Halatların gerilmeli korozyon çatlama davranışlarını belirleyebilmek için öncelikle çelik halatlara uygun bir gerilmeli korozyon test cihazı tasarlanıp üretilmiştir. Tasarlanan cihazda dikkat edilmesi gereken kısım halatlara uygulanacak gerilmenin deney boyunca sabit kalmasıdır. Bu da helisel bası yayı yardımıyla

kolaylıkla sağlanır. Şekil 3.3'te verilen ön gerilmeli düzeneklerden çekme çubuğu düzeneği seçilmiş ancak tasarlanan test cihazında cıvata-somun sistemi ile beraber helisel yay kullanılmıştır. Halata verilmesi gereken ön gerilmeye karşılık gelen kuvvet torkmetre ile sisteme verilecek ve yay basılacaktır, sonrasında yayda depolanan enerjiyi yay geri vermeye çalışarak açılacak ve halata çekme kuvveti uygulayacaktır.

Halata verilecek ön gerilme ile halatın çekme diyagramındaki elastik sınır aşılmamalı yani plastik bölgeye geçilmemelidir. Bunun için orantı sınırına göre hesap yapılmıştır. Daha önceki çalışmalarda yaşlandırılmış altı farklı halatın yapılan çekme testleri sonucu çekme diyagramları ve dolayısıyla mukavemet değerleri belirlenmiştir. Ortalamaları alınarak orantı sınırı $\sigma_{or,ort} = 150 \text{ MPa}$ olarak bulunur. Halatların kesit alanı da ortalama $50,26 \text{ mm}^2$ 'dir. Halatlara uygulanması gereken kuvvet,

$$\sigma = \frac{F}{A} \rightarrow 150 = \frac{F}{50,26} \rightarrow F = 7539 \text{ N} \approx 750 \text{ daN} \quad (4.1)$$

olarak bulunur. $F = -\lambda \cdot \Delta x$ formülünden de helisel bası yayı seçilerek gerekli deformasyon miktarı uygulanır. Cıvata hesabı da şu şekildedir:

$$\frac{750}{\frac{\pi d_1^2}{4}} \leq \frac{\sigma_{AK}}{2} \quad (4.2)$$

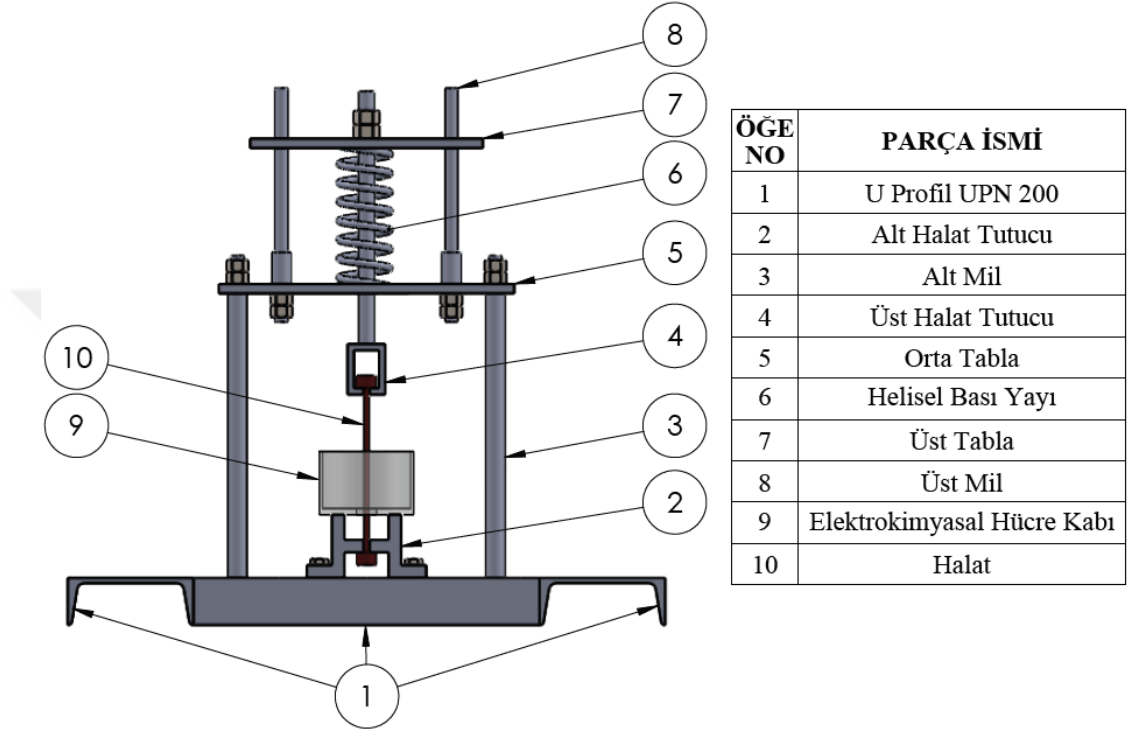
Test cihazında kullanılmak üzere $d_1 = 20,319 \text{ mm}$ olan M24 cıvata seçilmiştir. Buradan üstteki denklemde $4,63 \text{ daN/mm}^2 \leq \sigma_{AK}$ olarak bulunur. 8.8 kalitede M24 cıvatanın belirlenen mukavemeti rahatlıkla sağlayacağı görülmektedir. Pratik sıkma momenti formülünden cıvatalara torkmetre ile verilmesi gereken moment,

$$M_{s,top} = 0,2 \cdot F_{ön} \cdot d \rightarrow M_{s,top} = 0,2 \cdot 7500 \cdot 24 = 36000 \text{ Nmm} = 36 \text{ Nm} \quad (4.3)$$

olarak bulunur.

Yapılan hesaplamalar da dikkate alınarak tasarlanan gerilmeli korozyon test cihazı Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Sisteme kuvvet, 7 numara ile gösterilen üst tablanın üst

kısımında bulunan kontra somunların torkmetre ile sıkılmasıyla sağlanır. Somun-cıvata sistemine 36 Nm sıkma momenti ile ön gerilme sağlanması, işletme kuvveti etkisi altında, helisel yaydan dolayı üst halat tutucunun yukarıya çıkmasına ve dolayısıyla ona bağlı olan halatın gerilmesine neden olur.

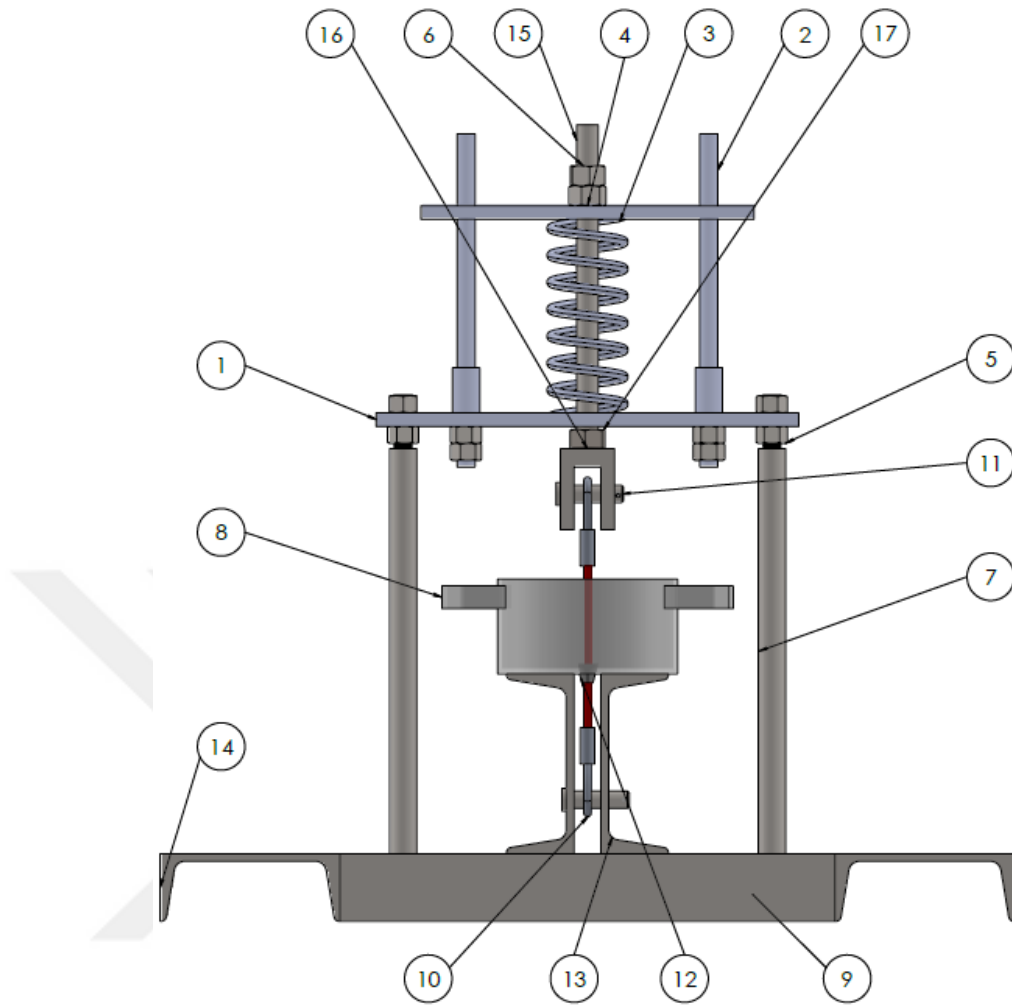


Şekil 4.19 Tasarlanan ön gerilmeli korozyon test cihazı

Halat ön gerilme kuvvetine maruzken diğer yandan da 9 numara ile gösterilen elektrokimyasal hücre kabı içerisindeki tuzlu su veya sülfürik asit solüsyonu vasıtasıyla korozyona maruz bırakılmaktadır. Bu şekilde, Şekil 3.1’de de belirtilen ve gerilmeli korozyon için gerekli olan ortam, malzeme ve yük sağlanmış olmaktadır.

4.6.1.2 Ön Gerilmeli Korozyon Test Cihazında Yapılan Modifikasyonlar

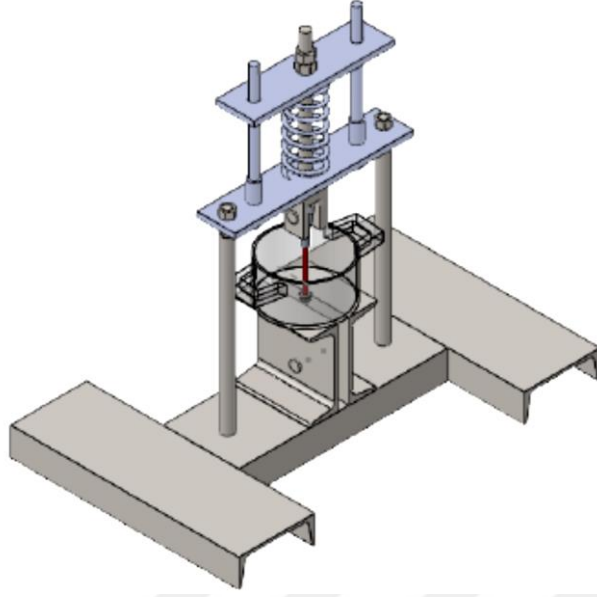
Kullanılan halat numunelerinin formu değiştiği için üretilecek olan gerilmeli korozyon test cihazında da değişikliğe gidilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu değişiklikler daha çok alt halat tutucu, üst halat tutucu ve elektrokimyasal hücre kabı üzerine yoğunlaşmıştır. Gerilmeli korozyon test cihazının değişiklikler sonucu meydana gelen son hali Şekil 4.20’de ve kullanılan parçaların listesi Tablo 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.20 Gerilmeli korozyon test cihazının tasarım değişikliği sonucu oluşan son hali

Tablo 4.11 Gerilmeli korozyon test cihazı parça listesi

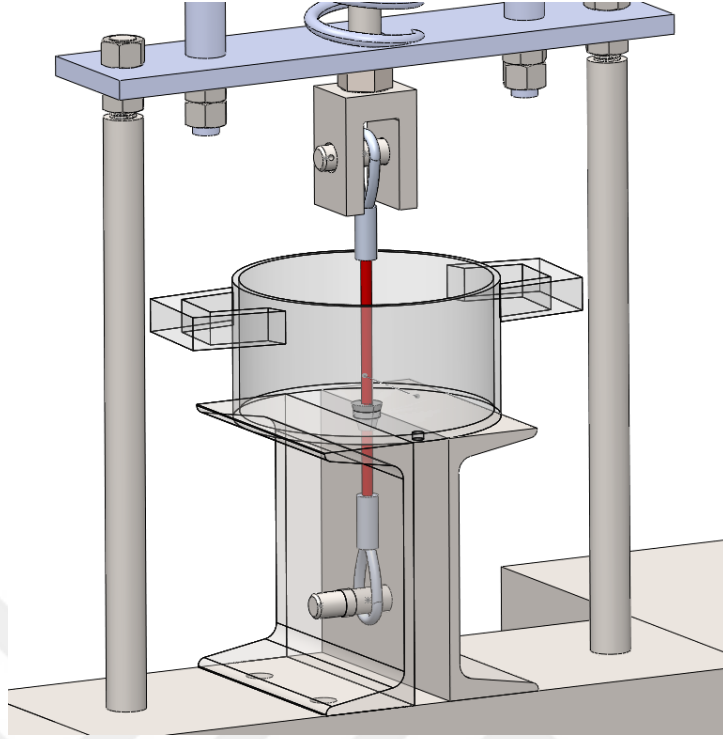
ÖĞE NO	PARÇA ADI	MİKTAR
1	Orta Tabla	1
2	Üst Mil	2
3	Helisel Bası Yayı	1
4	Üst Tabla	1
5	M20 Cıvata + Somun	12
6	M24 Cıvata + Somun	2
7	Alt Mil	2
8	Kap	1
9	Alt U Profil UPN200	1
10	Sapan Halat	1
11	Pim 20 mm	2
12	HDPE Sızdırmaz Konik Tıpa	2
13	Tutucu U Profil UPN200	2
14	Yan U Profil UPN200	2
15	Üst Tutucu Parça 1	1
16	Üst Tutucu Parça 2	1
17	M24 Cıvata	1



Şekil 4.21 Tasarlanan ön gerilmeli korozyon test cihazının izometrik görünümü

İlk tasarımda alt halat tutucu tabandaki U profile cıvatalar ile bağlanmıştı. Şekil 4.21’de izometrik görünümü verilen yeni tasarımda bu parçada değişikliğe gidilmiştir. Alın yüzeyleri birbirine bakan iki U profilin alt U profile kaynaklı bağlantı ile tutturulmasıyla alt halat tutucu oluşturulmuştur. İki U profil arasındaki boşluğa sapan halatın bir pim vasıtasıyla bağlanarak montajı yapılacaktır. Aynı değişiklik üst halat tutucuda da gerçekleştirilmiştir. Yine burada da pimli bağlantı ile halatın montajı gerçekleştirilecektir. Bu detaylar Şekil 4.22’de gösterilmiştir.

Elektrokimyasal hücre kabında ise sapan halatın uç kısmının geçebileceği şekilde alt delikte çap genişliğine gidilmiştir. Genişleyen çapta sızdırmazlığı azaltabilmek için 2 adet HDPE sızdırmaz konik tıpa kullanılmıştır. Tıpalar montajlandıktan sonra halatın heliselliğinden dolayı oluşabilecek az miktardaki sızdırmazlık ise her deney öncesi gerekli kısmın silikon ile kapatılmasıyla sağlanacaktır. Kabın alt kısmında deney sonrası kap içindeki sıvının tahliyesini karşılamak için 10 mm çapında ikinci bir delik daha açılmıştır. Elektrokimyasal hücre kabının rahatlıkla tutulabilmesi için yan tarafında tutma yüzeyleri tasarlanmıştır. Tüm bu tedbirler daha çok H_2SO_4 çözeltisi için uygulanacak deneyler göz önüne alınarak düşünülmüştür. Elektrokimyasal hücre kabı ve konik tıpa malzemeleri %50 konsantrasyondaki H_2SO_4 çözeltisine dayanabilecek şekilde seçilmiştir.



Şekil 4.22 Üst halat tutucu, alt halat tutucu ve elektrokimyasal hücre kabına ait detay görünüm

4.6.1.3 Gerilmeli Korozyon Çatlama Testlerinin Planlanması ve Numunelerin Hazırlanması

Çalışma kapsamında %3,5 NaCl çözeltisi için 90 adet ve %5 H₂SO₄ çözeltisi için 90 adet olacak şekilde toplam 180 test yapılması planlanmıştır. Tablo 4.12’de her bir halat grubu için uygulanan test sayıları görülmektedir. Her bir test (numunenin cihaza bağlanması ve sızdırmazlık işlemlerinin sağlanması da dahil olmak üzere) yaklaşık 2 saat sürmektedir. Bu da yaklaşık 360 saate karşılık gelmektedir.

Şekil 4.23’te çelik halatlar, korozyona karşı alınan tedbirler bakımından görsel olarak karşılaştırılmıştır. Şekil 4.23a’da herhangi bir galvanizleme işlemi yapılmamış olan siyah halat gösterilmiştir. Bu ve Şekil 4.23b’de görülen sıcak daldırmayla galvanizlenmiş halat tipleri piyasadan hazır olarak alınmıştır. Şekil 4.23c’de verilen çinko astar ile boyanan halat ise piyasada hazır bulunmayıp tez kapsamında denenilen bir korozyon direncini artırma yöntemidir. Kullanılan boya, DYO tarafından üretilen DYPOX Zinc Primer-08, %80 çinko içeren epoksi bir astardır. Sapan halat formuna getirilmiş çelik tel halatlar tiner ile temizlendikten sonra Şekil 4.24’te gösterildiği gibi

astarlanmış ve 12 saat kurumaya bırakılmıştır. Boyama işleminde üç katman bulunur. Bunlar sırasıyla çinko bakımından zengin epoksi astar (40 µm), epoksi ara madde (160 µm) ve poliüretan son kat (40 µm)'tır.

Tablo 4.12 Her bir halat grubu için uygulanan test sayıları (%3,5 NaCl çözeltisi ve %5 H₂SO₄ için ayrı ayrı olacak şekilde)

		Galvanizlenmemiş (Siyah)	Sıcak Daldırmayla Galvanizlenmiş	Çinko Bakımından Zengin Epoksi Astar ile Boyanmış
Standart	Çelik Özlü	5	5	5
	Kendir Özlü	5	5	5
Seale	Çelik Özlü	5	5	5
	Kendir Özlü	5	5	5
Warrington Seale	Çelik Özlü	5	5	5
	Kendir Özlü	5	5	5



Şekil 4.23 Çelik tel halatların korozyon tedbirleri bakımından karşılaştırılması a) Galvanizlenmemiş b) Sıcak daldırmayla galvanizlenmiş c) Epoksi astar ile boyanmış (Kişisel arşiv, 2021)



Şekil 4.24 Çelik halatların çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanması (Kişisel arşiv, 2021)

4.6.1.4 Deneylerin Gerçekleştirilmesi

Çelik halatların ön gerilmeli korozyon testlerinin yapılması için tasarlanan cihaz BAP projesi kapsamında üretilmiş ve son hali Şekil 4.25’te gösterilmiştir. İlk fotoğrafta elektrokimyasal hücre kabı olmadan görülen cihaz ikinci fotoğrafta hücre kabı ve elektrotlarla beraber verilmiştir. Elektrokimyasal hücre kabı içerisinde, çalışma elektrodu olarak çelik halat, %3,5 NaCl çözeltisi için Hg/HgCl referans elektrot, %5 H₂SO₄ çözeltisi için Hg/HgSO₄ referans elektrot ve yardımcı (karşıt) elektrot olarak grafit çubuk gerekli çözelti içine daldırılmakta ve her bir elektrot kabloyla potansiyostat cihazına bağlanmaktadır. Elektrokimyasal ölçümler 0,17 mV/s tarama hızında olup Gamry Framework yazılımı kullanılmaktadır.

Elektrokimyasal hücre kabı oluşturulmadan önce çelik halat, üst halat tutucuya ve alt halat tutucuya pimler vasıtasıyla bağlanır. Cihazın en üstündeki somun, tork metre aracılığıyla hesaplanan tork verilerek sıkılır. Halat ile elektrokimyasal hücre kabı arasındaki boşluk, iki adet konik keçe yardımıyla kapatılır. Halatın helisel olması nedeniyle oluşan ve çözeltinin dışarı sızmasına yol açacak boşluk da silikon yardımıyla kapatılır ve bir saat civarı silikonun kuruması beklenir. Şekil 4.26’da

görülen bu sızdırmazlık elemanları ile sistemin sızdırma sorunu tamamen engellenmiş olacaktır.

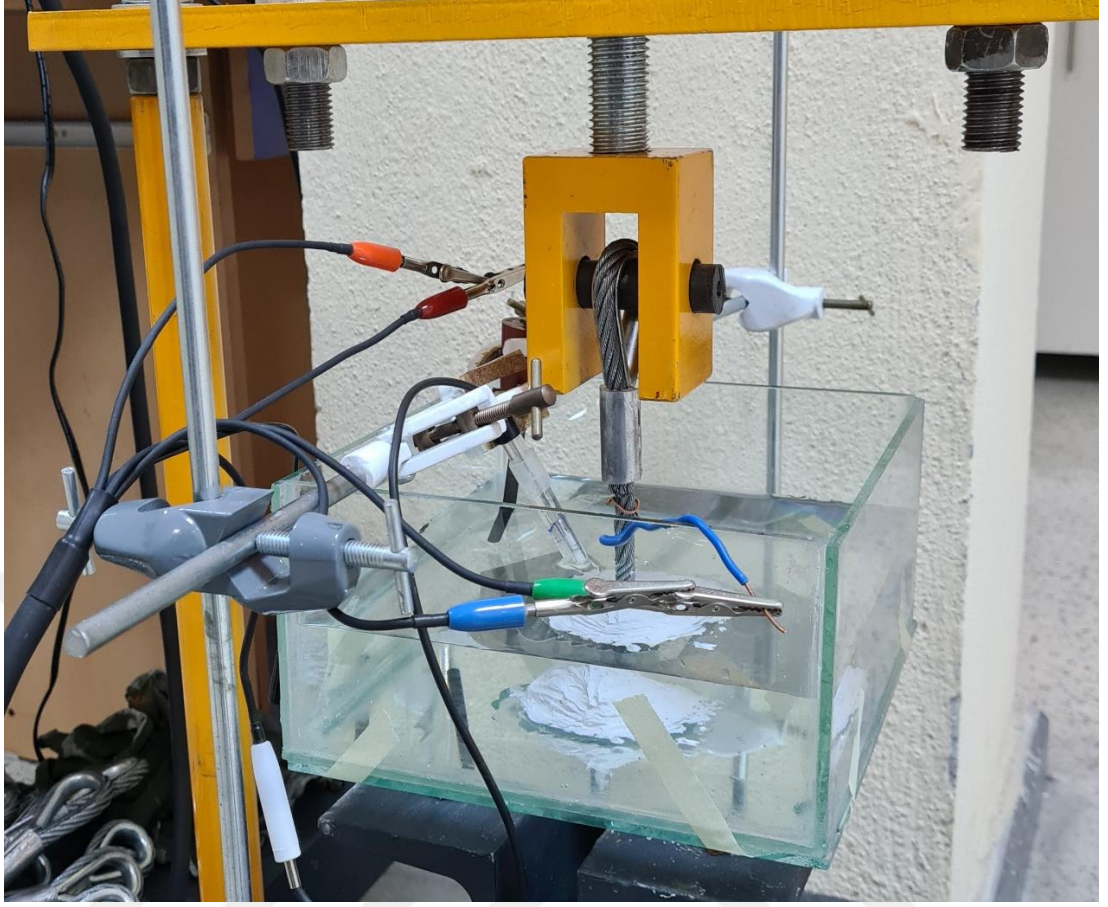


Şekil 4.25 Ön gerilmeli korozyon test cihazı (Kişisel arşiv, 2021)



Şekil 4.26 Sızdırmazlık için kullanılan keçe (Kişisel arşiv, 2021)

Şekil 4.27’de elektrokimyasal hücrenin deney anında yakın plandan çekilmiş fotoğrafı bulunmaktadır. Çalışma elektrodu, referans elektrot ve yardımcı elektrot iletken yardımcı uçlar vasıtasıyla sisteme bağlanmaktadır. Sistemde işlenen veriler bilgisayar aracılığıyla Şekil 4.28’de görüldüğü üzere Tafel eğrilerini vermektedir.



Şekil 4.27 Ön gerilmeli korozyon test cihazında oluşturulan elektrokimyasal hücre (Kişisel arşiv, 2022)



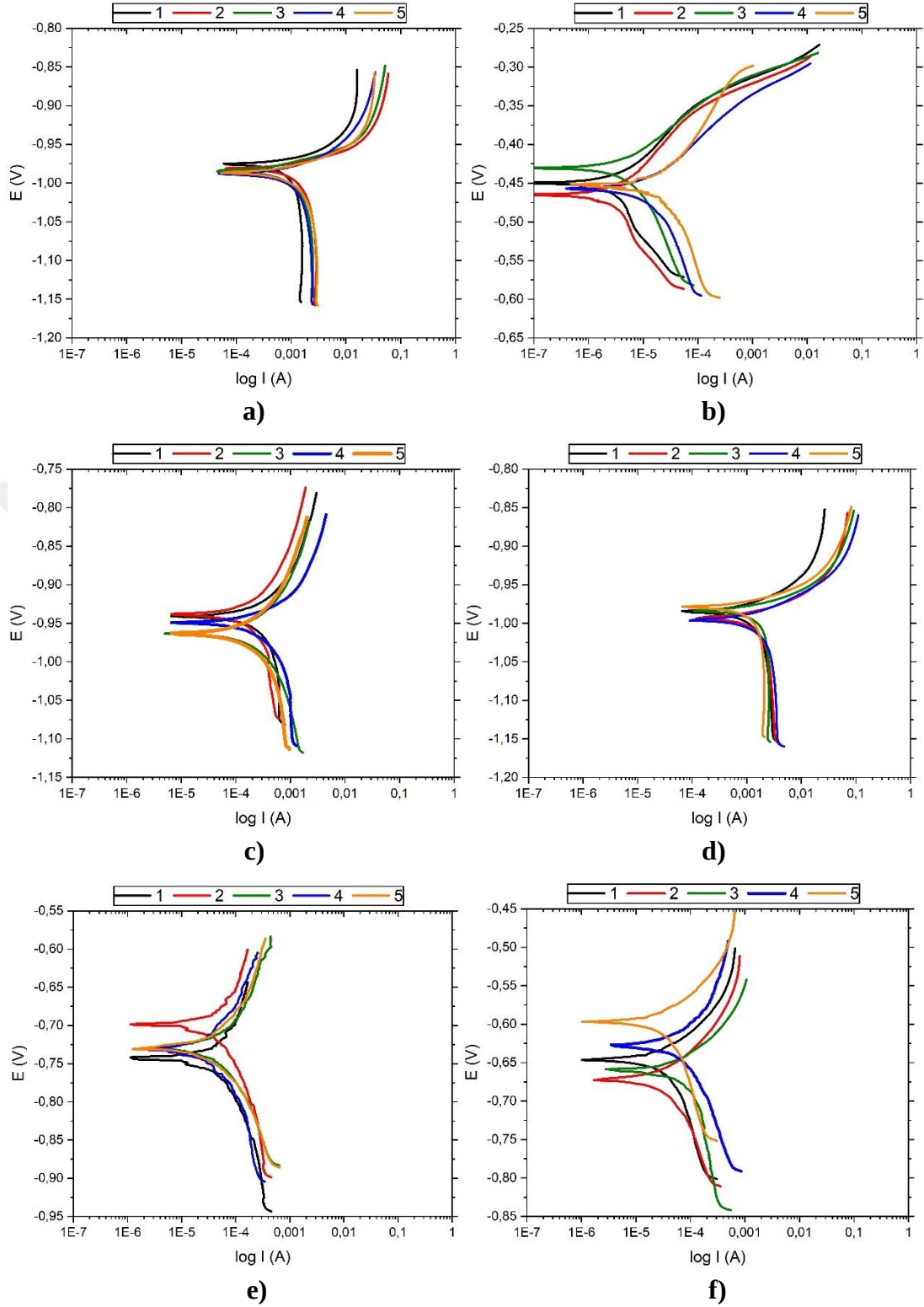
Şekil 4.28 Ön gerilmeli korozyon test cihazındaki deney sonrası Tafel eğrisinin elde edilmesi (Kişisel arşiv, 2022)

4.6.2 Sonuçlar

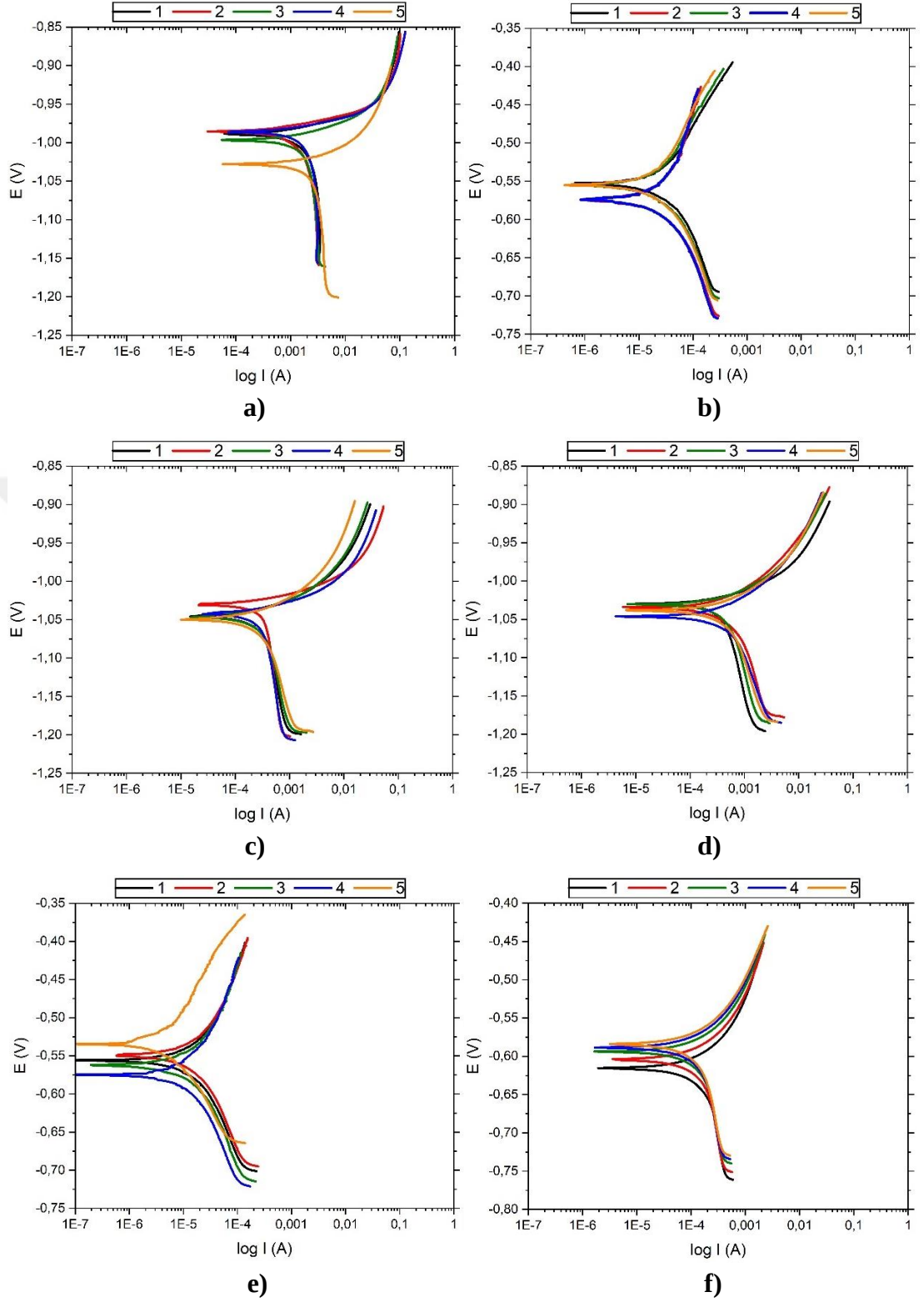
Çelik yük taşıma halatlarının gerilmeli korozyon çatlaması testleri kapsamında planlandığı gibi her bir halat grubu için beş farklı numune ile deneyler tekrarlanmış ve sonuçların birbirleri ile uyumluluğu denetlenmiştir. Uygulanan test sayıları Tablo 4.12’de de ifade edilmiştir. Deneyler sonucu halatların Tafel diyagramları elde edilmiştir. %3,5 NaCl çözeltisi için Standart halat Tafel diyagramları Şekil 4.29’da, %3,5 NaCl çözeltisi için Seale halat Tafel diyagramları Şekil 4.30’da, %3,5 NaCl çözeltisi için Warrington Seale halat Tafel diyagramları Şekil 4.31’de, %5 H₂SO₄ çözeltisi için Standart halat Tafel diyagramları Şekil 4.32’de, %5 H₂SO₄ çözeltisi için Seale halat Tafel diyagramları Şekil 4.33’te ve %5 H₂SO₄ çözeltisi için Warrington Seale halat Tafel diyagramları Şekil 4.34’teki grafiklerde verilmiştir.

Grafiklerde aynı halat tiplerine ait sonuçların bazı grafiklerdeki ufak sapmalara rağmen uyumlu olduğu görülmüştür. Bu ufak sapmaların nedeni de sızdırmazlığı sağlamak için konik keçeler çevresinde kullanılan silikonun deney süresi bitmeden çözünmeye başlaması olmuştur. Her bir halat tipinden beş farklı numunenin test edilmesi de zaten bu tip sorunların önceden öngörülmesinden dolayıdır.

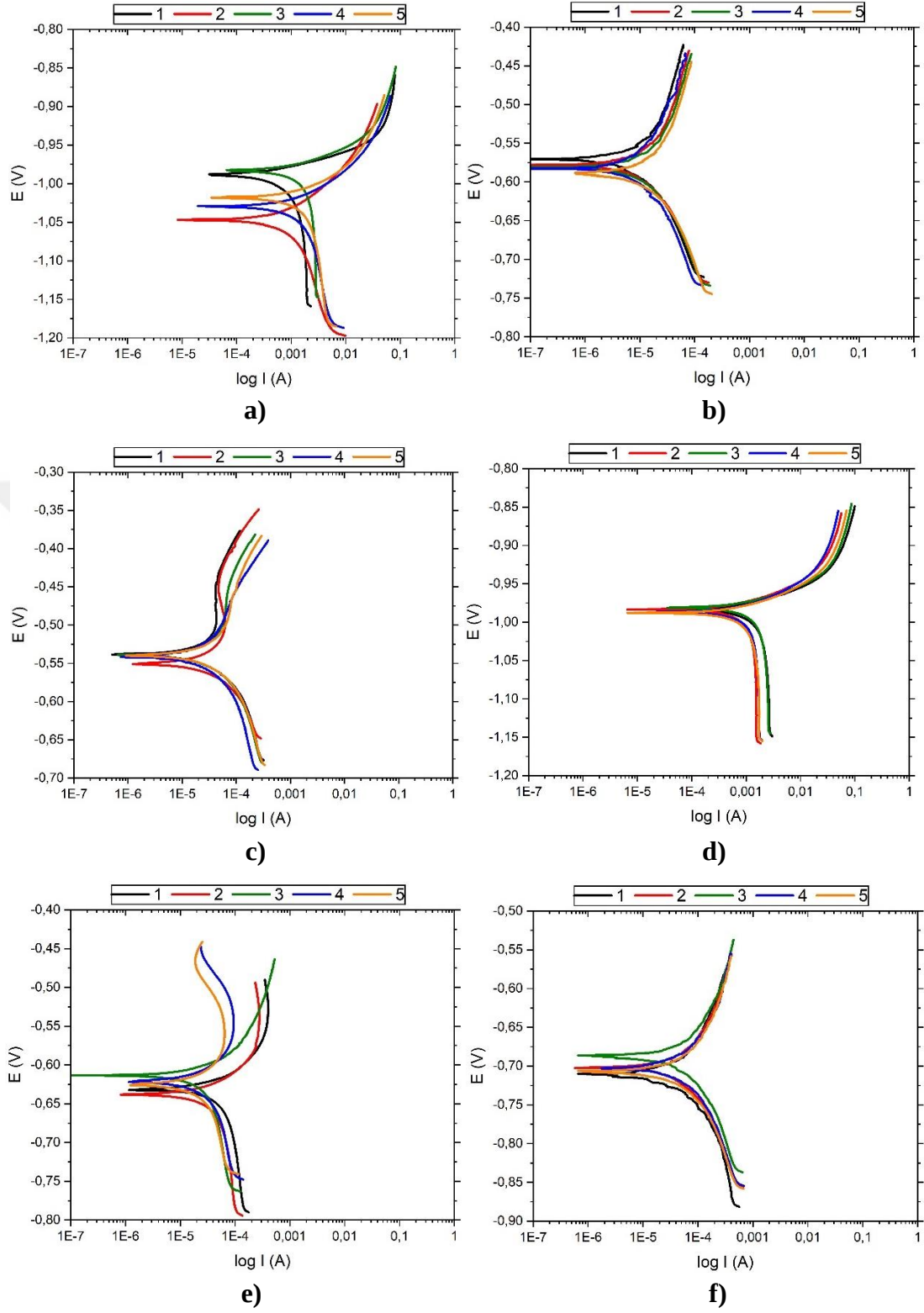
Deneylerin ardından elde edilen veriler Gamry Echem Analyst yazılımında açılarak Tafel Fit modülü ile hesaplanmış ve gerekli çıktılar elde edilmiştir. Diyagramlardan elde edilen bu çıktılar; korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}), korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon hızı değerleridir. Her bir halat tipi için beş farklı numunenin sonuçları bulunup ortalamaları alınmıştır. %3,5 NaCl çözeltisi için elde edilen sonuçlar Tablo 4.13’te, %5 H₂SO₄ çözeltisi için elde edilen sonuçlar Tablo 4.14’te verilmiştir. Bu sonuçlar ile korozyon hızı değerleri karşılaştırılıp halatların korozyon dayanımları kıyaslanabilecektir.



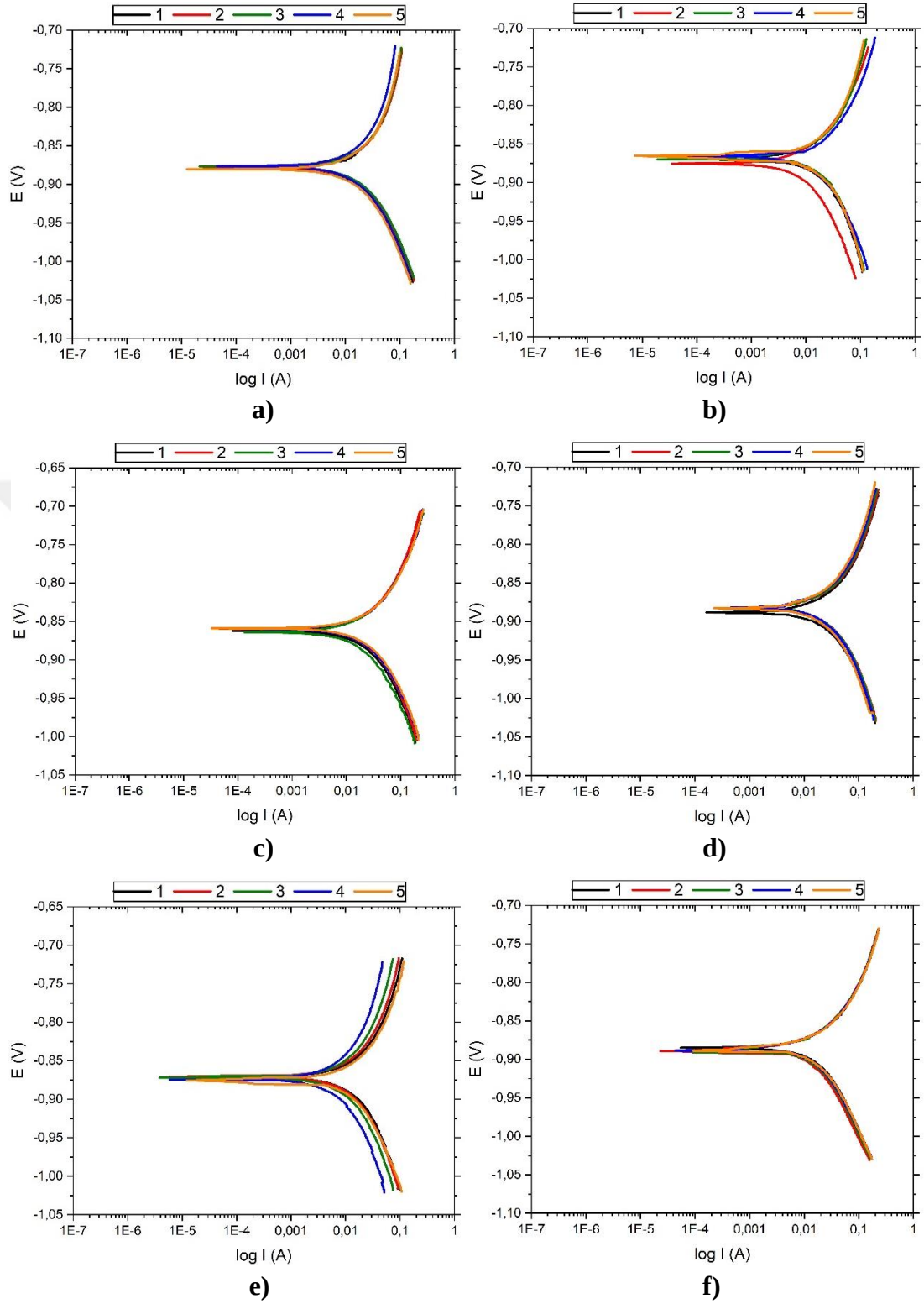
Şekil 4.29 %3,5 NaCl çözeltisi için Standart halat Tafel diyagramları a) Standart halat, çelik özlü, galvanizlenmemiş b) Standart halat, çelik özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş c) Standart halat, çelik özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış d) Standart halat, kendir özlü, galvanizlenmemiş e) Standart halat, kendir özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş f) Standart halat, kendir özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış



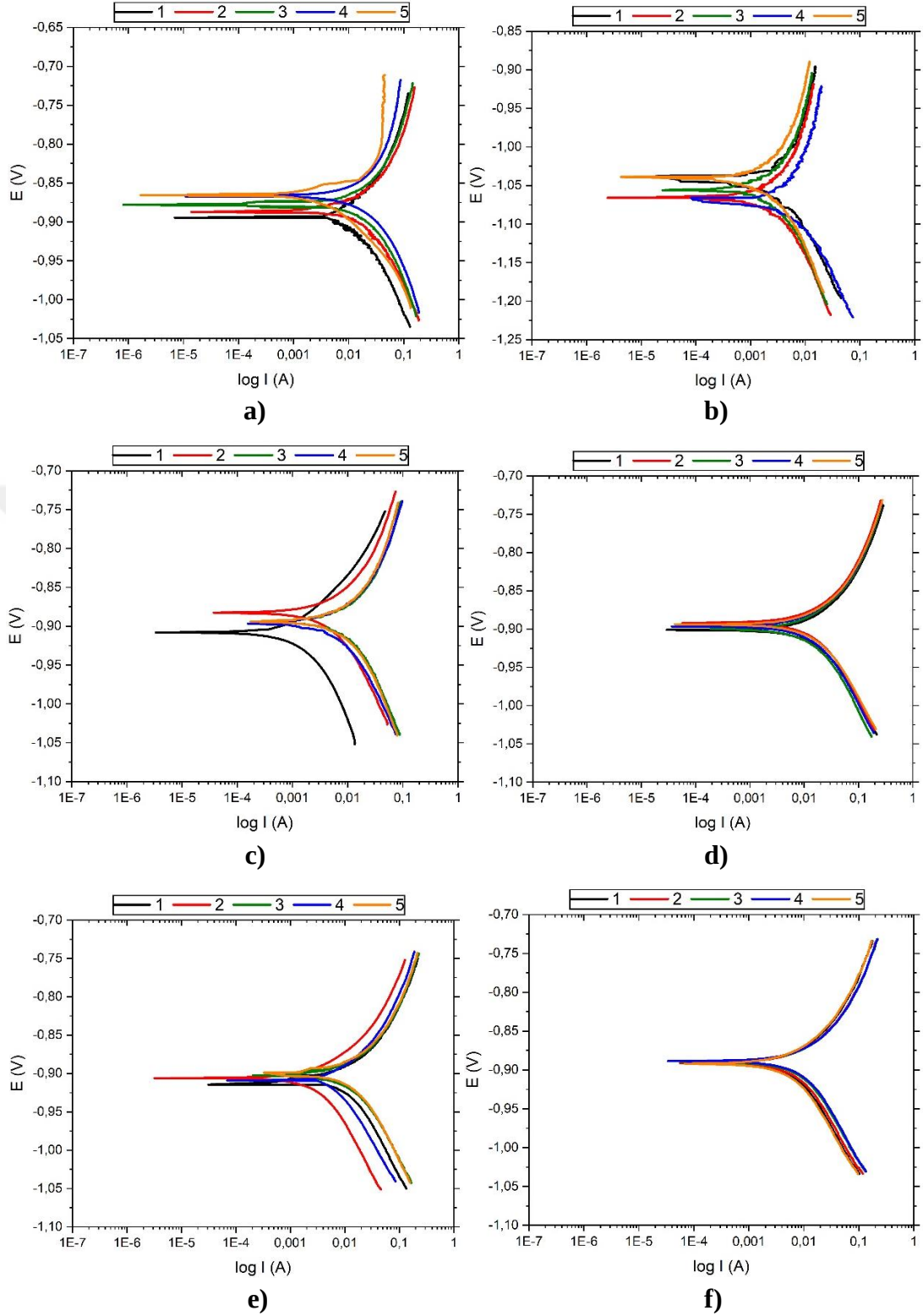
Şekil 4.30 %3,5 NaCl çözeltisi için Seale halat Tafel diyagramları a) Seale halat, çelik özlü, galvanizlenmemiş b) Seale halat, çelik özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş c) Seale halat, çelik özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış d) Seale halat, kendir özlü, galvanizlenmemiş e) Seale halat, kendir özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş f) Seale halat, kendir özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış



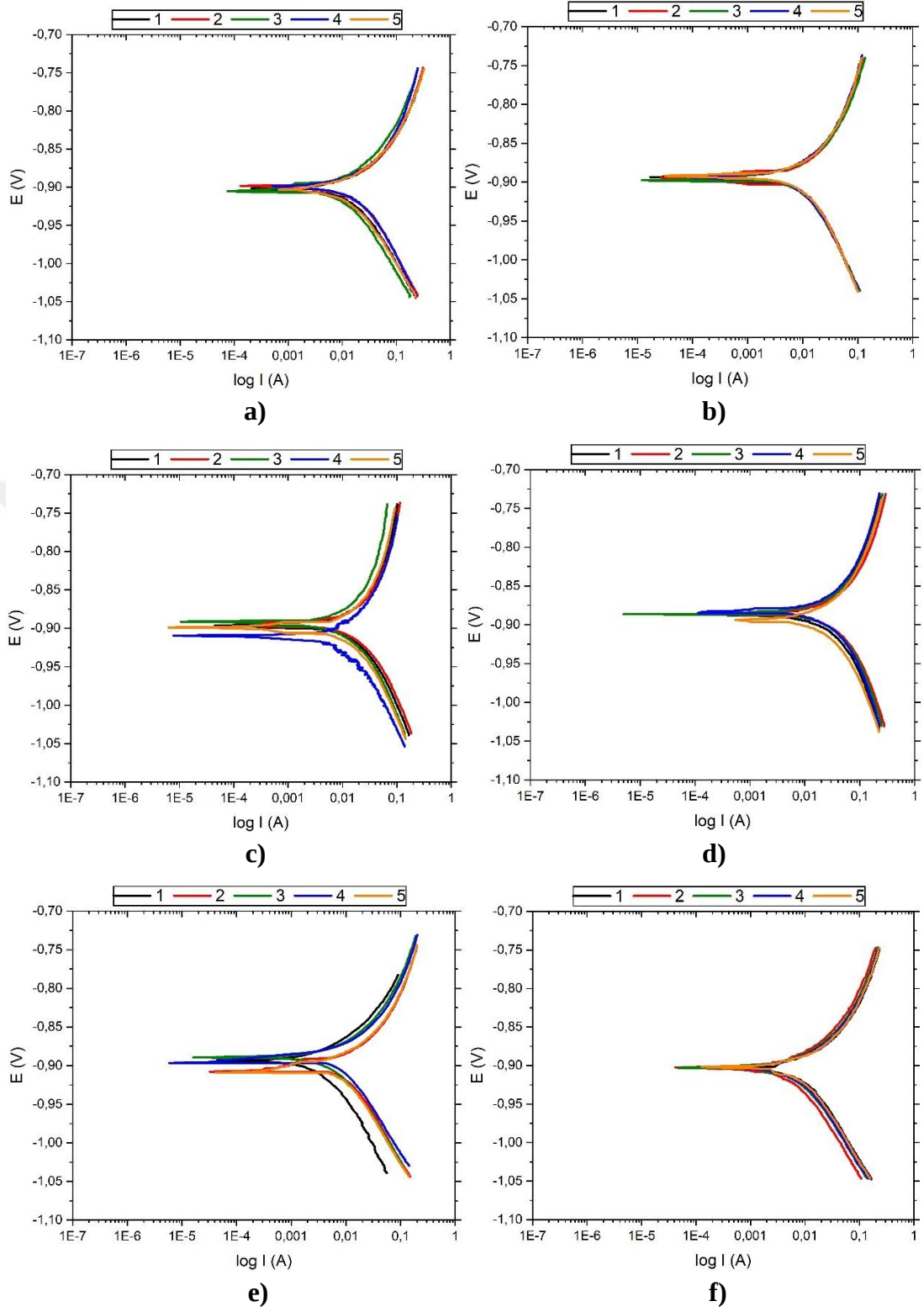
Şekil 4.31 %3,5 NaCl çözeltisi için Warrington Seale halat Tafel diyagramları a) W. Seale halat, çelik özlü , galvanizlenmemiş b) W. Seale halat, çelik özlü , sıcak daldırmayla galvanizlenmiş c) W. Seale halat, çelik özlü , çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış d) W. Seale halat, kendir özlü, galvanizlenmemiş e) W. Seale halat, kendir özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş f) W. Seale halat, kendir özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış



Şekil 4.32 %5 H_2SO_4 çözeltisi için Standart halat Tafel diyagramları a) Standart halat, çelik özlü, galvanizlenmemiş b) Standart halat, çelik özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş c) Standart halat, çelik özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış d) Standart halat, kendir özlü, galvanizlenmemiş e) Standart halat, kendir özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş f) Standart halat, kendir özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış



Şekil 4.33 %5 H_2SO_4 çözeltisi için Seale halat Tafel diyagramları a) Seale halat, çelik özlü, galvanizlenmemiş b) Seale halat, çelik özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş c) Seale halat, çelik özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış d) Seale halat, kendir özlü, galvanizlenmemiş e) Seale halat, kendir özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş f) Seale halat, kendir özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış

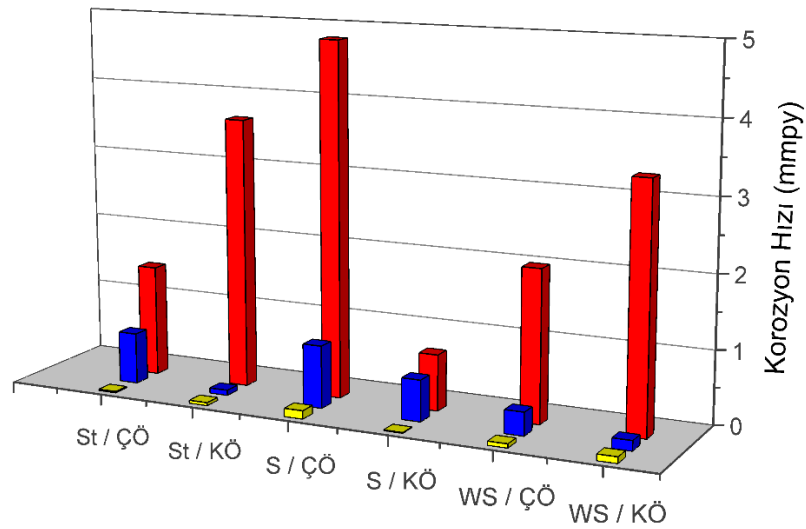


Şekil 4.34 %5 H_2SO_4 çözeltisi için Warrington Seale halat Tafel diyagramları a) W. Seale halat, çelik özlü, galvanizlenmemiş b) W. Seale halat, çelik özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş c) W. Seale halat, çelik özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış d) W. Seale halat, kendir özlü, galvanizlenmemiş e) W. Seale halat, kendir özlü, sıcak daldırmayla galvanizlenmiş f) W. Seale halat, kendir özlü, çinko bakımından zengin epoksi astar ile boyanmış

Tablo 4.13 %3,5 NaCl çözeltisi için Tafel diyagramlarından elde edilen E_{corr} , I_{corr} ve korozyon hızı değerleri

			E_{corr} (mV)	I_{corr} (μA)	Korozyon Hızı (mmpy)
Standart Halat	Çelik Özlü	Galvanizlenmemiş	-986	121	1,526
		Sıcak daldırmayla galvanizlenmiş	-457	1,55	0,020
		Epoksi astar ile boyanmış	-963	55,6	0,702
	Kendir Özlü	Galvanizlenmemiş	-993	293	3,698
		Sıcak daldırmayla galvanizlenmiş	-730	3,49	0,044
		Epoksi astar ile boyanmış	-646	5,87	0,074
Seale Halat	Çelik Özlü	Galvanizlenmemiş	-1030	384	4,851
		Sıcak daldırmayla galvanizlenmiş	-553	9,16	0,116
		Epoksi astar ile boyanmış	-1050	67,8	0,855
	Kendir Özlü	Galvanizlenmemiş	-1030	60,7	0,767
		Sıcak daldırmayla galvanizlenmiş	-535	0,94	0,012
		Epoksi astar ile boyanmış	-604	44,7	0,565
Warrington Seale Halat	Çelik Özlü	Galvanizlenmemiş	-1050	164	2,069
		Sıcak daldırmayla galvanizlenmiş	-578	4,61	0,058
		Epoksi astar ile boyanmış	-540	25,4	0,320
	Kendir Özlü	Galvanizlenmemiş	-981	265	3,349
		Sıcak daldırmayla galvanizlenmiş	-625	11	0,089
		Epoksi astar ile boyanmış	-707	27,3	0,140

■ Sıcak Daldırmayla Galvanizlenmiş ■ Epoksi Astar ile Boyanmış ■ Galvanizlenmemiş



Şekil 4.35 %3,5 NaCl çözeltisi için çelik halatların korozyon hızlarının karşılaştırılması (S: Standart, S: Seale, WS: Warrington Seale, ÇÖ: Çelik özlü, KÖ: Kendir özlü)

%3,5 NaCl çözeltisi için çelik halatların korozyon hızları karşılaştırıldığında beklendiği gibi galvanizlenmemiş (siyah) halatların korozyon hızı en yüksek çıkmıştır. Bunu sırasıyla epoksi astar ile boyanmış ve sıcak daldırmayla galvanizlenmiş halat grupları takip etmektedir. Bu durum, altı halat grubu için de aynı şekildedir. Şekil 4.35’de yer alan grafikte farklı halat grupları arasındaki korozyon hız ilişkileri ifade edilmiştir. Aynı halat grubundaki çelik özlü ve kendir özlü halatlar karşılaştırıldığında ise anlamlı bir ayrıma varılamamıştır.

Çelik özlü halatlar bazında karşılaştırma yapılacak olursa, galvanizlenmemiş ve sıcak daldırmayla galvanizlenmiş halatlarda korozyon hızı en yüksek halat tipi Seale tipi olup en düşük korozyon hızına sahip halatsa Standart halattır. 4,851 mmpy değeriyle çelik özlü galvanizlenmemiş Seale tipi halatın korozyon hızı oldukça yüksek çıkmıştır. Epoksi astar ile boyanmış çelik özlü halatlarda ise korozyon hızı en yüksek halat tipi yine Seale iken en düşük korozyon hızına sahip halatsa Warrington Seale tipi halattır.

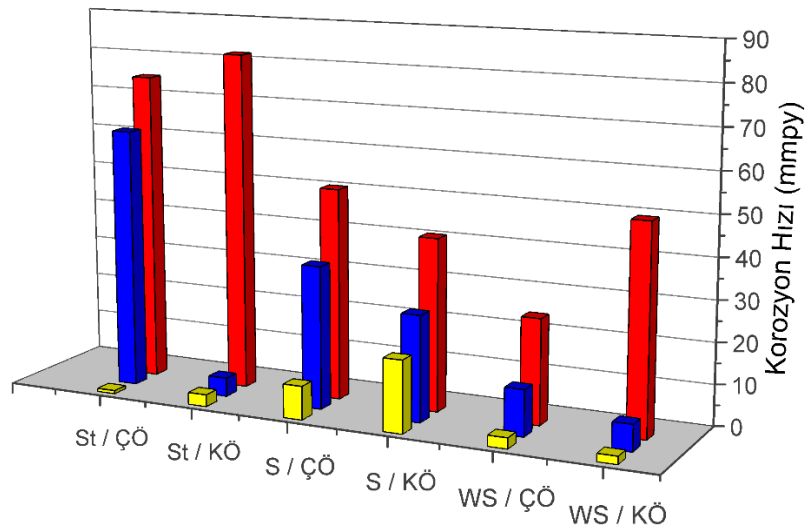
Kendir özlü halatlarda ise; galvanizlenmemiş grupta en yüksek korozyon hızı 3,698 mmpy değeriyle standart tipi halatta, en düşük ise 0,767 mmpy değeriyle Seale tipi halattadır. Aynı grupta Standart ve Warrington Seale halatların korozyon hızları birbirlerine yakın çıkmıştır. Sıcak daldırmayla galvanizlenmiş grupta ise en yüksek korozyon hızı Warrington Seale tipi halatta olup üç halat grubunda da sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Epoksi astar ile boyanmış kendir özlü halatlardaysa en yüksek korozyon hızı 0,565 mmpy değeriyle Seale tipi halattadır. Standart ve Warrington Seale tipi halatlarda galvanizlenmiş ve epoksi astar ile boyanmış halatların korozyon hızı değerleri birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır.

%5 H₂SO₄ çözeltisi için çelik halatların korozyon hızları karşılaştırıldığında %3,5 NaCl çözeltisinde olduğu gibi galvanizlenmemiş (siyah) halatların korozyon hızı en yüksek çıkmıştır. Bunu sırasıyla epoksi astar ile boyanmış ve sıcak daldırmayla galvanizlenmiş halat grupları takip etmektedir. Bu durum, altı halat grubu için de aynı şekildedir. Şekil 4.36’da yer alan grafikte farklı halat grupları arasındaki korozyon hız ilişkileri ifade edilmiştir. Aynı halat grubundaki çelik özlü ve kendir özlü halatlar karşılaştırıldığında ise anlamlı bir ayrıma varılamamıştır.

Tablo 4.14 %5 H₂SO₄ çözeltisi için Tafel diyagramlarından elde edilen E_{corr}, I_{corr} ve korozyon hızı değerleri

			E _{corr} (mV)	I _{corr} (μA)	Korozyon Hızı (mmpy)
Standart Halat	Çelik Özlü	Galvanizlenmemiş	-877	5990	75,60
		Sıcak daldırmayla galvanizlenmiş	-865	65,4	0,825
		Epoksi astar ile boyanmış	-859	5030	63,48
	Kendir Özlü	Galvanizlenmemiş	-883	6540	82,49
		Sıcak daldırmayla galvanizlenmiş	-871	235	2,966
		Epoksi astar ile boyanmış	-890	364	4,594
Seale Halat	Çelik Özlü	Galvanizlenmemiş	-867	2800	51,61
		Sıcak daldırmayla galvanizlenmiş	-1060	653	8,240
		Epoksi astar ile boyanmış	-894	2360	34,85
	Kendir Özlü	Galvanizlenmemiş	-897	2050	42,05
		Sıcak daldırmayla galvanizlenmiş	-909	771	17,60
		Epoksi astar ile boyanmış	-891	1390	25,83
Warrington Seale Halat	Çelik Özlü	Galvanizlenmemiş	-899	2030	25,60
		Sıcak daldırmayla galvanizlenmiş	-898	211	2,668
		Epoksi astar ile boyanmış	-894	894	11,28
	Kendir Özlü	Galvanizlenmemiş	-887	4020	50,69
		Sıcak daldırmayla galvanizlenmiş	-897	157	1,981
		Epoksi astar ile boyanmış	-903	515	6,499

■ Sıcak Daldırmayla Galvanizlenmiş ■ Epoksi Astar ile Boyanmış ■ Galvanizlenmemiş



Şekil 4.36 %5 H₂SO₄ çözeltisi için çelik halatların korozyon hızlarının karşılaştırılması (S: Standart, S: Seale, WS: Warrington Seale, ÇÖ: Çelik özlü, KÖ: Kendir özlü)

Tablo 4.14 incelendiğinde, %5 H₂SO₄ çözeltisindeki korozyon hızının %3,5 NaCl çözeltisindeki hıza göre oldukça yüksek değerlerde olduğunu söylemek mümkündür. %3,5 NaCl çözeltisinde en yüksek korozyon hızı 4,851 mmpy iken %5 H₂SO₄ çözeltisindeki en yüksek korozyon hızı 82,49 mmpy değerine kadar çıkmıştır. Bu da korozyon hızında yaklaşık 17 katlık bir artışa tekabül etmektedir.

%5 H₂SO₄ çözeltisi için çelik özlü halatlar bazında karşılaştırma yapılacak olursa, galvanizlenmemiş ve epoksi astar ile boyanmış halatlarda korozyon hızı en yüksek halat tipi Standart halat olup en düşük korozyon hızına sahip halatsa Warrington Seale tipi halattır. Galvanizlenmemiş halatların korozyon hızları yüksek olup en yüksek hız 75,6 mmpy ile Standart halat tipindedir. Sıcak daldırma galvanizleme yapılmış halatlarda maksimum korozyon hızı değeri 8,24 mmpy ile Seale halat olurken en düşük hız da 0,825 mmpy ile Standart tip halattadır.

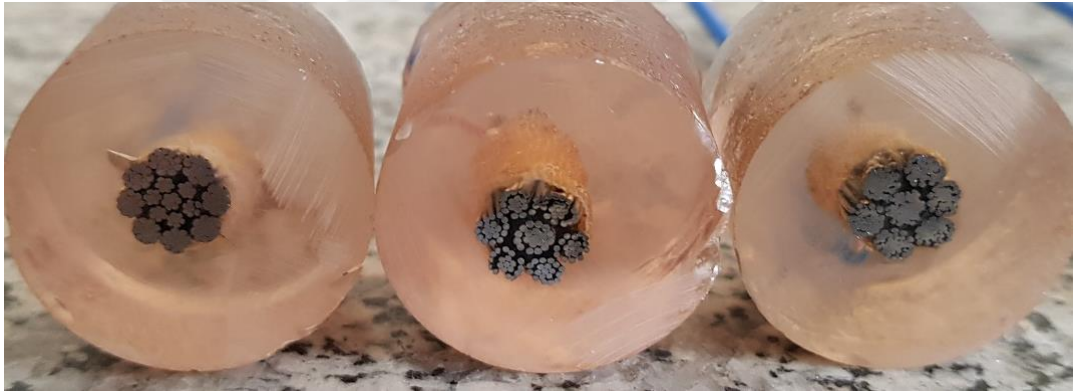
Kendir özlü halatlarda ise; sıcak daldırmayla galvanizlenmiş ve epoksi astar ile boyanmış halatlarda en yüksek korozyon hızı Seale tipi halatta ortaya çıkmıştır. Galvanizlenmemiş (siyah) halat korozyon hızları her üç halat grubu için de yüksek çıkmıştır. Bu değerler; Standart halat için 82,49 mmpy, Warrington Seale halat için 50,69 mmpy ve Seale halat için 42,05 mmpy'dir. Sıcak daldırmayla galvanizleme veya epoksi astar ile boyama işlemlerinde Standart ve Warrington Seale tipi halatlarda korozyon hızları nispeten azalsa da Seale tipi halatta bu değerler sırasıyla 17,60 mmpy ve 25,83 mmpy değerlerinde kalmıştır.

4.7 Metot 5: Yük Taşıma Halatlarının Yüzey Karakterizasyonu ile Korozyon Dayanımlarının İncelenmesi

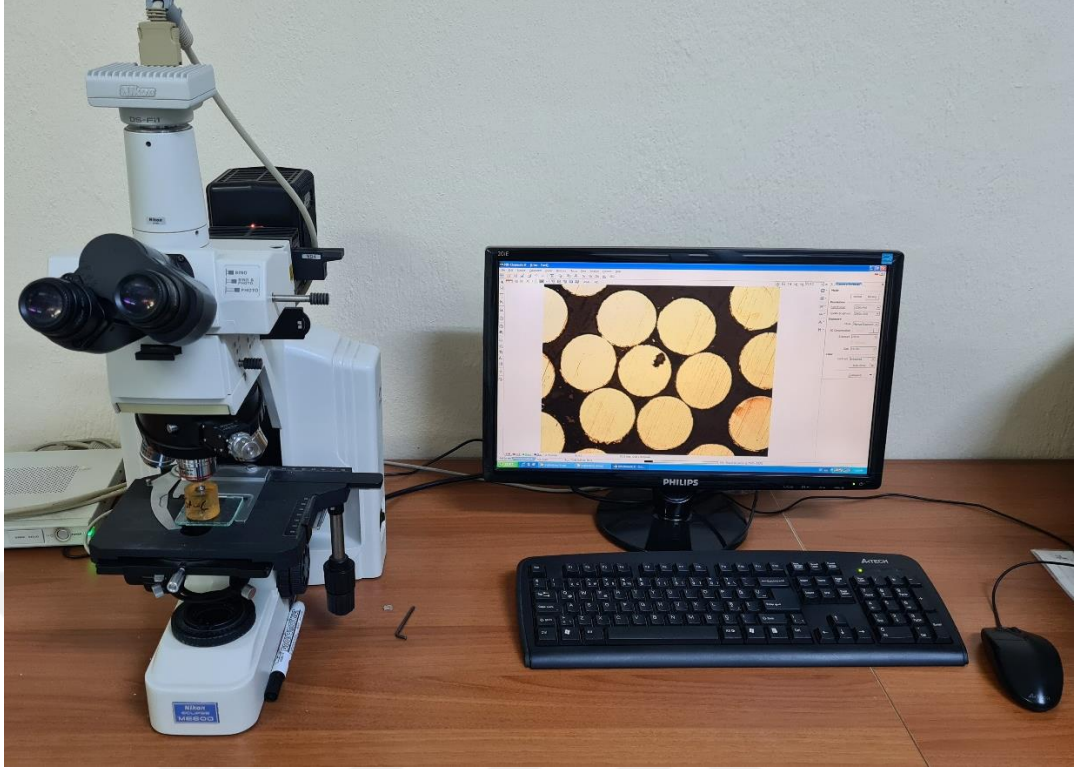
4.7.1 Materyal ve Metot

Bu çalışma kapsamında uygulanan son metot, yük taşıma halatlarının yüzey karakterizasyonu ile korozyon dayanımlarının incelenmesi olmuştur. Bu yöntem, diğerleri gibi tek başına bir yöntem olmayıp diğer metotları tamamlayıcı ve destekleyici nitelikte yapılmıştır.

Seçilen altı farklı tip galvanizlenmemiş yük taşıma halatı için öncelikle Metot 2’de belirtildiğı gibi numune hazırlama işlemleri yapılmıştır. Halat numuneleri yaklaşık 10 mm kalınlığında kesilmiş ve epoksi kalıplara alınmıştır. Bir gün sonra kalıptan çıkartılan numuneler test edilecek yüzeylerine sırasıyla yapılan 400-600-800-1200 gritlik zımparalama işlemleri ardından alümina süspansiyonu ile parlatılmıştır. Elde edilen numunelerin bir kısmı Şekil 4.37’de gösterilmiştir. Halat numuneleri Şekil 4.38’de görülen Nikon Eclipse ME600 marka ve model optik mikroskopta incelenmiş ve 5x, 10x, 20x ve 50x büyütme oranlarında görüntüleri alınmıştır. Ardından numunelere hızlı yaşlandırma test cihazında Tablo 4.6’da görülen 30 günlük periyottan oluşan Proses II yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Bu işlemde 4 saat tuz sisi, 4 saat %100 nem ve 16 saat kurutma basamakları sırasıyla uygulanmıştır. Bir ay sürenin sonunda test cihazından çıkartılan numunelere yeniden zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmış ve optik mikroskopta incelenmiştir.



Şekil 4.37 Halat numunelerinin epoksi kalıplara alınması (Kişisel arşiv, 2022)

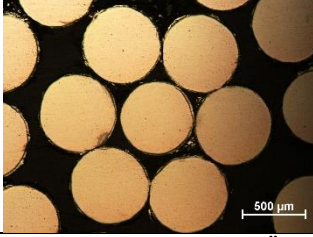
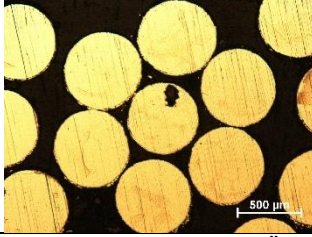
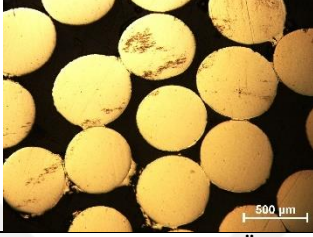
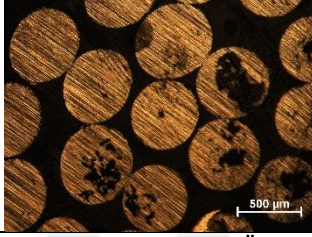
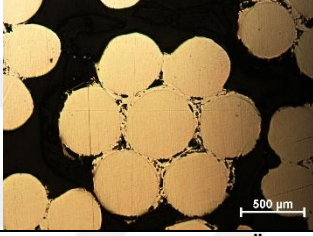
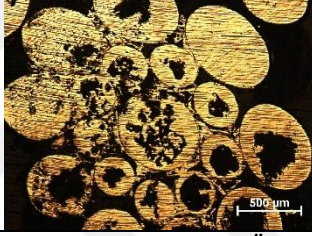
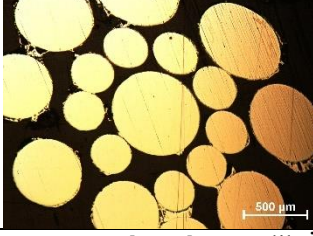
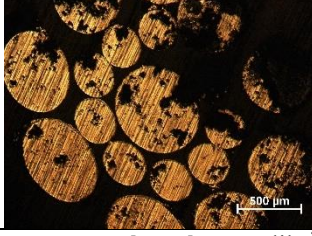
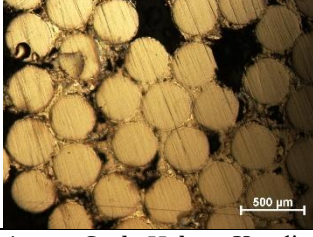
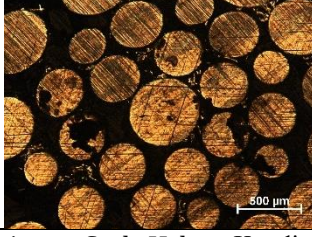
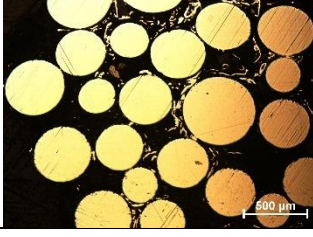
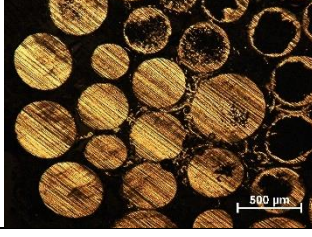


Şekil 4.38 Nikon Eclipse ME600 optik mikroskobu (Kişisel arşiv, 2022)

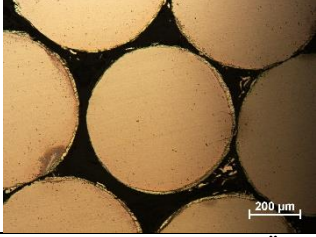
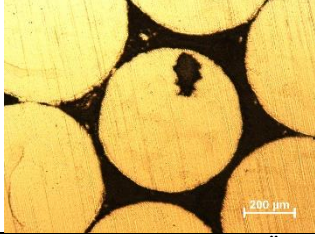
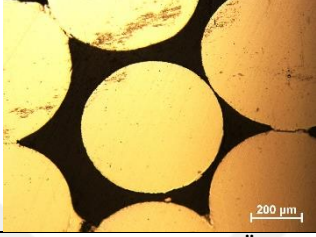
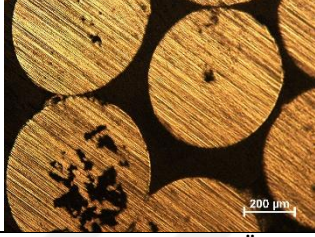
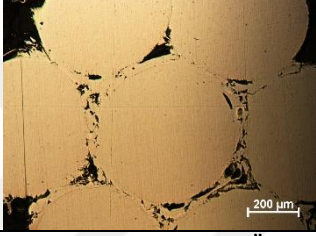
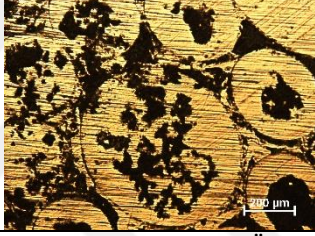
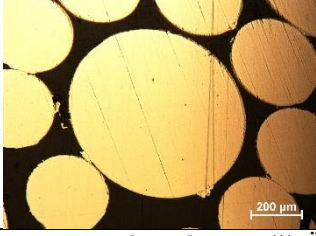
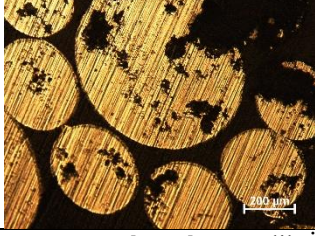
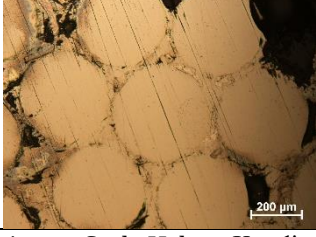
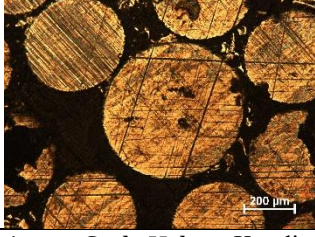
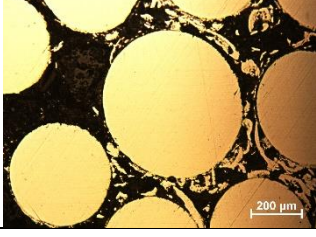
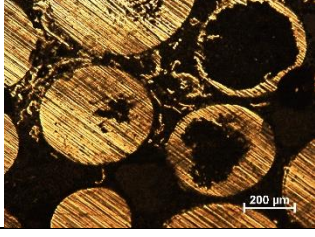
4.7.2 Sonuçlar

Optik mikroskop vasıtasıyla halat numunelerinden 5x, 10x, 20x ve 50x büyütme oranlarında görüntüler alınmış ve bu görüntülerden 5x büyütme oranına sahip olanlar Şekil 4.39’da, 10x büyütme oranına sahip olanlar Şekil 4.40’da, 20x büyütme oranına sahip olanlar Şekil 4.41’de, 50x büyütme oranına sahip olanlar Şekil 4.42’de yaşlandırma öncesi ve sonrası durumlarıyla karşılaştırılmıştır.

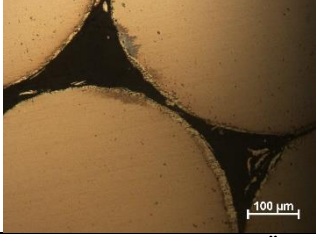
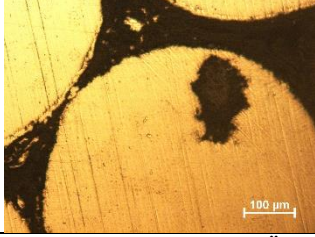
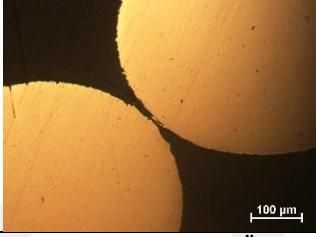
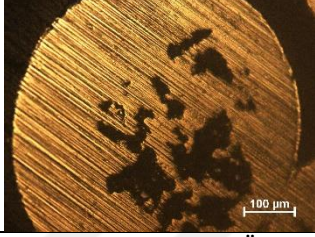
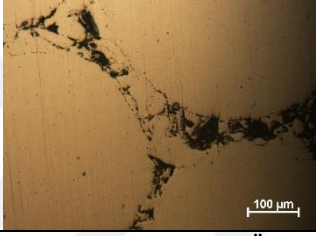
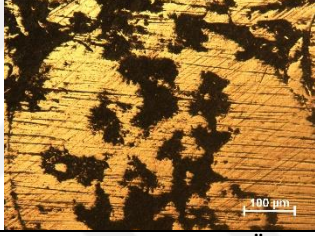
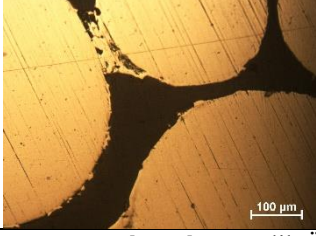
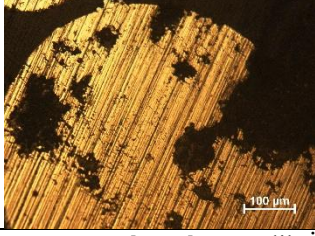
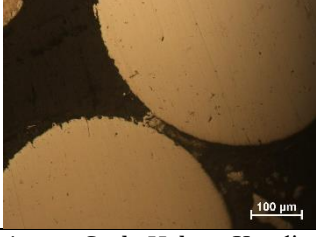
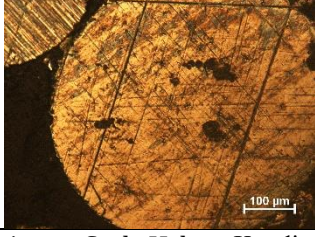
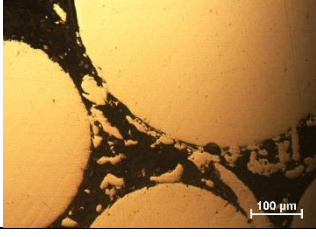
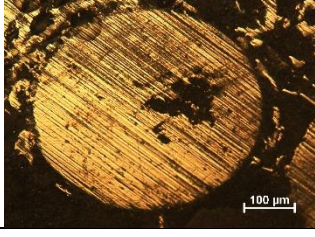
Yaşlandırma sonrası yapılan yüzey hazırlama işlem süreleri, yüzeydeki korozyonlu tabakanın görünümünü bozmamak için kısa tutulmuştur. Bu nedenle yaşlandırma sonrası alınan görüntülerdeki zımpara izleri yaşlandırma öncesi alınan görüntülere göre daha belirgin olmuştur. Genel olarak tüm halatlardan elde edilen görüntülerde üniform (genel) korozyon gözlenmiştir. Ancak bazı görüntülerde özellikle tellerin orta bölgelerinde çukurcuk korozyonu nedeniyle oluşan çok da derin olmayan çukurlar görülmüştür.

<i>Yaşlandırma Öncesi</i>	<i>Yaşlandırma Sonrası</i>
Standart Halat – Çelik Özlü	Standart Halat – Çelik Özlü
	
Standart Halat – Kendir Özlü	Standart Halat – Kendir Özlü
	
Seale Halat – Çelik Özlü	Seale Halat – Çelik Özlü
	
Seale Halat – Kendir Özlü	Seale Halat – Kendir Özlü
	
Warrington Seale Halat – Çelik Özlü	Warrington Seale Halat – Çelik Özlü
	
Warrington Seale Halat – Kendir Özlü	Warrington Seale Halat – Kendir Özlü
	

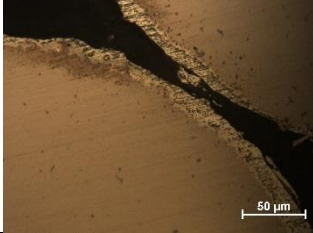
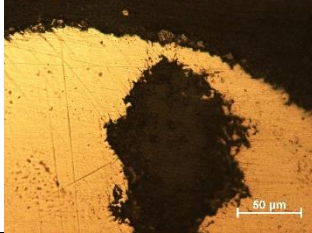
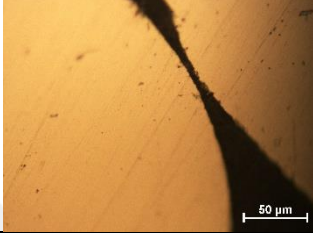
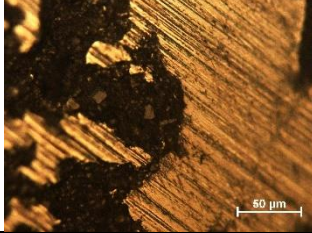
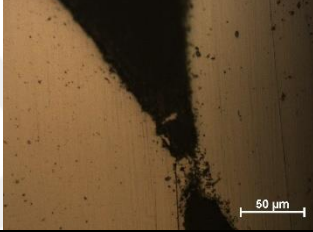
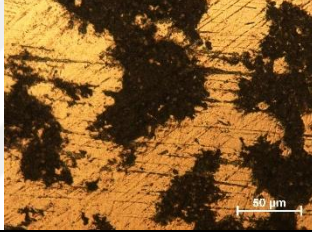
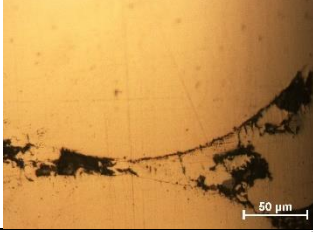
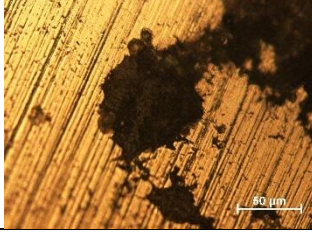
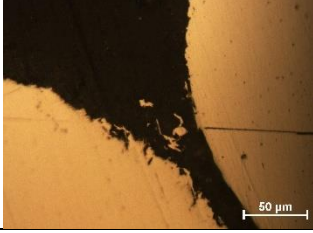
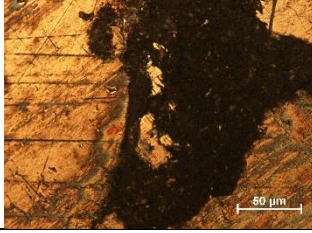
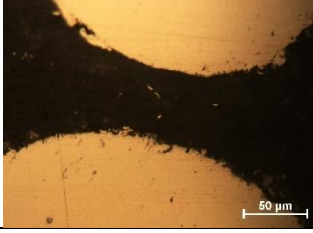
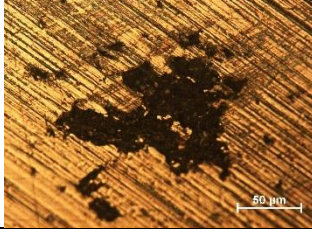
Şekil 4.39 Halat numunelerinin 5x büyütme oranındaki görüntülerinin karşılaştırılması

<i>Yaşlandırma Öncesi</i>	<i>Yaşlandırma Sonrası</i>
Standart Halat – Çelik Özlü	Standart Halat – Çelik Özlü
	
Standart Halat – Kendir Özlü	Standart Halat – Kendir Özlü
	
Seale Halat – Çelik Özlü	Seale Halat – Çelik Özlü
	
Seale Halat – Kendir Özlü	Seale Halat – Kendir Özlü
	
Warrington Seale Halat – Çelik Özlü	Warrington Seale Halat – Çelik Özlü
	
Warrington Seale Halat – Kendir Özlü	Warrington Seale Halat – Kendir Özlü
	

Şekil 4.40 Halat numunelerinin 10x büyütme oranındaki görüntülerinin karşılaştırılması

<i>Yaşlandırma Öncesi</i>	<i>Yaşlandırma Sonrası</i>
Standart Halat – Çelik Özlü	Standart Halat – Çelik Özlü
	
Standart Halat – Kendir Özlü	Standart Halat – Kendir Özlü
	
Seale Halat – Çelik Özlü	Seale Halat – Çelik Özlü
	
Seale Halat – Kendir Özlü	Seale Halat – Kendir Özlü
	
Warrington Seale Halat – Çelik Özlü	Warrington Seale Halat – Çelik Özlü
	
Warrington Seale Halat – Kendir Özlü	Warrington Seale Halat – Kendir Özlü
	

Şekil 4.41 Halat numunelerinin 20x büyütme oranındaki görüntülerinin karşılaştırılması

<i>Yaşlandırma Öncesi</i>	<i>Yaşlandırma Sonrası</i>
Standart Halat – Çelik Özlü	Standart Halat – Çelik Özlü
	
Standart Halat – Kendir Özlü	Standart Halat – Kendir Özlü
	
Seale Halat – Çelik Özlü	Seale Halat – Çelik Özlü
	
Seale Halat – Kendir Özlü	Seale Halat – Kendir Özlü
	
Warrington Seale Halat – Çelik Özlü	Warrington Seale Halat – Çelik Özlü
	
Warrington Seale Halat – Kendir Özlü	Warrington Seale Halat – Kendir Özlü
	

Şekil 4.42 Halat numunelerinin 50x büyütme oranındaki görüntülerinin karşılaştırılması

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

5.1 Sonuçlar

Yapılan çalışmada yüksek derecede korozyona maruz kalan yerlerde kullanılabilecek çelik telli yük taşıma halatlarından hangilerinin korozyona karşı daha dirençli olduğunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Halatlarda korozyon dayanımının incelenmesi için beş farklı metot uygulanmış ve bu sayede farklı özellikler bakımından kıyaslanmıştır.

- Metot 1’de; belirlenen halat tipleri için yaşlandırma kabiniinde hızlı yaşlandırma testleri yapılarak korozyon nedeniyle malzeme kütleindeki değişim yöntemi ile korozyon dayanımı incelenmiştir. Tuz sisi, %100 nem ve kurutma aşamalarının sürelerinin farklılaştırılmasıyla elde edilen 24 saatlik döngülerden oluşan üç farklı proses belirlenmiştir. 8 saat tuz sisi, 8 saat %100 nem ve 8 saat kurutmada oluşan proses I sonucunda halatlarda gözle görülür hasarlar meydana gelmiştir. Halatların maruz kaldığı yüksek korozyon sonucu halatlar kullanılamaz hale gelmiş olup bu proseste karşılaştırılabilir bir sonuç elde edilememiştir.

Proses II ve proses III sonrası yapılan kütle ölçümlerinde ise tüm halat tipleri nemi ve tuzu absorbe etmiş, bu nedenle kütlelerinde artışlar meydana gelmiştir. Standart ve Warrington Seale tipi halatların kendir özlü olanlarında kütle artışı çelik özlü halata oranla daha fazla iken Seale tipi halatlarda bu tam tersidir.

Bitkisel kendir çekirdeğin halat içindeki fazla nemi içine absorbe edip kütlelerini çelik çekirdeğe kıyasla daha çok arttırması beklenen bir sonuçtur. Ancak Seale tipi halatta durum farklıdır. Halat tipleri seçilirken krenlerde en çok kullanılan çelik halatlar göz önünde bulundurulmuştu. Bu nedenle seçilen Seale halat, diğerleri gibi 6 değil 8 kordondan oluşmaktadır. Ayrıca Seale tipi halatın kordonlar arası iç boşluğu daha fazladır. Çelik halatlarda nem tutma kabiliyeti, halatın iki özelliğinden etkilenir. Birinci olarak, halat çekirdeğinin kendir veya

elik zl olması etkiler. İkinci olarak ise, halattaki teller arası boşluk etkiler. Seale tipi halatın aynı çaptaki diğ er halatlara g re teller arası boşluğu daha fazladır. Kendir zl halatta zn şişmesi ile bu boşluk ve dolayısıyla nem tutma kabiliyeti azalmaktadır. Sonuç olarak, ikinci özellik nem tutma kabiliyetinde daha ağır basmakta ve bunların neticesinde elik zl Seale tipi halatın nem tutma kabiliyeti daha yüksek olmaktadır.

Her iki proses kendi içinde karşılaştırıldığında ise korozyona daha az maruz bırakılan proses III’de halatların kt le artışıında proses II’ye nazaran azalma g rlmşt r. Bu beklenen bir sonuçtur.

Birinci metota g re; korozyon potansiyelinin yüksek olduğu yerlerde kullanılan yük taşıma sistemlerinde elik zl halat tercih edilecekse Warrington Seale tipi halat; kendir zl halat tercih edilecekse de Seale tip halat kullanılması bu halatların ieriğ inde nem tutma oranları daha düşük olduğu için daha uygun olacaktır.

- Metot 2’de; yük taşıma halatlarının Tafel ekstrapolasyonu y ntemiyle elektrokimyasal olarak korozyon dayanımı incelenmişt r. Bunun için halat numuneleri  ncelikle epoksi kalıplara alınmış ve ardından l elektrot test düzenegi ile elektrokimyasal testler yapılmıştır. Testler sonucu elde edilen Tafel eğrilerinden faydalanılarak E_{corr} , I_{corr} ve korozyon hızı değ erleri elde edilmiştir. Halatların korozyon hızları karşılaştırıldığında Metot 1 ile benzer sonuçlar çıktığı g rlmşt r.

İkinci metota g re; korozyon potansiyelinin yüksek olduğu yerlerde kullanılan yük taşıma sistemlerinde elik zl halat tercih edilecekse Warrington Seale tipi halat; kendir zl halat tercih edilecekse de Seale tip halat kullanılması bu halatların elektrokimyasal korozyon dirençleri yüksek olduğu için daha uygun olacaktır.

- Metot 3'te; birinci metotta proses III yaşlandırma işlemi uygulanan halatların çekme testleri ile mekanik olarak korozyon dayanımının incelenmesi amaçlanmıştır. Halatların hızlı yaşlandırma işlemi sonucu elde edilen mukavemet değerleri ilk durumdaki değerler ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, kütle ölçümlerinden elde edilen sonuçlarla uyumluluk göstermiştir. Daha fazla nemi içinde absorbe edip kütlesi diğerlerine göre daha fazla artan halatların çekme testleri sonucu elde edilen mukavemet değerleri diğer halat tiplerininkine göre daha düşük çıkmıştır. Özellikle Standart tip halatın her iki çekirdek tipinde de mukavemetleri ciddi oranlarda düşmüştür.

Üçüncü metota göre; korozyon potansiyelinin yüksek olduğu yerlerde kullanılan yük taşıma sistemlerinde çelik özlü halat tercih edilecekse Warrington Seale tipi halat; kendir özlü halat tercih edilecekse de Seale tip halat kullanılması bu halatların korozyon ortamındaki çekme mukavemet değerleri yüksek olduğu için daha uygun olacaktır.

- Metot 4'te; öncelikle, çelik halatlara gerilmeli korozyon çatlaması testlerinin uygulanabilmesi için gerilmeli korozyon test düzeneği tasarlanıp üretilmiştir. Bu test cihazı vasıtasıyla halatlara gerilme uygulanırken aynı zamanda elektrokimyasal hücre kabında da halatlar korozyona uğratılmış ve veriler potansiyostat vasıtasıyla alınmıştır. Deney çıktıları sonucunda Tafel diyagramları elde edilmiş, buradan korozyon ömürlerine ulaşılmıştır. Ölçümler ilk aşamada %3,5 NaCl çözeltisi için alınmış, ikinci aşamada %5 H₂SO₄ çözeltisi için deneyler tekrarlanmıştır. %5 H₂SO₄ çözeltisi daha çok madenlerde çalışan yük taşıma halatlarına gerekli ortamı sağlamak için uygulanmıştır. Her bir parametre için deneyler 5 farklı numune ile tekrarlanmış ve karşılaştırılmıştır.

Tüm deneyler için ortak sonuç; en yüksek korozyon hızına sahip grubun galvanizlenmemiş halatlar olduğu, bunu sırasıyla epoksi astar ile boyanmış ve sıcak daldırmayla galvanizlenmiş halat gruplarının takip ettiği görülmüştür.

%3,5 NaCl çözeltisi için epoksi astar ile boyanmış ve galvanizlenmiş halat gruplarının korozyon hızları arasında çok ciddi bir fark olmadığı bu nedenle yer üstündeki kaldırma sistemlerinde kullanılan yük taşıma halatlarında galvanizleme yerine epoksi astar ile boyama yönteminin tercih edilebileceği görülmüştür. Halihazırda şu an işletmelerde kullanılan galvanizlenmiş yük taşıma halatlarında yüzeydeki yıpranmalarda ve çatlaklarda gereken yerleri çinko epoksi astar ile boyanarak halatların ömürleri uzatılmaktadır. Bu çalışma kapsamında alınan sonuçlarda bu yöntemin sadece bir tamir metodu olmayacağı korozyona karşı tek başına bir tedbir olarak kullanılabileceği görülmüştür. Bu sayede korozyona karşı alınacak tedbir daha düşük maliyetli ve daha hızlı olacaktır. %5 H₂SO₄ çözeltisi için bakarsak, epoksi astar ile boyama yönteminin sıcak daldırma ile galvanizleme yönteminin yerini alamayacağı sonucu çıkmıştır. Boyanmış halatların korozyon hızları beklenenden yüksek çıkmıştır. Bu nedenle madenler gibi yer altındaki yük taşıma sistemlerinde galvanizlemenin korozyona karşı tedbir olarak tek uygun sonuç olduğu anlaşılmıştır.

Dördüncü metota göre; %3,5 NaCl çözeltisi için sonuçlar incelendiğinde, korozyon potansiyelinin yüksek olduğu yer üstünde kullanılan yük taşıma sistemlerinde çelik özlü halat tercih edilecekse Standart tipi halat; kendir özlü halat tercih edilecekse de Seale tip halat kullanılması bu halatların gerilmeli korozyon dirençleri yüksek olduğu için daha uygun olacaktır.

Dördüncü metota göre; %5 H₂SO₄ çözeltisi için sonuçlar incelendiğinde, korozyon potansiyelinin yüksek olduğu maden yatakları gibi yer altında kullanılan yük taşıma sistemlerinde çelik özlü halat tercih edilecekse Warrington Seale tipi halat; kendir özlü halat tercih edilecekse de Seale tip halat kullanılması bu halatların gerilmeli korozyon dirençleri yüksek olduğu için daha uygun olacaktır.

- Metot 5'te; halatların optik mikroskop vasıtasıyla yaşlandırma öncesi ve sonrası farklı büyütme oranlarında görüntüleri alınıp karşılaştırılmıştır. Bu tek

başına bir metot olmayıp diğer metotları desteklemek amacıyla yapılmıştır. Yaşlandırma işlemi için Metot 1’de kullanılan hızlı yaşlandırma test cihazından faydalanılmıştır. İncelemeler sonucunda çelik halatlarda üniform korozyon ve çukurcuk korozyonunun beraber etki ettiği görülmüştür.

- Tüm metotlar beraber değerlendirildiğinde, yoğun korozyonun olduğu ortamlarda, kren halatı eğer kendir özlü olarak seçilecekse Seale tipi halatın alınması uygun olacaktır. Eğer çelik özlü olarak seçilecekse ortamdaki gerilmenin varlığına göre karar vermek yerinde olacaktır. Ortamda gerilme yoksa ya da sınırlıysa Warrington Seale tipi halatın, ortamda gerilmeli korozyon varsa ve halatlar yer üstündeki krenlerde çalışacaksa Standart tip halatın, asit etkisinin yoğun olduğu yer altındaki maden yataklarında çalışacaksa Warrington Seale tipi halatın seçilmesi uygun olacaktır. Bu halatların aynı gruptaki diğer halatlara göre korozyon hızları daha düşük olup korozyon dirençleri yüksektir. Aynı zamanda mukavemetleri diğer halatlara göre daha yüksek olup nem tutma oranları da çok daha düşüktür.

5.2 Gelecek Çalışmalar için Öneriler

Bu tezde sunulan araştırma çalışmasına dayalı olarak, gelecekteki çalışmalar için aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur:

- Özellikle dış ortamda çelik halatlarda çapraz sargı kullanılmaktadır. Bu bilgi de gözetilerek düz sargının ve çapraz sargının yaşlanmadaki etkisi incelenebilir.
- Çalışma kapsamında yapılan çinko kaplama piyasadan hazır alınan halatlara uygulanmıştır. Diğer bir yöntem de kaplamanın tellere uygulanarak daha sonra helisel sarılarak halatın üretimidir. Bu üretim yöntemi de denenerek iki farklı yöntemin sonuçları korozyon dayanıklılığı bakımından karşılaştırılabilir.
- Çelik halatların doğal yaşlandırma ve hızlı yaşlandırma şartları bakımından karşılaştırılması yapılabilir. Hızlı yaşlandırma test cihazında birim zamanda

yaşlandırılan halatın dış ortamda belirlenen koşullar altında doğal yaşlandırmada kaç birim zamana denk geldiği bulunursa yaşlandırma test cihazında yapılan deneylerin sonuçları daha anlamlı olacaktır.

- Halatlar yaşlandırma test cihazı içine 3 farklı şekilde yerleştirilerek hızlı yaşlandırma deneyleri yapılabilir:

- 1) Plakalar üzerine düz bir şekilde konulması
- 2) Çengelle ucundan tutturulup plakalara asılması
- 3) Bir kasknak üzerine bir veya iki kat sarılıp altına yük asılması

Bu çalışmada ilk durumdaki haliyle deneyleri yapılmıştır. Diğer iki durum da incelenerek halatların korozyon karşısındaki davranışları karşılaştırılabilir. Bu sayede kren çalışır haldeyken yük taşıma halatlarının farklı bölgelerindeki korozyon hakkında bilgi edinilebilir.

- Halat ömrünü belirleyen bazı etkenler vardır: Çekme yükü, çap oranı (D/d), eğilme, halat yuvası şekli, halat çapı, halat teli kalınlığı gibi. Bunlardan belirlenenler için belli parametreler oluşturularak korozyon karşısındaki davranışları karşılaştırılıp değerlendirilebilir.
- Literatürde 6x19 formundaki Standart ve Seale tipi halatların analizleri yapılmış olmakla beraber Warrington ve Warrington Seale tipi halatların analizleri yapılmamıştır. Bu halat tiplerinin modellenmelerinin ve analizlerinin de yapılp farklı çevre şartlarındaki yük taşıma kabiliyetlerinin karşılaştırılması sağlanabilir.
- Bu çalışmada kullanılan lif özlü halatlarda piyasada sıklıkla kullanıldığı için kendiri öz tercih edilmiştir. Ancak lif özlü çelik halatlarda farklı bitkisel lifler de kullanılmaktadır. Bu farklı lif özlü halatların yaşlandırma davranışları incelenerek nem tutma kabiliyetleri karşılaştırılabilir.
- Çalışmada madenlerde kullanılan çelik halatların korozyon dayanımlarının incelenmesi için %5 H_2SO_4 solüsyonu kullanılmıştır. Ancak HNO_3 gibi farklı

asitlerle de çalışmalar tekrarlanarak elik halatlarda oluşan koroziyon davranışta diğerk asitlerin etkisi de karşılaştırılabilir.

- Çalışma kapsamında elik halatlara elektrokimyasal yöntemlerden Tafel ekstrapolasyon yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem dışında elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) veya döngüsel voltametri gibi diğerk elektrokimyasal yöntemlerle de halatlardaki korozyon dirençleri araştırılıp var olan sonuçlarla karşılaştırılabilir.



KAYNAKLAR

Ahmad, Z. (2006). *Principles of corrosion engineering and corrosion control*. Elsevier Science & Technology Books.

American Society for Testing and Materials. (2016). *Standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements* (ASTM G102-89(2015)e1). <https://www.astm.org/g0102-89r15e01.html>

American Society for Testing and Materials. (2016). *Standard specification for carbon steel wire for wire rope* (A1007-15). <https://www.astm.org/a1007-15.html>

American Society for Testing and Materials. (2018). *Standard test method for tension testing of wire ropes and strand* (ASTM A931-18). <https://www.astm.org/a0931-18.html>

American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus* (ASTM B117-19). <https://www.astm.org/b0117-19.html>

American Society for Testing and Materials. (2021). *Standard practice for slow strain rate testing to evaluate the susceptibility of metallic materials to environmentally assisted cracking* (ASTM G129-21). <https://www.astm.org/g0129-21.html>

American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard practice for preparation and use of direct tension stress-corrosion test specimens* (ASTM G49-85). <https://www.astm.org/g0049-85r19.html>

Annett, F. A. (1988). *Elevators*. McGraw-Hill.

Ascott. (2017). *Corrosion test chambers & accessories* [Broşür].

Aycan, O. ve Onur Y. A. (2018). Farklı hasarlara maruz bırakılan 6x19 standart çelik tel halatın mekanik özelliklerindeki değişimlerin deneysel incelenmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 181-187. <https://doi.org/10.7212%2Fzkufbd.v8i1.948>

Baoyu, Z., Xinge, G., Xiaohua, C., Wenzhi, Y., Ziming, C., Wei, H. vd. (2016). Improvement of the corrosion resistance of steel wires by manufacturing continuous bulk metallic glass-coated steel wires. *Rare Metal Materials and Engineering*, 45(11), 2818-2822.

Callister, W. D. ve Rethwisch, D. G. (2011). *Malzeme bilimi ve mühendisliği*. Nobel Yayınları.

Chang, X. D., Huang, H. B., Peng, Y. X. ve Li, S. X. (2020). Friction, wear and residual strength properties of steel wire rope with different corrosion types. *Wear*, 458-459, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203425>

Chang, X. D., Peng, Y. X., Cheng, D. Q., Zhu, Z. C., Wang, D. G., Lu, H. vd. (2022). Influence of different corrosive environments on friction and wear characteristics of lubricated wire ropes in a multi-layer winding system. *Engineering Failure Analysis*, 13, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105901>

Çatar, R. (2013). *Magnezyum alaşımlarının farklı ortamlardaki gerilmeli korozyon davranışının incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Atatürk Üniversitesi.

Çelsan Çelik Halat. (2017). *Çelik halat kataloğu* [Broşür].

Çiçekoğlu, B. (1972). *Kaldırma makineleri*. Matbaa Teknisyenleri Basımevi.

Deflorian, F., Rossi, S., Tancon, B. ve Bonora P. L. (2004). Corrosion behaviour of steel ropes for snow and rockfall barriers. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 39(3), 250-254. <https://doi.org/10.1179/147842204X2853>

- Demirsoy, M. (1999). *Transport tekniği: Kaldırma makinaları Cilt 1*. Birsen Yayınevi.
- Demirsoy, M. (2005). *Kaldırma makinaları (Krenler)*. TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları.
- Demirsoy, M. (2015). *İletim Tekniği*. TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları.
- De Silva, A. R. T. ve Fong, L. W. (2002). Effect of abrasive wear on the tensile strength of steel wire rope. *Engineering Failure Analysis*, 9, 349-358.
- Díaz, B., Freire, L., Nóvoa, X. R. ve Pérez, M. C. (2009). Electrochemical behaviour of high strength steel wires in the presence of chlorides. *Electrochimica Acta*, 54, 5190-5198.
- Doruk, M. (2014). *Metelik malzemeler ve korozyon*. Korozyon Derneği Yayınları.
- El-Amoush, A. S. ve Al-Duheisat, S. A. (2018). Cathodic polarization behavior of the structural steel wires under different prestressing conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(1), 1-6.
- Erdemir, H. (2017). *Plakalı eşanjörlerde gerilmeli korozyon çatlağının incelenmesi ve bunun için test düzeneğinin hazırlanması* [Yüksek Lisans Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Ernst, H. (1973). *Kaldırma makinaları*. Fon Matbaası.
- Feyrer, K. (2015). *Wire ropes: Tension, endurance, reliability*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Fontanari, V., Benedetti, M. ve Monelli, B. D. (2015). Elasto-plastic behavior of a Warrington-Seale rope: Experimental analysis and finite element modeling. *Engineering Structures*, 82, 113-120. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.032>
- Fontanari, V., Benedetti, M., Monelli, B. D. ve Degasperi, F. (2015). Fire behavior of steel wire ropes: Experimental investigation and numerical analysis. *Engineering Structures*, 84, 340-349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.12.004>
- Fujii, T., Tohgo, K., Mori, Y., Miura, Y. ve Shimamura, Y. (2019). Crystallographic and mechanical investigation of intergranular stress corrosion crack initiation in austenitic stainless steel. *Materials Science & Engineering A* 751, 160-170. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.069>
- Gabe, D. R. (2005). The centenary of Tafel's equation. *Transactions of The Institute of Metal Finishing*, 83(3), 121-124.
- Galder. (2018). *Sürdürülebilir tasarım için sıcak daldırma galvaniz* [Broşür]. <http://www.estgal.com.tr/pdf/Sürdürülebilir-Tasarım-için-sicak-daldırma-galvaniz-nedir.pdf>
- Gamry Instruments. (2006). *Potansiyostat/galvanostat/zra sistemi kullanım rehberi* [Broşür].
- Gorbatov, E. K., Klekovkina, N. A., Saltuk, V. N., Fogel, V., Barsukov, V. K., Barsukov, E. V. vd. (2007). Steel rope with longer service life and improved quality. *Metallurgist*, 51, 279-283.
- Griffith, J. H. ve Bragg, J. G. (1919). *Strength and other properties of wire rope*. Technologic Papers of The Bureau of Standards.

Hardin, J-MI. (1998). *On path independence of axially loaded wire rope strands* [Doktora Tezi]. University of Illinois.

İmrak, C. E. ve Salman, Ö. (2010). Taşıyıcı halatların deneysel gerilme analizi. *Mühendis ve Makine*, 51(606), 23-29.

Jones, D. A. (1996). *Principles and prevention of corrosion*. Printice-Hall International Limited.

Joung, S. W., Kang, U. G., Hong, S. P., Kim, Y. W. ve Nam, W. J (2013). Aging behavior and delamination in cold drawn and post-deformation annealed hyper-eutectoid steel wires. *Materials Science & Engineering A*, 586, 171-177. <https://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2013.07.095>

Kanat Boya. (2019). *Koruyucu boyalar ve kaplamalar* [Broşür].

Kandemir, İ. (2014). *Çelik tel halatı mukavemetinin deniz ortamındaki değişikliklerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Kastratovic, G., Vidanovic, N., Bakic, V. ve Rasuo, B. (2014). On finite element analysis of sling wire rope subjected to axial loading. *Ocean Engineering*, 88, 480-487. <https://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.07.014>

Kim, S. H., Ham, S. H. ve Kwon, J. D. (2014). Bending fatigue characteristics of corroded wire ropes. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(7), 2853-2859. <https://doi.org/10.1007/s12206-014-0639-8>

Kösemen, Ö. (2008). *Asansör taşıyıcı halatların statik yük altında deneysel gerilme analizi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Kresak, J., Kropuch, S. ve Peterka, P. (2012). The anchors of steel wire ropes, testing methods and their results. *Metalurgija*, 51(4), 485-488.

- Kurashov, D. A., Barsukov, V. K., Barsukov, E. V., Kadochnikov, N. P., Makarova, E. V., Svidovskii, F. G. vd. (2008). Effect of various lubricants on corrosion resistance of steel ropes and on the resistance of organic cores to biological attack. *Metallurgist*, 52, 111-115.
- Liu, H., Zhang, D., Cao, S., Shen, Y., Hou, X. ve Xu, L. (2011). Fretting corrosion wear behaviors of steel wires in hoisting ropes in alkaline condition. *Applied Mechanics and Materials*, 99-100, 1014-1017. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.99-100.1014>
- Loeve, A. J., Krijger, T., Mugge, W., Breedveld, P., Dodou, D. ve Dankelman, J. (2014). Static friction of stainless steel wire rope-rubber contacts. *Wear*, 319, 27-37. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.07.005>
- Mallick, M., Mitra, S. K. ve Basak, D. (2014). Corrosion behaviour of FLC wire ropes. *International Journal of Science and Research*, 3(8), 816-819.
- McCafferty, E. (2005). Validation of corrosion rates measured by the Tafel extrapolation method. *Corrosion Science*, 47, 3202-3215.
- Meknassi, M., Mouhib, N., Tijani, A. ve El Ghorba, M. (2015). Experimental study of wires extracted from steel wire rope and exposed to sulfuric acid. *International Journal of Mechanical Engineering*, 3(11), 47-53.
- Meknassi, M., Tijani, A., Mouhib, N. ve El Ghorba, M. (2016). Experimental study on corrosion of wire rope strands under sulfuric acid attack. *The International Journal of Engineering and Science*, 5(6), 40-45.
- Molnár, V., Fedorko, G., Krešák, J., Peterka, P. ve Fabianová, J. (2017). The influence of corrosion on the life of steel ropes and prediction of their decommissioning. *Engineering Failure Analysis*, 74, 119-132. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.01.010>

- Özakın, B. (2014). *Alüminyum alaşımlarının farklı ortamlardaki gerilmeli korozyon davranışının incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Atatürk Üniversitesi.
- Peng, P. C. ve Wang, C. Y. (2015). Use of gamma rays in the inspection of steel wire ropes in suspension bridges. *NDT&E International*, 75, 80-86. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.06.006>
- Peterka, P., Kresak, J., Kropuch, S., Fedorko, G., Molnar, V. ve Vojtko, M. (2014). Failure analysis of hoisting steel wire rope. *Engineering Failure Analysis*, 45, 96-105.
- Peterka, P., Kresak, J., Šimonák, J., Bindzár, P. ve Keckešová, I. (2017). Tractive work of the aerial cableway towing haul rope. *Measurement*, 100, 322-328. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.01.006>
- Piskoty, G., Zraggen, M., Weisse, B., Affolter, Ch. ve Terrasi G. (2009). Structural failures of rope-based systems. *Engineering Failure Analysis*, 16, 1929-1939.
- Shih, C. C., Shih, C. M., Su, Y. Y. ve Lin, S. J. (2005). Galvanic current induced by heterogeneous structures on stainless steel wire. *Corrosion Science*, 47, 2199-2212.
- Singh, R. P., Mallick, M. ve Verma, M. K. (2016). Studies on failure behaviour of wire rope used in underground coal mines. *Engineering Failure Analysis*, 70, 290-304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.09.002>
- Singh, V., Lloyd, G. M. ve Wang, M. L. (2004). Effects of temperature and corrosion thickness and composition on magnetic measurements of structural steel wires. *NDT&E International*, 37, 525-538.
- Songquan, W., Dekun, Z., Dagang, W. ve Zefeng Z. (2011). Electrochemical corrosion behavior of steel wires in a coalmine with a corrosive medium. *Mining Science and Technology (China)*, 21, 71-76. <https://doi.org/10.1016/j.mstc.2010.12.003>

- Stanova, E., Fedorko, G., Fabian, M. ve Kmet, S. (2011). Computer modelling of wire strands and ropes Part I: Theory and computer implementation. *Advances in Engineering Software*, 42, 305-315. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.02.008>
- Şimşek, A. T. (1997). *5083 Al-Mg alaşımasının gerilmeli korozyonu* [Doktora Tezi]. Selçuk Üniversitesi.
- Torkar, M. ve Arzensek, B. (2002). Failure of crane wire rope. *Engineering Failure Analysis*, 9, 227-233.
- Uslu, E., Çatar, R. ve Çolak, M. (2017). Si ve Cu elementleri içeren alüminyum döküm alaşımlarının korozyon özelliklerinin belirlenmesi ve karşılaştırılması. *Engineering Sciences*, 12(3), 133-140.
- Verreet R. (2018). *A short history of wire rope*. Technology Aachen.
- Wang, D., Zhang, D., Wang, S. ve Ge, S. (2013). Finite element analysis of hoisting rope and fretting wear evolution and fatigue life estimation of steel wires. *Engineering Failure Analysis*, 27, 173-193. <https://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.08.014>
- Wood, H. T. (1971). *A survey of publications dealing with corrosion of wire rope* [Yüksek Lisans Tezi]. The Catholic University of America.
- Wu, S., Chen, H., Ramandi, H. L., Hagan, P. C., Crosky, A. ve Saydam, S. (2018). Effects of environmental factors on stress corrosion cracking of cold-drawn high-carbon steel wires. *Corrosion Science*, 132, 234-243. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.12.014>

Yang, Y., Yuan, X., Li, Y., He, Z., Zhang, S. ve Zheng, S. (2022). Effect of time-varying corrosion on the low-cycle fatigue mechanical properties of wire rope. *Ocean Engineering*, 250, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111027>

Zhang, S. C., Xu, X. M., Gao, F., Luo, B., Shi, W. Z. Ve Fang, Q. (2022). Experimental study on corrosion of galfan-coated full-locked coil ropes in a natatorium environment. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2022/9777836>



EKLER

EK 1: Yayınlar

Bu tezdeki materyallerin bir kısmı makale ve/veya konferans bildirilerinde şu şekilde yer almıştır:

Karasu, H. F. ve Demirsoy, M. (2020). Corrosion resistance of hoisting ropes. *Materials Testing*, 62(12), 1173-1180.

<https://doi.org/10.3139/120.111602>

Karasu, H. F. ve Demirsoy, M. (2020). Krenlerde kullanılan farklı tiplerdeki çelik tel halatların korozyon davranışlarının karşılaştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 22(64), 179-186.

<https://doi.org/10.21205/deufmd.2020226418>

Karasu, H. F. ve Demirsoy, M. (13-15 Temmuz 2016). *Investigation of corrosion behavior of hoisting ropes*. International Science and Technology Conference, Viyana, Avusturya, 681.

Karasu, H. F. ve Demirsoy, M. (5-7 Ekim 2016). *Yük taşıma halatlarının korozyon davranışının incelenmesi*. 14. Uluslararası Korozyon Sempozyumu, Bayburt, Türkiye, 152-156.

Karasu, H. F. ve Demirsoy, M. (26-28 Eylül 2018). *Farklı halat tiplerinin korozyon hızlarının Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile deneysel olarak elde edilmesi*. 15. Uluslararası Korozyon Sempozyumu, Hatay, Türkiye, 49-54.

Karasu, H. F. ve Demirsoy, M. (9-10 Temmuz 2022). *Yük taşıma halatlarının gerilmeli korozyon çatlaması testleri ile incelenmesi*. Avrasya Zirvesi 6. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi, Tiflis, Gürcistan.

Karasu, H. F. ve Demirsoy, M. (26-27 Ağustos 2022). *Tuzlu su ve sülfürik asit çözeltilerinin gerilmeli korozyon çatlamasındaki etkilerinin karşılaştırılması*. 6. Uluslararası Avrupa Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Bükreş, Romanya.

