



T.C.

KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



ST37 VE ST52 ÇELİKLERİNDE KOROZYON DAVRANIŞININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

TOLGA ÇELİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KIRŞEHİR

2026



T.C.

KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



ST37 VE ST52 ÇELİKLERİNDE KOROZYON DAVRANIŞININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

TOLGA ÇELİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Süleyman KILIÇ

KIRŞEHİR

2026

KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŐMASI
ETİK BEYANI

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesini okuduğumu ve anladığımı ve Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tez olarak sunduğum bu çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda bu konuda hakkımda yapılacak tüm yasal işlemleri ve aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Öğrenci
Tolga ÇELİK

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa No
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	I
TEŞEKKÜR	IV
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VI
TABLolar DİZİNİ	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Önem.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Çelik Malzemeler	3
2.2. Korozyon Kavramı ve Mekanizması	4
2.2.1. Korozyonun tanımı ve önemi.....	4
2.2.2. Korozyon mekanizması.....	4
2.2.3. Korozyon türleri.....	7
2.2.3.1. Homojen dağılımlı korozyon	8
2.2.3.2. Galvanik korozyon	8
2.2.3.3. Çukurcuk korozyonu.....	9
2.2.3.4. Aralık korozyonu	9
2.2.3.5. Tane sınırları korozyonu	10
2.2.3.6. Seçici korozyon.....	10
2.2.3.7. Gerilmeli korozyon	10
2.2.3.8. Erozyonlu korozyon.....	10
2.3. Çelik Malzemeler ve Korozyon Üzerine Yapılmış Çalışmalar	11
3. MATERYAL VE METOT.....	17

3.1. Materyal	17
3.1.1. Metal malzemeler.....	17
3.1.2. Koruyucu boya malzemesi.....	18
3.1.3. Koroziif çözeltiler	18
3.1.4. Deney ve analiz cihazları	19
3.2. Metot	20
3.2.1. Deney planı ve numune gruplandırması	20
3.2.2. Numunelerin hazırlanması	21
3.2.3. Koruyucu boya uygulama işlemi	21
3.2.4. Koroziif çözeltilere maruz bırakma işlemi.....	21
3.2.5. pH ölçümleri	22
3.2.6. Kütle değişimi ölçümleri.....	22
3.2.7. Korozyon hızı hesabı	23
3.2.8. Çekme testleri	23
3.2.9. Sertlik ölçümleri.....	23
3.2.10. Metalografik numune hazırlama	24
3.2.11. Optik yüzey/kesit incelemeleri.....	25
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	27
4.1. Kütle Değişimi ve Korozyon Hızı Bulguları	27
4.2. Koruyucu Boya Uygulamasının Korozyon Davranışına Etkisi	32
4.3. Çözeltilerin pH Değişimleri	35
4.4. Sertlik Bulguları	37
4.5. Çekme Testi Bulguları	45
4.6. Optik Yüzey/Kesit İnceleme Bulguları.....	84
4.7. Bulguların Genel Değerlendirmesi	87
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	89
5.1. Sonuçlar	89

5.2. Öneriler	90
KAYNAKLAR	93
EK-1.....	99
ÖZGEÇMİŞ.....	101

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, çalışmamın her aşamasını titizlikle takip ederek bilimsel görüş ve önerileriyle tezimin şekillenmesine önemli katkılar sağlayan, desteğini ve anlayışını her zaman hissettiğim Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Ana Bilim Dalı öğretim üyesi, değerli danışmanım Prof. Dr. Süleyman KILIÇ’a,

Tez çalışmam kapsamında gerçekleştirilen deneyler için Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Ana Bilim Dalı laboratuvarının imkânlarını kullanımına sunan; deneylerin planlanması ve yürütülmesi sürecinde bilgi, deneyim ve desteğiyle çalışmama büyük katkı sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Habip Gökay KORKMAZ’a,

Çalışmada kullanılan çözeltilerin hazırlanması sürecinde bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, laboratuvar imkânlarını kullanımına sunarak deneysel çalışmalarımın gerçekleştirilmesine değerli katkılarda bulunan Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdür Yardımcısı Doç. Dr. Çiğdem ER ÇALIŞKAN’a,

Yalnızca bu tezin zorlu ve yoğun çalışma döneminde değil, hayatımın her anında sabrı, anlayışı ve sevgisiyle yanımda olan; karşılaştığım her güçlükte beni cesaretlendiren, desteğiyle güç bulmamı sağlayan ve bu süreci benimle birlikte büyük bir özveriyle paylaşan sevgili eşime, en içten teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz, 2026

Tolga ÇELİK

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ST37 VE ST52 ÇELİKLERİNDE KOROZYON DAVRANIŞININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Tolga ÇELİK

KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman:

Prof. Dr. Süleyman KILIÇ

Yıl: 2026, Sayfa: 101

Jüri:

Dr. Öğr. Üyesi Habip Gökay KORKMAZ

Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM

Bu çalışmada, ST37 ve ST52 çeliklerinin farklı korozif ortamlardaki korozyon davranışları ile bu davranışların mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmada numuneler boyalı ve boyasız yüzey koşullarında hazırlanmış; 0.1 M HCl (asidik), %3.5 NaCl (tuzlu/nötr) ve 0.03 M NaOH (bazik) çözeltilerinde 30, 60 ve 90 gün süreyle bekletilmiştir. Maruziyet süresi sonunda çözeltilerin pH değişimleri takip edilmiş, numunelerde kütle değişimi ve korozyon hızı belirlenmiş, çekme testi ve Vickers sertlik ölçümleri yapılmış, seçilen numunelerin optik yüzey/kesit görüntüleri değerlendirilmiştir. Bulgulara göre, boyasız numunelerde en yüksek kütle kaybı ve korozyon hızı HCl ortamında meydana gelmiş, NaCl ortamında daha sınırlı ancak süreye bağlı artan bir korozyon davranışı gözlenmiştir. NaOH ortamında kütle kaybı ve korozyon hızı değerleri oldukça düşük düzeyde kalmıştır. Koruyucu boya uygulaması, özellikle HCl ve NaCl ortamlarında kütle kaybını ve korozyon hızını belirgin biçimde azaltmıştır. Mekanik test sonuçları, korozif ortamların çekme dayanımı, akma gerilmesi ve sertlik değerleri üzerinde değişimlere sebep olduğunu göstermiştir. Optik incelemelerde boyasız numunelerde yüzey hasarlarının daha belirgin olduğu, boyalı numunelerde ise kaplamanın koruyucu etkisiyle hasarın daha sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, ortam türü, maruziyet süresi ve yüzey koşulunun ST37 ve ST52 çeliklerinin korozyon davranışı ve mekanik performansı üzerinde etkili olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: ST37, ST52, Korozyon, Mekanik özellikler, Koruyucu boya

ABSTRACT

MASTER’S THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CORROSION BEHAVIOR ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ST37 AND ST52 STEELS

Tolga ÇELİK

**KIRŞEHİR AHI EVRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

Supervisor: Prof. Dr. Süleyman KILIÇ
Year: 2026, Pages: 101

Juries: Assist. Prof. Dr. Habip Gökay KORKMAZ
Assist. Prof. Dr. Oğuz ERDEM

In this study, the corrosion behavior of ST37 and ST52 steels in different corrosive environments and the effects of this behavior on mechanical properties were investigated. In the experimental study, specimens were prepared under painted and unpainted surface conditions and exposed to 0.1 M HCl (acidic), 3.5% NaCl (saline/neutral) and 0.03 M NaOH (alkaline) solutions for 30, 60, and 90 days. At the end of the exposure periods, pH changes of the solutions were monitored, mass change and corrosion rate of the specimens were determined, tensile tests and Vickers hardness measurements were performed, and optical surface/cross-section images of selected specimens were evaluated. According to the findings, the highest mass loss and corrosion rate in unpainted specimens occurred in the HCl environment, while a more limited but time-dependent increasing corrosion behavior was observed in the NaCl environment. In the NaOH environment, mass loss and corrosion rate values remained at very low levels. The protective paint application significantly reduced mass loss and corrosion rate, especially in HCl and NaCl environments. Mechanical test results showed that corrosive environments caused changes in tensile strength, yield stress and hardness values. Optical examinations revealed that surface damage was more pronounced in unpainted specimens, whereas the damage remained more limited in painted specimens due to the protective effect of the coating. As a result, it was determined that the environment type, exposure time, and surface condition had significant effects on the corrosion behavior and mechanical performance of ST37 and ST52 steels.

Key Words: ST37, ST52, Corrosion, Mechanical properties, Protective coating

TABLÖLER DİZİNİ

	Sayfa No
Tablo 2.1. Demir esaslı malzemelerin kimyasal bileşimlerine ve tipik kullanım alanlarına göre sınıflandırılması	3
Tablo 3.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri	17
Tablo 4.1. Boyasız ST37 ve ST52 çeliklerinin HCl, NaCl ve NaOH ortamlarındaki ortalama kütle kaybı ve korozyon hızı değerleri	27
Tablo 4.2. 90 gün sonunda boyalı ve boyasız ST37/ST52 numunelerinde ortalama kütle değişimi ve korozyon hızı değerleri	33
Tablo 4.3. Deney süresince HCl, NaCl ve NaOH çözeltilerinin pH değerlerinde meydana gelen değişimler	35
Tablo 4.4. ST37 ve ST52 çeliklerinde 90 gün maruziyet sonrası Vickers sertlik değerleri ve kontrol numunesine göre değişim oranları	44
Tablo 4.5. ST37 ve ST52 numunelerine ait kontrol ve 90 gün maruziyet sonrası çekme ve akma gerilmesi değerleri.....	82

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1. Elektrokimyasal korozyon.....	5
Şekil 2.2. 25 °C’de metal iyonlarının elektrot potansiyelleri	7
Şekil 2.3. Korozyon Türleri.....	8
Şekil 2.4. Korozyon Türleri.....	11
Şekil 3.1. Düz çekme numunesinin geometrisi ve temel ölçüleri	18
Şekil 3.2. Boya uygulanan numunelerin genel görünümü (a) ve kuruma sonrası yüzey durumu (b)	18
Şekil 3.3. HCl, NaOH ve %3.5 NaCl çözeltilerinin hazırlandığı deney kapları / daldırma düzeni.....	19
Şekil 3.4. Çekme test cihazı ve Vickers sertlik cihazı.....	20
Şekil 3.5. Numunelerin koroziyon ortamda bekletildiği kaplar ve deneyin genel düzeni ..	22
Şekil 3.6. Metalografik numune hazırlığı.....	24
Şekil 4.1. Boyasız ST37 ve ST52 numunelerinde HCl, NaCl ve NaOH ortamlarında maruziyet süresine bağlı ortalama kütle kaybı değişimi: (a) ST37, (b) ST52 ..	29
Şekil 4.2. Boyasız ST37 ve ST52 numunelerinde HCl, NaCl ve NaOH ortamlarında maruziyet süresine bağlı ortalama korozyon hızı değişimi: (a) ST37, (b) ST52	31
Şekil 4.3. ST37 ve ST52 çeliklerinde 90 gün sonunda boyalı ve boyasız numunelerin HCl, NaCl ve NaOH ortamlarındaki kütle değişimi karşılaştırmaları: (a) ST37, (b) ST52.....	34
Şekil 4.4. HCl, NaCl ve NaOH çözeltilerinde deney süresince pH değerlerinde meydana gelen değişim.....	37
Şekil 4.5. ST37 çeliğinde farklı koroziyon ortamları ve yüzey koşullarına göre Vickers sertlik değerlerinin maruziyet süresine bağlı değişimi: (a) boyasız, (b) boyalı	39
Şekil 4.6. ST52 çeliğinde farklı koroziyon ortamları ve yüzey koşullarına göre Vickers sertlik değerlerinin maruziyet süresine bağlı değişimi: (a) boyasız, (b) boyalı	41
Şekil 4.7. ST37 ve ST52 çeliklerinde 90 gün maruziyet sonrası boyalı ve boyasız numunelerin HCl, NaCl ve NaOH ortamlarına göre Vickers sertlik değerleri karşılaştırmaları: (a) ST37, (b) ST52.....	43
Şekil 4.8. Referans bir numuneye ait mühendislik ve gerçek gerilme-birim deformasyon eğrisinin karşılaştırılması.....	46
Şekil 4.9. ST37 çeliğine ait kontrol numunesi ile HCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyasız numunelerin gerçek gerilme–gerçek birim deformasyon eğrileri.....	47
Şekil 4.10. ST37 çeliğine ait kontrol numunesi ile HCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyalı numunelerin gerçek gerilme–gerçek birim deformasyon eğrileri.....	48
Şekil 4.11. ST37 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyasız numunelerin gerçek gerilme–gerçek birim deformasyon eğrileri.....	49
Şekil 4.12. ST37 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyalı numunelerin gerçek gerilme–gerçek birim deformasyon eğrileri.....	50
Şekil 4.13. ST37 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaOH çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyasız numunelerin gerçek gerilme–gerçek birim deformasyon eğrileri.....	51

Şekil 4.14. ST37 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaOH çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyalı numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri.....	52
Şekil 4.15. ST52 çeliğine ait kontrol numunesi ile HCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyasız numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri.....	53
Şekil 4.16. ST52 çeliğine ait kontrol numunesi ile HCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyalı numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri.....	54
Şekil 4.17. ST52 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyasız numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri.....	55
Şekil 4.18. ST52 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyalı numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri.....	56
Şekil 4.19. ST52 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaOH çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyasız numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri.....	57
Şekil 4.20. ST52 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaOH çözeltisinde 60 ve 90 gün bekletilen boyalı numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri.....	58
Şekil 4.21. 90 günlük maruziyet sonrası korozi ortamının gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon davranışına etkisi: a) ST37 çeliği boyasız, b) ST37 çeliği boyalı, c) ST52 çeliği boyasız, d) ST52 çeliği boyalı	60
Şekil 4.22. ST37 çeliğinin boyasız numunelerinde farklı korozi çözeltilere maruz kalma süresine bağlı çekme gerilmesi değerlerinin değişimi	61
Şekil 4.23. ST37 çeliğinin boyalı numunelerinde farklı korozi çözeltilere maruz kalma süresine bağlı çekme gerilmesi değerlerinin değişimi.....	62
Şekil 4.24. ST52 çeliğinin boyasız numunelerinde farklı korozi çözeltilere maruz kalma süresine bağlı çekme gerilmesi değerlerinin değişimi	63
Şekil 4.25. ST52 çeliğinin boyalı numunelerinde farklı korozi çözeltilere maruz kalma süresine bağlı çekme gerilmesi değerlerinin değişimi.....	64
Şekil 4.26. ST37 çeliğinin HCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre çekme gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi	65
Şekil 4.27. ST37 çeliğinin NaCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre çekme gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi	66
Şekil 4.28. ST37 çeliğinin NaOH çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre çekme gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi	67
Şekil 4.29. ST52 çeliğinin HCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre çekme gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi	68
Şekil 4.30. ST52 çeliğinin NaCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre çekme gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi	69
Şekil 4.31. ST52 çeliğinin NaOH çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre çekme gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi	70

Şekil 4.32. ST37 çeliğinin HCl çözeltisinde boyasız koşulda kontrol, 30, 60 ve 90 günlük maruziyet sonrası akma bölgesine ait gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri.....	71
Şekil 4.33. ST52 çeliğinin HCl çözeltisinde boyasız koşulda kontrol, 30, 60 ve 90 günlük maruziyet sonrası akma bölgesine ait gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri.....	72
Şekil 4.34. ST37 çeliğinin boyasız numunelerinde farklı korozif çözeltilere maruz kalma süresine bağlı akma gerilmesi değerlerinin değişimi.....	73
Şekil 4.35. ST37 çeliğinin boyalı numunelerinde farklı korozif çözeltilere maruz kalma süresine bağlı akma gerilmesi değerlerinin değişimi.....	74
Şekil 4.36. ST52 çeliğinin boyasız numunelerinde farklı korozif çözeltilere maruz kalma süresine bağlı akma gerilmesi değerlerinin değişimi.....	75
Şekil 4.37. ST52 çeliğinin boyalı numunelerinde farklı korozif çözeltilere maruz kalma süresine bağlı akma gerilmesi değerlerinin değişimi.....	76
Şekil 4.38. ST37 çeliğinin HCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre akma gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi	77
Şekil 4.39. ST37 çeliğinin NaCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre akma gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi	78
Şekil 4.40. ST37 çeliğinin NaOH çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre akma gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi	79
Şekil 4.41. ST52 çeliğinin HCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre akma gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi	80
Şekil 4.42. ST52 çeliğinin NaCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre akma gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi	81
Şekil 4.43. ST52 çeliğinin NaOH çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre akma gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi.	82
Şekil 4.44. ST37 çeliğinin HCl ve NaCl çözeltisinde 90 gün maruziyet sonrası boyalı ve boyasız koşullardaki seçilmiş optik yüzey/kesit görüntüleri: (a) HCl-boyasız, (b) HCl-boyalı, (c) NaCl-boyasız, (d) NaCl-boyalı.....	85
Şekil 4.45. ST52 çeliğinin HCl ve NaCl çözeltisinde 90 gün maruziyet sonrası boyalı ve boyasız koşullardaki seçilmiş optik yüzey/kesit görüntüleri: (a) HCl-boyasız, (b) HCl-boyalı, (c) NaCl-boyasız, (d) NaCl-boyalı.....	86

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simge	Açıklama
K	: Birim dönüşüm katsayısı
D_1	: Birinci köşegen uzunluğu
D_2	: İkinci köşegen uzunluğu
CR	: Korozyon hızı
W	: Kütle kaybı
ρ	: Malzeme yoğunluğu
t	: Maruz kalma süresi
A	: Numune yüzey alanı
d	: Ortalama köşegen uzunluğu
F	: Uygulanan yük
HV	: Vickers sertlik değeri

Kısaltma	Açıklama
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
ST37	: Düşük karbonlu yapı çeliği
EMK	: Elektromotor kuvvet
FBE	: Füzyon bağlı epoksi
SCC	: Gerilmeli korozyon çatlaması
pH	: Hidrojen iyonu aktivitesinin negatif logaritması
HCl	: Hidroklorik asit
NaOH	: Sodyum hidroksit
NaCl	: Sodyum klorür
ST52	: Yüksek dayanımlı yapı çeliği

1. GİRİŞ

Çelik malzemeler, yüksek mukavemet, iyi işlenebilirlik ve maliyet etkinliği gibi özellikleri nedeniyle birçok mühendislik uygulamasında tercih edilmekte ve kullanılmaktadır. ST37, genel yapısal uygulamalar için kullanılan düşük karbon içeriğine sahip yumuşak bir çeliktir. ST52 ise daha yüksek mukavemet ve sertlik gerektiren uygulamalar için kullanılan bir karbon çeliğidir. Bu çeliklerin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimleri farklıdır ve bu da korozyona karşı duyarlılıklarını etkilemektedir. Korozyonun, mikroyapıda değişiklikler, yüzey çukurları oluşumu ve malzeme içinde gerilim birikimi gibi çeşitli mekanizmalar yoluyla çeliklerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir (Revie, 2008). Örneğin, korozyon çeliklerin gerilme mukavemetinde ve sünekliğinde azalmaya yol açabilirken aynı zamanda yorulma mukavemetini ve darbe direncini de azaltmaktadır (Ahmad, 2006).

Korozyon, çevreleriyle kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyon yoluyla malzemelerin, özellikle metallerin kademeli olarak bozulması olarak tanımlanan doğal bir olgudur (Roberge ve Eng, 2005). Bu bozulma yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan çelikler için önemli bir endişe kaynağıdır. Çünkü mekanik mukavemet ve süneklik kaybından, yapıların bütünlüğünü ve işlevselliğini tehlikeye atabilecek çatlak ve kırılmaların oluşumuna kadar çeşitli olumsuzluklara yol açabilir (Jones, 1996).

Korozyonun ekonomik boyutu da oldukça dikkat çekicidir. Yapılan çalışmalarda, sanayileşmiş ülkelerde gayrisafi yurt içi hasılanın %3–4'lük kısmının doğrudan veya dolaylı olarak korozyon kaynaklı kayıplara harcandığı bildirilmektedir. Bu kayıplar, yalnızca malzeme yenilenmesiyle sınırlı kalmayıp bakım-onarım maliyetlerini, üretim kayıplarını, iş güvenliği risklerini ve enerji verimliliği sorunlarını da beraberinde getirmektedir (Mattsson, 2023). Dolayısıyla korozyon yalnızca bir malzeme sorunu değil, aynı zamanda ekonomik ve stratejik öneme sahip bir mühendislik problemidir.

1.1. Amaç ve Önem

Bu tez çalışmasının temel amacı, ST37 ve ST52 çeliklerinde korozyon davranışlarının incelenmesi ve korozyonun mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin ortaya konulmasıdır. Çalışma kapsamında, hazırlanan numuneler farklı yüzey koşullarında koruyucu boya uygulanarak veya boyasız bırakılarak üç farklı korozyon ortamına (asidik, bazik ve tuzlu su çözeltisi) maruz bırakılmıştır. Numuneler 30, 60 ve 90 günlük sürelerde deneysel ortamlarda tutulmuş; bu süreç sonunda ortamların pH

değişimleri, numunelerin kütle kayıpları ölçülmüş, çekme ve sertlik testleri gerçekleştirilmiş ve yüzey değişimleri incelenmiştir. Böylece hem koruyucu boya uygulamasının etkisi hem de korozyonun ilerleme süreci detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın önemi, korozyonun yalnızca malzeme yüzeyinde değil aynı zamanda mekanik özelliklerde de ciddi kayıplara yol açtığını deneysel olarak ortaya koymasında yatmaktadır. ST37 ve ST52 çeliklerinin farklı çevresel koşullar altındaki davranışlarının karşılaştırılması, mühendislik uygulamalarında uygun malzeme seçimi ve korozyona karşı alınabilecek önlemler konusunda yol gösterici olacaktır. Ayrıca çalışma, korozyon-mekanik özellik ilişkisini deneysel bulgularla destekleyerek literatüre katkı sağlayacak ve ileride yapılacak çalışmalara temel teşkil edecektir.

Çalışmada ST37 ve ST52 çeliklerinin seçilmesinin temel nedeni, bu malzemelerin endüstride, yapısal uygulamalarda, imalat sektöründe ve genel konstrüksiyonlarda en yaygın kullanılan karbon çelikleri arasında yer almasıdır. Farklı mekanik dayanımlara ve karbon eşdeğerlerine sahip bu iki çeliğin korozyon karşısındaki davranış farklarının belirlenmesi, mühendislik tasarımları için kritik öneme sahiptir. Deney ortamlarının seçiminde ise malzemelerin gerçek çalışma koşullarında maruz kalabileceği ekstrem kimyasal çevreler simüle edilmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda; endüstriyel tesislerdeki asidik etkileri temsilen HCl, denizel/tuzlu su ortamlarındaki korozyon karakterizasyonunu incelemek adına NaCl ve alkali/bazik ortamlardaki malzeme tepkisini gözlemlemek amacıyla NaOH çözeltileri tercih edilerek, geniş bir pH spektrumunda sistematik bir değerlendirme yapılması amaçlanmıştır.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasının gerekçesi; korozyonun çeliklerin mekanik dayanımını hangi boyutta etkilediğini sistematik olarak ortaya koymak, farklı çevresel koşullarda ST37 ve ST52 çeliklerinin performansını karşılaştırmak ve elde edilen bulgularla hem akademik literatüre hem de endüstriyel uygulamalara katkı sağlamaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Çelik Malzemeler

Çelik, içerisinde silisyum, karbon, manganez gibi elementler ihtiva eden, esas bileşeni demir olan ve yaygın olarak kullanılan malzemelerdendir. Dünya Çelik Örgütü tarafından yayımlanan verilere göre, küresel çelik üretiminin 2023 yılında 1.892 milyon tona ulaştığı belirtilmiştir. (*World Steel in Figures*, 2024).

Çelikler, kimyasal bileşimlerindeki karbon oranı ve alaşım elementleri ile kullanım alanlarına göre sınıflandırılmaktadır. Düşük karbonlu çelikler (%0.04–0.3 C) yüksek süneklikleri ve kolay işlenebilirlikleri nedeniyle genellikle inşaat sektörü ve makine imalatında tercih edilirken, yüksek karbonlu çelikler (%0.7–1.7 C) yüksek sertlik ve mukavemetleri sayesinde yaylar, bıçaklar ve kesici takımlar gibi dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Öte yandan, paslanmaz çelikler bünyelerinde önemli miktarda krom (Cr) ve nikel (Ni) içermeleri sayesinde yüzeylerinde koruyucu bir krom oksit tabakası oluşturur; bu da onlara kimyasal etkilere ve yüksek sıcaklıklara karşı üstün korozyon direnci kazandırır. Bu nedenle paslanmaz çelikler kimya endüstrisi, gıda işleme tesisleri ve tıbbi ekipman üretimi gibi alanlarda yaygın kullanım bulmaktadır. Çelik türlerinin kimyasal bileşimlerine ve kullanım alanlarına göre sınıflandırılmasına ilişkin örnek bir gösterim Tablo 2.1’de sunulmuştur (Ashby ve Jones, 1998).

Tablo 2.1. Demir esaslı malzemelerin kimyasal bileşimlerine ve tipik kullanım alanlarına göre sınıflandırılması (Ashby ve Jones, 1998)

Metal	Kimyasal Bileşim (ağırlık %)	Tipik Kullanım Alanları
Düşük karbonlu (“yumuşak”) çelik	Fe + %0.04–0.3 C (+ ≈ %0.8 Mn)	Düşük mukavemetli uygulamalar; genel inşaat çeliği, kaynak için uygun.
Orta karbonlu çelik	Fe + %0.3–0.7 C (+ ≈ %0.8 Mn)	Orta mukavemetli uygulamalar: makine parçaları – somunlar, cıvatalar, miller, dişliler.
Yüksek karbonlu çelik	Fe + %0.7–1.7 C (+ ≈ %0.8 Mn)	Yüksek mukavemetli uygulamalar: yaylar, kesici takımlar, kalıplar.
Düşük alaşımlı çelik	Fe + %0.2 C, %0.8 Mn, %1 Cr, %2 Ni	Yüksek mukavemetli uygulamalar: basınç kapları, uçak parçaları.
Yüksek alaşımlı (“paslanmaz”) çelik	Fe + %0.1 C, %0.5 Mn, %18 Cr, %8 Ni	Yüksek sıcaklık veya korozyon direnci gereken uygulamalar: kimya ve buhar tesisleri.
Dökme demir	Fe + %1.8–4 C (+ ≈ %0.8 Mn, %2 Si)	Düşük mukavemetli uygulamalar: silindirik blokları, drenaj boruları.

2.2. Korozyon Kavramı ve Mekanizması

2.2.1. Korozyonun tanımı ve önemi

Korozyon, bir malzemenin yalnızca çevresel etkiler ya da bu etkilerin mekanik kuvvetlerle birlikte oluşturduğu etki sonucunda zamanla bozulması olarak tanımlanabilir. Metaller söz konusu olduğunda, korozyon genellikle oksidasyonla ilişkilidir ve bu nedenle elektrokimyasal bir olay olarak kabul edilir. Ancak korozyon kavramı yalnızca metalleri kapsamaz; taş, ahşap veya plastik gibi elektrokimyasal süreçlerle bozulmayan malzemelerde de zamanla meydana gelen fiziksel veya kimyasal yıpranmalar bu tanımın kapsamına girmektedir (Gonçalves ve Margarido, 2015).

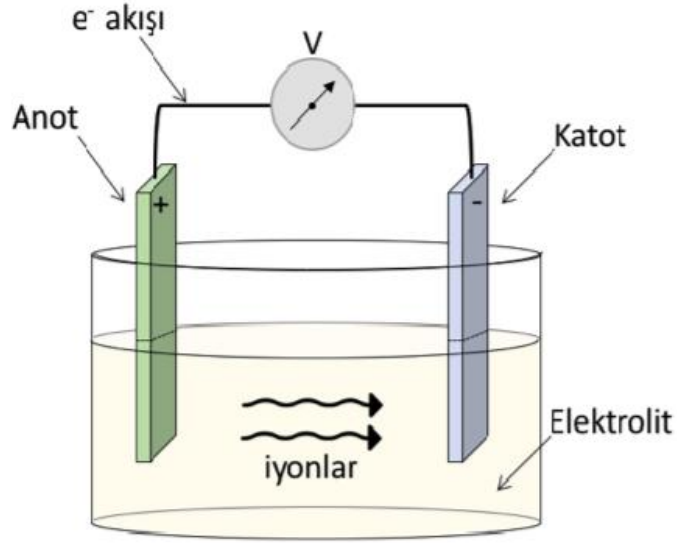
Korozyonun önemi üç temel başlık altında toplanabilir: ekonomi, güvenlik ve kaynakların korunması. Korozyon, metal yapıların, makinelerin, köprülerin, gemilerin ve boru hatlarının zamanla zayıflamasına ve hatta işlevini tamamen yitirmesine neden olmaktadır. Bu durum yalnızca maddi kayıplara yol açmakla kalmaz, aynı zamanda insan hayatını tehdit eden güvenlik riskleri de oluşturur. Özellikle basınçlı kaplar, uçak parçaları, köprüler ve nükleer santral ekipmanları gibi kritik sistemlerde korozyonun önlenmesi büyük önem taşımaktadır. Ekonomik açıdan bakıldığında, korozyon hem doğrudan hem de dolaylı kayıplara neden olur. Doğrudan kayıplar, korozyona uğrayan yapı ve ekipmanların onarım veya yenilenme maliyetlerini içerirken; dolaylı kayıplar üretim kesintileri, enerji israfı, bakım giderleri ve ürün kalitesindeki düşüş şeklinde ortaya çıkmaktadır (Revie ve Uhlig, 2025).

Dünya genelinde korozyonun ekonomik etkisi oldukça büyüktür. Yapılan araştırmalara göre, küresel korozyon maliyetleri dünya gayri safi yurt içi hasılasının yaklaşık %3–4'üne karşılık gelmektedir. Eğer mevcut koruma teknolojileri etkin biçimde kullanılsa, bu kayıpların %15–35'i önlenilecek seviyededir. Bu nedenle korozyonla mücadele hem endüstriyel verimliliğin artırılması hem de ekonomik kaynakların korunması açısından son derece önemlidir (Koch, 2017).

2.2.2. Korozyon mekanizması

Korozyon, metallerin bulundukları ortamla kimyasal veya elektrokimyasal etkileşime girerek daha kararlı bileşikler (oksit, hidroksit, sülfür vb.) hâline dönüşmeleri olarak tanımlanmaktadır. Bu süreç, metalin enerjice daha kararlı bir duruma ulaşma eğiliminin doğal sonucudur. Metalik malzemeler, üretim süreçleri sonunda yüksek enerji düzeyinde saf metal formuna getirilmişlerdir. Bu nedenle çevresel etkenlerle karşılaştıklarında yeniden oksitlenmiş hâllerine dönme eğilimi gösterirler (Doruk, 2012).

Korozyon olayı temelde elektrokimyasal karakterdedir; metal yüzeyinde yer alan mikro bölgeler arasında potansiyel farkı oluşmakta ve bu fark bir galvanik hücre gibi davranmaktadır. Bu durumda bir bölge anot, diğer bölge katot işlevi üstlenmektedir. Anodik bölgede metal atomları elektron kaybederek iyon hâline geçmekte ve çözünürken; katodik bölgede bu elektronlar elektrolit içerisindeki indirgenebilir türler tarafından tüketilmektedir. Böylece bir elektrik akımı meydana gelmekte ve korozyon süreci devam etmektedir (Marcus ve Oudar, 2002).



Şekil 2.1. Elektrokimyasal korozyon (Onaran, 2014)

Elektrokimyasal doğası nedeniyle korozyon, basit kimyasal çözünmeden farklı olarak hem elektron transferi hem de iyon hareketi gerektirir. Katı faz içerisinde elektronlar, elektrolit fazında ise iyonlar yük taşımını sağlamaktadır. Dolayısıyla korozyon, elektriksel anlamda kapalı bir devreye benzer şekilde gerçekleşmektedir (Groisman, 2009).

Korozyonun anlaşılmasındaki en temel model bir pil veya elektrokimyasal hücre modelidir. Bir metalin elektrolit ortamında çözünmesi klasik galvanik pildeki redoks tepkimeleriyle aynı prensiplerle açıklanabilir. Bu pil modeli ile tanımlanan sistem korozyon hücresi olarak adlandırılmaktadır (Doruk, 2012). Korozyon hücresinde elektron alışverişi ile anot kısmında oksidasyon (kimyasal yükseltgenme) ve katot kısmında redüksiyon (kimyasal indirgenme) reaksiyonları meydana gelmektedir. Elektron alan metal katot, veren metal anot sayılmaktadır (Roberge, 2000).

Bu hücrede iki farklı yarı-reaksiyon meydana gelir:

- Anodik reaksiyon (yükseltgenme): Metal atomu elektron kaybederek iyon haline geçmektedir.



- Katodik reaksiyon (indirgenme): Elektrolit içinde bulunan iyon veya moleküller bu elektronları alarak indirgenmektedir. Örneğin asidik bir ortamda hidrojen iyonları elektronları alarak gaz hâlinde H_2 oluşturmaktadır.



Bu iki tepkimenin aynı anda sürmesi, hücrenin sürekliliğini sağlamaktadır. Korozyonun şiddeti, bu yarı-reaksiyonların hız dengesi ile belirlenmektedir. Eğer katodik reaksiyonun hızı düşükse, anodik çözünme de yavaşlar; bu durum, katodik koruma yönteminin temelini oluşturmaktadır (Revie ve Uhlig, 2025).

Dışarıdan herhangi bir elektriksel etki bulunmasa dahi, her metal kendi yapısal özellikleri gereği belirli bir elektrokimyasal çözünme eğilimi göstermektedir. Bu eğilim, metalin elektrokimyasal potansiyeli olarak tanımlanmakta ve metalin elektron verme eğiliminin bir göstergesi olarak ifade edilmektedir. Her bir metalin potansiyeli, belirli bir referans elektrotla karşılaştırılarak yarı pil hücresi modeli üzerinden ölçülmektedir. Bu sistemde, metal elektrot uygun bir elektrolit çözeltisine daldırılmakta ve referans elektrotla oluşturduğu potansiyel farkı ölçülmektedir. Bu ölçümler sonucunda metallerin elektron bırakma eğilimleri kıyaslanabilir hale gelmektedir. Referans noktası olarak standart hidrojen elektrodu (SHE) kullanılmakta ve bu elektrodun potansiyeli sıfır kabul edilmektedir. Diğer metallerin hidrojen elektroduna göre daha yüksek elektron verme eğilimleri, potansiyel değerlerinin negatif olmasına neden olmaktadır (Askeland ve Phule, 1998).

Elde edilen bu veriler kullanılarak metallerin elektromotor kuvvet (EMK) serileri oluşturulmaktadır. Bu seri, metallerin indirgenme–yükseltgenme eğilimlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Şekil 2.2’de bazı metallerin EMK serisi üzerindeki potansiyel değerleri örneklendirilmiştir (Popov, 2015).

	Metal iyonu	25 °C 'de metal iyonlarının elektrot potansiyelleri (V)
Katodik	Au ³⁺	1.50
	Pt ²⁺	1.20
	Cu ²⁺	0.34
Referans	H ⁺	0.00
	Sn ²⁺	-0.14
	Ni ²⁺	-0.25
	Cd ²⁺	-0.40
	Fe ²⁺	-0.44
	Zn ²⁺	-0.76
	Al ³⁺	-1.66
Anodik	Mg ²⁺	-2.36

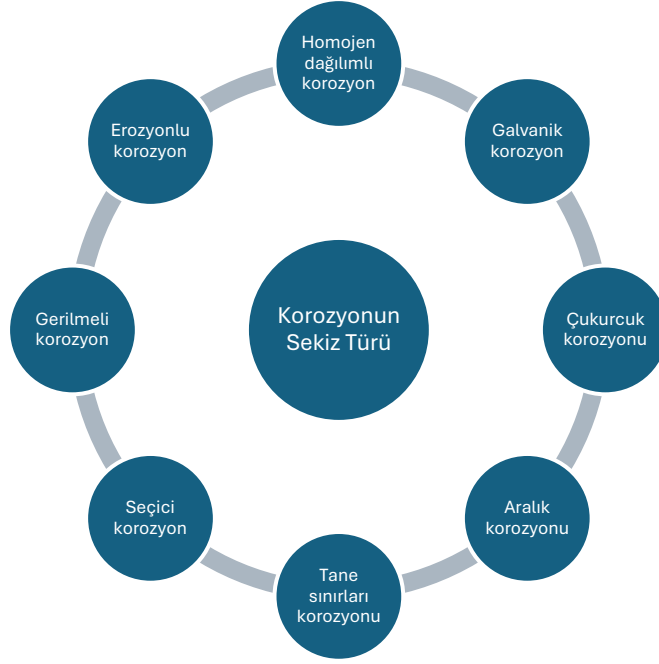
Şekil 2.2. 25 °C'de metal iyonlarının elektrot potansiyelleri (Popov, 2015)

2.2.3. Korozyon türleri

Korozyon türleri oluşma düzeneklerine göre kimyasal ve elektrokimyasal olmak üzere iki grupta incelenebilir. Kimyasal korozyon, metal ve alaşımların gaz ortamlarında oksijenle tepkimeye girerek oksitlenmesi sonucunda meydana gelmektedir. Buna karşılık, elektrokimyasal korozyon; metal ya da alaşımların su içeren ortamlarda bozunmasıyla ortaya çıkmaktadır. Bu tür ortamlar, metal yüzeyinde oluşan ince nem tabakalarından çeşitli sulu çözeltilere kadar oldukça geniş bir aralığı kapsamaktadır. Örneğin atmosfer, yer altı ve yüzey suları, toprak, canlı vücut sıvıları, kimyasal çözeltiler ve hatta bazı gıda ürünleri bu kapsama dahildir (Soyyigit, 2009).

Korozyonun birçok farklı türü vardır; bazıları oldukça yaygın olup günlük yaşamda sıkça gözlemlenirken, bazı türleri yalnızca belirli malzeme-çevre koşullarının bir araya gelmesiyle ortaya çıkmaktadır. Korozyon araştırmaları, bu farklı türlerin oluşum koşullarını ve etkileşim ortamlarını ayrıntılı biçimde incelemeyi gerektirmektedir. Korozyonu doğru şekilde anlamak ve etkili önleme ya da kontrol yöntemleri geliştirebilmek için, her korozyon tipinin hangi çevresel koşullarda meydana geldiğini iyi bilmek büyük önem taşımaktadır.

Korozyona uğramış yüzeyin görünüşüne göre çeliklerde görülen bazı korozyon türleri ise Fontana tarafından Şekil 2.3'te gösterildiği gibi farklı kategorilere ayrılmıştır (Fontana, 1986).



Şekil 2.3. Korozyon Türleri

2.2.3.1. Homojen dağılımlı korozyon

Homojen (uniform) korozyon, metal yüzeyinde malzeme kaybının nispeten eşit dağıldığı, zamanla tüm kesitte kalınlık azalmasına yol açan korozyon türüdür. Düşük karbonlu çelikler gibi pasif film oluşturmeyen malzemelerde, atmosferik ortamlar, içme suyu, zayıf asidik veya hafif tuzlu çözeltiler bu tür korozyonun tipik görüldüğü ortamlardır (Fontana, 1986; Revie, 2008). Çelik yüzeyinde oluşan demir oksit/hidroksit tabakası çoğu durumda gevşek ve geçirgen karakterdedir. Bu nedenle koruyuculuğu sınırlı olmakla birlikte korozyon süreci içinde devam etmektedir.

Son yıllarda yapılan deneysel çalışmalarda, S235 gibi yapı çeliklerinin %3.5 NaCl çözeltisinde altı aylık maruziyeti sonucunda hem yüzey pürüzlülüğünde artış hem de sertlikte belirgin azalma meydana geldiği, bunun da malzemenin mekanik performansında düşüşe yol açtığı gösterilmiştir (Buruiană ve ark., 2024). Benzer şekilde donatı çeliğinde kütle kaybıyla mekanik özelliklerdeki düşüş arasındaki ilişki literatürde rapor edilmiştir (Apostolopoulos ve Michalopoulos, 2007). Bu bulgular, homojen korozyonun yalnızca kesit kaybı açısından değil, aynı zamanda mekanik özellikler üzerindeki dolaylı etkileri bakımından da önemli olduğunu göstermektedir.

2.2.3.2. Galvanik korozyon

Galvanik korozyon, farklı elektrokimyasal potansiyele sahip iki metalin elektriksel temas hâlinde iken aynı elektrolite maruz kalmasıyla meydana gelmektedir.

Potansiyeli daha düşük olan metal anot olarak çözünürken, diğer metal katodik davranış göstermektedir (Roberge, 2000). Çelik yapılar içinde paslanmaz çelik–karbon çeliği, bakır–çelik ve alüminyum–çelik birleşimleri galvanik etkileşime açıktır. Deniz atmosferi gibi klorür içeriği yüksek ortamlarda galvanik akımın iletkenlik nedeniyle artması, anot malzemede korozyonun hızlanmasına yol açmaktadır (Revie, 2008). Bu nedenle farklı metallere sahip birleşim bölgelerinde uygun malzeme seçimi, elektriksel izolasyon ve uygun kaplama sistemlerinin kullanımı zorunludur.

2.2.3.3. Çukurcuk korozyonu

Çukurcuk (pitting) korozyonu, pasif filmle korunan metal yüzeylerinde filmin lokal olarak bozulması sonucu, küçük alanlarda derin oyukların oluşmasıyla karakterize edilen lokalize bir korozyon türüdür. Özellikle klorür iyonu içeren ortamlarda pasif tabakanın kararlılığı azalmakta ve belli noktalarda film kırılması meydana gelmektedir (Ahmad, 2006). Başlangıçta mikroskobik boyutlarda olan bu oyuklar, zamanla derinleşerek taşıyıcı kesitin etkin alanını azaltmakta ve çentik etkisi oluşturarak yorulma çatlaklarının başlamasına neden olmaktadır (Fontana, 1986). Betonarme yapılarda klorür kaynaklı donatı korozyonunun önemli bir kısmı çukurcuk korozyonu formunda gelişmekte, bu da çatlak oluşumu ve aderans kaybı yoluyla taşıyıcı sistemin davranışını olumsuz yönde etkilemektedir (Bentur ve ark., 1997; Broomfield, 2023).

2.2.3.4. Aralık korozyonu

Aralık (crevice) korozyonu, oksijen ve iyon taşınımının sınırlı olduğu dar boşluklarda, örneğin cıvata altları, contalı yüzeyler, kaynak aralıkları, üst üste bindirilmiş sac birleşimleri ve metal–beton arayüzlerinde meydana gelen lokal korozyon türüdür. Bu bölgelerde oksijen yoğunluğunun çevre yüzeylere göre daha düşük olması sonucu, aralık içi anodiklik artmakta ve çözünme hızı yükselmektedir (Bentur ve ark., 1997; Revie, 2008). Betonarme sistemlerde, gözenekli betonun klorür iyonlarını aralık bölgelerine taşıması donatı üzerinde yerel pasif tabaka bozulmalarına yol açabilmekte ve bu bölgelerde şiddetli korozyon gelişebilmektedir (Broomfield, 2023). Çelik donatının epoksi veya organik kaplamalarla korunmasının, bu dar bölgelerde oksijen ve nem ile temasın kesilmesi yoluyla korozyonu anlamlı ölçüde yavaşlattığı çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir (Selvaraj ve Bhuvaneshwari, 2009).

2.2.3.5. Tane sınırları korozyonu

Tane sınırları korozyonu, östenitik paslanmaz çeliklerde 450–850 °C sıcaklık aralığında krom karbür çökmesi sonucu tane sınırlarında krom tükenmesiyle gelişmektedir. Bu bölgeler anot hâline gelerek seçici çözünmeye uğramaktadır (Candelaria ve Pinedo, 2003). Kaynak sonrası ısıdan etkilenen bölgelerde bu mekanizmanın görülme ihtimali daha yüksektir. Klorür iyonlarının varlığı, duyarlılık kazanmış paslanmaz çeliklerde saldırgan davranışı artırabilmektedir (Costa ve ark., 2023).

2.2.3.6. Seçici korozyon

Seçici korozyon, alaşımı oluşturan elementlerden birinin diğerlerine oranla daha hızlı çözüldüğü durumlarda ortaya çıkmaktadır. Pirinç alaşımlarında dezinkifikasyon ve dökme demirde grafitleşme bu mekanizmaya örnektir (Ahmad, 2006). Magnezyum alaşımlarında farklı fazların oluşturduğu mikro-galvanik çiftler belirli bölgelerde anodiklik oluşturarak seçici çözünmeyi hızlandırmasına yol açabilmektedir (Song ve ark., 1997).

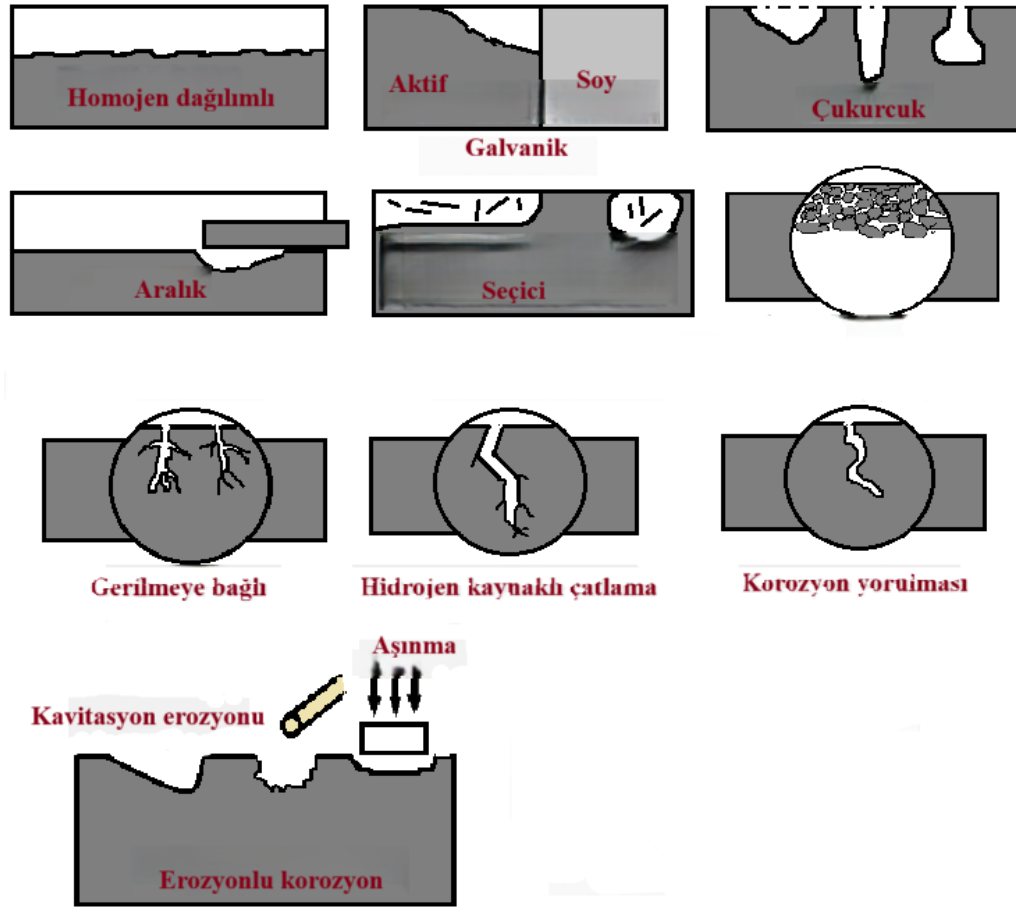
2.2.3.7. Gerilmeli korozyon

Gerilmeli korozyon çatlaması (SCC), çekme gerilmesi ile korozi ortamının birlikte etkisi sonucunda malzemede çatlak oluşumu ve ilerlemesiyle karakterize edilmektedir. Çatlaklar çoğu zaman akma dayanımının altında gerilmelerde oluşabilmektedir (Marcus ve Oudar, 2002; Revie ve Uhlig, 2025). Klorür içeren ortamlarda donatı çeliğinin çekme bölgelerinde bu tür kırılma davranışları gözlemlenebilmektedir.

2.2.3.8. Erozyonlu korozyon

Erozyonlu korozyon, akışkanın mekanik aşındırıcı etkisi ile elektrokimyasal çözünmeyi eş zamanlı olması sonucu ortaya çıkmaktadır. Yüksek hızdaki akış pasif filmi kaldırarak korozyon sürecini hızlandırmaktadır. Bu mekanizma özellikle boru hatları, pompa çarkları ve deniz suyu uygulamalarında önem taşımaktadır (Roberge, 2000; Ma, Li & Wang, 2009).

Farklı korozyon türlerinin davranış tiplerini gösteren şematik görüntüler Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Korozyon Türleri (Lopes ve ark., 2016)

2.3. Çelik Malzemeler ve Korozyon Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Çelik malzemeler; yüksek dayanım, şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik ve ekonomik üretim maliyetleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu malzemelerin servis ömrü yalnızca başlangıç mekanik özellikleriyle değil, maruz kaldıkları çevresel koşullarla da doğrudan ilişkilidir. Literatürde nem, klorür içeriği, pH, sıcaklık, çözeltinin iyonik bileşimi ve malzemenin mikroyapısı gibi değişkenlerin çelik yüzeyinde korozyonun başlaması ve ilerlemesi üzerinde belirleyici olduğu bildirilmektedir (Li ve Yang, 2021; Lawal ve Afolalu, 2024). Bu nedenle çeliklerin farklı korozyon ortamlarındaki davranışını anlamak hem malzeme seçimi hem de uzun süreli yapısal güvenilirlik açısından önem taşımaktadır.

Korozyon, metal yüzeyinde elektrolitik ortamın varlığında gelişen kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda meydana gelen bir bozunma süreci olarak değerlendirilmektedir (Uzorh, 2013). Bu süreçte anodik bölgelerde metal iyonlarının çözünmesi, katodik bölgelerde ise indirgenme reaksiyonlarının gerçekleşmesi malzeme yüzeyinde hasar oluşumuna yol açmaktadır (İbrahimi ve ark., 2021). Çeliğin korozyon

eğilimi; karbon ve alaşım elementi içeriği, yüzey durumu, mikroyapı, pasif film kararlılığı ve ortamın pH/iyonik karakteri gibi birden fazla değişkenin birlikte etkisiyle şekillenmektedir (Singh, 2014). Bu çok değişkenli yapı, korozyon çalışmalarında yalnızca kütle kaybının değil, mekanik ve mikroyapısal değişimlerin de birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Çevresel koşullar içinde özellikle nem ve klorür iyonları, düşük karbonlu çeliklerin korozyon davranışı üzerinde öne çıkan etkenlerdir. Nemli ortamlarda metal yüzeyinde ince bir elektrolit filmi oluşmakta ve bu film elektrokimyasal reaksiyonların sürekliliğini kolaylaştırmaktadır (Li ve Yang, 2021). Deniz suyu veya tuzlu çözeltilerde bulunan klorür iyonları ise pasif oksit tabakasını yerel olarak bozarak çukurcuk korozyonunun gelişmesine zemin hazırlamaktadır. ST37/S235 sınıfı çeliğin %3.5 NaCl çözeltisine 4032 saat boyunca maruz bırakılması sonucunda yüzey pürüzlülüğünün 0.833 μm 'den 1.442 μm 'ye yükseldiği ve Vickers sertlik değerinin 149.5 HV'den 102.9 HV'ye düştüğü bildirilmiştir. Bu bulgu, klorürlü ortamların yalnızca yüzey görünümünü değil, çeliğin mekanik karakterini de etkileyebildiğini göstermektedir (Buruiană ve ark., 2024).

Atmosferik koşullarda yürütülen çalışmalar da klorür birikiminin korozyon hızını belirgin biçimde değiştirdiğini ortaya koymaktadır. Düşük karbonlu çeliğin farklı klorür seviyelerine sahip atmosferik ortamlardaki davranışının incelendiği bir çalışmada, denize 95 m mesafede ölçülen klorür birikiminin 0.387 mg/100 cm²·gün, 375 m mesafede ise 0.0248 mg/100 cm²·gün olduğu rapor edilmiştir. Yirmi dört aylık doğal maruziyet sonunda kalınlık kaybı denize yakın istasyonda yaklaşık 900–1000 μm , daha uzak istasyonda ise 600–700 μm aralığında ölçülmüştür. Çalışmada yüksek klorür birikimi, daha gözenekli pas tabakası, β -FeOOH oluşumu ve erken dönemde hızlanan korozyon kinetiği ile ilişkilendirilmiştir (Ma ve ark., 2009).

Asidik ve bazik ortamların çeliklerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi de deneysel çalışmalarda ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. ASTM E-8 standardına uygun hazırlanan ST37, ST60 ve cıva çeliği numuneleri H₂SO₄, KOH, NaOH, makine yağı ve saf su gibi farklı ortamlarda bekletildikten sonra çekme testlerine tabi tutulmuştur. Çalışmada özellikle H₂SO₄ ortamının mekanik özellikler üzerinde daha yıpratıcı olduğu; bekleme süresinin artmasıyla ST37 ve ST60 çeliklerinde hasar yükü ve dayanımda belirgin azalmalar meydana geldiği bildirilmiştir. Buna karşılık nötr karakterli ortamlarda mekanik özelliklerde daha sınırlı değişimler gözlenmiştir (Adın, 2016). Bu sonuçlar, ortam kimyasının korozyon davranışı kadar çekme davranışını da etkileyebileceğini göstermektedir.

Ölçülen pH değişimi ve çözeltinin asidik/bazik karakteri, korozyon ürünlerinin kararlılığı açısından da önemlidir. Asidik ortamlarda demir oksit tabakasının çözünmesi metal yüzeyinin doğrudan saldırıya açık hâle gelmesine neden olurken, bazik ortamlarda geçici $\text{Fe}(\text{OH})_3$ tabakaları oluşabilmekte; ancak bu tabakalar kararlı olmadığında lokal korozyon bölgeleri gelişebilmektedir (Menteş, 2014). Farklı pH değerlerinin incelendiği çalışmalarda, düşük pH seviyelerinde kaplamasız çelik numunelerde daha yüksek korozyon hızları gözlenirken, kaplamalı numunelerde ağırlık kaybının daha sınırlı kaldığı bildirilmiştir (Bani, 2024). Düşük pH değerlerinde demir oksitlerin hızlı çözündüğü, nötr pH koşullarında ise goethit ve lepidokrokrit gibi daha kararlı oksitlerin oluşabildiği de gösterilmiştir (Hou ve ark., 2016).

Sıcaklık, korozyon hızını etkileyen diğer önemli çevresel değişkenlerden biridir. Docol 1200 çeliğinde %3.5 NaCl ortamında 25 °C’de 31 mpy olan korozyon hızının 60 °C’de 50 mpy’ye yükseldiği ve bu artışın sıcaklığın iyon hareketliliğini artırmasıyla ilişkili olduğu rapor edilmiştir (Gerengi ve ark., 2019). Dolayısıyla sıcaklık, klorür içeriği ve pH gibi parametreler ayrı ayrı etkili olmakla birlikte, pratik koşullarda çoğu zaman birlikte değişerek çeliklerin korozyon davranışını belirlemektedir.

Korozyonun mekanik özellikler üzerindeki etkileri, literatürde en çok çekme dayanımı, sertlik, süneklik ve yorulma davranışı üzerinden değerlendirilmiştir. Korozyonun ilerlemesiyle etkin kesit alanı azalmakta, yüzeyde çukurcuk ve çentik benzeri kusurlar oluşmakta ve bu kusurlar gerilme yığılmalarını artırarak mekanik performansı düşürmektedir (Li ve Yang, 2021). Deniz suyuna maruz bırakılan cam elyaf takviyeli epoksi kaplı 304L paslanmaz çelik borularda 40 günlük maruziyet sonunda çekme dayanımında %43.4 oranında azalma bildirilmiştir (Ahankari ve Patil, 2020). Farklı nem koşullarında tekrarlı korozyona uğrayan oluklu çelik borularda da sertlik ve çekme dayanımı değerlerinin düştüğü rapor edilmiştir (Ezzeldin ve ark., 2022). ST37 çeliğinde yapılan başka bir çalışmada ise tuzlu ortamda çekme dayanımında yaklaşık %17 oranında kayıp meydana geldiği belirtilmiştir (Eken ve ark., 2016).

BSt500s donatı çeliğinin tuz püskürtme ortamında korozyona uğramasıyla mekanik özelliklerde meydana gelen değişimler incelenmiştir (Apostolopoulos ve Michalopoulos, 2007). Çalışmada 12 mm çeliklerde 10–90 günlük maruziyet boyunca kütle kaybının %1.37–8.26, 8 mm çeliklerde ise %0.60–31.86 aralığında değiştiği rapor edilmiştir. Korozyonun ilerlemesiyle çubukların yüzeyinde çukurcuklar ve çentikler oluşmuş, bu durum yorulma dayanımını belirgin biçimde azaltmıştır. Özellikle 12 mm çeliklerde kütle kaybı düşük düzeyde kalmasına rağmen yorulma ömrünün önemli ölçüde

gerilediği belirtilmiştir. Ayrıca 8 mm çeliklerde sertlik kaybının dış bölgede %25–35, iç bölgede ise %2–10 aralığında gerçekleştiği bildirilmiştir. Bu çalışma, düşük düzeydeki korozyonun bile donatı çeliğinde yorulma davranışı, sertlik ve enerji yutma kapasitesi üzerinde belirgin etkiler oluşturabileceğini göstermektedir.

Gerilim ve yorulma ile birlikte ilerleyen korozyon süreçleri, servis koşullarındaki çelik yapı elemanları açısından ayrıca önem taşımaktadır. Gerilim altındaki numunelerde korozyon kaynaklı kütle kaybının gerilimsiz numunelere göre daha yüksek olabildiği, eş zamanlı gerilim-korozyon etkisinin çekme dayanımındaki azalmayı artırabildiği bildirilmiştir (Li ve ark., 2002). Gerilmeli korozyon çatlaması (SCC) çalışmalarında karbon çelik borularda ilerleyen çatlakların malzemenin mukavemetini düşürdüğü ve kırılma davranışına neden olduğu gösterilmiştir (Quej-Ake ve ark., 2020). Benzer şekilde, 9MnSi5 çeliğinde H₂S ortamında 100–250 µm derinliğinde çatlakların oluştuğu ve akma dayanımının %60'ı üzerindeki gerilmelerde SCC'nin hızlandığı belirtilmiştir (Alkhimenko ve ark., 2020). Klorür iyonları içeren ortamlarda türbin kanat çeliği T552'nin yorulma dayanımında gözlenen düşüş de bu etkileşimin önemini desteklemektedir (Janoušek ve ark., 2017).

Korozyon yalnızca makroskobik kesit kaybı ile sınırlı olmayıp, mikroyapı ve korozyon ürünlerinin karakteri üzerinde de belirleyici sonuçlar doğurmaktadır. H₂S içeren ortamlarda düşük alaşımlı çeliklerin yüzeyinde Mackinawite ve Greigite gibi sülfürlü ürünlerin oluştuğu, bu ürünlerin kompakt olmayan tabakalar meydana getirerek korozyonu hızlandırdığı belirlenmiştir (Liu ve ark., 2022). St37 çeliği üzerinde yürütülen uzun süreli deneylerde NaCl ortamında gevşek FeOOH ve Fe₃O₄ fazlarının geliştiği, içme suyu ortamında ise daha kararlı α -FeOOH (goethit) tabakasının oluştuğu gözlenmiştir (Buruiană ve ark., 2024). Bu bulgular, ortam bileşiminin yalnızca korozyon miktarını değil, oluşan pas tabakasının koruyuculuk düzeyini de etkilediğini göstermektedir.

Farklı çelik türlerinin aynı ortam koşullarında sergiledikleri korozyon davranışları karşılaştırmalı çalışmalarda değerlendirilmiştir. Su arıtma tesislerinde AISI 316L, AISI 321 ve Duplex 14462 çeliklerinin korozyon dayanımlarının karşılaştırıldığı bir araştırmada, en yüksek korozyon direncinin Duplex 14462 çeliğinde elde edildiği belirtilmiştir (Costa ve ark., 2023). 304 paslanmaz çeliğin NaClO ortamında kısa süreli maruziyetlerde pasif film oluşturabildiği, ancak uzun süreli temas sonucunda krom tükenmesine bağlı olarak çukurcuk korozyonuna daha açık hâle geldiği bildirilmiştir (Li ve ark., 2022). Yumuşak çeliklerin farklı ortamlardaki davranışlarının incelendiği bir çalışmada ise en yüksek korozyon hızının 0.1 M HCl çözeltisinde, en düşük hızın tatlı su

ortamında meydana geldiği tespit edilmiştir (Odio ve ark., 2014). P235TR2 çeliğinde %10 NaCl ortamında 10 °C’de 432 saatlik maruziyet sonunda korozyon hızının 0.24 mm/yıl’dan 0.51 mm/yıl’a yükseldiği rapor edilmiştir (Lipinski ve Pietraszak, 2023).

Eski bir demiryolu köprü çeliği ile modern hava şartlarına dayanıklı bir çeliğin karşılaştırıldığı bir çalışmada, modern çeliğin daha düşük karbon ancak daha yüksek Cu, Cr ve Ni içeriğine sahip olduğu belirtilmiştir. Bu bileşim farkının daha yüksek sertlik ve daha kompakt bir pasif tabaka oluşumu ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Korozyon testlerinde %3.5 NaCl ortamında düşük korozyon hızları ölçülürken, %1 HCl çözeltisinin çok daha agresif davrandığı ve her iki çelikte de korozyon hızını yaklaşık 5–10 kat artırdığı bildirilmiştir. Modern çeliğin alaşım katkıları sayesinde daha stabil bir korozyon ürünü tabakası geliştirdiği ve uzun dönem dayanımının eski çeliğe göre daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Tewary ve ark., 2016).

Mikroyapının korozyon tabakası gelişimi üzerindeki etkisi CO₂ içeren klorürlü ortamlarda da incelenmiştir. CO₂ ile doymuş %5 NaCl ortamında tavllanmış ferrit–perlit yapıları çelik ile su verilmiş-temperlenmiş martenzitik yapının farklı korozyon ürünü tabakaları oluşturduğu gösterilmiştir. Tavllanmış yapıda inhibitör ilavesiyle daha kompakt bir tabaka oluşurken, martenzitik yapıda inhibitör etkisinin daha kararsız davranabildiği rapor edilmiştir (López ve ark., 2003). CO₂ ile doymuş %3 NaCl ortamında 25–65 °C aralığında çelik mikroyapısının korozyon hızını belirgin biçimde değiştirdiği, alaşım içeriği ve ısıtma işlemi geçmişinin ağırlık kaybı üzerinde etkili olduğu ortaya konulmuştur (Al-Hassan ve ark., 1998). Bu çalışmalar, çeliklerde korozyon davranışının yalnızca ortamdan değil, malzemenin iç yapısından da güçlü biçimde etkilendiğini göstermektedir.

Çeliklerin koroziyon ortamlardaki dayanımını artırmak amacıyla yüzey kaplamaları, inhibitörler, alaşım ve ısıtma işlemi düzenlemeleri ile elektrokimyasal koruma yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında organik boya kaplamaları, metal yüzeyi elektrolitten ayıran fiziksel bir bariyer oluşturarak özellikle asidik ve klorürlü ortamlarda korozyon hızını azaltabilmektedir. Bununla birlikte kaplamadaki gözenek, çatlak veya aderans kaybı gibi yerel kusurlar, koroziyon iyonların zamanla metal yüzeyine ulaşmasına ve koruyucu etkinliğin azalmasına neden olabilmektedir (Sørensen ve ark., 2009; Lyon ve ark., 2017; Yadav ve ark., 2022).

Genel olarak önceki çalışmalar, çeliklerin korozyon davranışının çevresel koşullar, kimyasal bileşim, mikroyapı, yüzey durumu ve uygulanan koruma yöntemlerinin birlikte etkisiyle belirlendiğini göstermektedir. Yüksek klorür yoğunluğu, düşük pH, sıcaklık artışı ve nem gibi agresif koşullar çeliklerde kütle kaybı, yüzey hasarı,

sertlik azalması, çekme dayanımı kaybı ve yorulma ömründe düşüş gibi sonuçlara neden olabilmektedir. Buna karşılık kaplama sistemleri, uygun ısıt işlemleri, alaşımların optimizasyonu, inhibitör kullanımı ve katodik koruma gibi yöntemler korozyon hızını azaltmada etkili seçenekler sunmaktadır. Literatürdeki bu bulgular, farklı çelik türlerinin çeşitli korozyon ortamlardaki davranışlarının yalnızca korozyon parametreleriyle değil, mekanik ve yüzey özellikleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

3.1.1. Metal malzemeler

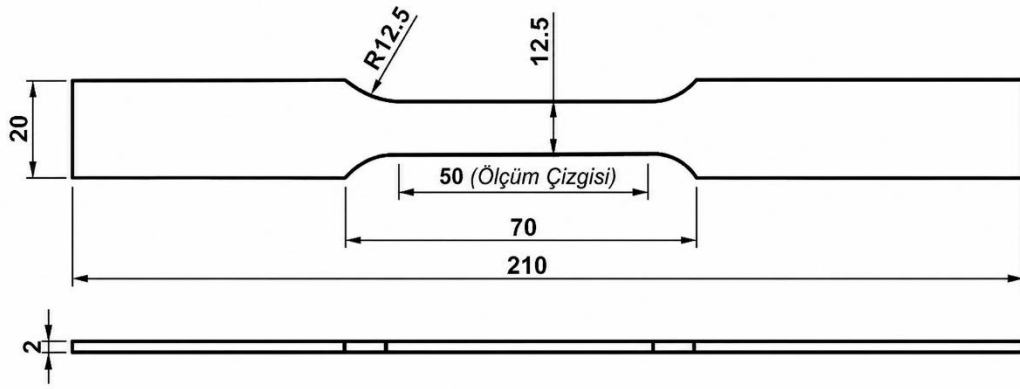
Bu çalışmada toplam 114 adet düz çekme numunesi kullanılmıştır. Numunelerin 57 adedi ticari olarak ST37, 57 adedi ise ticari olarak ST52 olarak temin edilen çelik malzemelerden hazırlanmıştır. Malzemelerin kimyasal bileşimleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri

Element	ST37 (S235JR)	ST52 (S355J2+N)
C	0.14	0.16
Mn	0.56	1.25
Si	0.01	0.01
P	0.02	0.02
S	0.01	0.01
Al	0.03	0.03
Cu	0.04	0.03
Cr	0.03	0.01
Ni	0.02	0.01
Diğer	V: 0.002; N: 0.0047	V: 0.003; Ti: 0.020; Sn: 0.016; N: 0.004; Mo: 0.002
Fe	Kalan	Kalan

Her iki malzeme grubundan 3’er adet numune referans grup olarak ayrılmış, bu numunelere herhangi bir boya uygulaması veya korozyon işlemi yapılmadan başlangıç çekme ve sertlik değerleri belirlenmiştir. Geriye kalan numuneler ise boyalı ve boyasız yüzey koşullarında farklı korozif ortamlara maruz bırakılarak deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

Deney numuneleri 2 mm kalınlığındaki sac malzemeden hazırlanmıştır. Numunelerin kesimi lazer kesim yöntemi ile ve hadde yönüne paralel olarak (0°) gerçekleştirilmiştir. Numune geometrisinin belirlenmesinde, metalik malzemelerin oda sıcaklığındaki çekme özelliklerinin tayinine yönelik ASTM E8/E8M standardı esas alınmıştır. Söz konusu standart; akma dayanımı, çekme dayanımı, uzama ve kesit daralması gibi temel çekme parametrelerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (ASTM International, 2025). Bu standarda uygun numuneye ait teknik resim ve ölçüleri Şekil 3.1’de verilmiştir.

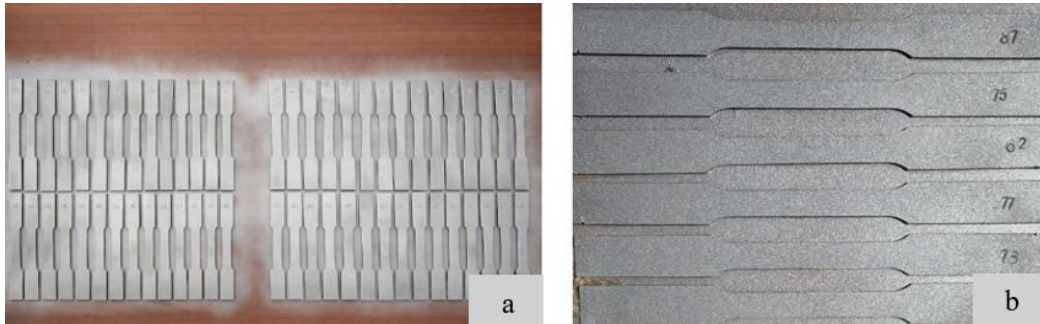


Şekil 3.1. Düz çekme numunesinin geometrisi ve temel ölçüleri

3.1.2. Koruyucu boya malzemesi

Numunelerin bir kısmında yüzey koruması amacıyla metalik gri renkte aerosol tip sprey boya kullanılmıştır. Boya uygulaması tek kat olarak gerçekleştirilmiştir. Boyama işlemi sonrasında numuneler laboratuvar ortamında 24 saat süreyle kurumaya bırakılmıştır. Boyasız grup numunelerine ise herhangi bir kaplama uygulanmamıştır.

Kaplama uygulamasının deney planına dahil edilmesindeki temel amaç, boya tabakasının korozif ortam ile metal yüzey arasındaki doğrudan teması ne ölçüde sınırlandırdığını karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Organik esaslı bariyer kaplamaların, metal yüzeyi elektrolitten ayırarak korozyon hızını azaltabildiği ve özellikle atmosferik ya da sulu ortamlarda koruyucu etki gösterebildiği literatürde yaygın olarak bildirilmektedir (Kordas, 2022).



Şekil 3.2. Boya uygulanan numunelerin genel görünümü (a) ve kuruma sonrası yüzey durumu (b)

3.1.3. Koroziyon çözeltiler

Bu çalışmada kullanılan koroziyon ortamları laboratuvar koşullarında hazırlanmıştır. Asidik ortam olarak 0.1 M HCl, bazik ortam olarak 0.03 M NaOH ve tuzlu ortam olarak %3.5 (w/v) NaCl çözeltisi kullanılmıştır.

0.1 M HCl çözeltisi, derişik hidroklorik asit (%37, $d = 1.19 \text{ g/mL}$, yaklaşık 12 M) kullanılarak hazırlanmıştır. Bu amaçla 25 mL derişik HCl dikkatli bir şekilde ölçülmüş

ve hacim saf su ile 3 L'ye tamamlanmıştır. Hazırlanan çözeltinin başlangıç pH değeri yaklaşık 1.0 olarak belirlenmiştir.

0.03 M NaOH çözeltisi, katı NaOH kullanılarak hazırlanmıştır. Toplam 3 L çözelti için 3.6 g NaOH tartılmış, bir miktar saf suda çözündürülmüş ve hacim saf su ile 3 L'ye tamamlanmıştır. Elde edilen çözeltinin başlangıç pH değeri yaklaşık 12.5 olarak ölçülmüştür.

%3.5 (w/v) NaCl çözeltisinin hazırlanmasında 105 g NaCl tartılmış, saf suda çözündürülmüş ve hacim 3 L'ye tamamlanmıştır. Hazırlanan çözeltinin başlangıç pH değeri yaklaşık 7.2 olarak belirlenmiştir.

Klorür içeren %3.5 NaCl çözeltisi, düşük karbonlu yapı çeliklerinin korozyon davranışını inceleyen deneysel çalışmalarda yaygın biçimde kullanılan bir ortamdır. Literatürde, S235 sınıfı çeliklerin %3.5 NaCl ortamında belirgin korozyon ürünleri oluşturduğu, yüzey pürüzlülüğünde artış ve sertlikte azalma gibi değişimler gösterdiği rapor edilmektedir. Bu nedenle, çalışmada kullanılan tuzlu ortamın seçimi literatürde sık kullanılan korozyon koşulları ile uyumlu olacak şekilde yapılmıştır (Buruiană ve ark., 2024).



Şekil 3.3. HCl, NaOH ve %3.5 NaCl çözeltilerinin hazırlandığı deney kapları / daldırma düzeneği

3.1.4. Deney ve analiz cihazları

Numunelerin kütle ölçümleri maksimum kapasitesi 220 g ve hassasiyeti 0.001 g olan Sartorius CPA224S model analitik terazi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri Shimadzu Autograph AG-IS 100 kN universal çekme cihazında, sertlik ölçümleri ise Mitutoyo marka Vickers sertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Çözeltilerin pH ölçümlerinde Thermo Scientific marka pH metre kullanılmıştır. Optik görüntü alma işlemlerinde Olympus BX51M mikroskop kullanılmış, metalografik yüzey hazırlama işlemleri ise Struers LaboForce-50 cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Metalografik yüzey hazırlama sürecinde kullanılan taşlama ve parlatma ekipmanları, numune yüzeyinin optik inceleme için uygun düzlüğe ulaştırılmasında kritik öneme sahiptir. Struers'in teknik kılavuzlarında, taşlama ve parlatma adımlarının özellikle yüzey çiziklerinin kontrolü, düzlemsellik ve inceleme kalitesi üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmaktadır. Benzer şekilde ASTM E92, Vickers sertlik testlerinde yüzey hazırlığının ölçüm doğruluğu açısından önemli olduğunu belirtmektedir (Struers; ASTM International, 2023).



Şekil 3.4. Çekme test cihazı ve Vickers sertlik cihazı

3.2. Metot

3.2.1. Deney planı ve numune gruplandırması

Her bir malzeme türü için toplam 57 adet numune hazırlanmıştır. Bunların 3 adedi referans numune olarak ayrılmış, kalan 54 adet numune ise deneysel koşullara göre gruplandırılmıştır. Deney planı her malzeme için 2 yüzey durumu (boyalı/boyasız), 3 korozif ortam (HCl, NaOH ve NaCl) ve 3 bekletme süresi (30, 60 ve 90 gün) esas alınarak oluşturulmuştur. Böylece deney tasarımı, malzeme türü, yüzey durumu, korozif ortam ve bekletme süresi değişkenlerinin karşılaştırılmasına olanak sağlayacak şekilde düzenlenmiştir.

Referans numuneler yalnızca başlangıç mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Deney numuneleri ise boya uygulaması, korozif ortamda bekletme, kütle değişimi takibi, korozyon hızı hesabı, çekme testi, sertlik ölçümleri ve optik yüzey/kesit incelemeleri için değerlendirilmiştir.

3.2.2. Numunelerin hazırlanması

Deney numuneleri lazer kesim yöntemi ile ve hadde yönüne paralel olacak şekilde hazırlanmıştır. Kesim sonrasında numuneler numaralandırılmış ve deney planına uygun biçimde sınıflandırılmıştır. Numunelerin yüzeyleri boya uygulamasından önce kir, toz ve yağ kalıntılarından arındırılmıştır. Referans grup dışında kalan numuneler boyalı ve boyasız olmak üzere iki ana gruba ayrılmıştır.

Numune hazırlama ve işaretleme aşamasında her numunenin ait olduğu malzeme türü, yüzey durumu, maruz kalacağı çözelti ve bekletme süresi kayıt altına alınmıştır.

3.2.3. Koruyucu boya uygulama işlemi

Boyalı gruba ait numunelere metalik gri spreyci boya tek kat halinde uygulanmıştır. Uygulama sırasında numune yüzeylerinin homojen biçimde kaplanmasına dikkat edilmiştir. Boya uygulamasından sonra numuneler laboratuvar ortamında 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Boyasız grup numuneleri de benzer çevresel koşullarda bekletilmiş, ancak bu numunelere herhangi bir kaplama uygulanmamıştır.

Kaplama tabakasının koruyucu etkisinin değerlendirilebilmesi için boyalı ve boyasız numuneler aynı deney akışı içerisinde karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Böylece boya tabakasının yalnızca görsel bir yüzey örtüsü değil, aynı zamanda korozif türlerin metal yüzeye erişimini sınırlandıran bir bariyer oluşturup oluşturmadığı deneysel olarak gözlenmiştir. Bu yaklaşım, bariyer kaplama davranışının değerlendirilmesine yönelik temel literatür ile uyumludur (Kordas, 2022).

3.2.4. Korozif çözeltilere maruz bırakma işlemi

Hazırlanan numuneler her çözelti için ayrı kaplar kullanılacak şekilde korozif ortamlara daldırılmıştır. Her ortam için 30, 60 ve 90 günlük süre grupları oluşturulmuş ve ilgili süre grubuna ait numuneler deney süresi boyunca aynı kap içerisinde muhafaza edilmiştir. Deney süresince çözeltiler yenilenmemiştir. Ayrıca numuneler oda sıcaklığında bekletilmiş olup harici hava şartlandırıcı kullanılmamıştır.

Numuneler; malzeme türü, yüzey durumu, çözelti türü ve bekletme süresi esas alınarak ayrı ayrı takip edilmiştir. Bu sayede hem malzeme kalitesinin hem de boya uygulamasının farklı korozif ortamlardaki davranışı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. ASTM G31 rehberinde belirtildiği üzere laboratuvar daldırma deneylerinde çözeltinin bileşimi, test süresi, numune yüzey alanı, çözeltinin hacmi, numunenin desteklenme biçimi ve numune temizleme yaklaşımı sonuçları doğrudan etkileyen temel değişkenlerdir. Bu nedenle deney kurgusu oluşturulurken her çözelti için ayrı kap

kullanılması ve süre gruplarının açık biçimde ayrılması esas alınmıştır (ASTM International, 2021).



Şekil 3.5. Numunelerin korozi ortamda bekletildiği kaplar ve deneyin genel düzeni

3.2.5. pH ölçümleri

Korozi çözeltilerin pH değerleri deney başlangıcında ölçülmüştür. Ayrıca 30, 60 ve 90 günlük bekletme sürelerinin sonunda çözeltilerin pH değerleri yeniden ölçülerek ortam kimyasındaki değişim değerlendirilmiştir. pH takibi, numune-çözelti etkileşimi sonucu ortamda meydana gelen kimyasal değişimlerin izlenebilmesi açısından değerlendirmeye dahil edilmiştir.

Özellikle uzun süreli daldırma deneylerinde çözelti pH'ındaki değişim, metal çözünmesi, yüzey reaksiyonları ve korozyon ürünlerinin oluşumu hakkında dolaylı bilgi sunabilmektedir. Bu nedenle pH değerleri, kütle kaybı ve görsel yüzey değişimleri birlikte yorumlanmıştır.

3.2.6. Kütle değişimi ölçümleri

Tüm numunelerin deney öncesi başlangıç kütleleri analitik terazi kullanılarak belirlenmiştir. Bekletme süresi sonunda numuneler çözeltilerden çıkarılmış ve iki aşamalı tartım yapılmıştır. İlk aşamada numuneler üzerindeki korozyon ürünleri uzaklaştırılmadan tartılmıştır. Bu ölçüm, numunelerin yüzey ürünleri ile birlikte toplam kütle değişiminin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır.

İkinci aşamada ise numuneler saf su ile temizlenmiş, laboratuvar ortamında kurutulmuş ve yeniden tartılmıştır. Bu ölçüm ile yüzey temizliği sonrası kütle değişimi belirlenmiştir. Böylece numunelerin hem korozyon ürünleriyle birlikte gösterdiği

davranış hem de saf su ile yüzey temizliği sonrası kütle değişimi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

3.2.7. Korozyon hızı hesabı

Korozyon hızının belirlenmesinde ağırlık kaybı verilerinden yararlanılmıştır. Hesaplamalarda numunelerin başlangıç ve deney sonu kütleleri arasındaki fark esas alınmış; gerekli durumlarda numune yüzey alanı, maruz kalma süresi ve malzeme yoğunluğu dikkate alınmıştır. Korozyon hızı hesabında seçilen birim sistemine bağlı olarak uygun dönüşüm katsayısı kullanılmıştır. Genel formül aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$CR = \frac{K \times W}{A \times t \times \rho} \quad (3.1)$$

Burada CR korozyon hızını, K birim dönüşüm katsayısını, W kütle kaybını, A numune yüzey alanını, t maruz kalma süresini ve ρ malzeme yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu yaklaşım, daldırma tipi korozyon deneylerinde kütle kaybına dayalı değerlendirme için ASTM G31 rehberinde tanımlanan temel hesaplama mantığı ile uyumludur. Ayrıca gravimetrik korozyon değerlendirmesi, özellikle tuzlu ortamlarda çelik numunelerin davranışını karşılaştırmak için literatürde yaygın biçimde kullanılmaktadır (ASTM International, 2021; Buruiană ve ark., 2024).

3.2.8. Çekme testleri

Referans numuneler ile korozyon ortamına maruz bırakılan numunelerin çekme testleri Shimadzu Autograph AG-IS 100 kN üniversal çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri, ASTM E8/E8M standardına göre 25 mm/dak çekme hızında yürütülmüştür. Deneyler sonucunda numunelerin uzama değerleri ve kuvvet değerleri kayıt altına alınmış ve bu değerler kullanılarak malzemeye ait akma dayanımı, çekme dayanımı ve şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar referans numunelerle karşılaştırılarak korozyonun ve kaplama durumunun mekanik özellikler üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

3.2.9. Sertlik ölçümleri

Kontrol grubu ve korozyona maruz bırakılan tüm numunelerin sertlik ölçümleri Vickers yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Her numunenin üç ayrı bölgesinden ölçümler

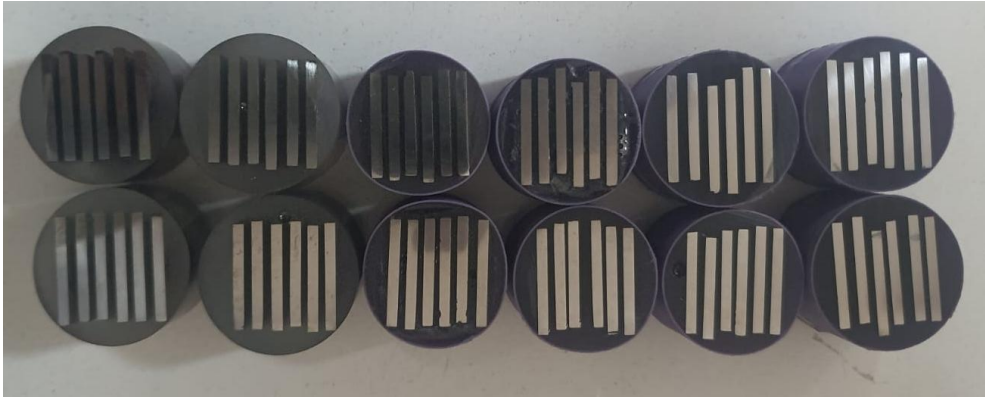
alınmıştır. Her ölçümde izin iki köşegen uzunluğu (D1 ve D2) belirlenmiş, köşegenlerin ortalaması alınarak ilgili sertlik değeri cihaz üzerinden okunmuştur. Her numunenin sertlik değeri, üç ölçüm sonucundan elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Cihazın ilgili köşegen uzunluklarını kullanarak sertlik değerini hesaplamasında kullanılan bağıntı Eşitlik 3.2’de verilmiştir.

$$HV = 0.1891 \times \left(\frac{F \times 9.81}{(d/1000)^2} \right) \quad (3.2)$$

Burada; F uygulanan yükü (kgf), d ise D1 ve D2 köşegen uzunluklarının ortalamasını mm cinsinden göstermektedir. Kullanılan bu ifade, Vickers sertlik bağıntısının yükün Newton cinsinden yazıldığı eşdeğer formudur. ASTM E92, Vickers sertlik deneylerinde uygulanan kuvvet aralığını, yüzey hazırlığı gerekliliğini ve ölçüm esaslarını tanımlamaktadır; bu çalışmada kullanılan yük değerleri de standardın kapsadığı kuvvet aralığı içinde yer almaktadır (ASTM International, 2023).

3.2.10. Metalografik numune hazırlama

Optik inceleme için seçilen numuneler bakalite alınarak hazırlanmıştır. Şekil 3.6’da görüldüğü gibi her set için dört adet bakalit kalıbı oluşturulmuş ve her bir bakalit içerisine 6 adet numune yerleştirilmiştir. Böylece birden fazla numunenin kesit yüzeyi aynı hazırlama süreci içerisinde birlikte incelenebilir hale getirilmiştir.



Şekil 3.6. Metalografik numune hazırlığı

Bakalite alınan numunelerin yüzey hazırlama işlemleri Struers LaboForce-50 cihazında gerçekleştirilmiştir. Yüzey hazırlama aşamasında sırasıyla 120, 240 ve 1200 kum zımpara kullanılmıştır. Her zımpara aşamasında numune yönü 90° değiştirilerek bir önceki aşamaya ait çiziklerin giderilmesi amaçlanmıştır. Bu işlem, numune yüzeyinin

optik inceleme için uygun düzlüğe ve yüzey kalitesine ulaştırılması amacıyla uygulanmıştır.

Metalografik yüzey hazırlamada taşlama ve parlatma basamakları, yüzeyde oluşan deformasyon tabakasının azaltılması ve incelemeye uygun yüzey kalitesinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Struers'in malzeme hazırlama kılavuzlarında da taşlama kademeleri arasında yön değiştirmenin, önceki aşamadan kalan çiziklerin kontrolü açısından önerildiği belirtilmektedir. Bu nedenle her aşamada 90° yön değişimi uygulanmıştır (Struers).

3.2.11. Optik yüzey/kesit incelemeleri

Hazırlanan numunelerin optik görüntüleri Olympus BX51M optik mikroskop kullanılarak elde edilmiştir. Numunelerde dağlama uygulanmadığından, bu aşama mikroyapı analizi yerine optik yüzey/kesit incelemesi olarak değerlendirilmiştir. Bu incelemelerde numune yüzeyinde ve kesit bölgelerinde gözlenen korozyon izleri, boya tabakasındaki bozulmalar, yüzey düzensizlikleri, tabaka süreksizlikleri ve hasar oluşumları değerlendirilmiştir. Elde edilen görüntülerde 100 µm ölçek çubuğu esas alınmıştır. Optik görüntüler, farklı deney koşullarına maruz bırakılan numunelerin görsel karşılaştırılmasında destekleyici veri olarak kullanılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Kütle Değişimi ve Korozyon Hızı Bulguları

Bu bölümde, boyasız ST37 ve ST52 çelik numunelerinin farklı koroziv ortamlarda maruziyet süresine bağlı kütle kaybı ve korozyon hızı değişimleri değerlendirilmiştir. Korozyon hızı hesabında numune yüzey alanı, maruziyet süresi ve çelik malzemenin yoğunluğu dikkate alınmıştır. Bazı ortamlarda (özellikle korozyonun sınırlı kaldığı alkali ortamlarda) numune yüzeyinde oluşan kararsız korozyon ürünlerinin (oksit/hidroksit tabakaları) ve çözelti kalıntılarının tamamen uzaklaştırılamamasına bağlı olarak miligram düzeyinde kütle artışları (negatif kütle değişimi) kaydedilmiştir. Bu durum korozyon hızı formülasyonunda negatif hız değerlerine yol açtığından, ilgili veriler korozyon hızı hesaplamalarında hesaba katılmamış ve korozyon hızı sifıra yakın/ihmal edilebilir kabul edilmiştir. Boyasız ST37 ve ST52 numunelerinde temizleme sonrası belirlenen ortalama kütle kaybı ve bu değerlerden hesaplanan ortalama korozyon hızı sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 incelendiğinde, boyasız numunelerde en yüksek kütle kaybı ve korozyon hızı değerlerinin HCl ortamında elde edildiği görülmektedir. ST37 numunelerinde 90 gün sonunda HCl ortamındaki kütle kaybı 0.8133 g iken, ST52 numunelerinde bu değer 1.0292 g’ye ulaşmıştır. NaCl ortamında kütle kaybı değerleri HCl’ye göre daha düşük kalmış, ancak maruziyet süresi arttıkça her iki çelik türünde de artış eğilimi göstermiştir. NaOH ortamında ise kütle kaybı ve korozyon hızı değerlerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4.1. Boyasız ST37 ve ST52 çeliklerinin HCl, NaCl ve NaOH ortamlarındaki ortalama kütle kaybı ve korozyon hızı değerleri

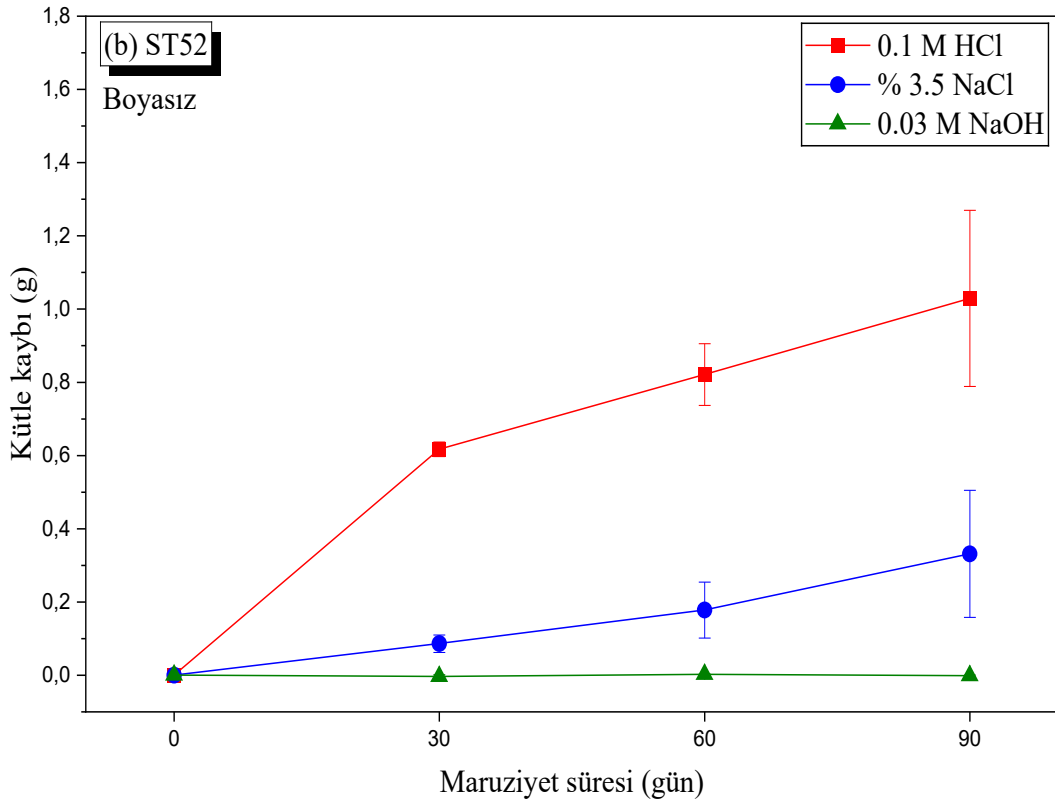
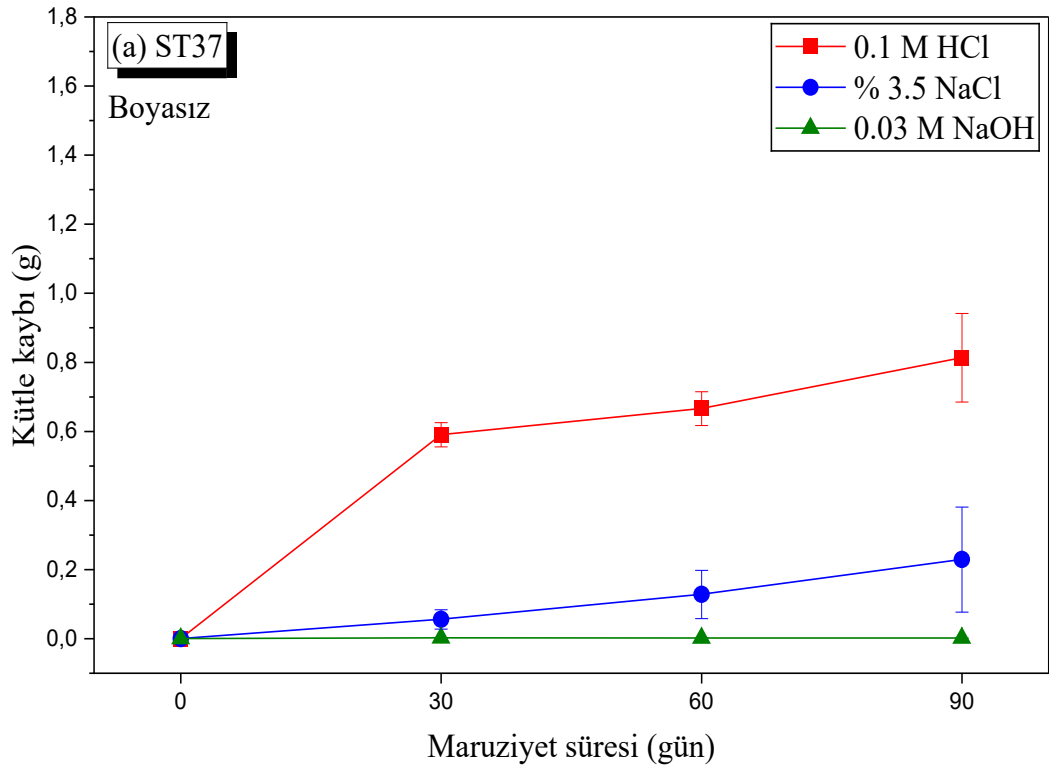
Çelik türü	Ortam	30 gün kütle kaybı (g)	30 gün korozyon hızı (mm/yıl)	60 gün kütle kaybı (g)	60 gün korozyon hızı (mm/yıl)	90 gün kütle kaybı (g)	90 gün korozyon hızı (mm/yıl)
ST37	0.1 M HCl	0.5901	0.11020	0.6662	0.06220	0.8133	0.05063
ST37	%3.5 NaCl	0.0558	0.01041	0.1280	0.01195	0.2292	0.01426
ST37	0.03 M NaOH	0.0020	0.00038	0.0015	0.00014	0.0015	0.00010
ST52	0.1 M HCl	0.6170	0.11522	0.8212	0.07667	1.0292	0.06406
ST52	%3.5 NaCl	0.0863	0.01612	0.1779	0.01661	0.3315	0.02063
ST52	0.03 M NaOH	-0.0037	0.00000	0.0019	0.00017	-0.0017	0.00000

Şekil 4.1 (a) ve (b)’de boyasız ST37 ve ST52 numunelerinin farklı koroziv ortamlarda 30, 60 ve 90 günlük maruziyet süreleri sonundaki kütle kaybı değişimleri

verilmiştir. Grafiklerden görüleceği üzere, her iki çelik türünde de kütle kaybı açısından en agresif ve aşındırıcı etki 0.1 M HCl asidik ortamında ortaya çıkmıştır. Asidik ortamdaki yüksek hidrojen iyonu (H^+) konsantrasyonu, katodik reaksiyonu (hidrojen gazı çıkışı) hızlandırarak anodik metal çözünmesini güçlü bir şekilde teşvik etmiş ve kütle kaybının zamanla neredeyse doğrusal bir şekilde artmasına neden olmuştur.

%3.5 NaCl ortamında kütle kaybı davranışı HCl'ye kıyasla daha sınırlı kalmakla birlikte maruziyet süresiyle birlikte düzenli bir artış eğilimi göstermiştir. Nötre yakın bu ortamda korozyon hızı çözünmüş oksijen difüzyonuna bağlıdır. Zamanla yüzeyde oluşan gevşek pas tabakası klorür (Cl^-) iyonlarının penetrasyonunu engelleyemediği için kütle kaybı artmaya devam etmiştir. Buna karşın, 0.03 M NaOH alkali ortamında ise her iki çelik türünde de kütle kaybı tüm sürelerde ihmal edilebilir (sıfıra yakın) düzeyde gerçekleşmiştir. Bu durum, yüksek pH koşullarında çelik yüzeyinde başlıca Fe_3O_4 ile Fe(III) oksit ve oksihidroksitlerinden oluşan yoğun ve koruyucu bir pasif filmin meydana gelmesi ve bu filmin metal ile korozyon ortam arasındaki yük ve madde transferini önemli ölçüde sınırlandırmasıyla açıklanmaktadır (Valcarce ve Vázquez, 2008; Freire ve ark., 2009).

Grafiklerde yer alan hata çubukları deneysel tekrarların standart sapmasını göstermektedir. Dikkat edileceği üzere özellikle maruziyet süresinin artmasıyla (90. günde) asidik ve tuzlu ortamlarda lokal korozyon ürünlerinin heterojen dağılımına (lokal paslanma ve çukurcuklar oluştuğu için) bağlı olarak standart sapma değerlerinde hafif bir açılma kaydedilmiştir. Ancak genel olarak düşük sapma değerleri deneysel verilerin tekrarlanabilirliğini ve güvenilirliğini doğrulamaktadır.

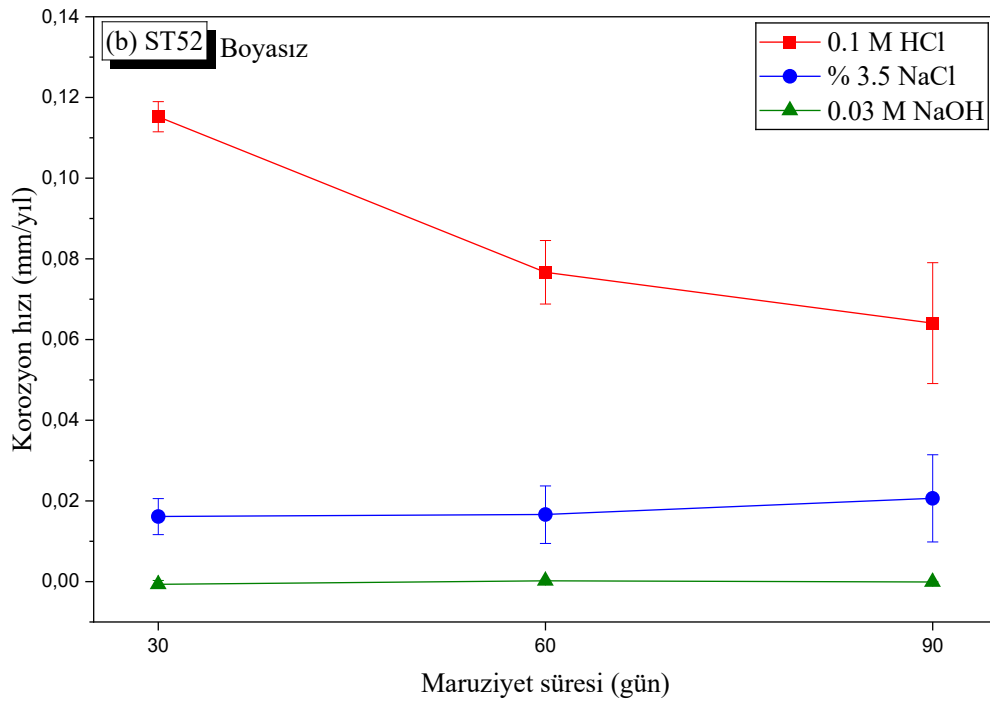
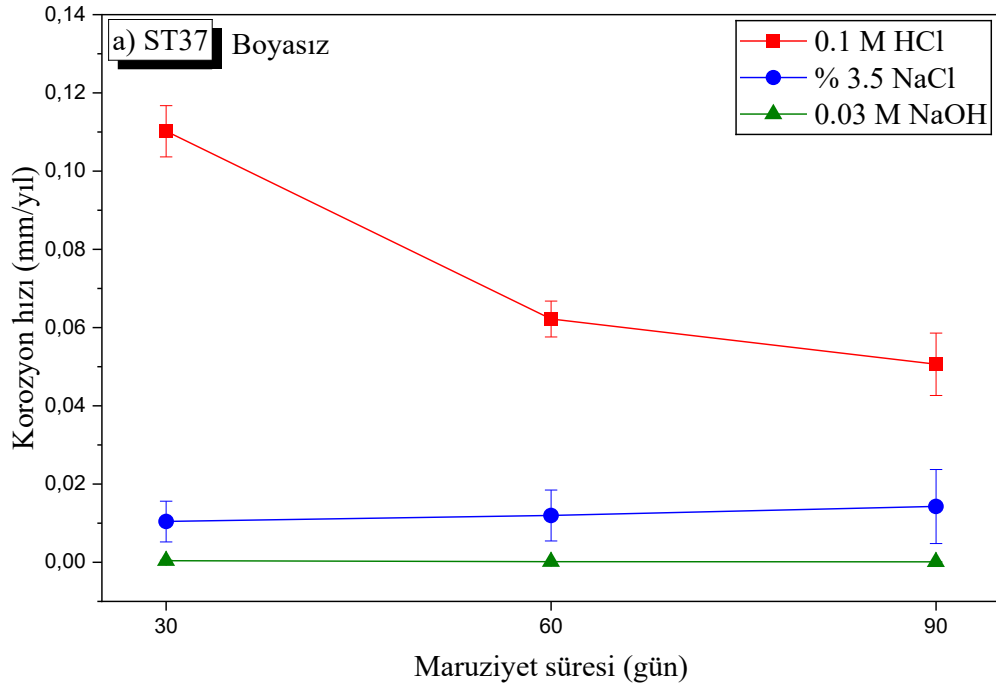


Şekil 4.1. Boyasız ST37 ve ST52 numunelerinde HCl, NaCl ve NaOH ortamlarında maruziyet süresine bağlı ortalama kütle kaybı değişimi: (a) ST37, (b) ST52

Şekil 4.2 (a) ve (b)'de verilen birim zamandaki korozyon hızı (mm/yıl) değerleri incelendiğinde; 0.1 M HCl ortamında her iki çelik türünde de en yüksek hızların 30 günlük maruziyet sonunda elde edildiği görülmektedir. ST37 numunelerinde HCl ortamındaki korozyon hızı 30 gün sonunda 0.11020 mm/yıl iken, 60 gün sonunda 0.06220 mm/yıl ve 90 gün sonunda 0.05063 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. ST52 numunelerinde ise aynı ortamda korozyon hızı 30 gün sonunda 0.11522 mm/yıl, 60 gün sonunda 0.07667 mm/yıl ve 90 gün sonunda 0.06406 mm/yıl olarak belirlenmiştir. Toplam kütle kaybının süreyle artmasına rağmen yıllıklandırılmış korozyon hızının HCl ortamında zamanla azalması, metal çözünmesinin özellikle ilk maruziyet döneminde daha hızlı gerçekleştiğini göstermektedir (Jafar ve ark., 2022). Bu kinetik yavaşlama, asidik ortamda zamanla numune yüzeyinde biriken korozyon ürünlerinin (gevşek pas tabakası) korozif iyonların metal matrisine doğru olan difüzyonunu zorlaştıran kısmi bir kütle transferi bariyeri oluşturması ile açıklanmaktadır (Fontana, 1986; Bardal, 2004)

%3.5 NaCl ortamında korozyon hızı değerleri HCl ortamına göre oldukça düşük olmakla birlikte, maruziyet süresiyle birlikte hafif bir artış eğilimi göstermiştir. ST37 numunelerinde NaCl ortamındaki korozyon hızı 30 gün sonunda 0.01041 mm/yıl iken, 90 gün sonunda 0.01426 mm/yıl değerine yükselmiştir. ST52 numunelerinde ise aynı ortamda 30 gün sonunda 0.01612 mm/yıl olan korozyon hızı, 90 gün sonunda 0.02063 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Süre uzadıkça klorür (Cl^-) iyonlarının penetrasyon yeteneği ve oluşan pas tabakasının altında meydana gelen lokal oksijen konsantrasyonu farkı (derişim hücresi), korozyon hızının zamana bağlı olarak aktif kalmasını veya hafifçe yükselmesini tetiklemiştir. 0.03 M NaOH alkali ortamında ise korozyon hızı değerleri her iki çelik türünde de tüm sürelerde sifıra yakın seyrederek bazik ortamın korozyonu kısıtlayıcı rolünü desteklemiştir.

Çelik türleri (ST37 ve ST52) birbiriyle kıyaslandığında; özellikle asidik ortamda ST52 çeliğinin hem nihai kütle kaybının hem de korozyon hızının ST37'ye kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Metalurjik olarak daha yüksek mukavemetli bir yapı çeliği olan ST52, mikroyapısında ST37'ye göre daha fazla perlit fazı barındırmaktadır. Perlitik yapıdaki ferrit ve sementit (Fe_3C) lamelleri, asidik ortamlarda mikroskobik boyutta çok sayıda anodik/katodik lokal galvanik hücre oluşturarak demir çözünme hızını artırmıştır. Dolayısıyla ST52'nin asidik ortama karşı daha hassas bir karakter sergilemesine yol açmıştır. Bu durum, alaşım elementleri ve mikroyapısal faz dağılımının korozyon kinetiği üzerindeki doğrudan etkisini ortaya koymaktadır (Callister Jr ve Rethwisch, 2020).



Şekil 4.2. Boyasız ST37 ve ST52 numunelerinde HCl, NaCl ve NaOH ortamlarında maruziyet süresine bağlı ortalama korozyon hızı değişimi: (a) ST37, (b) ST52

Elde edilen bu bulgular, ortam kimyasının ve pH değerinin karbon çeliklerinin kütle kaybı ile korozyon kinetiği üzerinde birincil derecede belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. HCl ortamında yüksek kütle kaybı ve korozyon hızı değerlerinin elde edilmesi, asidik çözeltinin çelik yüzeyindeki doğal oksit/hidroksit tabakasını hızla

  zerek metal-elektrolit temasını doğrudan artırmasıyla ilişkilidir (Gassama ve ark., 2015). Bu  alışmada HCl ortamında toplam kütle kaybı maruziyet süresiyle artarken yıllıklandırılmış korozyon hızının özellikle ilk 30 günlük dönemde pik yapıp ardından yavaşlaması korozyonun başlangıç aşamasında çok daha agresif ilerlediğini doğrulamaktadır. Literatürde, karbon  eliklerinin HCl ortamındaki uzun süreli maruziyetlerinde kütle kaybının süreyle arttığı, korozyon hızının ise yüzeyde biriken korozyon ürünlerinin difüzyon bariyeri etkisiyle ilerleyen dönemlerde azalma eğilimine girdiği bildirilmektedir (Mohammed ve ark., 2023). Benzer şekilde; HCl, NaOH ve NaCl   zeltilerinin karşılaştırıldığı daldırma testlerinde de en yüksek korozyon reaksiyon hızlarının asidik ortamlarda elde edildiği rapor edilmiştir (Harmi Tjahjanti ve ark., 2020). NaCl ortamında gözlenen daha sınırlı fakat maruziyet süresine bağlı olarak sürekli artış gösteren korozyon davranışı ise, klorür (Cl^-) iyonlarının pas tabakası altına penetre olarak lokal anodik çözünme süreçlerini sürekli beslemesiyle açıklanmaktadır (Guo ve ark., 2018). Buna karşılık NaOH ortamında kütle değişimi ve korozyon hızının ihmal edilebilir düzeyde kalması, bu alkali deney koşullarında  elik yüzeyinde kararlı bir pasif filmin oluştuğunu ve bazik ortamın ST37 ve ST52  elikleri üzerinde HCl ve NaCl gibi korozif ortamlara kıyasla yüksek bir koruyuculuk sağladığını ispatlamaktadır (Freire ve ark., 2009; Muresan ve ark., 2025).

4.2. Koruyucu Boya Uygulamasının Korozyon Davranışına Etkisi

Koruyucu boya uygulamasının korozyon davranışı üzerindeki etkisi, 90 gün sonunda boyalı ve boyasız numunelerde elde edilen ortalama kütle değişimi ve korozyon hızı değerleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede, aynı çelik türü ve aynı korozif ortam koşullarında boyalı ve boyasız yüzeylerin gösterdiği farklılıklar dikkate alınmıştır. Deneyler sonucunda bazı boyalı numunelerde kaydedilen negatif kütle değişimi durumları bir metal kazanımı olarak yorumlanmamış; deney sonrasındaki temizleme, kurutma prosesleri ile yüzeyde kalması muhtemel mikroskobik boya kaplama kalıntıları ve sökülemeyen korozyon ürünlerinin heterojen yapısından kaynaklanan deneysel kütle dalgalanmaları olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 4.2 incelendiğinde, 90 günlük maruziyet sonunda koruyucu boya uygulamasının özellikle HCl ve NaCl ortamlarında kütle kaybı ve korozyon hızı değerlerini belirgin biçimde azalttığı görülmektedir. HCl asidik ortamında boyasız ST37 numunelerinde 0.8133 g kütle kaybı ve 0.05063 mm/yıl korozyon hızı belirlenirken boyalı ST37 numunelerinde kütle değişimi-0.0558 g olarak ölçülmüş ve korozyon hızı

teknik olarak 0 kabul edilmiştir. Benzer şekilde ST52 numunelerinde HCl ortamında boyasız durumda 1.0292 g kütle kaybı ve 0.06406 mm/yıl korozyon hızı elde edilirken boyalı numunelerde kütle değişimi -0.0373 g olarak belirlenmiş ve korozyon hızı yine 0 olarak değerlendirilmiştir. Boya tabakasının bu performansı, asidik çözeltideki korozif iyonların (H^+ ve Cl^-) metal matrisine ulaşmasını engelleyen yüksek hidrofobik bariyer etkisi göstermesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir (Sørensen ve ark., 2009).

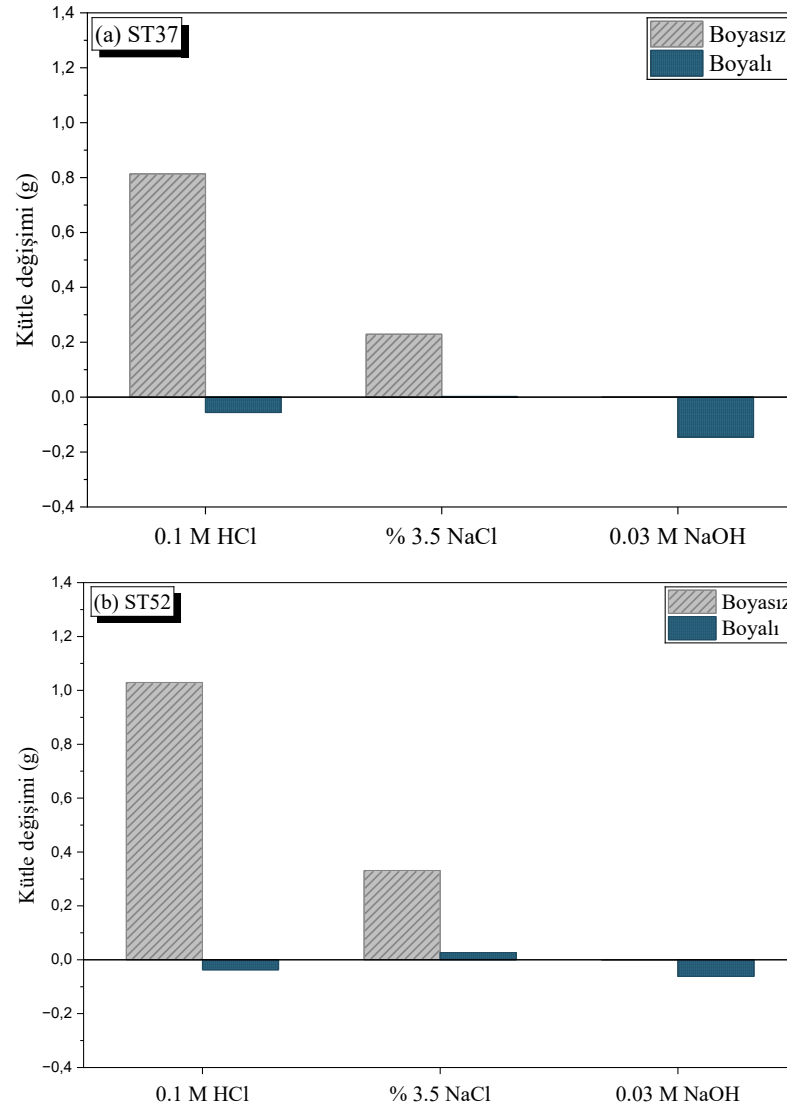
Tablo 4.2. 90 gün sonunda boyalı ve boyasız ST37/ST52 numunelerinde ortalama kütle değişimi ve korozyon hızı değerleri

Çelik türü	Ortam	Boyasız kütle değişimi (g)	Boyalı kütle değişimi (g)	Boyasız korozyon hızı (mm/yıl)	Boyalı korozyon hızı (mm/yıl)
ST37	0.1 M HCl	0.8133	-0.0558	0.05063	0.00000
ST37	%3.5 NaCl	0.2292	0.0026	0.01426	0.00016
ST37	0.03 M NaOH	0.0015	-0.1461	0.00010	0.00000
ST52	0.1 M HCl	1.0292	-0.0373	0.06406	0.00000
ST52	%3.5 NaCl	0.3315	0.0267	0.02063	0.00170
ST52	0.03 M NaOH	-0.0017	-0.0618	0.00000	0.00000

NaCl ortamında da boya uygulamasının koruyucu etkisi belirgin olmakla birlikte, HCl ortamından farklı olarak boyalı numunelerde düşük düzeyde korozyon hızı hesaplanmıştır. ST37 numunelerinde NaCl ortamında boyasız durumda 0.2292 g kütle kaybı ve 0.01426 mm/yıl korozyon hızı elde edilirken, boyalı numunede kütle değişimi 0.0026 g ve korozyon hızı 0.00016 mm/yıl olarak belirlenmiştir. ST52 numunelerinde ise NaCl ortamında boyasız durumda 0.3315 g kütle kaybı ve 0.02063 mm/yıl korozyon hızı hesaplanırken, boyalı durumda bu değerler sırasıyla 0.0267 g ve 0.00170 mm/yıl olarak elde edilmiştir. Nötre yakın tuzlu su ortamında korozyonun tamamen sıfırlanamaması, klorür (Cl^-) iyonlarının çok küçük iyonik yarıçapa ve yüksek penetrasyon yeteneğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Zamanla boya kaplamadaki mikroskobik gözeneklerden veya kusurlardan sızan klorür iyonları, boya-metal arayüzeyinde lokalize anodik çözünme bölgeleri (alt kaplama korozyonu) başlatmaktadır (Amirudin ve Thieny, 1995). NaOH alkali ortamında ise hem boyalı hem de boyasız numunelerde korozyon hızının oldukça düşük düzeyde kalması, bazik ortamın çelik yüzeyinde oluşturduğu doğal pasivasyon tabakasının mukavemetini ve boya kaplamanın alkali kararlılığını doğrulamaktadır.

Şekil 4.3 incelendiğinde, boya uygulamasının 90 gün sonunda kütle değişimi üzerinde belirgin bir azaltıcı etki oluşturduğu görülmektedir. Boyasız numunelerde özellikle HCl ve NaCl ortamlarında pozitif kütle kaybı değerleri elde edilirken, boyalı

serilerde bu değerlerin neredeyse eksen çizgisi seviyesine indirgendiği görülmektedir. Asidik ortamda boyalı numunelerin temizleme sonrası hafif negatif bölgede kalması, polimerik yapının asidik ortamda gösterdiği kararlı duruşu ve metal yüzeyini doğrudan proton (H^+) saldırısından tamamen izole ettiğini düşündürmektedir. NaCl ortamında ise boyalı numunelerin çok küçük de olsa pozitif kütle kaybı yönünde eğilim göstermesi, klorür iyonlarının zamanla boya tabakasının difüzyon direncini zorladığını ve sistemde çok sınırlı bir elektrokimyasal aktivite başlattığını grafiksel olarak ortaya koymaktadır.



Şekil 4.3. ST37 ve ST52 çeliklerinde 90 gün sonunda boyalı ve boyasız numunelerin HCl, NaCl ve NaOH ortamlarındaki kütle değişimi karşılaştırmaları: (a) ST37, (b) ST52

Bu bulgular, kaplama uygulamalarının temel koruma mekanizmasının bariyer etkisiyle ilişkili olduğunu göstermektedir. Polimerik boya tabakası, korozyon elektrolit bileşenlerinin metal arayüzeyi ile doğrudan temasını fiziksel olarak kısıtlayarak, özellikle reaksiyon kinetiğinin yüksek olduğu HCl ve NaCl ortamlarında kütle kaybını ve

korozyon hızını önemli ölçüde azaltmıştır. Bununla birlikte, NaCl ortamında boyalı numunelerde düşük düzeyde de olsa korozyon görülmesi, kaplama tabakasının koruyucu etki sağladığını ancak her koşulda tam bir izolasyon oluşturmadığını göstermektedir. Kapsama tabakasındaki yerel süreksizlikler, yüzeye tutunma farklılıkları veya maruziyet süresine bağlı kaplama altı değişimler, özellikle klorürlü ortamlarda sınırlı düzeyde korozyon davranışının devam etmesine neden olabilir. Literatürde de organik kaplamaların ve epoksi esaslı sistemlerin çelik yüzeylerde koroziyon türlerin metal yüzeyine ulaşmasını geciktirdiği; ancak kaplama hasarı, çizik veya yerel kusurların bulunduğu durumlarda lokal korozyonun geliştiği bildirilmektedir (Selvaraj ve Bhuvaneshwari, 2009; Bigdeli ve ark., 2021; Yadav ve ark., 2022).

4.3. Çözeltilerin pH Değişimleri

Koroziyon çözeltilerin pH değerleri deney başlangıcında ve 30, 60 ve 90 günlük bekletme sürelerinin sonunda ölçülmüştür. pH değişimleri, numuneler ile çözelti ortamı arasındaki kimyasal etkileşimlerin izlenebilmesi ve korozyon sürecinde ortam karakterinin nasıl değiştiğinin değerlendirilebilmesi amacıyla incelenmiştir.

Tablo 4.3 incelendiğinde, her üç çözeltide de deney süresince başlangıç pH değerlerine göre belirgin değişimler meydana geldiği görülmektedir. HCl çözeltisinin başlangıç pH değeri 1.00 iken, 30 gün sonunda 4.07 değerine yükselmiştir. Bu durum, asidik ortamdaki korozyon sürecinde baskın olan katodik reaksiyon neticesinde hidrojen iyonlarının harcanması ($2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$) ve gaz çıkışı ile açıklanmaktadır. Maruziyet süresinin devamında, 60 ve 90 gün sonunda pH değerlerinin sırasıyla 3.60 ve 3.23 seviyelerine hafifçe geri çekilmesi ise çözeltide biriken demir iyonlarının (Fe^{2+}/Fe^{3+}) su molekülleriyle asidik karakterli hidroliz reaksiyonlarına girmesinden ve sistemin kimyasal bir dengeye ulaşmasından kaynaklanmaktadır.

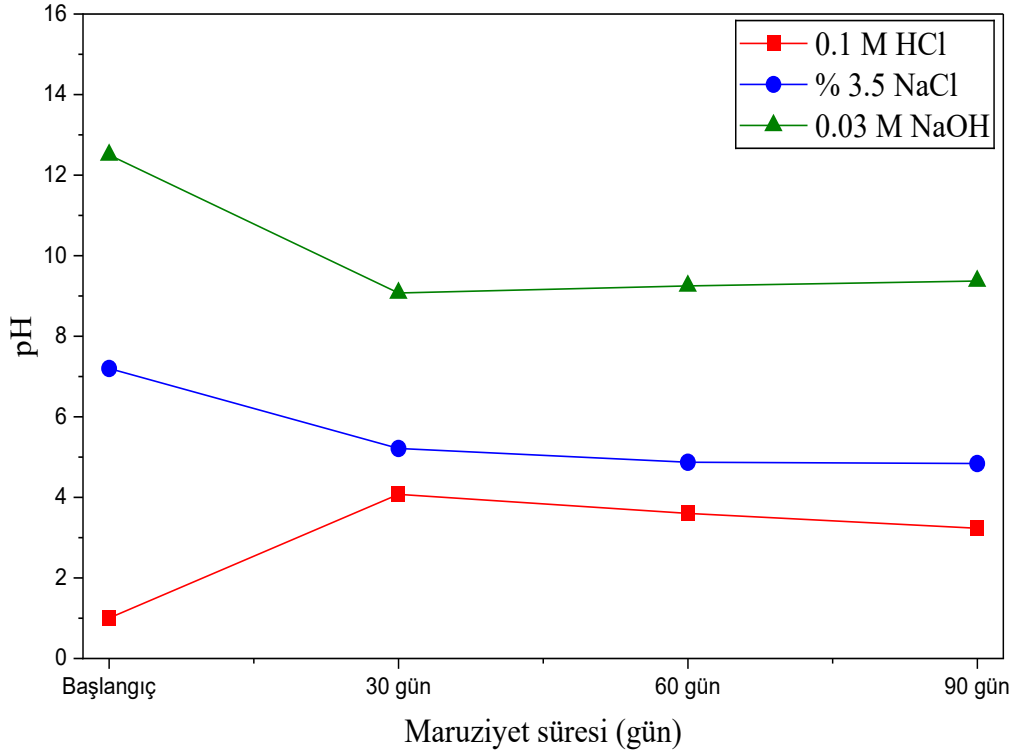
Tablo 4.3. Deney süresince HCl, NaCl ve NaOH çözeltilerinin pH değerlerinde meydana gelen değişimler

Çözelti ortamı	Başlangıç pH	30 gün pH	60 gün pH	90 gün pH
0.1 M HCl	1.00	4.07	3.60	3.23
%3.5 NaCl	7.20	5.21	4.87	4.84
0.03 M NaOH	12.50	9.07	9.25	9.37

%3.5 NaCl çözeltisinde başlangıç pH değeri 7.20 iken, 30 gün sonunda 5.21'e, 60 gün sonunda 4.87'ye ve 90 gün sonunda 4.84'e gerilemiştir. Nötr karakterdeki bu çözeltinin zamanla asidik bölgeye kayması, korozyon sürecinde anodik bölgelerde yoğunlaşan demir (Fe^{2+}) iyonlarının su molekülleriyle asidik karakterli hidroliz reaksiyonuna girmesi ($Fe^{2+} + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2H^+$) ve ortama serbest H^+ iyonu salmasıyla açıklanmaktadır.

0.03 M NaOH alkali çözeltisinde ise başlangıç pH değeri 12.50 iken 30 gün sonunda 9.07'ye düşüş göstermiş; 60 ve 90 gün sonunda sırasıyla 9.25 ve 9.37 seviyelerinde kararlı hale gelmiştir. Başlangıçtaki yüksek alkalinitenin bu şekilde azalması, atmosfere açık korozyon hücrelerinde havada bulunan karbondioksit (CO_2) gazının alkali çözelti tarafından absorbe edilmesi ve ortamdaki hidroksil (OH^-) iyonlarının karbonatlaşma reaksiyonu ile ($CO_2 + 2OH^- \rightarrow CO_3^{2-} + H_2O$) tüketilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu düşüşe rağmen, çözeltinin pH değerinin 9 mertebesinde dengelenmesi, ST37 ve ST52 çeliklerinin yüzeyinde koruyucu pasivasyon filmlerinin kararlılığını koruduğunu ve korozyon hızının neden bu ortamda ihmal edilebilir düzeyde kaldığını doğrulamaktadır.

Şekil 4.4, çözeltilerin pH değişim eğilimlerini görsel olarak ortaya koymaktadır. Özellikle ilk 30 gündeki keskin kinetik değişimler (HCl'deki artış, NaCl ve NaOH'taki düşüş), malzeme ile agresif ortamlar arasındaki primer elektrokimyasal reaksiyonların bu dönemde yoğunlaştığını kanıtlamaktadır. Sonraki süreçte (60 ve 90. günlerde) eğrilerin yatay bir platoya ulaşarak kararlı seyretmesi ise ortam kimyasının dengeye ulaştığının göstergesidir. Bu sonuçlar, kütle kaybı ve korozyon hızı bulgularıyla birlikte değerlendirildiğinde, çözeltinin pH değişiminin korozyon sürecini destekleyici ve doğrulayıcı bir parametre olarak kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.4. HCl, NaCl ve NaOH çözeltilerinde deney süresince pH değerlerinde meydana gelen değişim

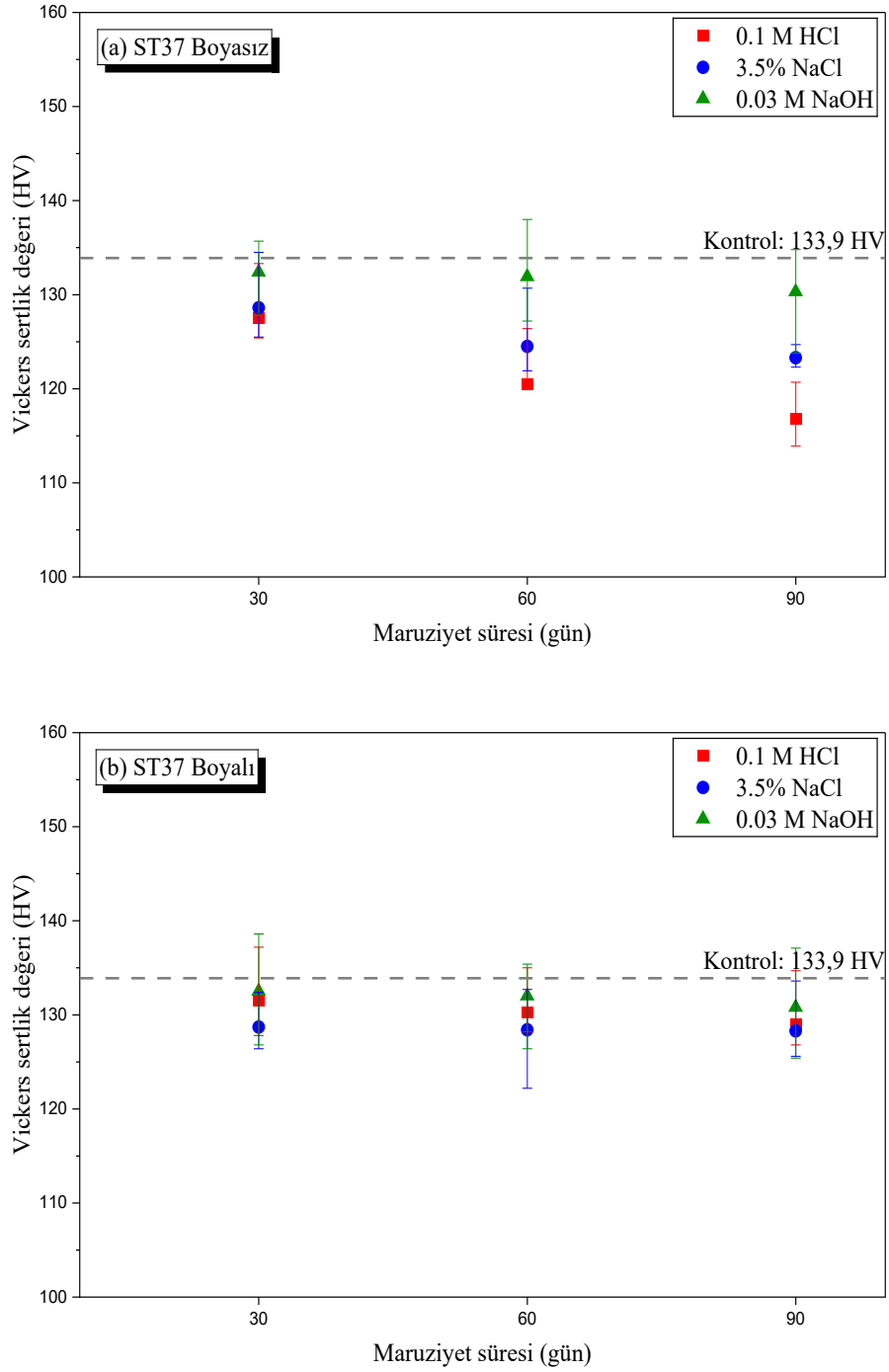
Literatürde, çeliklerin korozyon davranışında çözelti pH değerinin önemli bir belirleyici olduğu, düşük pH değerlerinde metal çözünmesinin hızlanabildiği ve klorürlü ortamlarda yüzey reaksiyonlarının lokal korozyon süreçlerini destekleyebildiği bildirilmektedir (Revie, 2008; Buruiană ve ark., 2024; Muresan ve ark., 2025). Bu çalışmada HCl ortamında başlangıçtaki düşük pH değerine rağmen zamanla meydana gelen pH yükselmesi ve NaCl ortamında pH değerinin hafif asidik değerlere doğru kayması, numune-çözelti etkileşiminin deney süresince devam ettiğini göstermektedir. NaOH ortamındaki pH düşüşüne rağmen kütle kaybı ve korozyon hızı değerlerinin düşük düzeyde kalması ise bazik ortamın bu deney koşullarında daha sınırlı bir korozyon etkisi oluşturduğunu desteklemektedir (Freire ve ark., 2009; Harmi Tjahjanti ve ark., 2020).

4.4. Sertlik Bulguları

Bu çalışmada, ST37 ve ST52 çeliklerine ait kontrol numuneleri ile farklı korozyon ortamlarda 30, 60 ve 90 gün süreyle bekletilen boyalı ve boyasız numunelerin Vickers sertlik değerleri karşılaştırılmıştır. Sertlik ölçümleri, korozyon kinetiğinin ve buna bağlı değişen yüzey morfolojisinin malzeme yüzey katmanındaki mekanik davranış üzerindeki etkilerini tayin etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.5(a) incelendiğinde, ST37 çeliği kontrol numunesinin ortalama sertlik değerinin 133.9 HV olduğu görülmektedir. Boyasız numunelerde maruziyet süresinin artmasına paralel olarak tüm korozi ortamlarda sertlik değerlerinin kademeli biçimde azaldığı belirlenmiştir. Bu azalma özellikle HCl ortamında daha belirgin gerçekleşmiş ve sertlik değeri 90 günlük maruziyet sonunda 116.8 HV seviyesine gerilemiştir. NaCl ortamında da maruziyet süresine bağlı düzenli bir azalma gözlenmiş ve 90. gün sonunda 123.3 HV değeri elde edilmiştir. HCl ortamındaki daha yüksek sertlik kaybının, asidik çözünmenin metal yüzeyinde meydana getirdiği yaygın yüzey dejenerasyonu ve artan yüzey pürüzlülüğüyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. NaCl ortamındaki düşüş ise klorür iyonlarının etkisiyle gelişen yerel çözünme, çukurcuklaşma ve düzensiz korozyon ürünlerinin yüzey morfolojisinde oluşturduğu bozulmalarla açıklanabilir. Buna karşın, NaOH ortamındaki sertlik değerleri kontrol numunesine daha yakın seyretmiş ve 90. gün sonunda 130.3 HV olarak ölçülmüştür. Bu daha sınırlı değişimin, bazik ortamda çelik yüzeyinde oluşan ve ileri düzey çözünmeyi sınırlandıran koruyucu yüzey tabakasının etkisiyle ilişkili olduğu değerlendirilmektedir.

Şekil 4.5(b)'de yer alan Boyalı ST37 numunelerinin sertlik değişimleri incelendiğinde, tüm korozi ortamlarda maruziyet süresine bağlı olarak sınırlı ve kademeli bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Boya tabakası, özellikle HCl ve NaCl ortamlarında metal yüzeyi ile korozi çözelti arasındaki doğrudan teması sınırlandırarak sertlik kaybının boyasız numunelere göre daha düşük düzeyde kalmasını sağlamıştır. Nitekim 90 günlük maruziyet sonunda HCl ortamındaki boyalı numunenin sertlik değeri 129.0 HV olarak belirlenirken, aynı ortamdaki boyasız numunede bu değer 116.8 HV'ye kadar gerilemiştir. Benzer şekilde NaCl ortamında boyalı numunenin sertlik değeri 128.3 HV, boyasız numunenin sertlik değeri ise 123.3 HV olarak ölçülmüştür. NaOH ortamında boyalı numunenin sertlik değeri 90. gün sonunda 130.8 HV olarak kaydedilmiş ve boyasız numunenin 130.3 HV düzeyindeki değeriyle oldukça yakın bir seyir göstermiştir. Bu sonuçlar, boya uygulamasının asidik ve klorürlü ortamlarda sertlik kaybını belirgin biçimde sınırlandırdığını, bazik ortamda ise boyasız çeliğin hâlihazırda sergilediği yüksek kararlılık nedeniyle kaplamanın sağladığı ilave koruma avantajının daha sınırlı kaldığını göstermektedir.

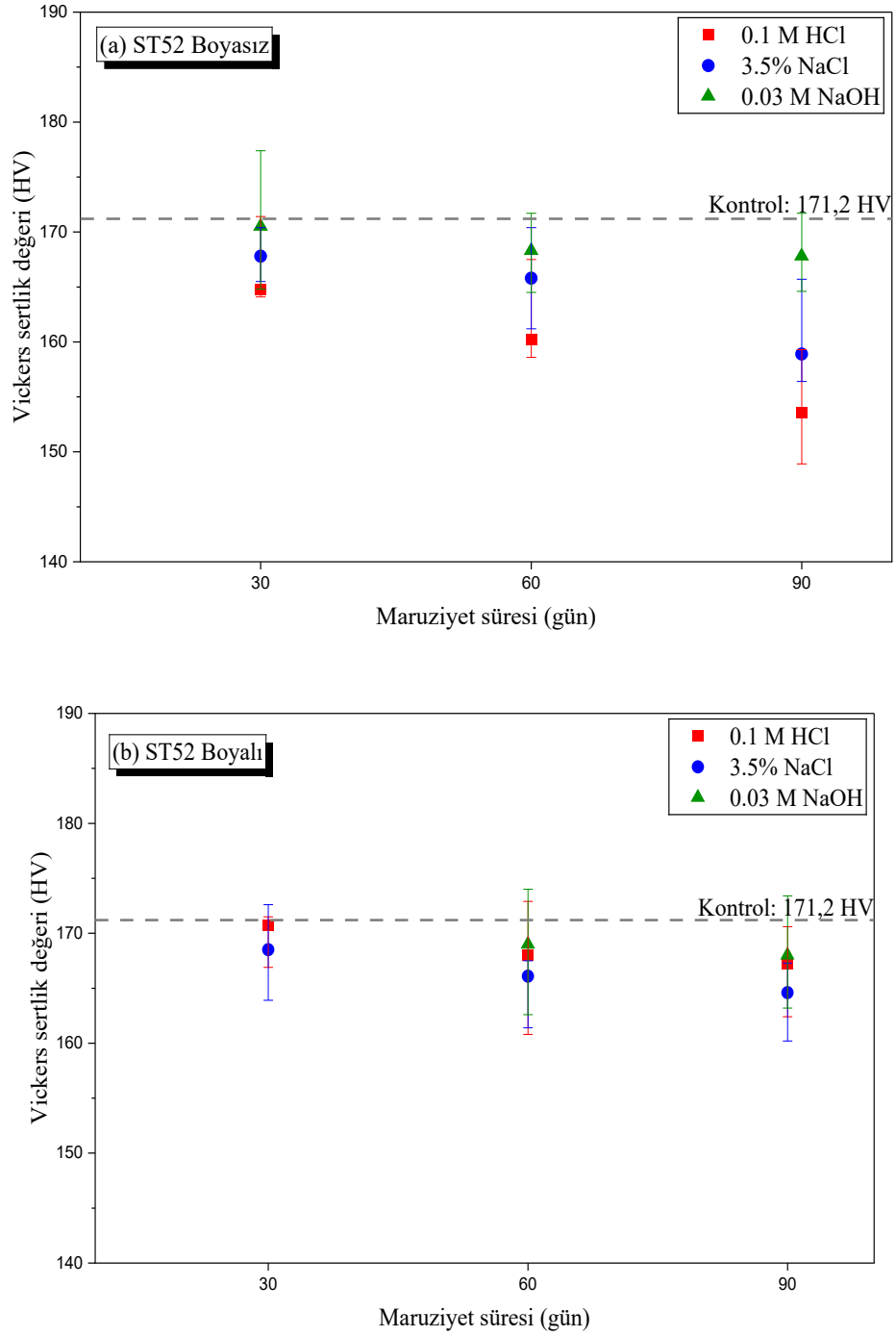


Şekil 4.5. ST37 çeliğinde farklı korozif ortamlar ve yüzey koşullarına göre Vickers sertlik değerlerinin maruziyet süresine bağlı değişimi: (a) boyasız, (b) boyalı

Şekil 4.6 (a) incelendiğinde, ST52 çeliği kontrol numunesinin ortalama sertlik değerinin 171.2 HV olduğu görülmektedir. Boyasız ST52 numunelerinde maruziyet süresinin artmasına bağlı olarak tüm korozif ortamlarda sertlik değerlerinin kademeli biçimde azaldığı belirlenmiştir. En belirgin sertlik kaybı HCl ortamında gerçekleşmiş ve sertlik değeri 90 günlük maruziyet sonunda 153.6 HV seviyesine gerilemiştir. Asidik ortamda gözlenen bu düşüşün, yüksek hidrojen iyonu aktivitesinin metal yüzeyinde

oluşturduğu yaygın çözünme, yüzey düzensizlikleri ve artan pürüzlülükle ilişkili olduğu düşünülmektedir. NaCl ortamında da maruziyet süresine bağlı düzenli bir azalma gözlenmiş ve sertlik değeri 90. gün sonunda 158.9 HV olarak ölçülmüştür. Bu değişim, klorür iyonlarının etkisiyle gelişen yerel çözünmeler, çukurcuklaşma ve düzensiz korozyon ürünlerinin yüzey morfolojisini bozmasıyla açıklanabilir. Buna karşın, NaOH ortamındaki numuneler kontrol değerine daha yakın bir seyir göstermiş ve 90. gün sonunda 167.8 HV değerini korumuştur. Bazik ortamda meydana gelen daha sınırlı sertlik kaybının, çelik yüzeyinde oluşan ve ileri düzey çözünmeyi sınırlandıran koruyucu yüzey tabakasının etkisiyle ilişkili olduğu değerlendirilmektedir.

Boyalı ST52 numunelerinin sertlik değişimleri Şekil 4.6(b)'de incelendiğinde, tüm koroziv ortamlarda maruziyet süresinin artmasıyla birlikte sınırlı ve kademeli bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Boya tabakası, metal yüzeyi ile koroziv çözelti arasındaki doğrudan teması sınırlandırarak özellikle HCl ve NaCl ortamlarında boyasız numunelere kıyasla daha yüksek sertlik değerlerinin korunmasını sağlamıştır. HCl ortamındaki boyalı numunenin sertlik değeri 90 günlük maruziyet sonunda 167.2 HV olarak belirlenirken aynı ortamdaki boyasız numunede bu değer 153.6 HV'ye kadar gerilemiştir. NaCl ortamında boyalı numunenin sertliği 90. gün sonunda 164.6 HV olarak ölçülmüş ve boyasız numunenin 158.9 HV değerinin üzerinde kalmıştır. NaOH ortamında ise boyalı numune 168.0 HV, boyasız numune 167.8 HV sertlik değeri göstermiştir. Bu yakınlık, bazik ortamda çelik yüzeyinin hâlihazırda sergilediği yüksek kararlılık nedeniyle boya kaplamanın sağladığı ilave koruma katkısının sınırlı kaldığını göstermektedir. Genel olarak sonuçlar, boya uygulamasının ST52 çeliğinde özellikle asidik ve klorürlü ortamlara bağlı sertlik kaybını sınırlandırdığını ancak koruyucu etkinliğin ortam karakterine göre değiştiğini ortaya koymaktadır.



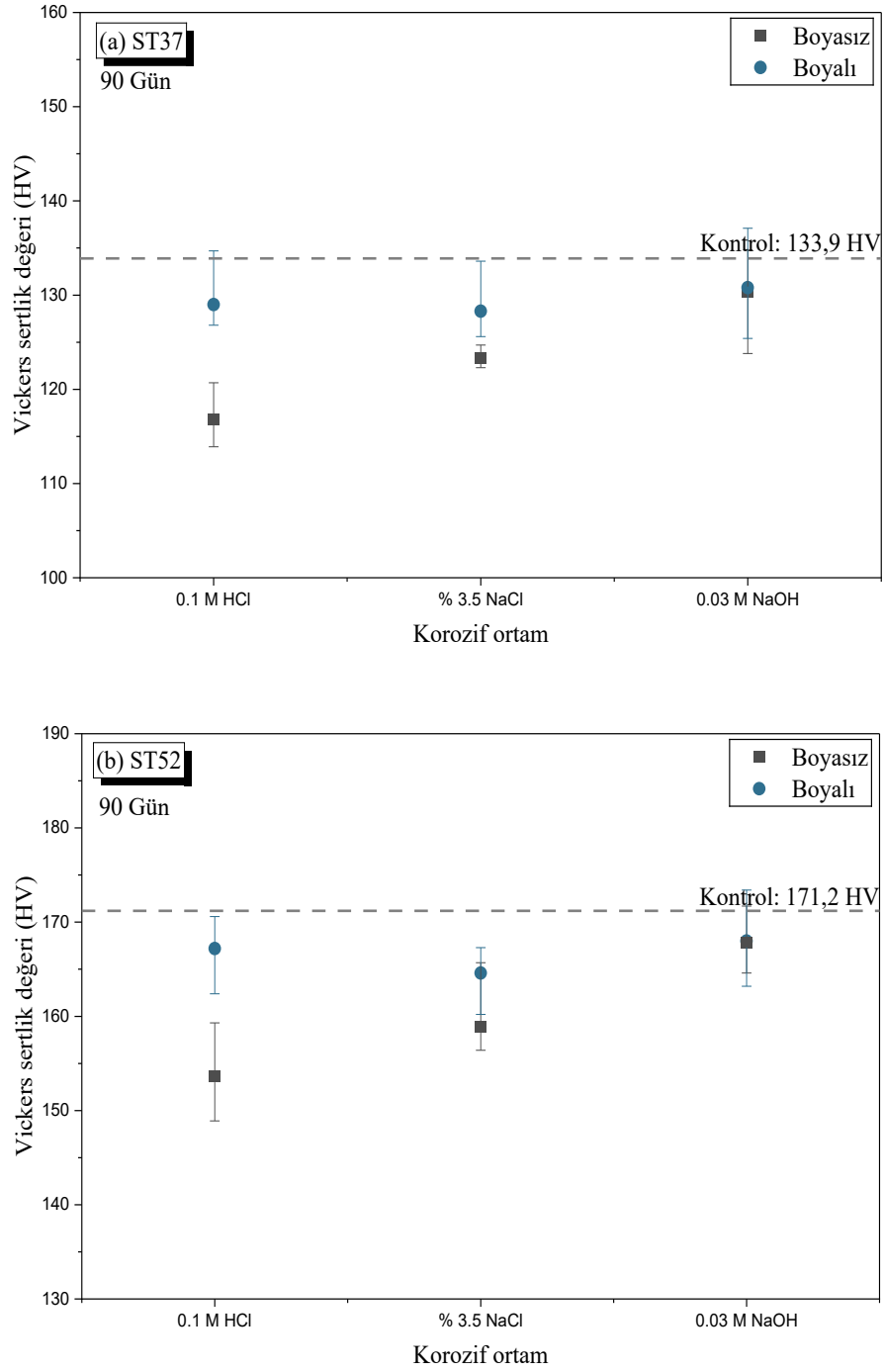
Şekil 4.6. ST52 çeliğinde farklı korozif ortamlar ve yüzey koşullarına göre Vickers sertlik değerlerinin maruziyet süresine bağlı değişimi: (a) boyasız, (b) boyalı

Şekil 4.7’de, 90 günlük maruziyet periyodu sonunda ST37 ve ST52 çeliklerinin boyalı ve boyasız numunelerine ait sertlik değerleri toplu olarak karşılaştırılmıştır. Grafik genel olarak incelendiğinde, her iki çelik türünde de korozif ortamlara maruz bırakılan tüm numunelerin sertlik değerlerinin kontrol seviyelerinin altında kaldığı görülmektedir. Bununla birlikte sertlik kaybının düzeyi çelik türüne, korozif ortamın karakterine ve boya uygulamasına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Her iki çelikte de en düşük sertlik

değerleri HCl ortamındaki boyasız numunelerde kaydedilirken, NaOH ortamındaki numunelerin kontrol değerlerine daha yakın bir seyir gösterdiği belirlenmiştir.

Boyalı ve boyasız numuneler dikey ekseninde karşılaştırıldığında, boya uygulamasının özellikle HCl ve NaCl ortamlarında sertlik kaybını sınırladığı açıkça görülmektedir. Boyalı ve boyasız numuneler arasındaki sertlik farkının en belirgin olduğu ortam, her iki çelik türü için de HCl olmuştur. Nitekim 90 günlük maruziyet sonunda boya uygulaması ST37 çeliğinde sertlik değerinin 116.8 HV'den 129.0 HV'ye, ST52 çeliğinde ise 153.6 HV'den 167.2 HV'ye yükselmesini sağlamıştır. NaCl ortamında da boyalı numuneler boyasız numunelere kıyasla daha yüksek sertlik değerlerini korumuş; ancak boya uygulamasının sağladığı fark HCl ortamına göre daha sınırlı kalmıştır. Bu bulgular, boya tabakasının özellikle asidik ortamda metal yüzeyi ile korozif çözelti arasındaki doğrudan teması azaltarak yüzeydeki mekanik özellik kaybını sınırladığını göstermektedir.

Buna karşın, NaOH ortamında boyalı ve boyasız numunelere ait sertlik değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. ST37 çeliğinde 90 günlük maruziyet sonunda boyasız numune 130.3 HV, boyalı numune ise 130.8 HV değerini gösterirken; ST52 çeliğinde bu değerler sırasıyla 167.8 ve 168.0 HV olarak belirlenmiştir. Özellikle ST52 çeliğinde değerlerin neredeyse çakışması, bazik ortamda boyasız çelik yüzeyinin de yüksek mekanik kararlılık sergilediğini ve boya kaplamanın sağladığı ilave koruma avantajının sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu nedenle söz konusu yakınlığın, yalnızca kaplama bütünlüğünün kaybıyla değil, NaOH ortamında çelik yüzeyinde gelişen koruyucu yüzey tabakasının korozyon etkisini sınırlandırmasıyla birlikte değerlendirilmesi daha uygun olacaktır.



Şekil 4.7. ST37 ve ST52 çeliklerinde 90 gün maruziyet sonrası boyalı ve boyasız numunelerin HCl, NaCl ve NaOH ortamlarına göre Vickers sertlik değerleri karşılaştırmaları: (a) ST37, (b) ST52

Maruziyet süreçlerinin malzeme yüzeyindeki mekanik etkileri sayısal olarak Tablo 4.4'te özetlenmiştir. 90 günlük periyot sonunda her iki çelik grubunda da kontrol değerlerine kıyasla farklı oranlarda sertlik kayıpları hesaplanmıştır. Tablo verileri incelendiğinde, boyasız durumdaki en yüksek sertlik kaybı ST37 çeliğinde %12.77 (116.8 HV) ile HCl ortamında gerçekleşirken, ST52 çeliğinde %10.28 (153.6 HV) ile yine aynı

ortamda kaydedilmiştir. Boya uygulamasının koruyucu etkisi yüzde değişim oranları üzerinden net bir şekilde takip edilebilmektedir; nitekim HCl ortamında boya kullanımı, ST37'deki sertlik kaybını %12.77'den %3.66'ya, ST52'de ise %10.28'den %2.34'e sınırlayarak her iki malzeme için de en etkili bariyer performansını bu ortamda sergilemiştir. Benzer şekilde NaCl ortamında da boya tabakası, ST37 çeliğindeki sertlik kaybını %7.92'den %4.18'e, ST52 çeliğindeki kaybı ise %7.18'den %3.86'ya düşürmüştür. Buna karşın, NaOH ortamında boyalı ve boyasız numuneler arasındaki sertlik kaybı oranlarının birbirine oldukça yakın kaldığı görülmüştür. Boyasız ST37 numunesi NaOH ortamında %2.69 oranında sertlik kaybı gösterirken boyalı numunede bu oran %2.32 olarak belirlenmiştir. ST52 çeliğinde de NaOH ortamındaki boyalı ve boyasız numunelerin sertlik kaybı oranlarının sırasıyla %1.87 ve %1.99 düzeyinde kalması, bazik ortamda boya uygulamasının sağladığı ilave koruma katkısının sınırlı olduğunu sayısal olarak ortaya koymaktadır.

Tablo 4.4. ST37 ve ST52 çeliklerinde 90 gün maruziyet sonrası Vickers sertlik değerleri ve kontrol numunesine göre değişim oranları

Deney koşulu	ST37 90 gün sertlik değeri (HV)	ST37 değişim (%)	ST52 90 gün sertlik değeri (HV)	ST52 değişim (%)
Kontrol	133.9	Referans	171.2	Referans
HCl Boyasız	116.8	-12.77	153.6	-10.28
HCl Boyalı	129.0	-3.66	167.2	-2.34
NaCl Boyasız	123.3	-7.92	158.9	-7.18
NaCl Boyalı	128.3	-4.18	164.6	-3.86
NaOH Boyasız	130.3	-2.69	167.8	-1.99
NaOH Boyalı	130.8	-2.32	168.0	-1.87

Bu sonuçlar, korozyonun yalnızca kütle kaybı veya yüzey görünümüyle sınırlı kalmadığını, yüzey mekanik özellikleri üzerinde de etkili olabildiğini göstermektedir. Özellikle HCl ortamında meydana gelen yaygın yüzey çözünmesi ile NaCl ortamında gelişen yerel korozyon reaksiyonları; artan yüzey pürüzlülüğü, çukurcuklaşma morfolojisi ve düzensiz korozyon ürünleri nedeniyle sertlik ölçümlerinde düşüşe yol açabilecek yüzey koşulları meydana getirmektedir. Literatürde de korozyona bağlı yüzey bozulmalarının ve lokal hasar oluşumunun çeliklerde sertlik ve mekanik performans üzerinde olumsuz etki oluşturabildiği bildirilmektedir (Apostolopoulos ve Michalopoulos, 2007; Buruiană ve ark., 2024; Palanivelu ve ark., 2025).

4.5. Çekme Testi Bulguları

Bu bölümde, ST37 ve ST52 çeliklerine ait kontrol numuneleri ile farklı korozyon ortamlarında 30, 60 ve 90 gün süreyle bekletilen boyalı ve boyasız numunelerin çekme testi sonuçları değerlendirilmiştir. Çekme testi bulguları kapsamında öncelikle seçilen referans numunelere ait gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri incelenmiş, ardından çekme gerilmesi ve akma gerilmesi değerleri üzerinden ortam türü, maruziyet süresi ve boya kaplamanın mekanik davranış üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Üç tekrarlı olarak gerçekleştirilen testlerden elde edilen grafiklerin ortalaması alınarak nihai grafikler oluşturulmuş ve değerlendirmede bu grafikler kullanılmıştır.

Çekme testlerinde mühendislik gerilmesi, uygulanan kuvvetin numunenin başlangıç kesit alanına bölünmesiyle; mühendislik birim deformasyonu ise boy değişiminin başlangıç ölçü boyuna oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. Buna karşılık gerçek gerilme, kuvvetin anlık kesit alanına oranını; gerçek birim deformasyon ise deformasyon süresince anlık boy değişimini dikkate almaktadır. Bu nedenle plastik deformasyon bölgesinde, özellikle boyun verme sonrasında mühendislik ve gerçek gerilme-birim deformasyon eğrileri birbirinden ayrılmaktadır. Literatürde yapısal çeliklerin büyük şekil değiştirme davranışının ve plastik deformasyon özelliklerinin değerlendirilmesinde gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon verilerinin daha uygun olduğu bildirilmektedir (Arasaratnam ve ark., 2011; Do Kweon ve ark., 2021).

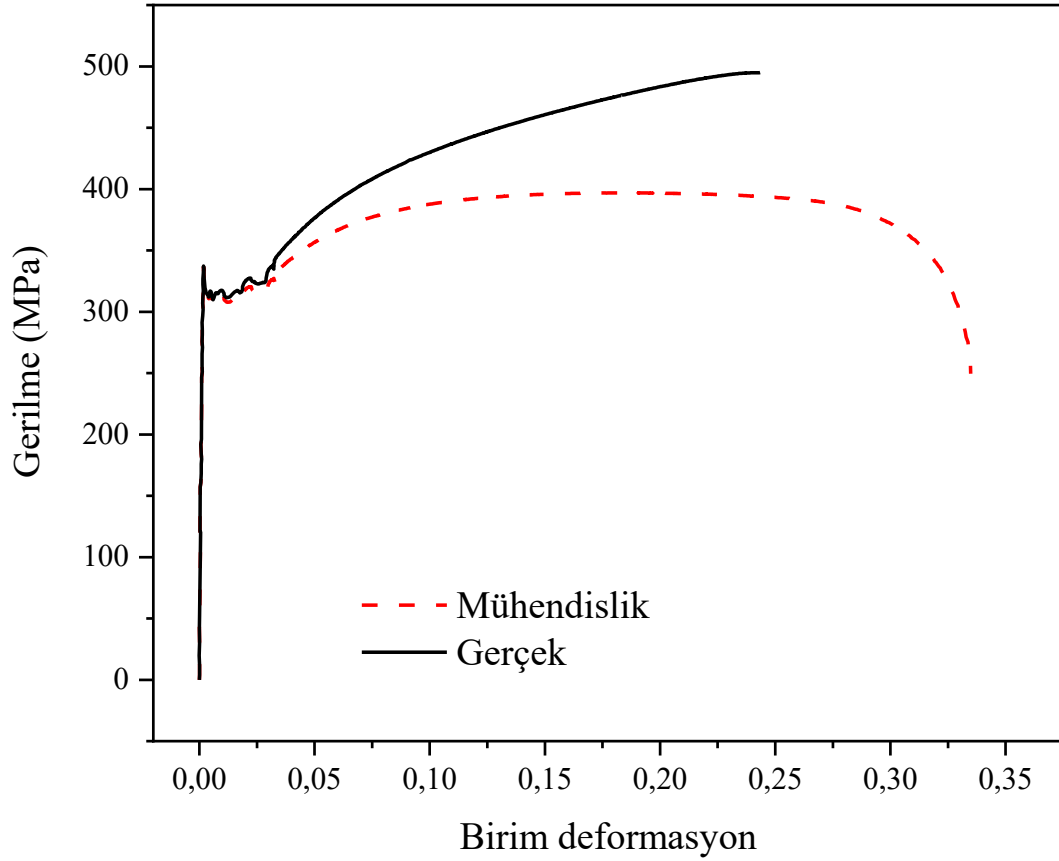
Üniform deformasyon bölgesinde gerçek gerilme ve gerçek birim deformasyon değerleri, mühendislik gerilmesi ve mühendislik birim deformasyonu kullanılarak Eşitlik 4.1 ve Eşitlik 4.2’de verilen bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\sigma_g = \sigma_m(1 + \varepsilon_m) \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_g = \ln(1 + \varepsilon_m) \quad (4.2)$$

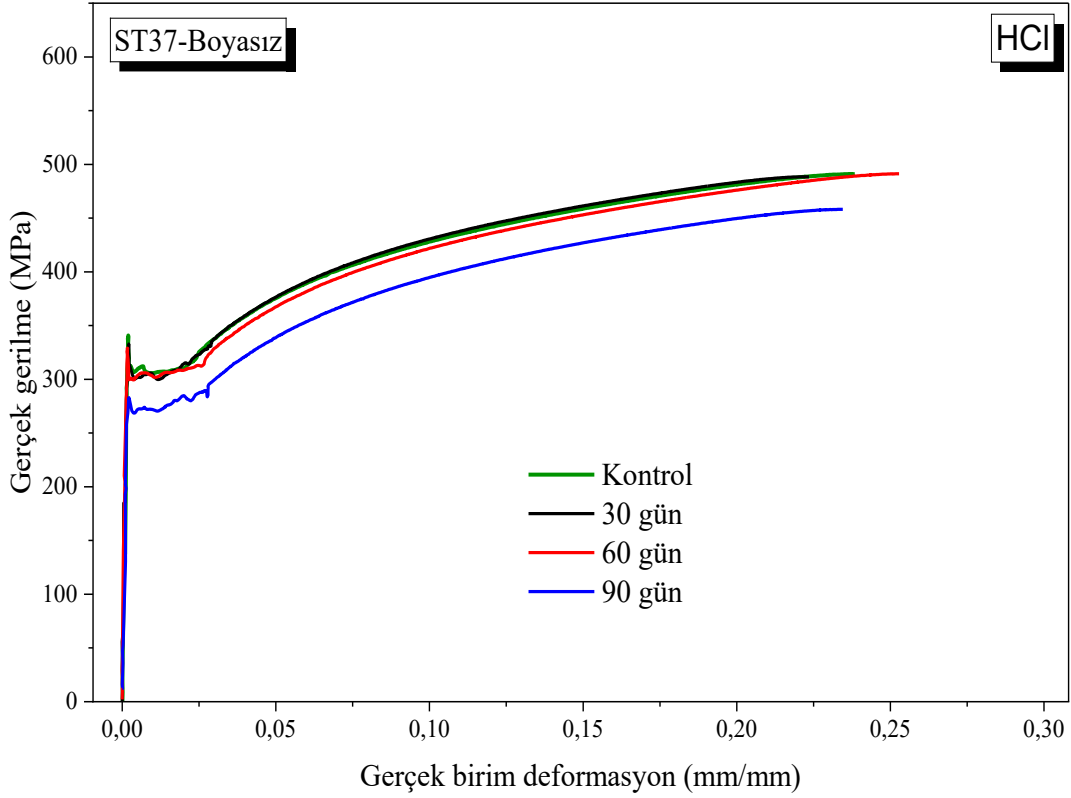
Burada σ_g gerçek gerilmeyi, σ_m mühendislik gerilmesini, ε_g gerçek birim deformasyonu ve ε_m mühendislik birim deformasyonunu ifade etmektedir. Bu bağıntılar üniform deformasyon bölgesi için geçerli kabul edilmiş ve bu çalışmada çekme testi verileri gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon formuna dönüştürülerek değerlendirilmiştir.

Şekil 4.8’de referans bir numuneye ait mühendislik gerilme-birim deformasyon eğrisi ile bu verilerden elde edilen gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrisi karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Özellikle plastik deformasyon bölgesinde iki eğri arasında belirgin farklılıklar oluşmaktadır.



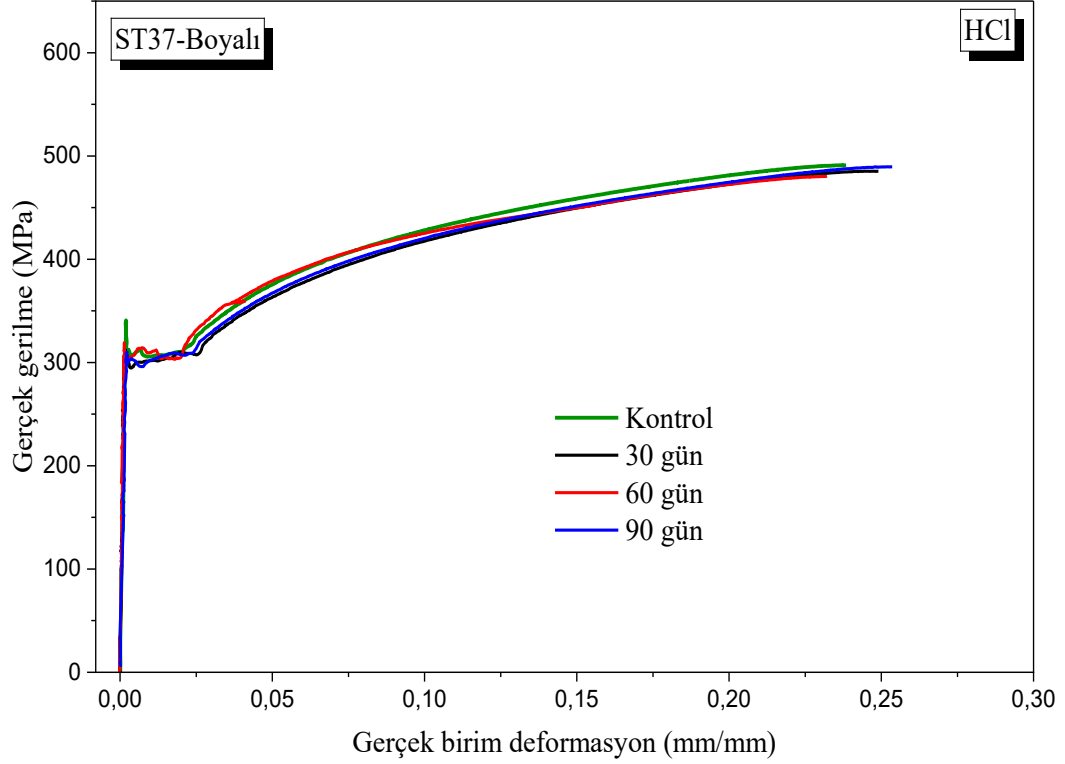
Şekil 4.8. Referans bir numuneye ait mühendislik ve gerçek gerilme-birim deformasyon eğrisinin karşılaştırılması

Şekil 4.9’da sunulan eğriler, HCl çözeltisine maruz bırakılan boyasız ST37 numunelerinde elastik bölgenin sonunda belirgin bir üst akma noktasının oluştuğunu ve bunu ani gerilme düşüşüyle başlayan Lüders platosunun izlediğini göstermektedir. Bu durum, düşük karbonlu yapısal çeliklerde arayer atomlarının dislokasyonları tutması ve plastik deformasyonun başlangıcında lokal kayma bantlarının oluşmasıyla açıklanan süreksiz akma mekanizmasıyla uyumludur (Hahn, 1962; Sun ve ark., 2003). Pekleşme bölgesinde, kontrol numunesi ile 30 ve 60 günlük maruziyet sonrası elde edilen eğrilerin birbirleriyle büyük ölçüde örtüştüğü ve benzer bir mekanik davranış sergilediği görülmektedir. Buna karşılık 90 günlük asidik maruziyet sonunda eğri diğerlerinden belirgin biçimde ayrılarak tüm deformasyon bölgesi boyunca daha düşük gerilme seviyelerinde seyretmektedir. HCl çözeltisinin asidik karakteri metal yüzeyiyle doğrudan reaksiyona girerek demir çözünmesini ($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$) hızlandırmakta; maruziyet süresi uzadıkça yüzey pürüzlülüğünün artması, çukurcuk oluşumu ve kesit kaybı gibi hasarların birikmesiyle bu etkinin 90. günde belirginleştiği düşünülmektedir (Gadow ve Motawea, 2017).



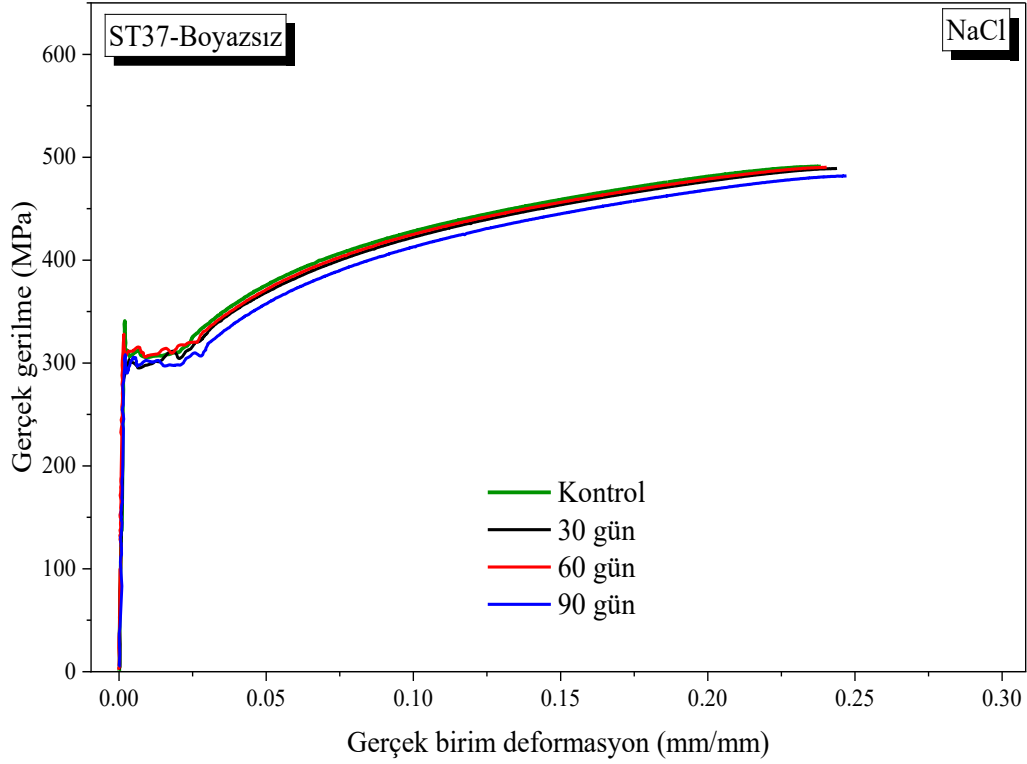
Şekil 4.9. ST37 çeliğine ait kontrol numunesi ile HCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyasız numunelerin gerçek gerilme–gerçek birim deformasyon eğrileri

Şekil 4.10’da ST37 boyalı numunelerin HCl çözeltisindeki gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri karşılaştırıldığında, kontrol numunesi ile 30, 60 ve 90 günlük maruziyet sonrası eğrilerin pekleşme bölgesinde büyük ölçüde örtüştüğü görülmektedir. Boyasız numunelerden farklı olarak, 90 günlük maruziyet sonrasında eğrinin belirgin biçimde ayrışmaması, boya kaplamasının mekanik davranıştaki değişimi sınırlandırdığını göstermektedir. Bu duruma, boya kaplamasının HCl çözeltisinin metal yüzeyiyle doğrudan temasını büyük ölçüde engelleyerek asidik korozyonun mekanik davranış üzerindeki olumsuz etkisini sınırlandırmasının sebep olduğu düşünülmektedir.



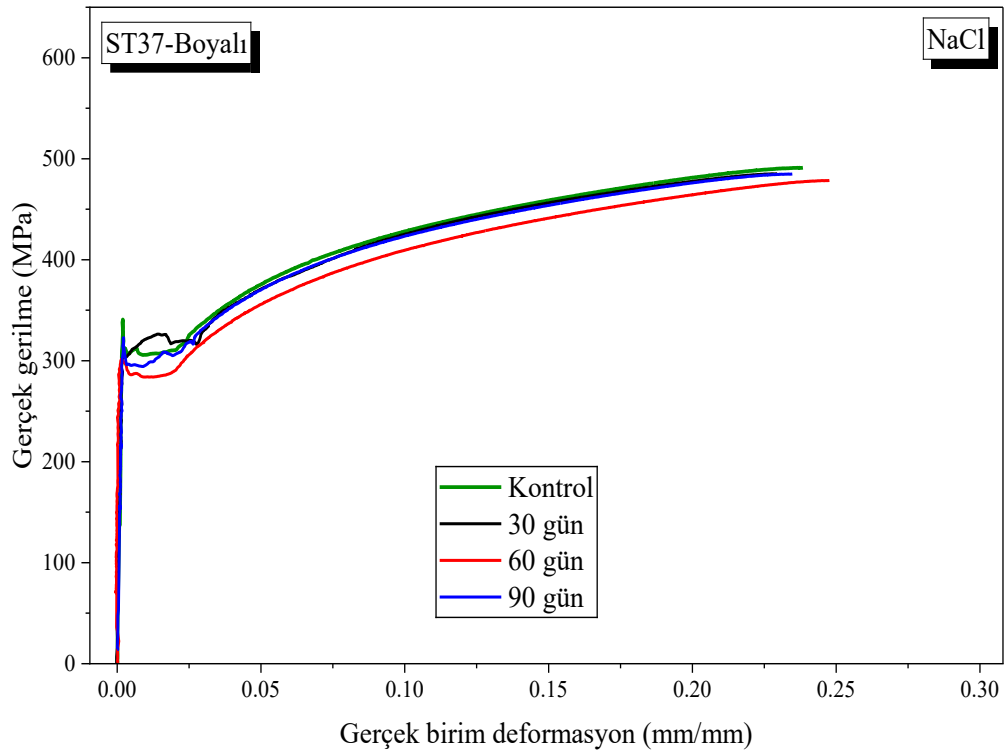
Şekil 4.10. ST37 çeliğine ait kontrol numunesi ile HCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyalı numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri

Şekil 4.11’de ST37 boyasız numuneler için elde edilen eğriler karşılaştırıldığında, kontrol numunesi ile 30 ve 60 günlük maruziyet sonuçlarının pekleşme bölgesinde büyük ölçüde örtüştüğü, 90 günlük maruziyet eğrisinin ise daha düşük gerilme seviyelerinde seyrettiği görülmektedir. Ancak bu ayrışma, HCl çözeltisindeki boyasız numunelerde gözlenen değişime kıyasla daha sınırlıdır. Bu bulgu, klorürlü ortamın mekanik davranışı olumsuz etkilediğini, ancak aynı maruziyet süresinde asidik ortama göre daha düşük düzeyde bir değişime yol açtığını düşündürmektedir.



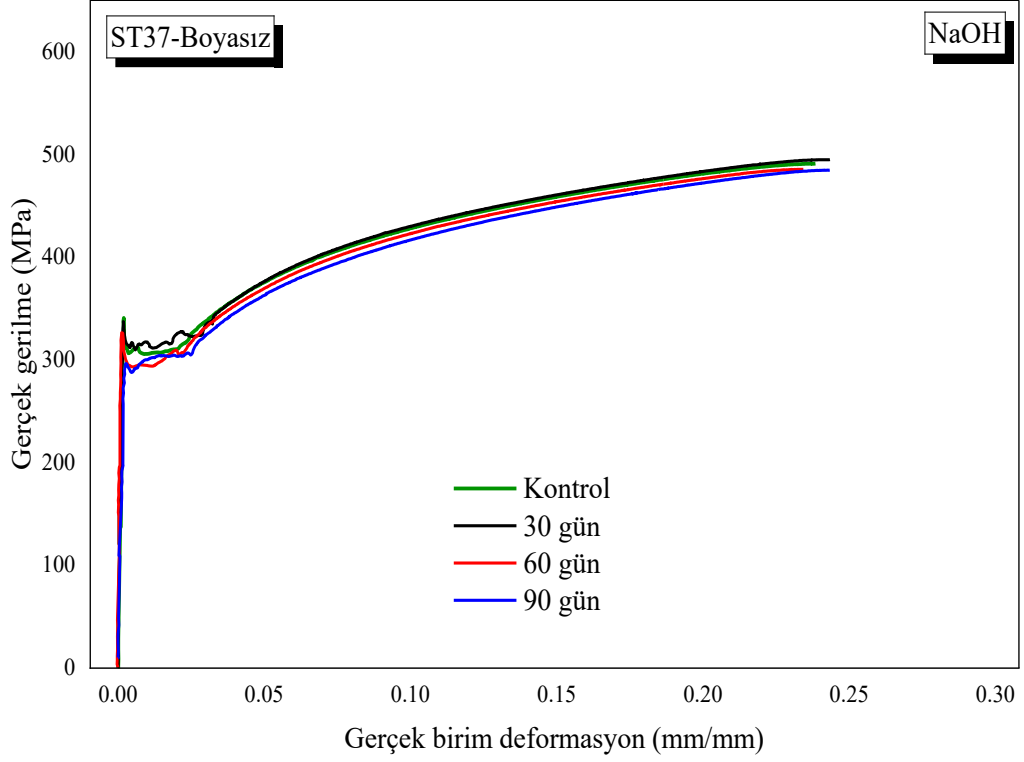
Şekil 4.11. ST37 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyasız numunelerin gerçek gerilme–gerçek birim deformasyon eğrileri

Şekil 4.12’de ST37 boyalı numunelere ait eğriler karşılaştırıldığında, kontrol numunesi ile 30 ve 90 günlük maruziyet sonuçlarının pekleşme bölgesinde büyük ölçüde örtüştüğü, 60 günlük maruziyet eğrisinin ise diğerlerinin altında seyrettiği görülmektedir. Bu sonuç, maruziyet süresi arttıkça düzenli biçimde ilerleyen bir mekanik bozulma eğilimi bulunmadığını göstermektedir. Altmış günlük numunede gözlenen gerilme düşüşü; boya tabakasının mikroskobik bütünlüğündeki yerel farklılıklar, kaplama altında gelişebilecek kabarma veya klorür iyonlarının kaplamadaki zayıf ve gözenekli bölgelerden metal yüzeyine ulaşmasıyla ilişkili olabilir. Genel olarak boya uygulaması, NaCl ortamında boyasız numunelere kıyasla daha kararlı bir çekme davranışı sağlamış; ancak kaplamadaki yerel değişkenliklerin neden olabileceği mekanik dalgalanmaları tamamen önleyememiştir.



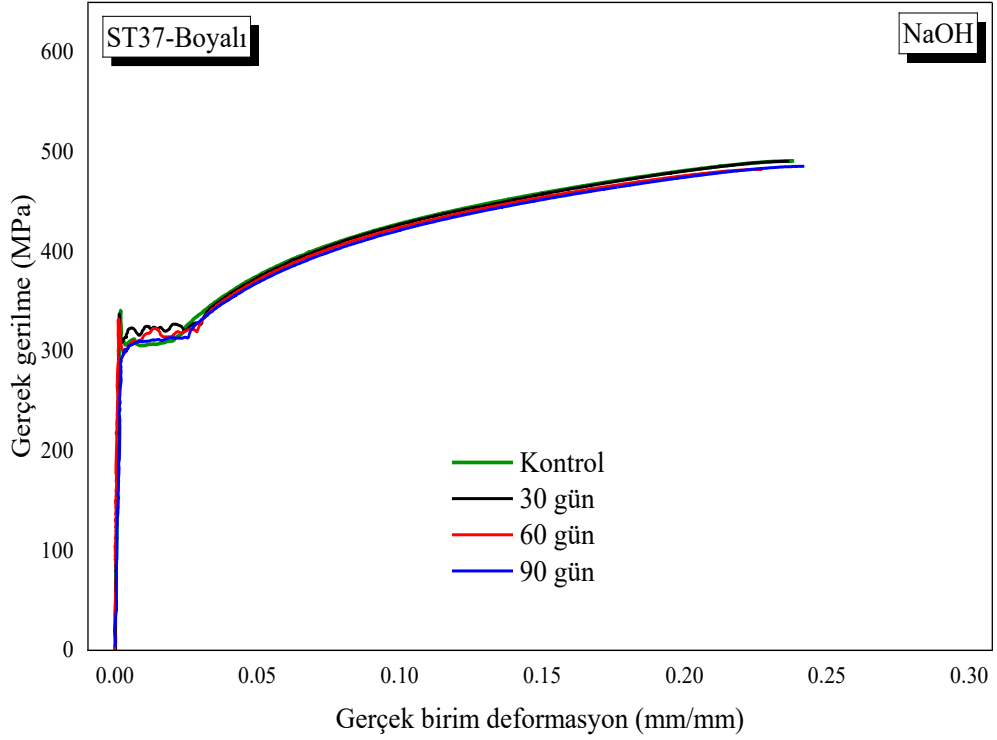
Şekil 4.12. ST37 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyalı numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri

Şekil 4.13'te ST37 boyasız numunelere ait eğrilerin pekleşme bölgesinde birbirine oldukça yakın seyrettiği görülmektedir. Bununla birlikte, maruziyet süresinin artmasıyla eğrilerin kontrol numunesine göre hafifçe daha düşük gerilme seviyelerine gerilediği belirlenmiştir. Bu sınırlı değişim, NaOH ortamının mekanik davranış üzerindeki etkisinin HCl ve NaCl çözeltilerine kıyasla daha düşük düzeyde kaldığını göstermektedir. NaOH çözeltisinde metal yüzeyinde oluşabilecek koruyucu oksit tabakasının doğrudan yüzey bozunmasını sınırlandırmış olabileceği düşünülmektedir.



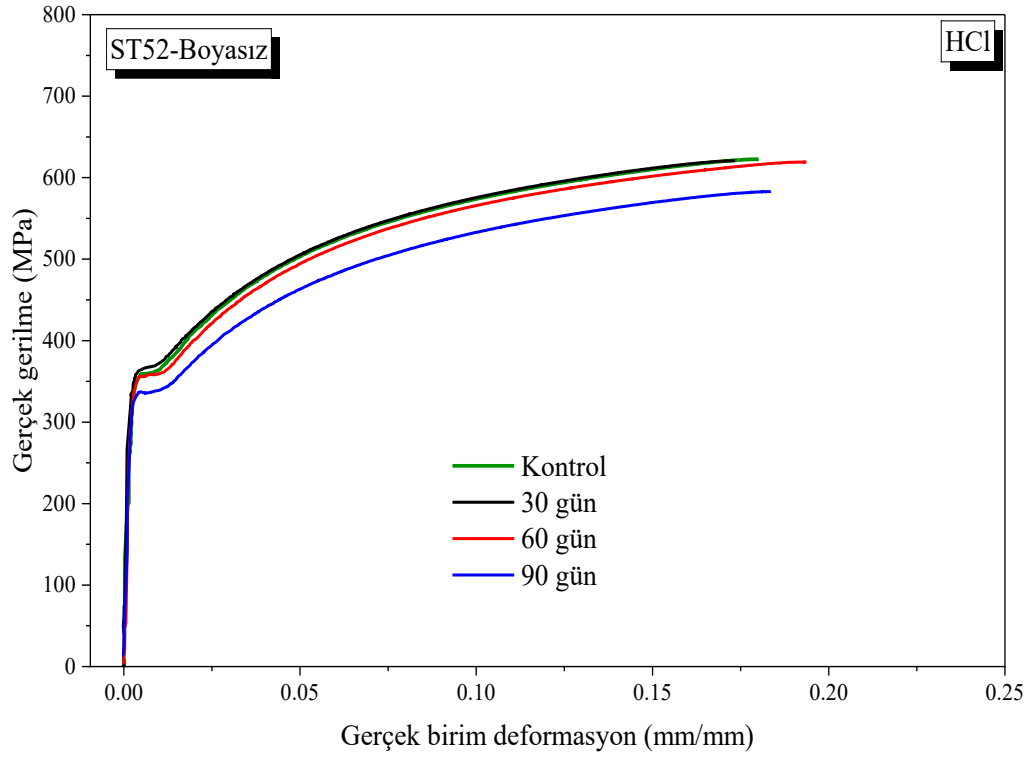
Şekil 4.13. ST37 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaOH çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyasız numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri

Şekil 4.14'te ST37 boyalı numunelere ait kontrol, 30, 60 ve 90 günlük maruziyet eğrilerinin pekleşme bölgesinde büyük ölçüde örtüştüğü ve maruziyet süresine bağlı belirgin bir ayrışma göstermediği görülmektedir. Boyasız numunelerin sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, boya uygulamasının NaOH ortamındaki mekanik davranış üzerinde belirgin bir ilave koruyucu katkı sağlamadığı anlaşılmaktadır. Bu durum, bazik ortamda metal yüzeyinde oluşabilecek koruyucu oksit tabakasının, boya kaplaması bulunmadığında da yüzey bozunmasını önemli ölçüde sınırlandırabilmesiyle ilişkili olabilir.



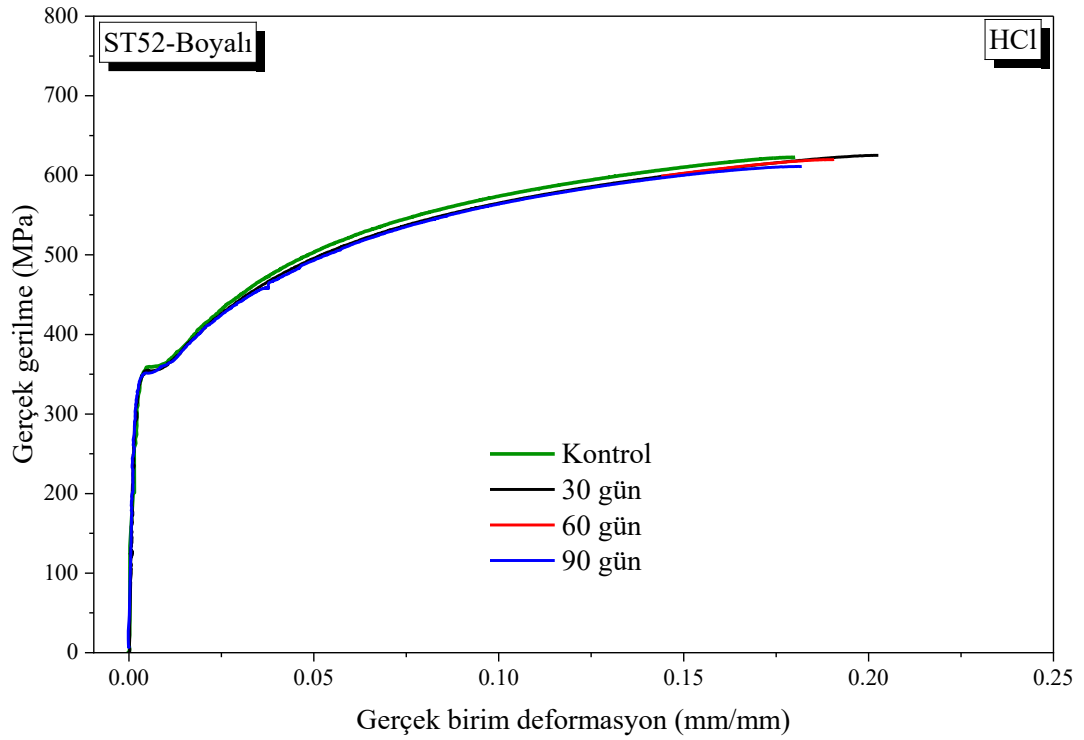
Şekil 4.14. ST37 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaOH çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyalı numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri

Şekil 4.15, HCl ortamındaki boyasız ST52 numunelerinde akma geçişinin, ST37 çeliğinde belirlenen Lüders platosuna kıyasla daha kademeli gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Bu farklılık, ST52 çeliğinin daha yüksek mukavemet düzeyi ve mikroyapısal özellikleriyle uyumludur. Kontrol ve 30 günlük maruziyet eğrileri birbirine yakın seyrederken, 60 günlük eğride sınırlı bir gerilme düşüşü belirlenmiştir. Doksan günlük maruziyet eğrisi ise tüm deformasyon aralığında diğer eğrilerden ayrılarak daha düşük gerilme değerlerine kaymıştır. Şekil 4.9'daki ST37 sonuçlarıyla benzerlik taşıyan bu eğilim, uzun süreli HCl maruziyetinin her iki çelik türünün mekanik davranışını olumsuz etkilediğine işaret etmektedir.



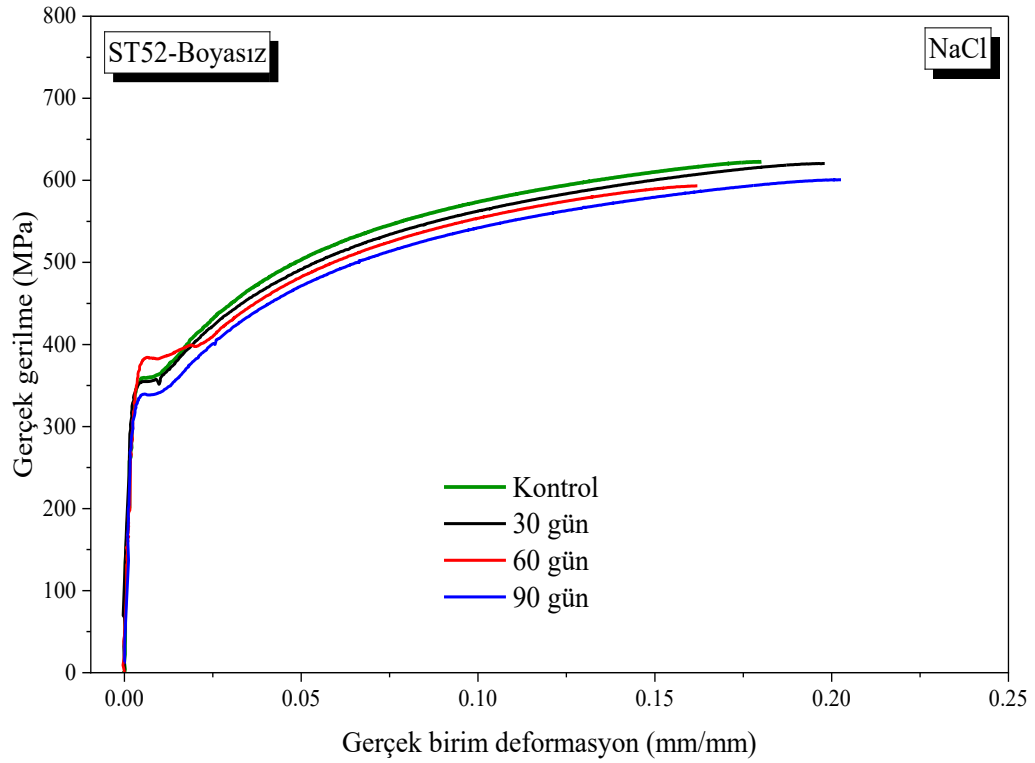
Şekil 4.15. ST52 çeliğine ait kontrol numunesi ile HCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyasız numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri

Şekil 4.16’da HCl ortamına maruz bırakılan boyalı ST52 numunelerine ait eğriler, kontrol numunesine yakın seyretmiştir. Tüm gruplarda kademeli akma geçişi devam ederken, pekleşme aşamasındaki farklılıklar sınırlı düzeyde kalmıştır. Şekil 4.15’teki boyasız numunelerde belirlenen gerilme kaybıyla karşılaştırıldığında bu sonuç, boya kaplamasının HCl’nin ST52 çeliği üzerindeki olumsuz etkisini azalttığına işaret etmektedir.



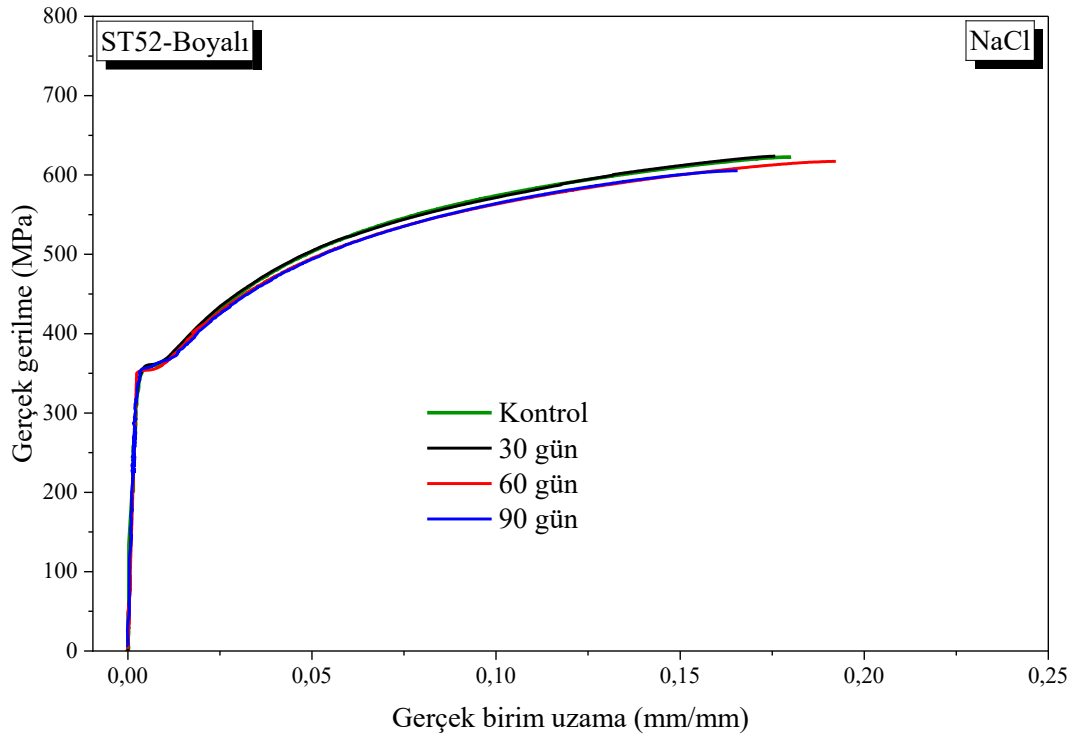
Şekil 4.16. ST52 çeliğine ait kontrol numunesi ile HCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyalı numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri

Şekil 4.17’de boyasız ST52 numunelerine ait eğriler, NaCl maruziyet süresi uzadıkça kontrol eğrisinin altında konumlanmıştır. Özellikle pekleşme aşamasındaki bu kademeli ayrışma, klorürlü ortamın mekanik davranış üzerindeki etkisinin zamanla belirginleştiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, eğriler arasındaki fark Şekil 4.15’teki boyasız HCl numunelerine göre daha sınırlıdır. Bu karşılaştırma, NaCl çözeltisinin aynı sürelerde HCl’ye kıyasla daha düşük düzeyde mekanik değişime yol açtığını göstermektedir.



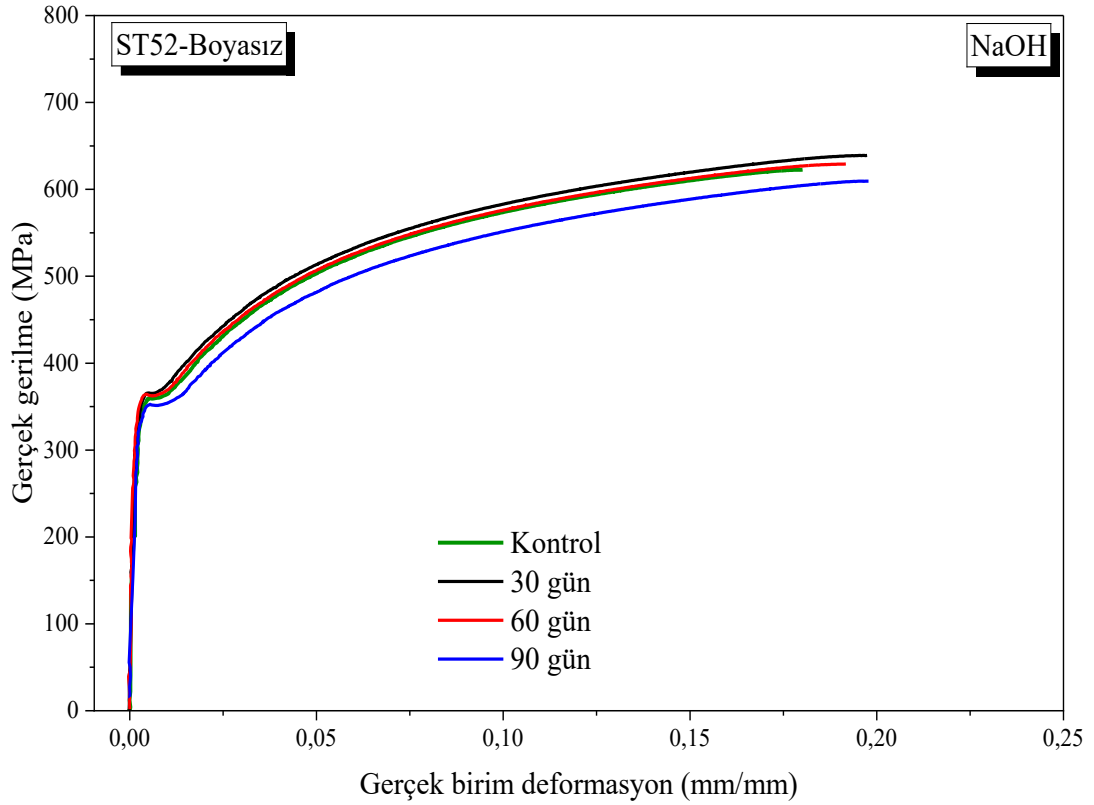
Şekil 4.17. ST52 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyasız numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri

Şekil 4.18’de kontrol numunesi ile 30 günlük maruziyet eğrisinin birbirine oldukça yakın olduğu, 60 ve 90 günlük maruziyet sonuçlarının ise pekleşme bölgesinde daha düşük gerilme değerlerinde kaldığı belirlenmiştir. Altmış ve 90 günlük eğriler arasındaki farkın küçük olması, 60. günden sonra mekanik davranıştaki değişimin belirgin biçimde ilerlemediğine işaret etmektedir. Şekil 4.17’deki boyasız numunelerle yapılan karşılaştırma, boya kaplamasının NaCl ortamından kaynaklanan mekanik değişimi azalttığını, ancak uzun süreli maruziyetin etkisini tamamen önleyemediğini göstermektedir.



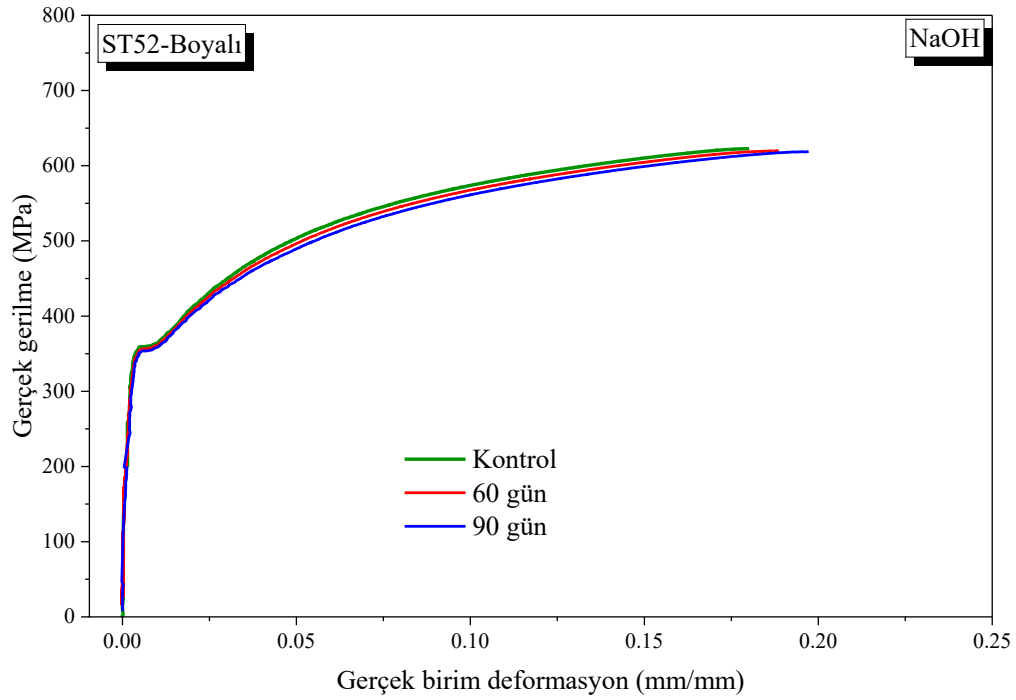
Şekil 4.18. ST52 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaCl çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyalı numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri

Şekil 4.19’da 30 ve 60 günlük NaOH maruziyetine ait eğriler kontrol numunesine yakın kalırken, 90 günlük eğri daha düşük gerilme değerlerine kaymıştır. Bu sınırlı ayrışma, uzun süreli bazik ortamın boyasız ST52 çeliğinin mekanik davranışında bir miktar zayıflamaya yol açabildiğine işaret etmektedir. Ancak değişimin HCl ve NaCl ortamlarındaki boyasız numunelere göre daha düşük düzeyde olması, NaOH çözeltisinde oluşabilecek koruyucu yüzey tabakasının bozunmayı sınırlandırmış olabileceğini göstermektedir.



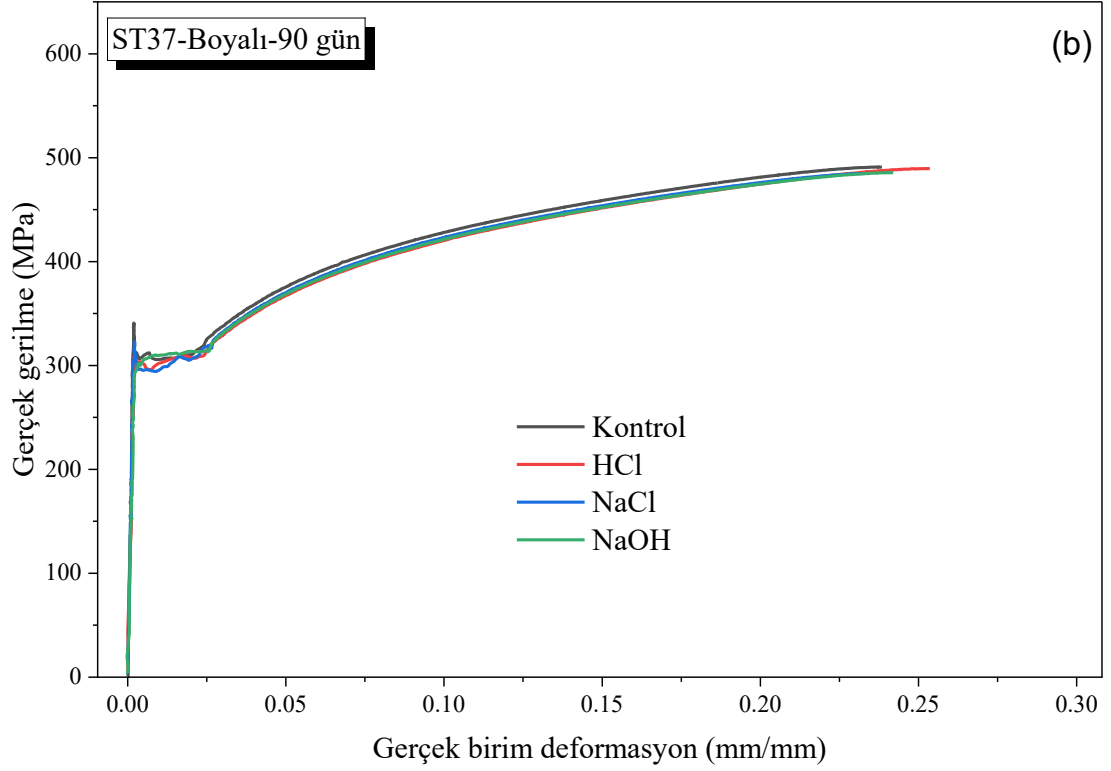
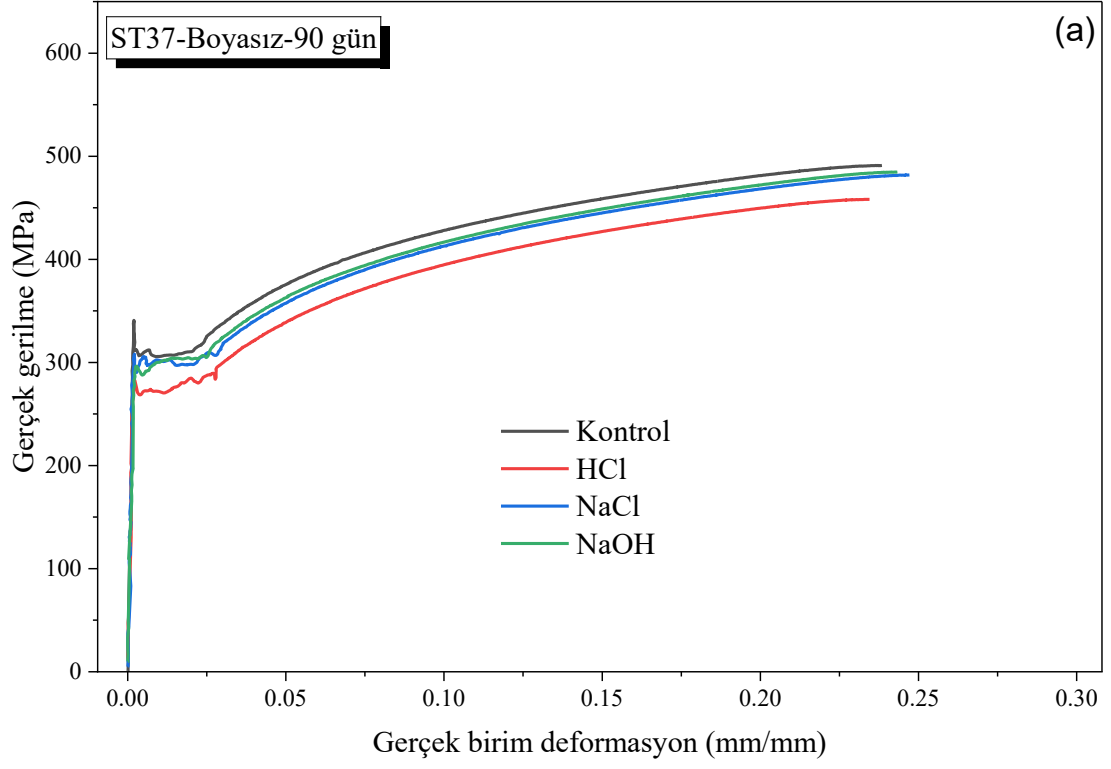
Şekil 4.19. ST52 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaOH çözeltisinde 30, 60 ve 90 gün bekletilen boyasız numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri

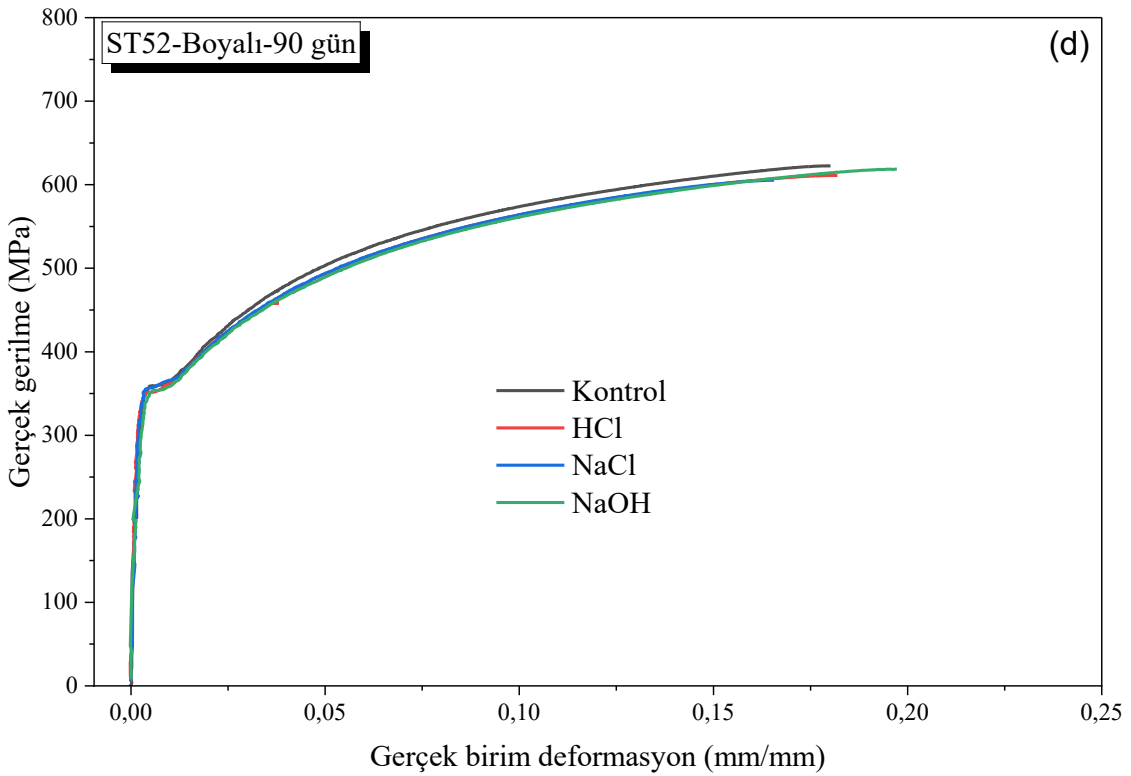
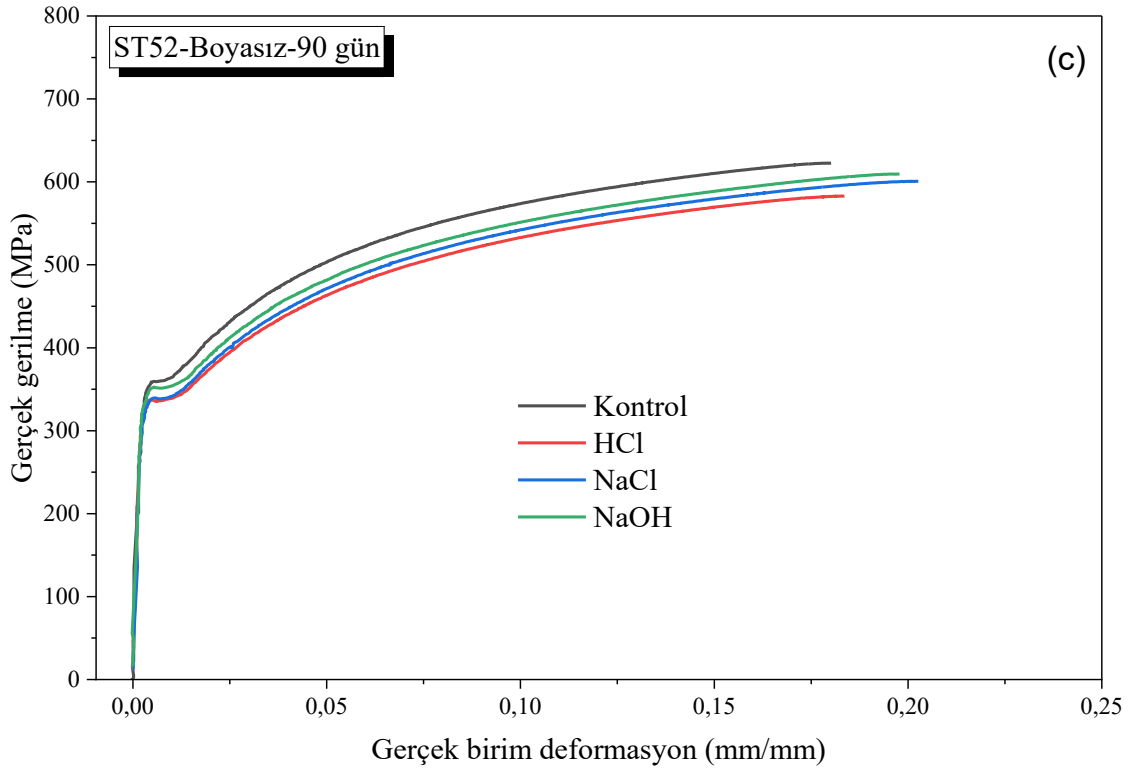
Şekil 4.20’de kontrol numunesi ile 60 ve 90 günlük NaOH maruziyetine ait eğrilerin genel biçimlerini koruduğu, ancak pekleşme bölgesindeki gerilme düzeylerinin maruziyet süresiyle birlikte hafifçe azaldığı belirlenmiştir. Boyasız ST52 numuneleriyle birlikte değerlendirildiğinde, uzun süreli NaOH maruziyetinin boyalı numunelerin mekanik davranışında da sınırlı bir değişime yol açtığı; bununla birlikte söz konusu etkinin HCl ve NaCl ortamlarında gözlenen değişimlere kıyasla daha düşük düzeyde kaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.20. ST52 çeliğine ait kontrol numunesi ile NaOH çözeltisinde 60 ve 90 gün bekletilen boyalı numunelerin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri

Doksan günlük maruziyet sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, Şekil 4.21a'da boyasız ST37 numuneleri için HCl eğrisinin kontrol eğrisinin belirgin biçimde altında kaldığı, NaCl ve NaOH eğrilerindeki ayrışmanın ise daha sınırlı olduğu izlenmektedir. Boyalı ST37 numunelerinin sunulduğu Şekil 4.21b'de korozif ortamlara ait eğrilerin kontrol sonucuna yaklaşması, kaplamanın ortamlar arasındaki mekanik davranış farklılıklarını azalttığına işaret etmektedir. Benzer biçimde, Şekil 4.21c'deki boyasız ST52 numunelerinde en düşük gerilme değerleri HCl ortamında elde edilmiş; NaCl ve NaOH sonuçları kontrol eğrisine daha yakın kalmıştır. Şekil 4.21d'de ise boyalı ST52 numunelerine ait eğriler arasındaki ayrışmanın oldukça düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir. Boyasız ve boyalı koşulların birlikte karşılaştırılması, boya uygulamasının 90 günlük süreçte korozif ortamların mekanik davranış üzerindeki etkisini azalttığını göstermektedir. Ayrıca tüm alt grafiklerde ST52 çeliğinin ST37 çeliğine göre daha yüksek gerilme düzeylerine ulaştığı görülmektedir.



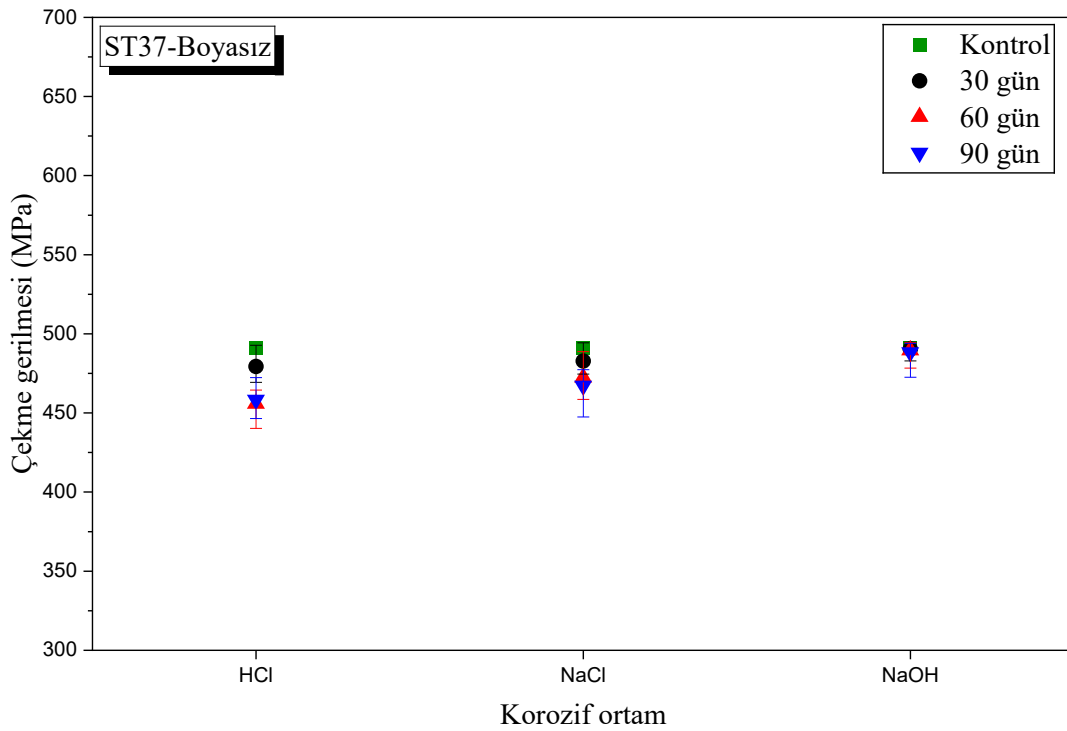


Şekil 4.21. 90 günlük maruziyet sonrası korozif ortamın gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon davranışına etkisi: a) ST37 çeliği boyasız, b) ST37 çeliği boyalı, c) ST52 çeliği boyasız, d) ST52 çeliği boyalı

Gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrilerinin değerlendirilmesinin ardından, numunelerin çekme gerilmesi değerleri karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda ST37

ve ST52 çeliklerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına ait çekme gerilmesi değerleri; koroziif ortam türü, maruziyet süresi ve yüzey koşulu dikkate alınarak incelenmiştir. Böylece farklı çözeltilerin ve boya uygulamasının çekme dayanımı üzerindeki etkisi daha nicel olarak değerlendirilmiştir.

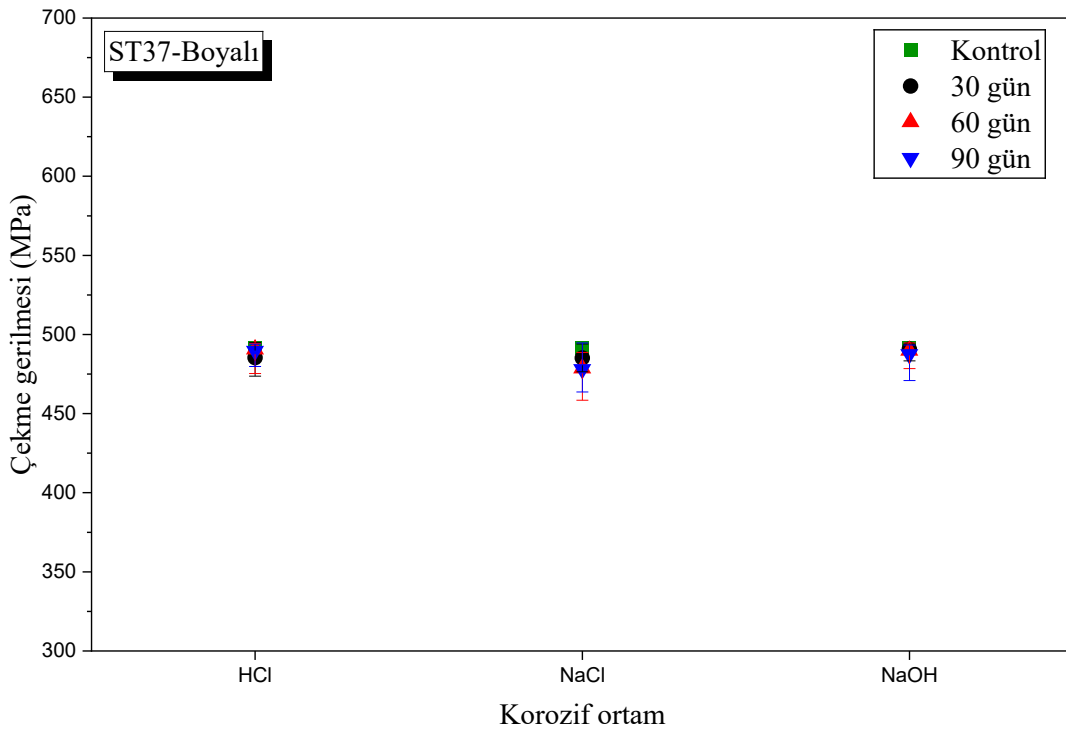
Şekil 4.22’de boyasız ST37 numunelerinin çekme gerilmesi değerlerinin hem koroziif ortam türüne hem de maruziyet süresine göre değiştiği belirlenmiştir. HCl ortamında süre uzadıkça çekme gerilmesi düzenli biçimde azalmış, özellikle 60 ve 90 günlük değerler kontrol numunesinin altında kalmıştır. NaCl çözeltisinde de zamana bağlı bir düşüş oluşmakla birlikte, değişimin büyüklüğü HCl ortamına göre daha sınırlıdır. NaOH grubunda ise farklı maruziyet sürelerine ait sonuçlar kontrol değerine yakın seyretmiş ve belirgin bir azalma meydana gelmemiştir. Buna göre, boyasız ST37 numunelerinde çekme gerilmesi üzerindeki olumsuz ortam etkisi $HCl > NaCl > NaOH$ sıralamasını izlemiştir.



Şekil 4.22. ST37 çeliğinin boyasız numunelerinde farklı koroziif çözeltilere maruz kalma süresine bağlı çekme gerilmesi değerlerinin değişimi

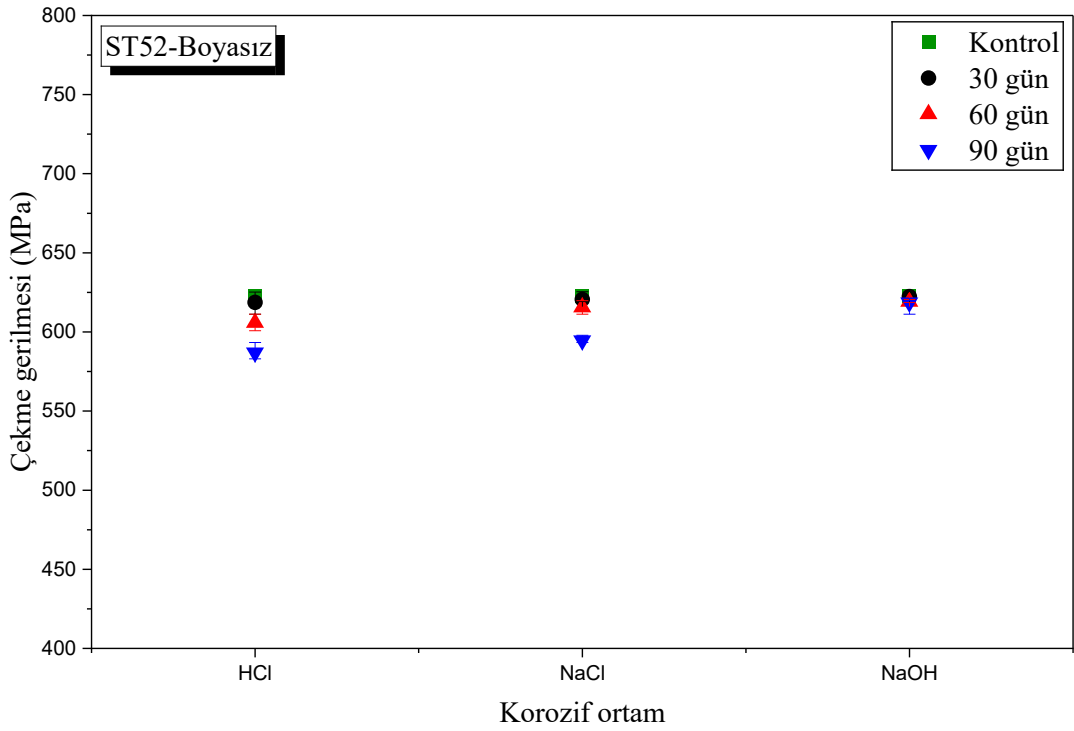
Şekil 4.23’teki boyalı ST37 numuneleri, Şekil 4.22’deki boyasız sonuçlarla karşılaştırıldığında, çekme gerilmesi değerlerinin genel olarak daha dar bir aralıkta dağıldığı belirlenmiştir. HCl ortamında maruziyet sürelerine ait sonuçların kontrol değerine yakın kalması, boyasız numunelerdeki düzenli gerilme kaybının boya

uygulamasıyla büyük ölçüde azaldığını göstermektedir. NaOH grubunda da süreler arasında belirgin bir farklılık oluşmamıştır. NaCl ortamında ise 60 günlük değer diğer ölçümlerin altında kalmış ve süreye bağlı düzenli eğilimden ayrılmıştır. Şekil 4.12'deki eğri davranışıyla uyumlu olan bu sapma, boya tabakasının yerel bütünlüğündeki farklılıklar veya klorür iyonlarının kaplamanın zayıf bölgelerinden yüzeye ulaşmasıyla ilişkili olabilir. Genel değerlendirme, boya uygulamasının ST37 çeliğinde korozif ortam kaynaklı çekme gerilmesi değişimlerini önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır.



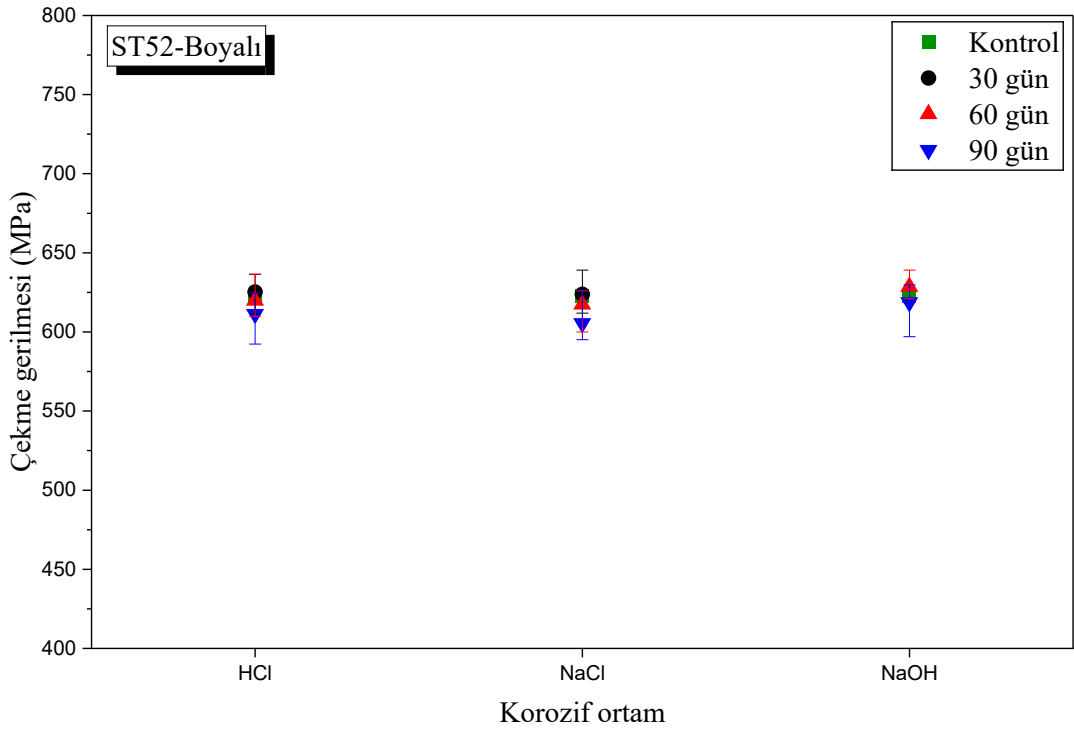
Şekil 4.23. ST37 çeliğinin boyalı numunelerinde farklı korozif çözeltilere maruz kalma süresine bağlı çekme gerilmesi değerlerinin değişimi

Şekil 4.24'te boyasız ST52 numunelerinin çekme gerilmesi değerleri, korozif ortam ve maruziyet süresine göre farklı bir dağılım sergilemiştir. HCl grubunda süre uzadıkça düzenli bir gerilme kaybı oluşmuş ve en belirgin azalma 90 günlük maruziyet sonunda ortaya çıkmıştır. NaCl ortamında 30 ve 60 günlük değerler kontrol sonucuna yakın kalırken, 90. günde çekme gerilmesinin azaldığı belirlenmiştir. NaOH çözeltisinde ise tüm süreler boyunca kontrol değerinden belirgin bir uzaklaşma meydana gelmemiştir. Şekil 4.22'deki boyasız ST37 sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, her iki çelik türünde de ortamların etkisi $HCl > NaCl > NaOH$ sıralamasını izlemiştir. Bu benzerlik, korozif ortamların çekme gerilmesi üzerindeki göreceli etkisinin iki malzeme için de aynı yönde geliştiğini ortaya koymaktadır.



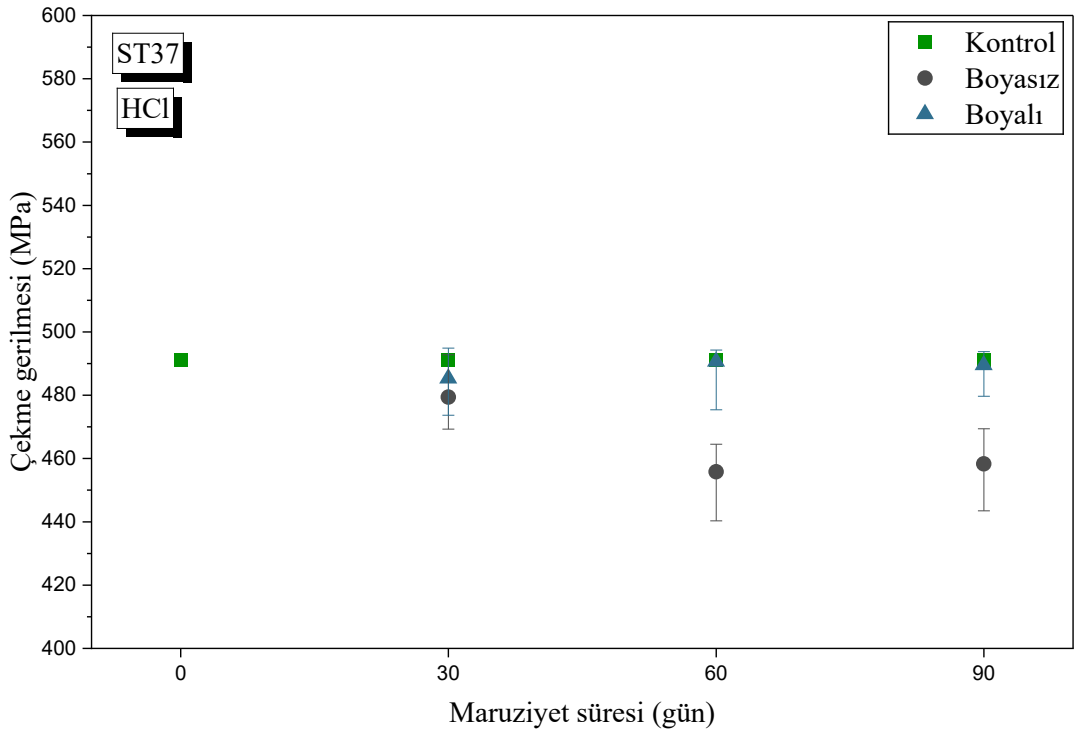
Şekil 4.24. ST52 çeliğinin boyasız numunelerinde farklı korozif çözeltilere maruz kalma süresine bağlı çekme gerilmesi değerlerinin değişimi

Şekil 4.25'te boyalı ST52 numunelerine ait çekme gerilmesi değerleri, korozif ortam ve maruziyet süresinden bağımsız olarak dar bir aralıkta dağılım göstermiştir. Şekil 4.24'teki boyasız sonuçlarla karşılaştırıldığında, HCl grubunda 90 günlük maruziyet sonunda ortaya çıkan belirgin gerilme kaybının boyalı numunelerde büyük ölçüde azaldığı belirlenmiştir. NaCl ortamında değerler genel olarak kontrol sonucuna yakın kalmış, yalnızca 90. günde sınırlı bir düşüş meydana gelmiştir. NaOH grubunda ise maruziyet süreleri arasında belirgin bir farklılık oluşmamıştır. Bu sonuçlar, boya uygulamasının ST52 çeliğinde korozif ortamların çekme gerilmesi üzerindeki etkisini azalttığını, bu katkının özellikle HCl ve NaCl koşullarında öne çıktığını göstermektedir.



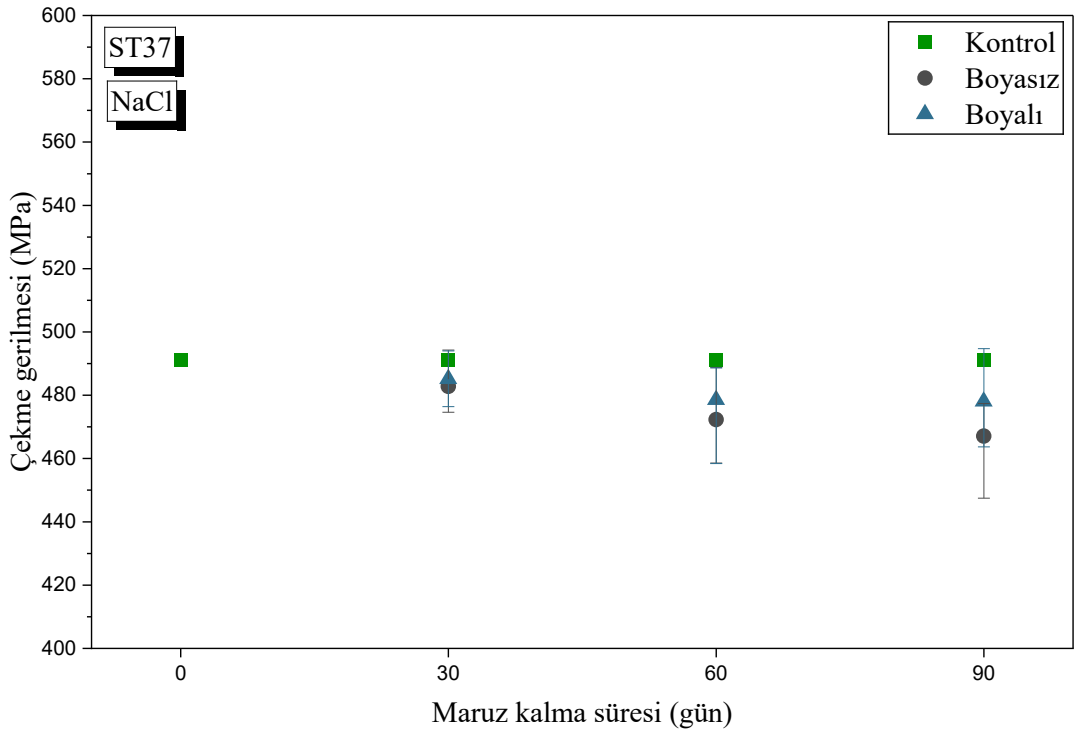
Şekil 4.25. ST52 çeliğinin boyalı numunelerinde farklı korozif çözeltilere maruz kalma süresine bağlı çekme gerilmesi değerlerinin değişimi

Şekil 4.26’da ST37 çeliğinin HCl ortamındaki boyalı ve boyasız numuneleri karşılaştırıldığında, 30 günlük maruziyet sonunda iki yüzey koşulu arasında sınırlı bir fark oluşmuştur. Maruziyetin 60 ve 90 güne uzamasıyla boyasız numunelerin çekme gerilmesi belirgin biçimde azalırken, boyalı numunelere ait değerler kontrol düzeyine yakınlığını sürdürmüştür. Yüzey koşulları arasındaki farkın uzun süreli maruziyette belirginleşmesi, boya kaplamasının asidik ortamda çekme dayanımının korunmasına katkı sağladığını ortaya koymaktadır.



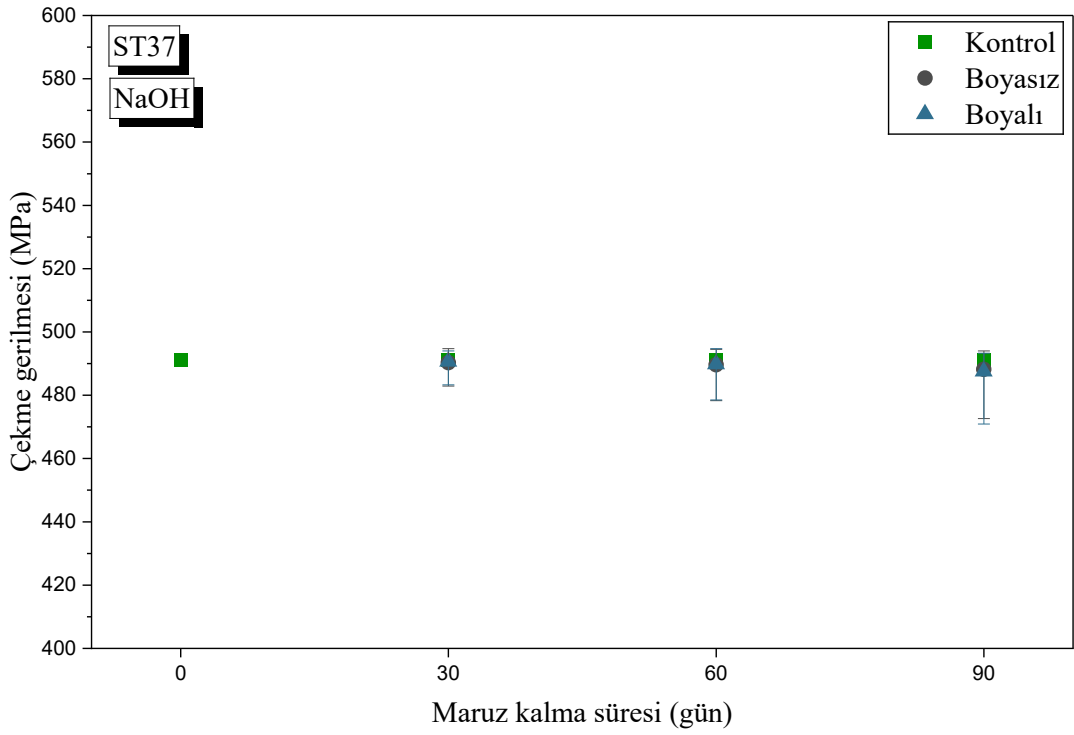
Şekil 4.26. ST37 çeliğinin HCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre çekme gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi

Şekil 4.27’de ST37 çeliğinin NaCl ortamındaki sonuçları yüzey koşuluna göre karşılaştırıldığında, boyasız numunelerin çekme gerilmesi maruziyet süresi boyunca düzenli biçimde azalmıştır. Boyalı numunelerde ise 60 ve 90 günlük değerlerin birbirine yakın kalması, süre uzadıkça devam eden belirgin bir düşüş eğiliminin oluşmadığını göstermektedir. İki yüzey koşulu arasındaki ayrım, Şekil 4.26’daki HCl sonuçlarına göre daha düşük düzeydedir. Buna göre boya uygulaması, NaCl ortamında çekme gerilmesindeki azalmayı sınırlamış; ancak sağlanan koruma asidik ortamdaki kadar belirgin olmamıştır.



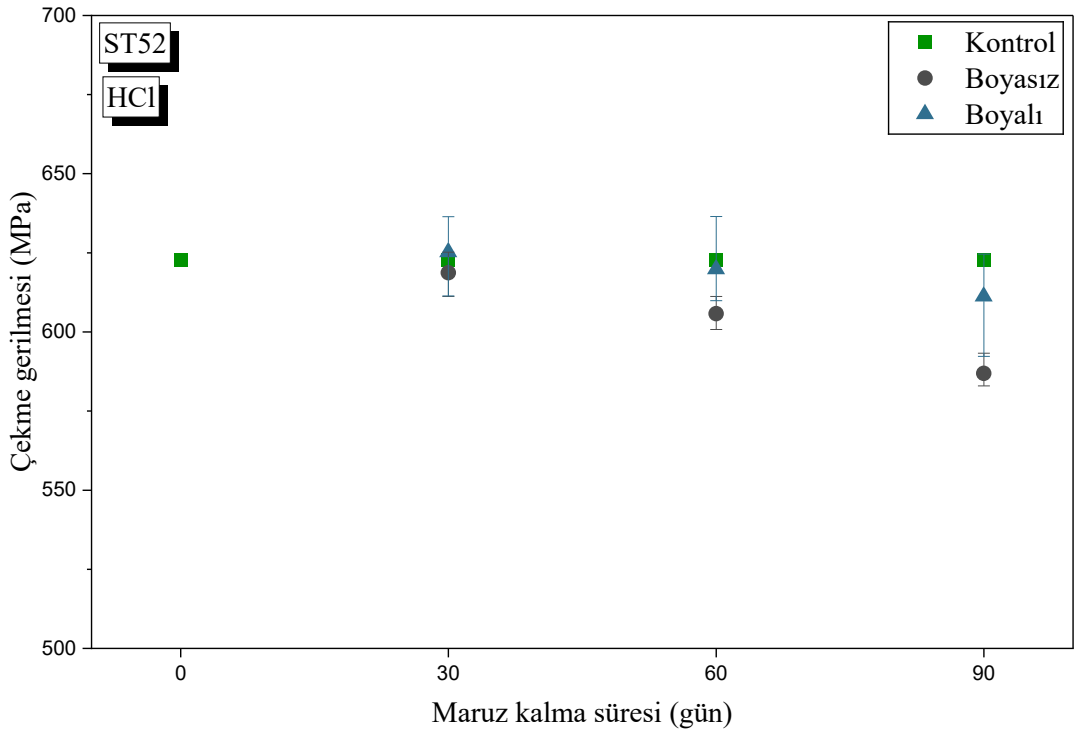
Şekil 4.27. ST37 çeliğinin NaCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre çekme gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi

Şekil 4.28’de ST37 çeliğinin NaOH ortamındaki boyalı ve boyasız numunelerine ait çekme gerilmesi değerleri, tüm maruziyet sürelerinde birbirine yakın kalmış ve kontrol değerinden yalnızca sınırlı ölçüde uzaklaşmıştır. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de HCl ve NaCl ortamları için belirlenen yüzey koşuluna bağlı ayrışma, NaOH grubunda ortaya çıkmamıştır. Bu sonuç, bazik ortamın çekme gerilmesi üzerindeki etkisinin düşük düzeyde kaldığını ve boya uygulamasının bu koşulda belirgin bir ilave koruma sağlamadığını ortaya koymaktadır. Metal yüzeyinde oluşabilecek koruyucu oksit tabakasının, boya bulunmayan numunelerde de yüzey bozunmasını sınırlandırmış olabileceği değerlendirilmektedir.



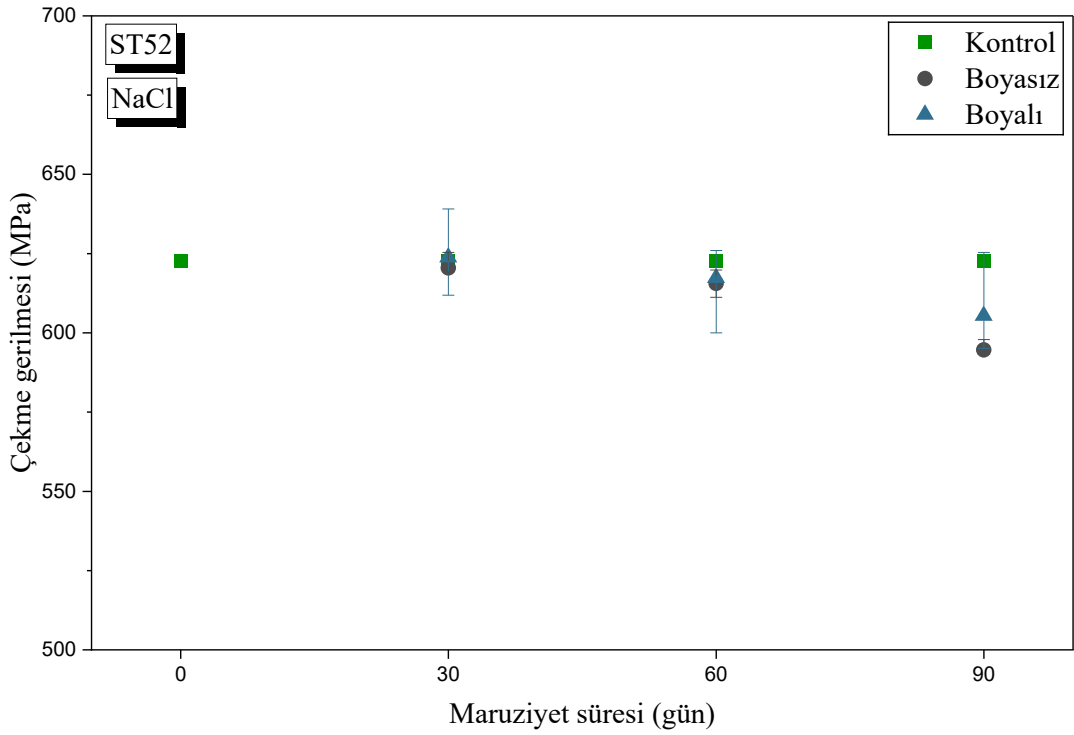
Şekil 4.28. ST37 çeliğinin NaOH çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre çekme gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi

Şekil 4.29’da ST52 çeliğinin HCl ortamındaki boyasız numunelerinde çekme gerilmesi, maruziyet süresi uzadıkça düzenli biçimde azalmış ve en düşük değer 90. günde elde edilmiştir. Boyalı numuneler kontrol düzeyine daha yakın kalmış; 90 günlük maruziyette sınırlı bir düşüş oluşmasına rağmen aynı süredeki boyasız numuneden daha yüksek çekme gerilmesi sergilemiştir. Bu ayrım, boya kaplamanın asidik ortamda uzun süreli mekanik kaybı azalttığını, ancak etkisini tamamen ortadan kaldırmadığını ortaya koymaktadır. Şekil 4.26’daki ST37 sonuçları da HCl ortamında yüzey koşuluna bağlı benzer bir eğilim göstermiştir.



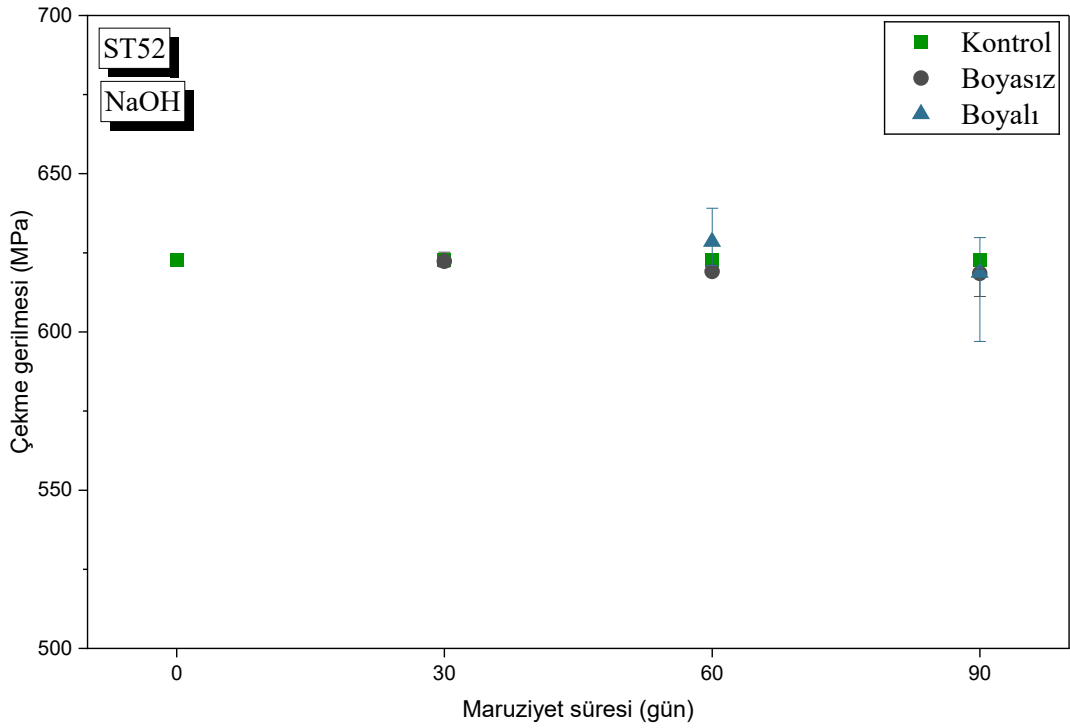
Şekil 4.29. ST52 çeliğinin HCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre çekme gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi

Şekil 4.30’da ST52 çeliğinin NaCl ortamındaki boyalı ve boyasız numuneleri, 30 ve 60 günlük maruziyetlerde birbirine yakın çekme gerilmesi değerleri sergilemiştir. Doksan günlük maruziyet sonunda boyasız numunede daha belirgin bir gerilme kaybı oluşurken, boyalı numune görece yüksek düzeyini sürdürmüştür. Bununla birlikte yüzey koşulları arasındaki ayrım, Şekil 4.29’daki HCl sonuçlarına göre daha düşük düzeyde kalmıştır. Bu karşılaştırma, boya kaplamasının NaCl ortamında özellikle uzun süreli maruziyet sırasında çekme gerilmesindeki azalmayı sınırladığını; ancak sağlanan katkının asidik ortamdaki kadar güçlü olmadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.30. ST52 çeliğinin NaCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre çekme gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi

Şekil 4.31’de ST52 çeliğinin NaOH ortamındaki boyalı ve boyasız numunelerine ait çekme gerilmesi değerleri genel olarak kontrol düzeyine yakın kalmıştır. Boyasız numunelerde maruziyet süresine bağlı belirgin bir azalma eğilimi oluşmazken, boyalı numunelerin 60 ve 90 günlük sonuçları da benzer bir dağılım sergilemiştir. Yüzey koşulları arasında belirgin bir ayrışmanın ortaya çıkmaması, boya uygulamasının bu ortamda çekme gerilmesi açısından ilave ve belirleyici bir katkı sağlamadığını ortaya koymaktadır. Şekil 4.28’deki ST37 sonuçlarında da benzer bir eğilim belirlenmiş olması, NaOH ortamının her iki çelik türündeki etkisinin HCl ve NaCl ortamlarına göre daha sınırlı kaldığını göstermektedir.



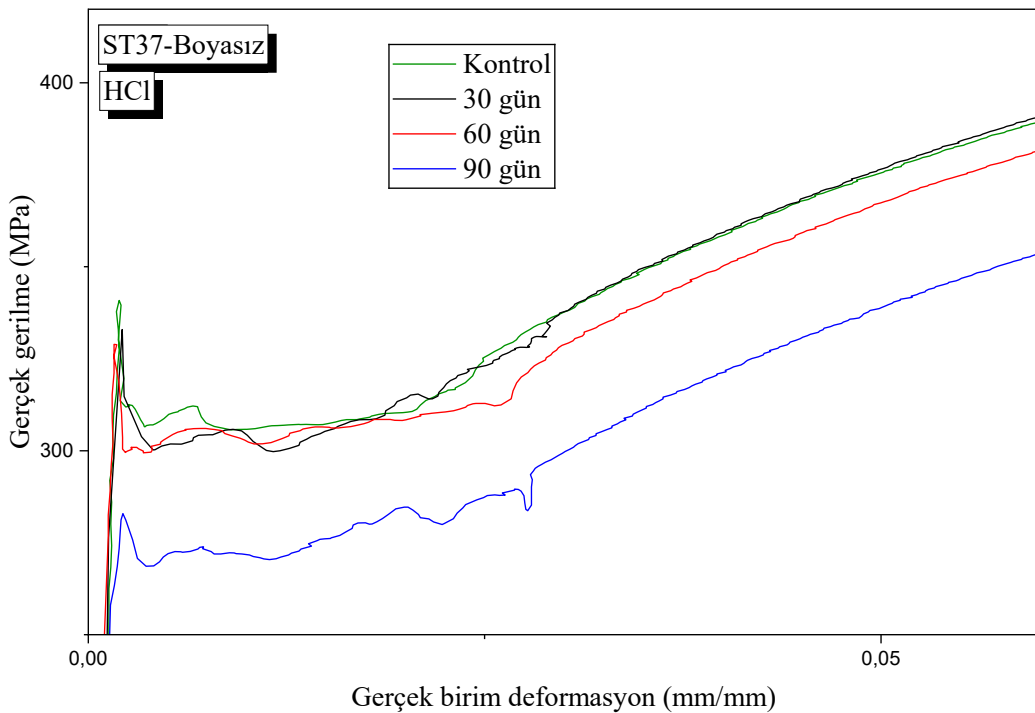
Şekil 4.31. ST52 çeliğinin NaOH çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre çekme gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi

Akma gerilmesi değerlerinin belirlenmesinde, gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrilerinde elastik bölgeden plastik deformasyon bölgesine geçişi temsil eden ilk belirgin akma noktası esas alınmıştır. Bu kapsamda, eğrinin başlangıç bölgesinde görülen ilk belirgin tepe/sıçrama noktası üst akma dayanımı (ReH) olarak değerlendirilmiştir. ASTM E8/E8M standardında, süreksiz akma davranışı gösteren malzemelerde akma başlangıcındaki maksimum kuvvete karşılık gelen gerilmenin üst akma dayanımı olarak kaydedildiği; birden fazla küçük tepe görülmesi durumunda ilk tepenin esas alınacağı belirtilmektedir (ASTM International, 2025). Benzer şekilde ISO 6892-1 standardında üst akma dayanımı, kuvvetteki ilk düşüşten önce ulaşılan maksimum gerilme değeri olarak tanımlanmaktadır (International Organization for Standardization, 2019).

Bu yaklaşım, düşük karbonlu ve yapısal karbon çeliklerinde gözlenebilen süreksiz akma ve Lüders davranışı ile uyumludur. Literatürde yapısal karbon çeliklerinin gerilme-birim deformasyon eğrilerinde akma platosu oluşabildiği, ferrit-perlit yapıları çeliklerde ise akma noktası ve akma platosunun Lüders deformasyonu ile ilişkili olduğu bildirilmektedir (Sadowski ve ark., 2017; Qiu ve ark., 2022). Ayrıca süreksiz akma davranışında üst akma noktası ile alt akma noktasının birbirinden ayrılabilirdiği ve üst

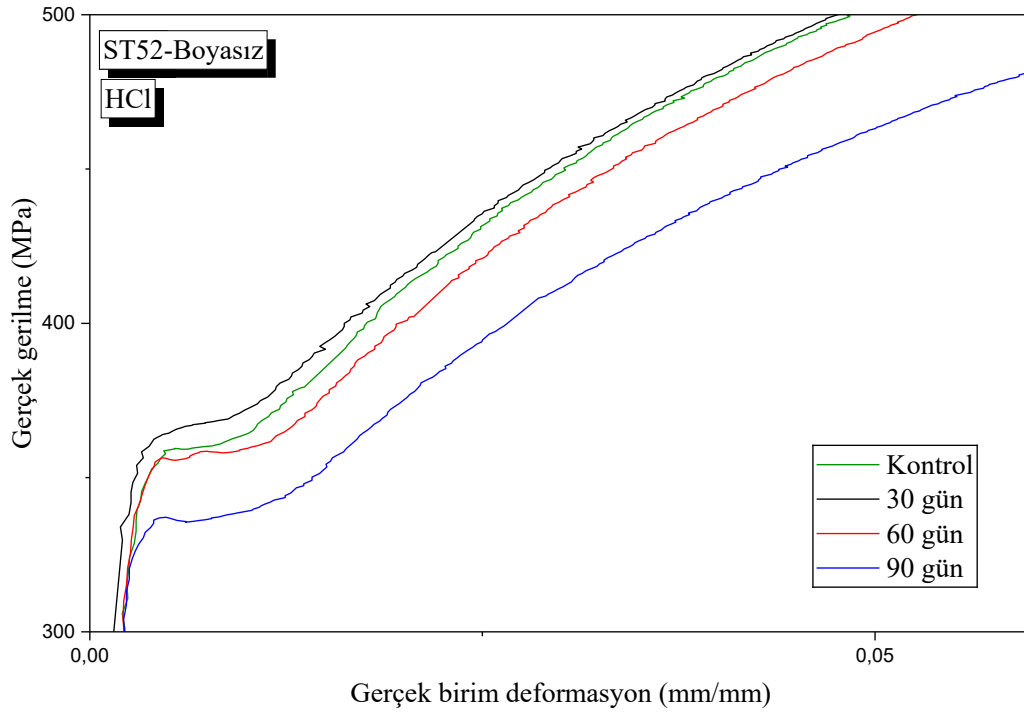
akma noktasının plastik deformasyonun başladığı ilk belirgin gerilme seviyesi olarak değerlendirilebildiği belirtilmektedir (Kang ve ark., 2021; Bruno ve ark., 2023). Bu nedenle bu çalışmada akma gerilmesi değerleri, eğrilerin başlangıç bölgesindeki ilk belirgin akma/sıçrama noktası esas alınarak belirlenmiş ve ilgili değerler gerçek gerilme karşılığı olarak raporlanmıştır.

Şekil 4.32’de boyasız ST37 numunelerinin HCl ortamında kontrol, 30, 60 ve 90 günlük maruziyet koşullarına ait akma bölgeleri ayrıntılı olarak sunulmuştur. Akma gerilmesi değerleri, yukarıda açıklanan ReH yaklaşımı doğrultusunda eğrilerin başlangıç bölümündeki ilk belirgin tepe noktaları esas alınarak belirlenmiştir.



Şekil 4.32. ST37 çeliğinin HCl çözeltisinde boyasız koşulda kontrol, 30, 60 ve 90 günlük maruziyet sonrası akma bölgesine ait gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri

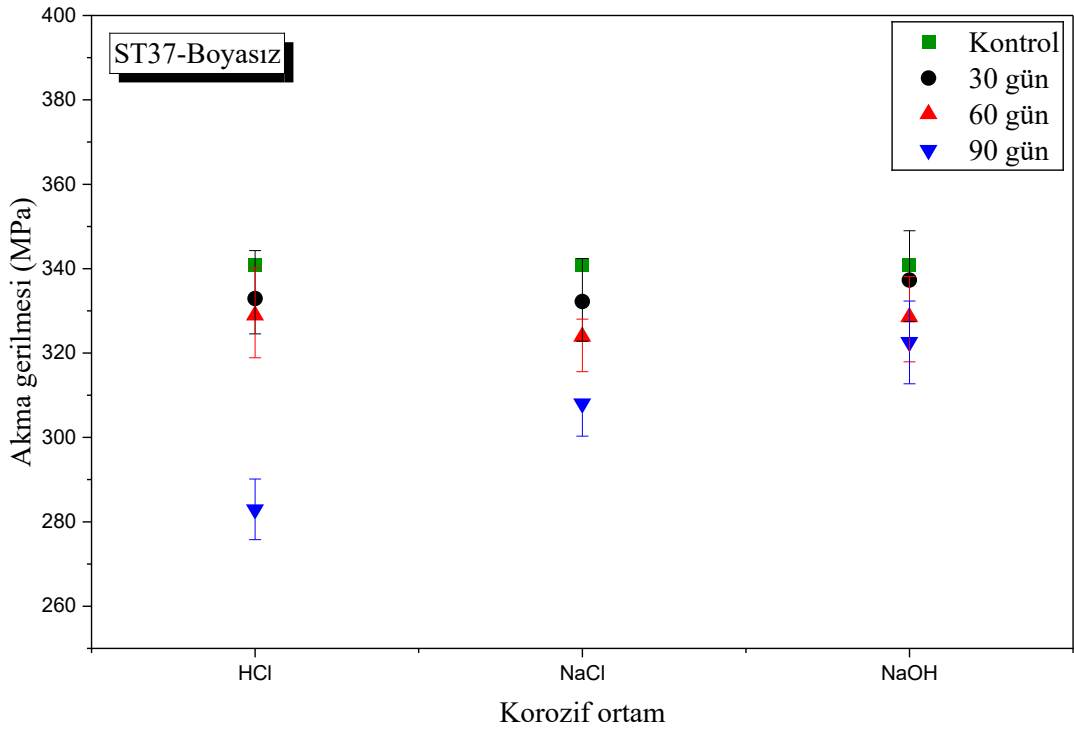
Şekil 4.33’te boyasız ST52 numunelerinin HCl ortamındaki akma bölgeleri gösterilmiştir. ST37 numunelerine kıyasla daha kademeli bir geçiş sergileyen bu eğrilerde akma gerilmesi değerleri, aynı ReH yaklaşımı kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 4.33. ST52 çeliğinin HCl çözeltisinde boyasız koşulda kontrol, 30, 60 ve 90 günlük maruziyet sonrası akma bölgesine ait gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri

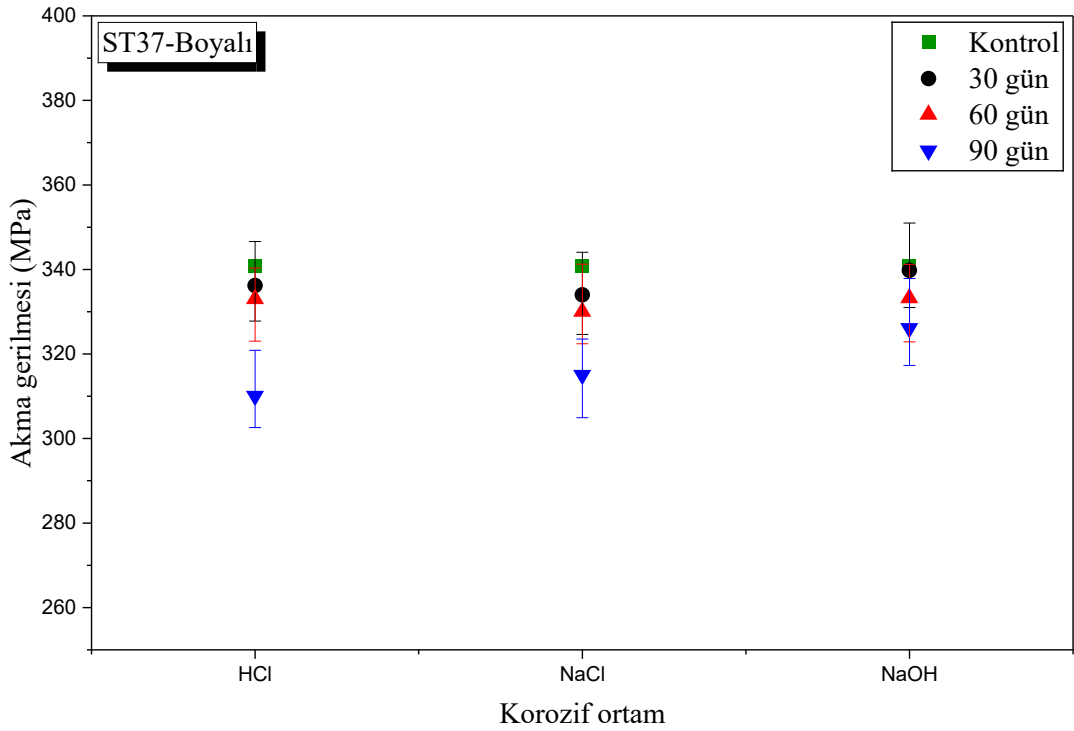
Çalışmada tüm numunelere ait akma gerilmesi değerleri aynı yöntem kullanılarak belirlenmiş ve çözelti türü, maruziyet süresi ve yüzey koşuluna göre karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.34'te boyasız ST37 numunelerinin akma gerilmesi değerleri, ortam türü ve maruziyet süresine göre belirgin farklılıklar göstermiştir. HCl ortamında 30 ve 60 günlük sonuçlar kontrol değerine yakın kalırken, 90 günlük maruziyet sonunda akma gerilmesinde belirgin bir kayıp meydana gelmiştir. NaCl grubunda süre uzadıkça düzenli bir azalma oluşmuş ve en düşük değer 90. günde elde edilmiştir. NaOH çözeltisinde ise değerler kontrol düzeyine daha yakın seyretmiş, diğer ortamlara kıyasla daha sınırlı bir değişim ortaya çıkmıştır. Çekme gerilmesi sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, boyasız ST37 numunelerinde akma davranışındaki değişimin daha belirgin olduğu ve ortam etkisinin $HCl > NaCl > NaOH$ sıralamasını izlediği anlaşılmaktadır.



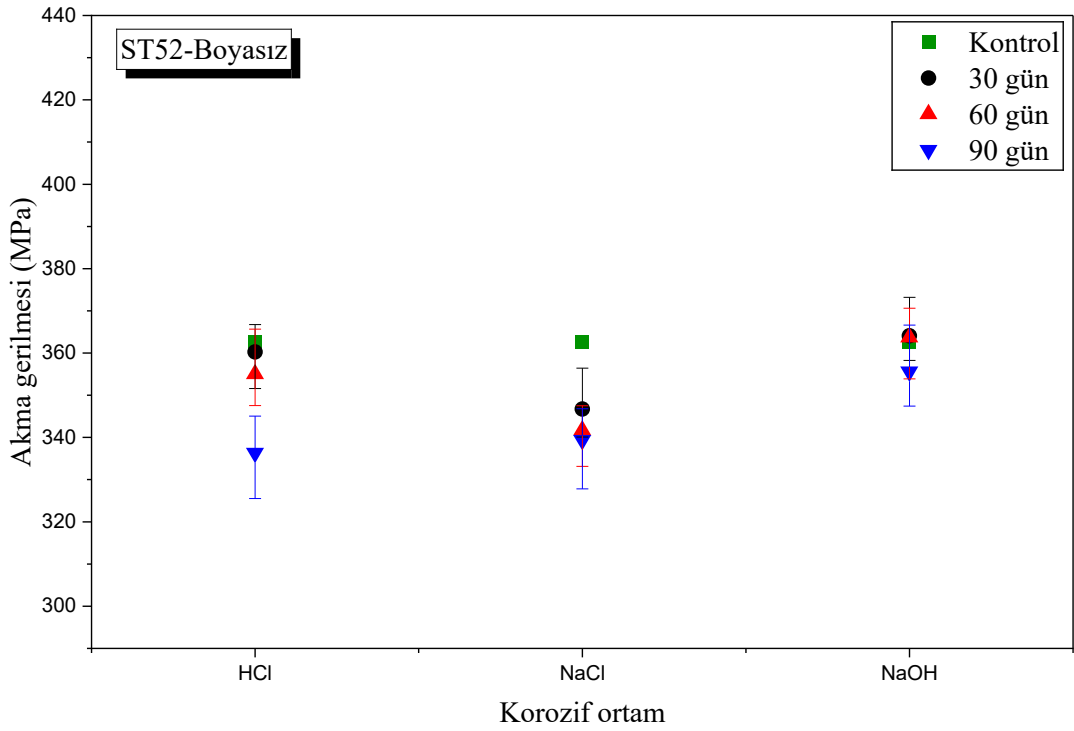
Şekil 4.34. ST37 çeliğinin boyasız numunelerinde farklı korozif çözeltilere maruz kalma süresine bağlı akma gerilmesi değerlerinin değişimi

Şekil 4.35'te ST37 çeliğinin boyalı numunelerine ait akma gerilmesi değerleri incelendiğinde, tüm ortamlarda boyasız numunelere (Şekil 4.34) kıyasla değerlerin genel olarak daha yüksek seviyelerde seyrettiği görülmektedir. HCl çözeltisinde 90 günlük maruziyet sonrası akma gerilmesi değerinde belirgin bir düşüş gözlemlenmekle birlikte, boyasız numunedeki düşüşe kıyasla daha sınırlı kaldığı dikkat çekmektedir. NaCl çözeltisinde de benzer şekilde maruziyet süresine bağlı bir azalma trendi gözlemlenmiş, ancak boyasız numunelere kıyasla değerlerin daha yüksek seviyelerde korunduğu görülmektedir. NaOH çözeltisinde ise hem boyalı hem de boyasız numunelerde değişimin sınırlı kaldığı ve iki yüzey koşulu arasındaki farkın oldukça küçük olduğu dikkat çekmektedir. Bu bulgular, boya uygulamasının akma gerilmesi üzerindeki koruyucu etkisinin özellikle HCl ortamında belirgin olduğunu, NaCl ve NaOH ortamlarında ise bu etkinin giderek azaldığını göstermektedir.



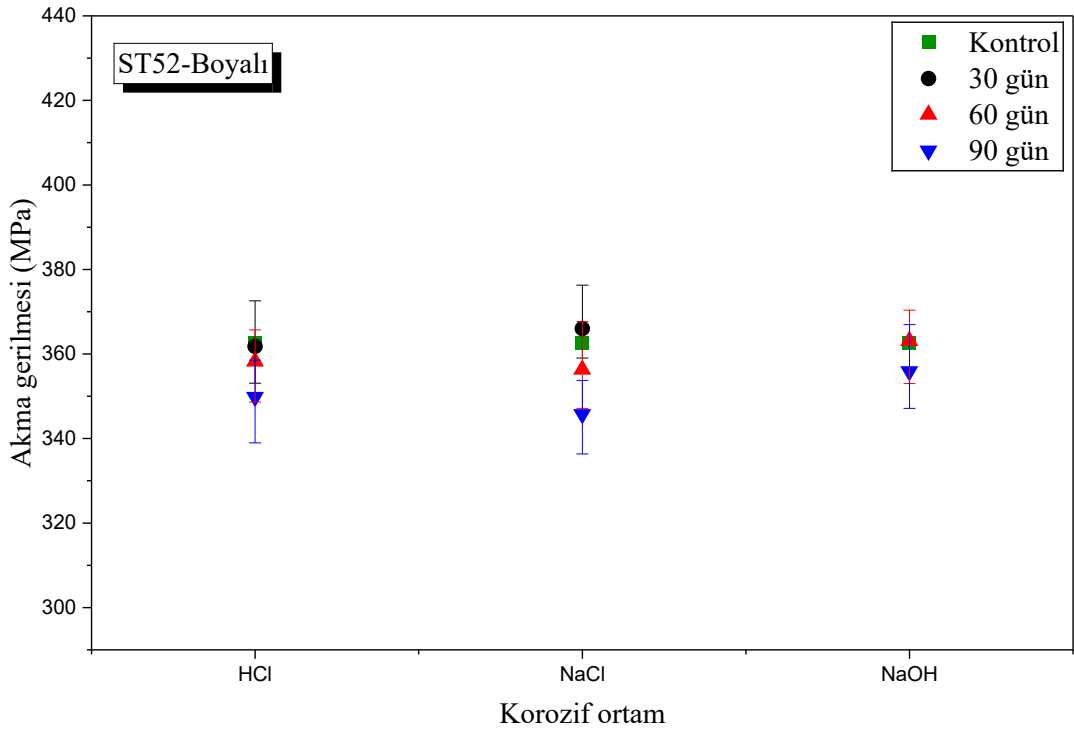
Şekil 4.35. ST37 çeliğinin boyalı numunelerinde farklı korozif çözeltilere maruz kalma süresine bağlı akma gerilmesi değerlerinin değişimi

Şekil 4.36’da ST52 çeliğinin boyasız numunelerine ait akma gerilmesi değerleri incelendiğinde, ortam türü ve maruziyet süresine bağlı farklılıkların ortaya çıktığı görülmektedir. HCl çözeltisinde maruziyet süresinin artmasıyla akma gerilmesi değerlerinde düzenli bir azalma trendi gözlemlenmiş; 90 günlük maruziyet sonrası değer kontrol numunesinin belirgin altına gerilmiştir. NaCl çözeltisinde ise 30 günlük maruziyet sonrası değerde belirgin bir düşüş gözlemlenirken, 60 ve 90 günlük değerlerin birbirine yakın seyrettiği ve azalmanın bu süreden sonra görece durağanlaştığı dikkat çekmektedir. NaOH çözeltisinde tüm maruziyet sürelerindeki değerlerin kontrol numunesine oldukça yakın kaldığı ve belirgin bir değişimin gözlemlenmediği görülmektedir. ST37 boyasız numuneleriyle karşılaştırıldığında (Şekil 4.34), ST52 çeliğinde akma gerilmesindeki düşüşün oransal olarak daha sınırlı kaldığı, ancak ortam etkisinin $HCl > NaCl > NaOH$ sıralamasını koruduğu dikkat çekmektedir.



Şekil 4.36. ST52 çeliğinin boyasız numunelerinde farklı korozif çözeltilere maruz kalma süresine bağlı akma gerilmesi değerlerinin değişimi

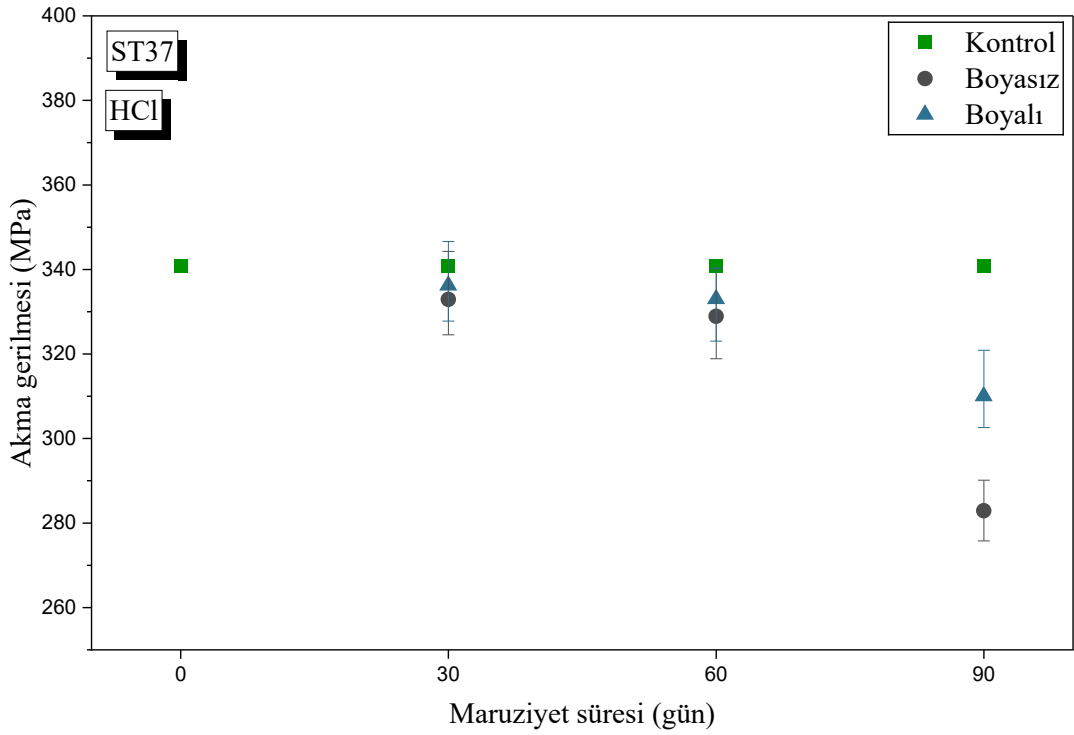
Şekil 4.37’de ST52 çeliğinin boyalı numunelerine ait akma gerilmesi değerleri verilmiştir. Mevcut veriler incelendiğinde, tüm ortamlarda boyasız numunelere (Şekil 4.36) kıyasla akma gerilmesi değerlerinin genel olarak daha yüksek seviyelerde seyrettiği görülmektedir. HCl çözeltisinde 90 günlük maruziyet sonrası değerinde sınırlı düzeyde bir düşüş gözlemlenmekle birlikte, boyasız numuneye kıyasla belirgin biçimde daha yüksek seviyede kaldığı dikkat çekmektedir. NaCl çözeltisinde boyasız numunelerde 30 günde gözlemlenen ani düşüşün boyalı numunelerde engellendiği, ancak 90 günlük maruziyet sonrasında değerlerin kontrol numunesinin altına gerildiği görülmektedir. NaOH çözeltisinde ise her iki yüzey koşulunda da değişimin oldukça sınırlı kaldığı ve boya uygulamasının bu ortamda belirleyici bir katkı sağlamadığı dikkat çekmektedir. Bu bulgular, boya uygulamasının ST52 çeliğinin akma davranışı üzerindeki koruyucu etkisinin özellikle HCl ortamında belirgin olduğunu, NaOH ortamında ise bu etkinin oldukça sınırlı kaldığını düşündürmektedir.



Şekil 4.37. ST52 çeliğinin boyalı numunelerinde farklı korozif çözeltilere maruz kalma süresine bağlı akma gerilmesi değerlerinin değişimi

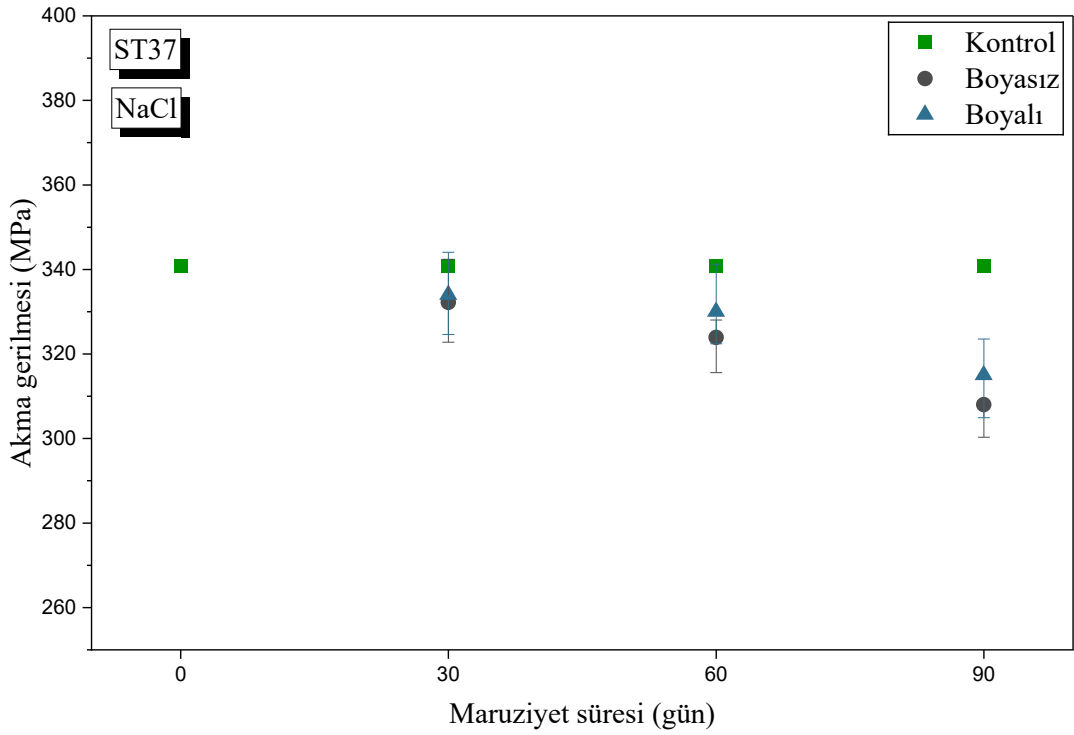
ST37 ve ST52 çeliklerinde akma gerilmesi değerlerinin boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre karşılaştırılması, boya uygulamasının plastik deformasyona başlama davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Bu kapsamda her bir korozif çözelti için boyalı ve boyasız numunelerin maruziyet süresine bağlı akma gerilmesi değerleri karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.38’de ST37 çeliğinin HCl çözeltisindeki boyalı ve boyasız numunelerine ait akma gerilmesi değerleri karşılaştırıldığında, 30 ve 60 günlük maruziyette her iki yüzey koşuluna ait değerlerin birbirine yakın seyrettiği görülmektedir. Buna karşılık 90 günlük maruziyet sonrasında boyasız numunede akma gerilmesinde çok belirgin bir düşüş gözlemlenirken, boyalı numunenin daha yüksek seviyesini koruduğu dikkat çekmektedir. Çekme gerilmesi karşılaştırmasıyla (Şekil 4.26) birlikte değerlendirildiğinde, HCl çözeltisinin uzun süreli maruziyette akma davranışını nihai çekme dayanımına kıyasla çok daha belirgin biçimde olumsuz etkilediği, boya uygulamasının ise her iki parametre üzerinde de koruyucu etki göstermekle birlikte bu etkinin akma gerilmesi üzerinde görece daha sınırlı kaldığı görülmektedir.



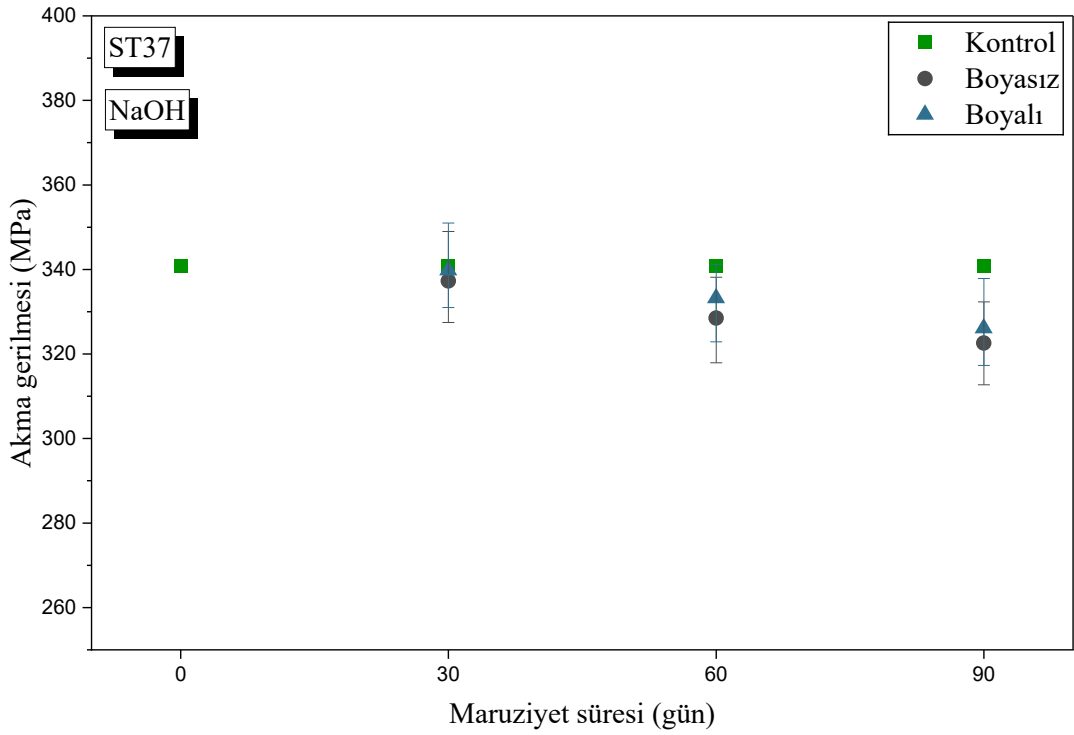
Şekil 4.38. ST37 çeliğinin HCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre akma gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi

Şekil 4.39’da ST37 çeliğinin NaCl çözeltisindeki boyalı ve boyasız numunelerine ait akma gerilmesi değerleri karşılaştırıldığında, her iki yüzey koşulunda da maruziyet süresinin artmasıyla değerlerin kontrol numunesinin altına gerildiği ve düzenli bir azalma trendinin olduğu görülmektedir. Boyalı numunelerin tüm maruziyet sürelerinde boyasız numunelere kıyasla daha yüksek değerler sergilediği, ancak iki yüzey koşulu arasındaki farkın HCl çözeltisindeki karşılaştırmaya (Şekil 4.38) kıyasla belirgin biçimde daha sınırlı kaldığı dikkat çekmektedir. Bu durum, NaCl çözeltisinde boya uygulamasının akma davranışı üzerinde sınırlı düzeyde koruyucu etki gösterdiğini, ancak bu etkinin HCl ortamındaki kadar belirleyici olmadığını düşündürmektedir.



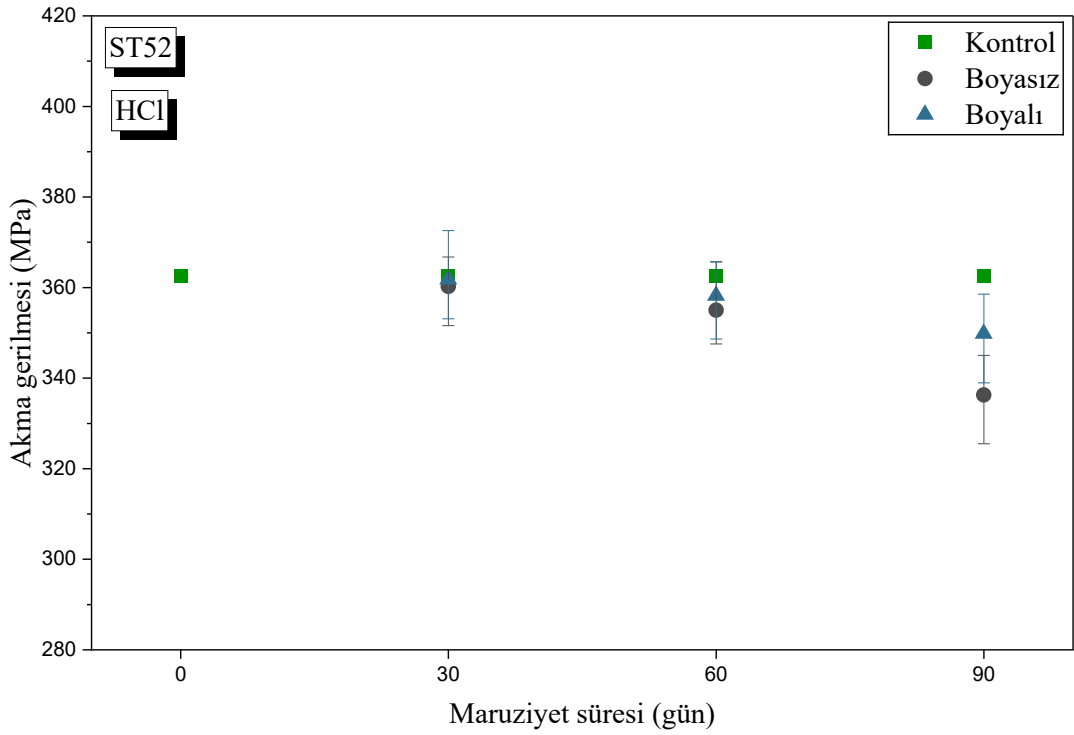
Şekil 4.39. ST37 çeliğinin NaCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre akma gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi

Şekil 4.40'ta ST37 çeliğinin NaOH çözeltisindeki boyalı ve boyasız numunelerine ait akma gerilmesi değerleri verilmiştir. Tüm maruziyet sürelerinde her iki yüzey koşuluna ait değerlerin birbirine oldukça yakın seyrettiği görülmektedir. Maruziyet süresinin artmasıyla değerlerde sınırlı düzeyde bir azalma gözlemlenmekle birlikte bu düşüşün HCl ve NaCl çözeltilerine kıyasla (Şekil 4.38 ve 4.39) çok daha az belirgin kaldığı dikkat çekmektedir. Boyalı ve boyasız numuneler arasındaki farkın ise tüm maruziyet sürelerinde oldukça sınırlı düzeyde kaldığı ve boya uygulamasının bu ortamda akma davranışı üzerinde belirleyici bir koruyucu katkı sağlamadığı görülmektedir. Bu durum, NaOH çözeltisinin pasifleştirici karakterinin boya varlığı ya da yokluğundan bağımsız olarak akma davranışını büyük ölçüde koruduğunu düşündürmektedir.



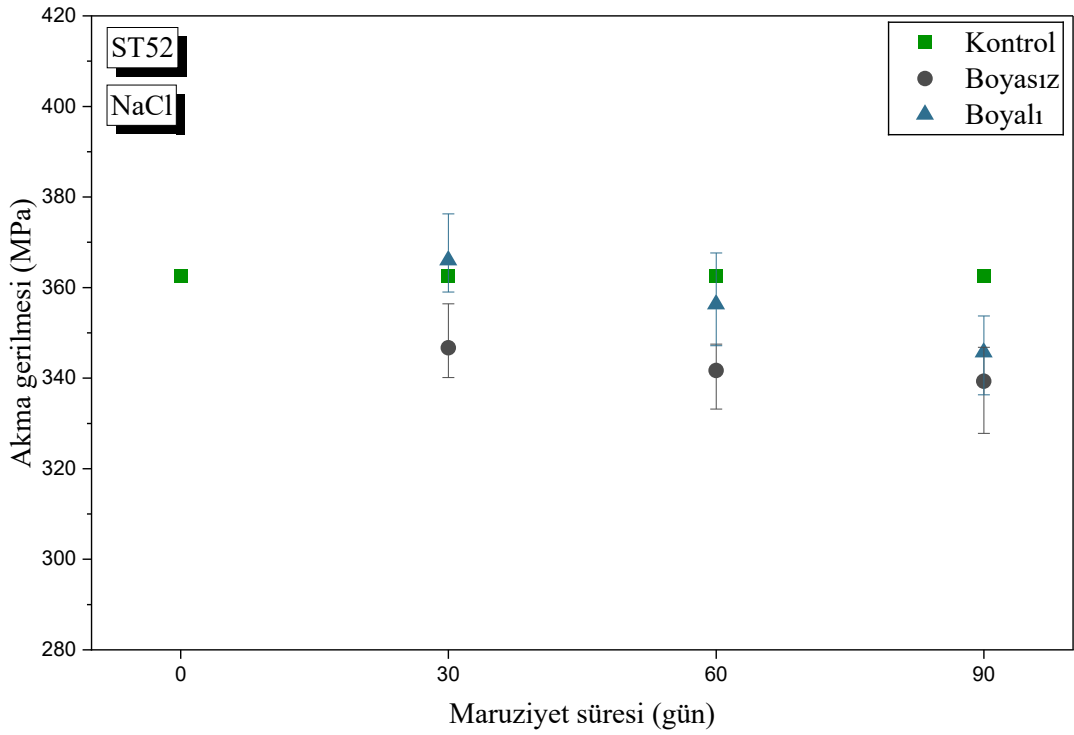
Şekil 4.40. ST37 çeliğinin NaOH çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre akma gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi

Şekil 4.41’de ST52 çeliğinin HCl çözeltisindeki boyalı ve boyasız numunelerine ait akma gerilmesi değerleri karşılaştırıldığında, 30 ve 60 günlük maruziyette her iki yüzey koşuluna ait değerlerin birbirine yakın seyrettiği görülmektedir. 90 günlük maruziyet sonrasında ise boyasız numunede belirgin bir düşüş gözlemlenirken boyalı numunenin daha yüksek seviyesini koruduğu dikkat çekmektedir. ST37 çeliğiyle karşılaştırıldığında (Şekil 4.38), ST52 çeliğinde hem boyalı hem de boyasız numunelerde akma gerilmesindeki düşüşün oransal olarak daha sınırlı kaldığı, ancak boya uygulamasının koruyucu etkisini koruduğu görülmektedir. Bu durum, ST52 çeliğinin daha yüksek başlangıç mukavemeti ve farklı mikroyapısal karakteristiklerinin HCl ortamındaki akma davranışını görece daha dirençli kıldığını düşündürmektedir.



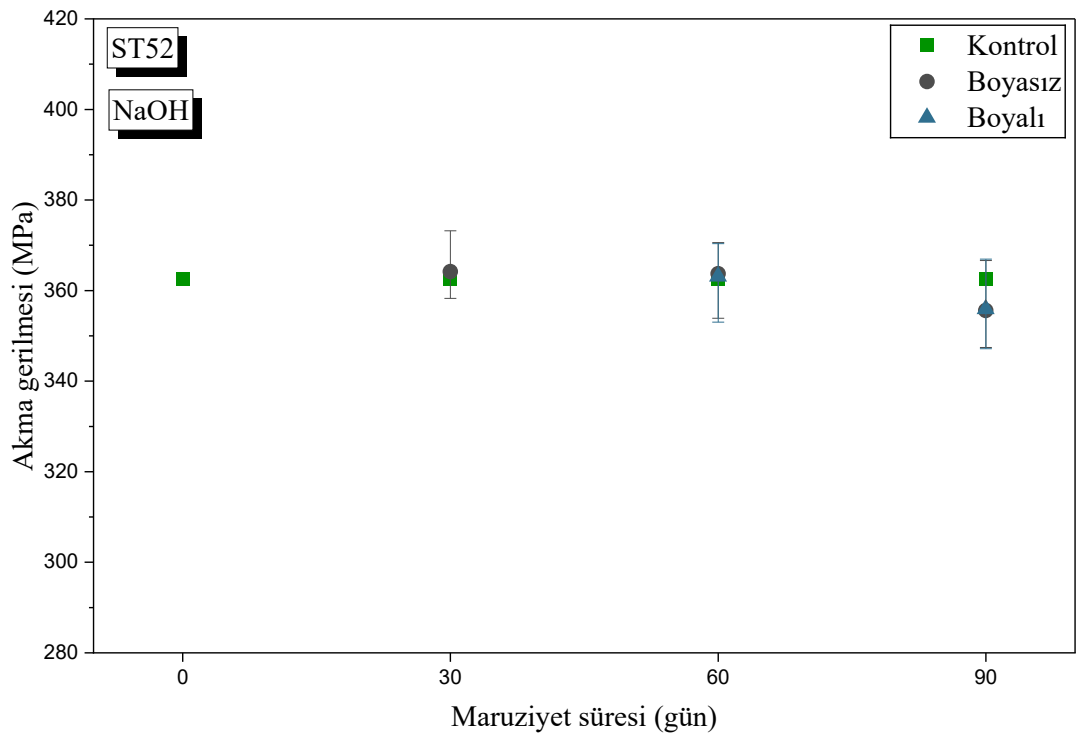
Şekil 4.41. ST52 çeliğinin HCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre akma gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi

Şekil 4.42’de ST52 çeliğinin NaCl çözeltisindeki boyalı ve boyasız numunelerine ait akma gerilmesi değerleri karşılaştırıldığında, boyasız numunelerde 30 günlük maruziyette kontrole kıyasla belirgin bir düşüş gözlemlendiği, ardından 60 ve 90 günlük değerlerin birbirine yakın seyrettiği ve azalmanın görece durağanlaştığı dikkat çekmektedir. Boyalı numunelerde ise 30 günlük değer kontrol numunesine oldukça yakın seyrettiği, maruziyet süresi uzadıkça değerlerin kademeli olarak düştüğü görülmektedir. Bu durum, klorür iyonlarının boya tabakası üzerindeki zamana bağlı etkisinin boyasız yüzeye kıyasla farklı bir davranış profili oluşturduğunu düşündürmektedir. HCl çözeltisiyle karşılaştırıldığında (Şekil 4.41), 90 günlük maruziyet sonrasında boyalı ve boyasız numuneler arasındaki farkın daha sınırlı kaldığı ve boya uygulamasının NaCl ortamında akma davranışı üzerindeki koruyucu etkisinin görece azaldığı söylenebilir.



Şekil 4.42. ST52 çeliğinin NaCl çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre akma gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi

Şekil 4.43'te ST52 çeliğinin NaOH çözeltisindeki boyalı ve boyasız numunelerine ait akma gerilmesi değerleri karşılaştırılmıştır. Boyalı numunelere ait 30 günlük veri, deneysel uygulama hatası nedeniyle değerlendirme dışı bırakılmıştır. Mevcut veriler incelendiğinde, boyasız numunelerin tüm maruziyet sürelerinde kontrol numunesine oldukça yakın değerler sergilediği ve belirgin bir azalma trendinin gözlemlenmediği görülmektedir. Boyalı numunelerde de 60 ve 90 günlük değerlerin boyasız numunelerle neredeyse üst üste seyrettiği dikkat çekmektedir. Bu durum ST37 çeliğinin NaOH ortamındaki akma davranışıyla (Şekil 4.40) tam uyum içinde olup NaOH çözeltisinin her iki çelik türünde de boya varlığı ya da yokluğundan bağımsız olarak akma davranışını büyük ölçüde koruduğunu düşündürmektedir. Tüm çekme ve akma gerilmesi grafikleri bir bütün olarak değerlendirildiğinde, özellikle boyasız numunelerde korozif ortamların mekanik davranış üzerindeki olumsuz etkisinin genel olarak $HCl > NaCl > NaOH$ sıralamasını izlediği ve boya uygulamasının bu etkiyi özellikle HCl ortamında belirgin biçimde sınırladığı görülmektedir.



Şekil 4.43. ST52 çeliğinin NaOH çözeltisindeki numunelerinde boyalı ve boyasız yüzey koşullarına göre akma gerilmesi değerlerinin maruz kalma süresine bağlı değişimi.

Gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri ile akma gerilmesi karşılaştırmalarının sayısal olarak özetlenebilmesi amacıyla, grafiklerde kullanılan seçilmiş numunelere ait kontrol ve 90 günlük çekme ve akma gerilmesi değerleri Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. ST37 ve ST52 numunelerine ait kontrol ve 90 gün maruziyet sonrası çekme ve akma gerilmesi değerleri

Deney koşulu	ST37 çekme gerilmesi (MPa)	ST37 akma gerilmesi (MPa)	ST52 çekme gerilmesi (MPa)	ST52 akma gerilmesi (MPa)
Kontrol	491.1	340.9	622.7	362.6
HCl boyasız	458.3	282.9	586.9	336.3
HCl boyalı	489.5	310.0	611.2	349.8
NaCl boyasız	467.1	308.0	594.6	339.3
NaCl boyalı	478.0	315.0	605.4	345.7
NaOH boyasız	488.2	322.6	618.5	355.6
NaOH boyalı	487.5	326.1	618.7	355.9

Çekme testi bulguları genel olarak değerlendirildiğinde, ST37 ve ST52 çeliklerinde korozif çözelti türü, maruziyet süresi ve yüzey koşulunun mekanik davranış üzerinde birlikte etkili olduğu görülmektedir. Gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri, çekme gerilmesi ve akma gerilmesi sonuçları birlikte incelendiğinde, özellikle boyasız numunelerde HCl ve NaCl çözeltilerinin mekanik özelliklerde daha belirgin

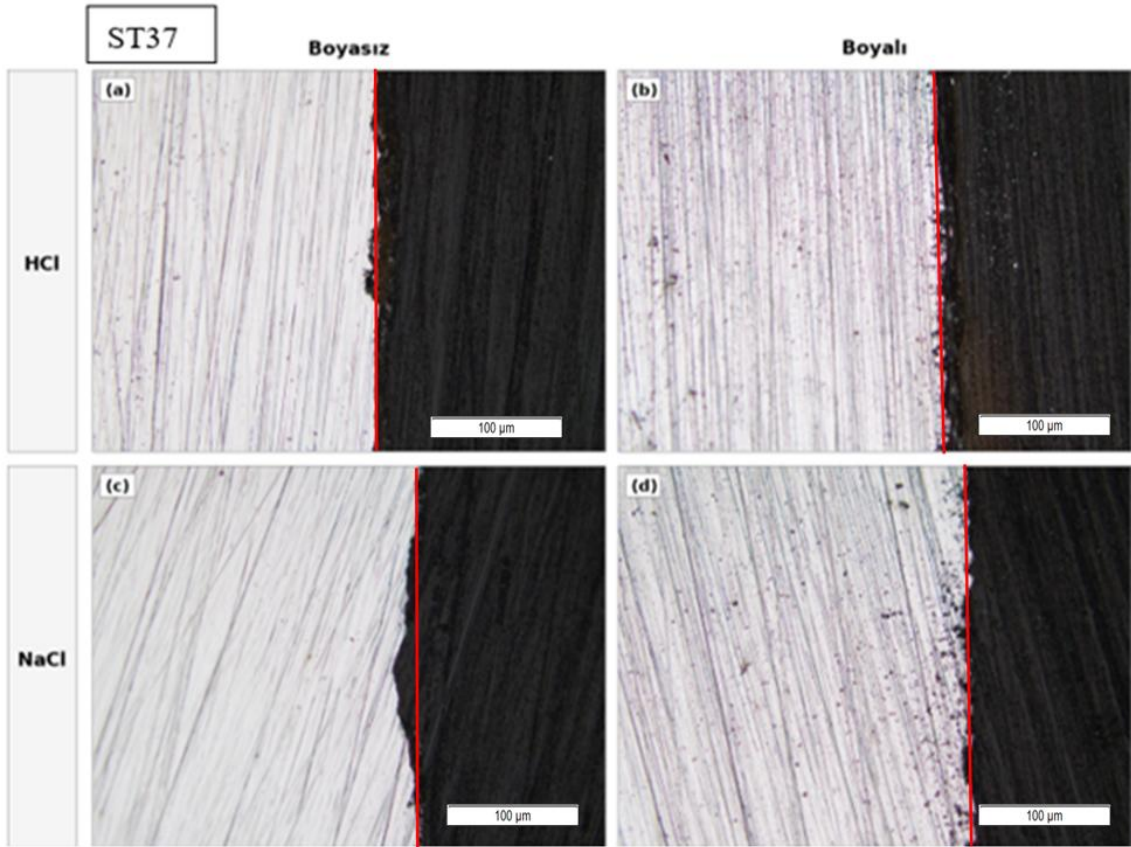
değişimlere neden olduğu belirlenmiştir. HCl çözeltisinde asidik etkinin metal yüzeyiyle doğrudan temas ederek yüzey bütünlüğünü zayıflatmasının, NaCl çözeltisinde ise klorür iyonlarının lokal yüzey bozulmalarını artırmasının bu değişimlerde etkili olmuş olabileceği düşünülmektedir. Buna karşılık NaOH çözeltisinde elde edilen değerler genel olarak kontrol numunesine daha yakın seyretmiş, bu durum bazik çözeltinin çekme davranışı üzerindeki etkisinin HCl ve NaCl çözeltilerine kıyasla daha sınırlı kaldığını düşündürmüştür. ST52 çeliğinin çekme gerilmesi ve akma gerilmesi değerleri genel olarak ST37 çeliğine göre daha yüksek seviyelerde bulunmuştur. Bu sonuç, ST52 çeliğinin başlangıçtaki daha yüksek mekanik dayanım özellikleriyle uyumludur. Bununla birlikte, her iki çelik türünde de uzun süreli korozif çözelti maruziyeti sonrasında kontrol numunesine göre farklı düzeylerde azalma ve dalgalanmalar meydana gelmiştir.

Bu sonuçlar, korozyonun çeliklerde yalnızca yüzey görünümünü veya kütle kaybını etkilemediğini; kesit kaybı, lokal yüzey bozulmaları, çukurcuk oluşumu ve mikroyapısal hasar mekanizmaları yoluyla çekme dayanımı, akma davranışı ve sertlik gibi mekanik özelliklerde azalmaya neden olabildiğini bildiren literatürle genel olarak uyumludur (Apostolopoulos ve Michalopoulos, 2007; Li ve Yang, 2021). %3.5 NaCl çözeltisine maruz kalan yapı çeliğinde yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve Vickers sertlik değerlerinde belirgin azalma meydana geldiği rapor edilmiş olup, bu durum klorürlü ortamların mekanik performans üzerindeki olumsuz etkisini desteklemektedir (Buruiană ve ark., 2024). Farklı kimyasal ortamlara maruz bırakılan çeliklerde özellikle asidik ortamların mekanik özellikler üzerinde daha yıpratıcı etki oluşturduğu, bazik ortamların ise bazı mekanik özelliklerde azalmaya neden olabildiği belirtilmiştir (Adın, 2016). Asidik klorürlü ortamların kütle kaybı ve yüzey çözünmesi açısından bazik ortamlara kıyasla daha agresif davranış gösterebildiği de bildirilmektedir (Menteş, 2014). Bu çalışmada HCl ve NaCl çözeltilerinde daha belirgin mekanik değişimlerin gözlenmesi, söz konusu literatür bulgularıyla benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte, bazı grafiklerde 30, 60 ve 90 gün değerleri arasında doğrusal olmayan dalgalanmalar elde edilmiştir. Bu farklılıkların seçilen temsili numuneler, lokal korozyon dağılımı, yüzey koşulları, boya tabakasının yerel bütünlüğü ve akma gerilmesinin eğri üzerinden belirlenmesine bağlı değişkenliklerle ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle çekme testi bulgularının yalnızca maruziyet süresine bağlı tek yönlü bir azalma olarak değil; çözelti türü, malzeme türü, yüzey koşulu ve lokal yüzey etkileri birlikte dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

4.6. Optik Yüzey/Kesit İnceleme Bulguları

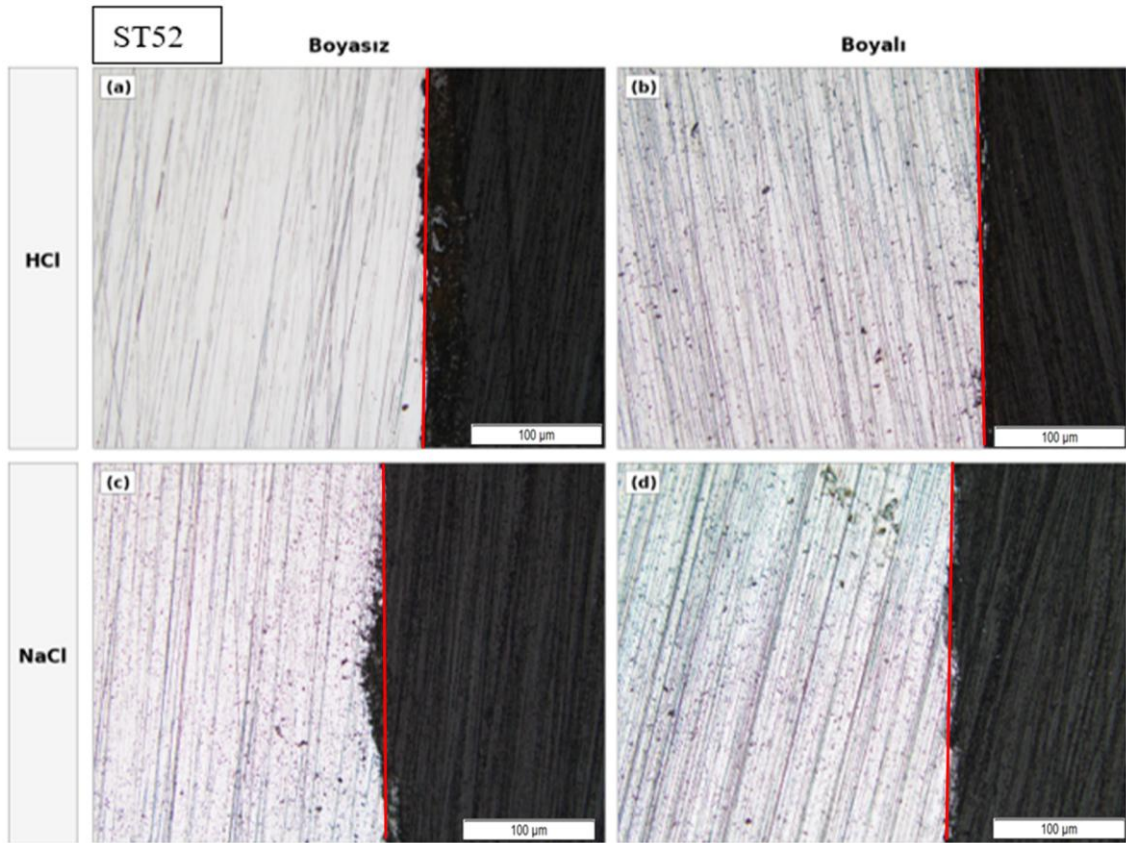
Bu bölümde, ST37 ve ST52 çelik numunelerinin koroziif çözeltilere maruziyet sonrası yüzey/kesit görünümüleri optik inceleme bulguları üzerinden değeriendirilmiştir. Optik incelemeler, korozyon etkisinin numune yüzeyinde ve yüzey/sınır hattında oluşturduğu görsel değışimleri destekleyici veri olarak yorumlamak amacıyla yapılmıştır. Bu kapsamda özellikle HCl ve NaCl çözeltilerinde 90 gün maruziyet sonrası elde edilen görüntüler üzerinden yüzey düzensizlikleri, koyu bölgeler, çizgisel izler, boya tabakasındaki yerel bozulmalar ve hasar görünümüleri değeriendirilmiştir. NaOH çözeltisine ait numunelerde ise mekanik test sonuçlarında bu ortamın yüzey bozunması üzerindeki etkisinin oldukça sınırlı kaldığı görüldüğünden, optik inceleme bu ortam için ayrıca gerçekleştirilmemiştir.

Şekil 4.44'te kesit sınır hattı incelendiğinde, HCl çözeltisinde boyasız numunede (a) sınır hattının belirgin biçimde düzensiz bir morfoloji sergilediğı ve yüzey bütünlüğünün bozulduğuna işaret eden lokal renk değışimleri ile girintili bölgelerin gözlemlendiğı görülmektedir. HCl boyalı numunede (b) sınır hattının daha düzenli seyrettiğı, yüzey morfolojisinin büyük ölçüde korunduğı dikkat çekmektedir. NaCl boyasız numunede (c) sınır hattı düzensizliğinin (a)'ya kıyasla daha sınırlı kaldığı, NaCl boyalı numunede (d) ise dört görüntü arasında en düzenli sınır hattı morfolojisinin gözlemlendiğı görülmektedir. Bu bulgular mekanik test sonuçlarını destekler nitelikte olmakla birlikte, yüzey hasarının daha ayrıntılı karakterizasyonu için daha yüksek çözünürlüklü yüzey analiz yöntemlerinin kullanılması gerektiğı değeriendirilmektedir.



Şekil 4.44. ST37 çeliğinin HCl ve NaCl çözeltilerinde 90 gün maruziyet sonrası boyalı ve boyasız koşullardaki seçilmiş optik yüzey/kesit görüntüleri: (a) HCl-boyasız, (b) HCl-boyalı, (c) NaCl-boyasız, (d) NaCl-boyalı.

Şekil 4.45’te kesit sınır hattı incelendiğinde, HCl çözeltisinde boyasız numunede (a) sınır hattı yakınında renk değişimi ve lokal düzensizliklerin gözlemlendiği, HCl boyalı numunede (b) ise sınır hattının daha düzenli bir morfoloji sergilediği dikkat çekmektedir. NaCl boyasız numunede (c) sınır hattı boyunca belirgin düzensizliklerin ve lokal birikim izlerinin gözlemlendiği, NaCl boyalı numunede (d) ise sınır hattı morfolojisinin büyük ölçüde korunduğu görülmektedir. Bu bulgular, ST37 çeliğinde elde edilen optik inceleme sonuçlarıyla (Şekil 4.44) genel olarak uyum içinde olup mekanik test sonuçlarını destekler nitelikte olmakla birlikte, yüzey hasarının daha ayrıntılı karakterizasyonu için daha yüksek çözünürlüklü yüzey analiz yöntemlerinin kullanılması gerektiği değerlendirilmektedir.



Şekil 4.45. ST52 çeliğinin HCl ve NaCl çözeltilerinde 90 gün maruziyet sonrası boyalı ve boyasız koşullardaki seçilmiş optik yüzey/kesit görüntüleri: (a) HCl-boyasız, (b) HCl-boyalı, (c) NaCl-boyasız, (d) NaCl-boyalı.

Karbon çeliklerinde yüzey morfolojisi, yüzey kusurları ve lokal bozulmaların korozyon davranışı üzerinde belirleyici olduğu ve bu tür yüzey değişimlerinin korozyon değerlendirmelerinde önemli bir gösterge olarak ele alınabileceği bildirilmektedir (Dwivedi ve ark., 2017). %3.5 NaCl çözeltisinde S235/S235JR yapı çeliği üzerinde yapılan bir çalışmada, maruziyet sonrasında optik mikroskopi, SEM, yüzey pürüzlülüğü ve Vickers sertlik analizleriyle yüzey ve mekanik özelliklerdeki değişimlerin değerlendirildiği bildirilmiştir (Buruiană ve ark., 2024). Bu çalışmada %3.5 NaCl çözeltisinde özellikle boyasız numunelerde gözlenen sınır hattı düzensizlikleri ve yerel koyu bölgeler, klorürlü ortamların lokal yüzey bozulmalarını artırabildiğini gösteren literatür bulgularıyla uyumludur.

HCl çözeltisinde gözlenen belirgin sınır hattı değişimleri de asidik ortamların karbon çeliği üzerindeki agresif etkisiyle ilişkilendirilebilir. HCl ortamında karbon çeliğinin korozyon davranışını inceleyen çalışmalarda, korozyon hızının HCl molaritesi, sıcaklık ve maruziyet süresi gibi değişkenlerden etkilendiği; yüzey morfolojisinin ise SEM/EDX gibi yöntemlerle değerlendirildiği belirtilmektedir (Alzahrani ve ark., 2021). Boyalı numunelerde yüzey/sınır hattındaki bozulmaların bazı bölgelerde daha sınırlı

görünmesi, kaplama tabakasının koroziif çözeltinin metal yüzeyiyle doğrudan temasını azaltan bariyer etkisiyle açıklanabilir. Organik kaplamaların çelik yüzeylerde korozyon koruması sağlamasında bariyer etkisinin önemli olduğu; ancak kaplama kusurları, iyon geçişi, yapışma kaybı ve lokal delaminasyon gibi mekanizmaların uzun süreli maruziyette koruyuculuğu azaltabileceği bildirilmektedir (Lyon ve ark., 2017; Song ve Feng, 2020). Bu nedenle bu çalışmada boyalı numunelerde değişimlerin tamamen ortadan kalkmaması, boya tabakasının koruyucu etkisine rağmen yerel kaplama farklılıkları veya uzun süreli çözelti maruziyeti sonucunda sınırlı yüzey bozulmalarının gelişebilmesiyle ilişkilendirilebilir. Optik inceleme bulguları, kütle değişimi, korozyon hızı, sertlik ve çekme testi sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, HCl ve NaCl çözeltilerinin özellikle boyasız numunelerde daha belirgin yüzeysel ve mekanik değişimlere yol açtığı yönündeki genel bulguları desteklemektedir.

4.7. Bulguların Genel Değerlendirmesi

Bulgular genel olarak değerlendirildiğinde, ST37 ve ST52 çeliklerinin koroziif çözeltilere verdiği yanıtın yalnızca çözelti türüne değil, aynı zamanda maruziyet süresine, yüzey koşuluna ve malzeme türüne bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Kütle değişimi ve korozyon hızı bulguları, özellikle boyasız numunelerde koroziif ortam etkisinin daha belirgin olduğunu göstermiştir. HCl çözeltisinin asidik karakteri nedeniyle metal yüzeyi üzerinde daha agresif bir etki oluşturduğu, NaCl çözeltisinin ise klorür iyonlarına bağlı lokal yüzey bozulmaları ve düzensizliklerle ilişkili olduğu değerlendirilmiştir. Tuz püskürtme ortamında yapılan güncel çalışmalarda, çelik yüzeylerinde korozyon morfolojisinin başlangıç, çukurcuk baskın dönem ve daha yaygın korozyon evreleri şeklinde gelişebildiği; lokal korozyon ve yüzey morfolojisi değişimlerinin çeliğin servis davranışı açısından önemli olduğu bildirilmektedir (Cheng ve ark., 2025).

Sertlik ve çekme testi sonuçları, koroziif çözelti maruziyetinin yalnızca yüzeysel değişimlerle sınırlı kalmadığını, mekanik davranış üzerinde de etkili olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle boyasız numunelerde bazı koşullarda sertlik, çekme gerilmesi ve akma gerilmesi değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir. Korozyon hasarına uğramış yüksek performanslı çeliklerde yapılan deneysel çalışmalarda, korozyon derecesine bağlı olarak artık mekanik özelliklerin değiştiği, korozyon ağırlık kaybı ile mekanik özellikler arasında ilişki kurulabildiği ve pitting/lokal korozyonun deformasyon davranışı üzerinde etkili olduğu belirtilmektedir (Chen ve ark., 2023). Benzer şekilde, korozyona uğramış düşük alaşımlı yapı çeliklerinde yapılan deneysel çalışmalarda, korozyon sonrası akma

dayanımı, nihai dayanım, elastisite modülü ve süneklik gibi mekanik özelliklerin değişebildiği; ayrıca yüzey morfolojisindeki bozulmaların mekanik davranışla birlikte değerlendirilmesi gerektiği bildirilmektedir (Chen ve ark., 2024). Bu nedenle çalışmada özellikle HCl ve NaCl çözeltilerinde gözlenen mekanik değişimler, korozyonun yüzey hasarı ve kesit etkisiyle birlikte mekanik performansı değiştirebildiğini gösteren güncel literatürle uyumludur.

Boya uygulaması genel olarak korozif çözelti ile metal yüzeyi arasındaki doğrudan teması sınırlandırarak korozyon etkisini azaltan bir bariyer görevi görmüştür. Bununla birlikte, boyalı numunelerde de bazı koşullarda kütle değişimi, sertlik, çekme davranışı ve optik yüzey görünümünde farklılıkların devam etmesi, boya uygulamasının koruyucu etkisinin mutlak olmadığını göstermektedir. Organik kaplamalı çeliklerle ilgili güncel çalışmalarda, kaplama sistemlerinin metal yüzeyi dış ortamdan ayıran bariyer tabakalar olarak görev yaptığı; ancak kaplama homojenliği, gözeneklilik ve yüzeydeki yerel farklılıkların korozyon direncini etkileyebildiği belirtilmektedir (Watkins ve ark., 2024). Polimer/epoksi esaslı kompozit kaplamalara ilişkin güncel derlemelerde de kaplamaların korozif iyon geçişini sınırlandıran fiziksel bariyer etkisinin korozyon korumasında temel mekanizmalardan biri olduğu vurgulanmaktadır (Saikia ve ark., 2025). Bu nedenle bu çalışmada boyalı numunelerde gözlenen sınırlı değişimler, kaplama tabakasının yerel bütünlüğü, olası yüzey süreksizlikleri ve uzun süreli çözelti maruziyeti ile ilişkilendirilebilir.

Sonuç olarak, bu bölümde elde edilen kütle değişimi, korozyon hızı, pH değişimi, sertlik, çekme testi ve optik yüzey/kesit inceleme bulguları birlikte değerlendirildiğinde, HCl ve NaCl çözeltilerinin özellikle boyasız ST37 ve ST52 numunelerinde daha belirgin yüzeysel ve mekanik değişimlere yol açtığı görülmüştür. NaOH çözeltisinin etkisi ise genel olarak daha sınırlı kalmıştır. ST52 çeliği başlangıçta ST37 çeliğine göre daha yüksek mekanik dayanım göstermesine rağmen, uzun süreli korozif çözelti maruziyetinden etkilenmiştir. Bu bulgular, korozif ortamlarda çelik malzemelerin performansının yalnızca tek bir parametreyle değil; korozyon davranışı, mekanik özellikler, yüzey koşulu ve optik inceleme bulgularının birlikte değerlendirilmesiyle daha doğru yorumlanabileceğini göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, ST37 ve ST52 çeliklerinin farklı koroziif çözeltilerdeki korozyon davranışları ile bu çözeltilerin mekanik özellikler ve yüzey görünümü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda boyalı ve boyasız numuneler HCl, NaCl ve NaOH çözeltilerinde 30, 60 ve 90 gün süreyle bekletilmiş; maruziyet sonrasında kütle değişimi, korozyon hızı, çözelti pH değişimi, Vickers sertlik değerleri, çekme testi sonuçları ve optik kesit görüntüleri birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda ulaşılan başlıca sonuçlar ve gelecek çalışmalar için öneriler aşağıda sunulmuştur.

5.1. Sonuçlar

1. Koroziif ortam türü, maruziyet süresi, malzeme türü ve yüzey koşulunun ST37 ve ST52 çeliklerinin korozyon davranışı ile mekanik özellikleri üzerinde birlikte etkili olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, korozyon davranışının yalnızca tek bir deney parametresi üzerinden açıklanamayacağını göstermiştir.

2. Boyasız numunelerde en yüksek kütle kaybı ve korozyon hızı değerleri HCl ortamında elde edilmiştir. Doksan günlük maruziyet sonunda HCl ortamındaki ortalama kütle kaybı ST37 çeliğinde 0.8133 g, ST52 çeliğinde ise 1.0292 g olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, kullanılan deney koşullarında HCl çözeltisinin her iki çelik türü üzerinde de en agresif ortam olduğunu göstermiştir.

3. NaCl ortamında elde edilen kütle kaybı değerleri HCl ortamına göre daha düşük kalmakla birlikte maruziyet süresinin artmasıyla yükselmiştir. Doksan gün sonunda NaCl ortamındaki ortalama kütle kaybı ST37 çeliğinde 0.2292 g, ST52 çeliğinde ise 0.3315 g olarak ölçülmüştür. Bu davranış, klorürlü ortamın maruziyet süresi boyunca devam eden yüzey bozunmasına neden olabildiğini göstermiştir.

4. NaOH ortamında kütle değişimi ve korozyon hızı değerleri genel olarak HCl ve NaCl ortamlarına kıyasla daha düşük düzeyde kalmıştır. Bu durum, kullanılan alkali deney koşullarında çelik yüzeyinde gelişen koruyucu oksit ve hidroksit tabakalarının metal çözünmesini sınırlandırmış olabileceğini düşündürmektedir.

5. Koruyucu boya uygulaması, özellikle HCl ve NaCl ortamlarında numunelerin kütle değişimini ve yüzey bozunmasını sınırlandırmıştır. Boyalı numunelerde elde edilen değerlerin kaplama tabakası, yüzeyde kalan ürünler ve çelik altlığın birlikte oluşturduğu net kütle değişimini temsil ettiği dikkate alınmıştır.

6. Çözeltilerin pH değerlerinde maruziyet süresine bağlı değişimler meydana gelmiştir. HCl çözeltisinin başlangıç pH değeri 1.00 iken 30 gün sonunda 4.07'ye yükselmiş; NaCl çözeltisinin pH değeri 7.20'den 90 gün sonunda 4.84'e gerilemiş; NaOH çözeltisinin pH değeri ise 12.50'den yaklaşık 9 seviyesine düşmüştür. Bu değişimler, numune yüzeyi ile çözelti arasında gerçekleşen kimyasal ve elektrokimyasal etkileşimlerin ortam karakterini zamanla değiştirdiğini göstermiştir.

7. Sertlik sonuçlarında en yüksek azalma HCl ortamındaki boyasız numunelerde elde edilmiştir. Doksan günlük maruziyet sonunda ST37 çeliğinin sertlik değeri kontrol numunesine göre %12.77, ST52 çeliğinin sertlik değeri ise %10.28 oranında azalmıştır. Boya uygulaması HCl ve NaCl ortamlarında sertlik kaybını sınırlandırırken, NaOH ortamında boyalı ve boyasız numuneler arasındaki fark daha düşük düzeyde kalmıştır.

8. Çekme testi sonuçları, özellikle HCl ve NaCl ortamlarındaki boyasız numunelerde çekme ve akma gerilmesi değerlerinin kontrol numunelerine göre azaldığını göstermiştir. En belirgin değişimler uzun süreli HCl maruziyetinde ortaya çıkmış, NaOH ortamındaki değerler ise genel olarak kontrol numunesine daha yakın seyretmiştir. ST52 çeliği bütün koşullarda ST37 çeliğine göre daha yüksek mutlak mekanik dayanım değerleri göstermiş, ancak uzun süreli korozyon ortam maruziyetinden tamamen etkilenmeden kalmamıştır.

9. Optik yüzey/kesit incelemelerinde HCl ve NaCl ortamlarında bekletilen boyasız numunelerde sınır hattı düzensizlikleri ve yerel yüzey değişimleri daha belirgin gözlenmiştir. Boyalı numunelerde ise bu değişimlerin daha sınırlı kaldığı görülmüştür. Optik bulgular, kütle değişimi, sertlik ve çekme testi sonuçlarında belirlenen genel eğilimleri nitel olarak desteklemiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, kullanılan deney koşullarında korozyon ortamların olumsuz etkisi HCl, NaCl ve NaOH sıralamasını izlemiştir. Koruyucu boya uygulaması özellikle HCl ve NaCl ortamlarında yüzey ile çözelti arasındaki doğrudan teması sınırlandırarak korozyon etkisini azaltmış; ancak bütün deney koşullarında mutlak bir koruma sağlamamıştır.

5.2. Öneriler

1. Gelecek çalışmalarda daha uzun maruziyet süreleri ve daha sık ölçüm aralıkları kullanılarak korozyon davranışının zamana bağlı değişimi daha ayrıntılı biçimde incelenmelidir. Ayrıca statik ve yenilenmeyen çözeltilerin yanı sıra belirli aralıklarla yenilenen veya akış hâlindeki korozyon ortamları da karşılaştırılmalıdır.

2. Çekme ve sertlik deneylerinde her koşul için yeterli sayıda tekrarlı numune kullanılmalı; sonuçlar ortalama, standart sapma ve uygun istatistiksel analizlerle birlikte sunulmalıdır. Böylece deneysel saçılma ile korozyon ortamının etkisi daha güvenilir biçimde birbirinden ayrılabilir.

3. Yüzey ve kesit değişimlerinin daha ayrıntılı incelenebilmesi için optik mikroskopun yanı sıra SEM, EDS, profilometre, yüzey pürüzlülüğü ve çukurcuk derinliği ölçümleri kullanılmalıdır. Böylece gözlenen mekanik değişimlerin yüzey morfolojisi ve korozyon ürünü bileşimiyle ilişkisi daha güçlü biçimde açıklanabilir.

4. Koruyucu kaplamaların performansının değerlendirilmesinde farklı boya türleri, kaplama kalınlıkları, yüzey hazırlama yöntemleri ve çok katmanlı kaplama sistemleri karşılaştırılmalıdır. Kaplama kalınlığı, aderans, gözeneklilik ve su emme gibi özelliklerin ölçülmesi, boya tabakasının uzun süreli koruyucu davranışının daha doğru değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

5. Çalışmada korozyon sonrası sertlik ve çekme davranışı değerlendirilmiştir. Gelecek çalışmalarda darbe testi, yorulma testi ve kırılma yüzeyi analizleri gibi ek mekanik testler uygulanarak korozyonun farklı mekanik davranışlar üzerindeki etkisi daha geniş kapsamda incelenebilir.

6. Sonuç olarak, ST37 ve ST52 çeliklerinin korozyon ortamlardaki performansının yalnızca kütle kaybı veya tek bir mekanik özellik üzerinden değerlendirilmemesi gerektiği görülmüştür. Bu nedenle ileride yapılacak çalışmalarda korozyon hızı, yüzey analizi, mekanik testler ve kaplama performansı birlikte ele alınarak daha bütüncül değerlendirme yaklaşımları geliştirilmelidir.

KAYNAKLAR

- Adın, H. (2016). Çeliklerin Çalışma Ortamlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 6(2/2), 160–173.
- Ahankari, S., & Patil, A. (2020). Sea Water Effect on Mechanical Performance of Steel Pipes Rehabilitated with Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Materials Today: Proceedings*, 22, 2490–2498. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.377>
- Ahmad, Z. (2006). *Principles of corrosion engineering and corrosion control*. Elsevier.
- Al-Hassan, S., Mishra, B., Olson, D., & Salama, M. (1998). Effect of microstructure on corrosion of steels in aqueous solutions containing carbon dioxide. *Corrosion*, 54(6), 480–491.
- Alkhimenko, A., Ermakov, B., Alekseeva, E., Davidov, A., Kovalev, M., & Mushnikova, S. (2020). Environmental effect on corrosion behavior of 9MnSi5 steel pipelines. E3S Web of Conferences,
- Alzahrani, E., Abo-Dief, H. M., & Algethami, F. (2021). Electrochemical investigations of hydrochloric acid corrosion for carbon steel and coating effect by Poly (butyl Methacrylate)-grafted alginate/Fe₃O₄. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(5), 103100.
- Amirudin, A., & Thieny, D. (1995). Application of electrochemical impedance spectroscopy to study the degradation of polymer-coated metals. *Progress in Organic Coatings*, 26(1), 1–28.
- Apostolopoulos, C. A., & Michalopoulos, D. (2007). Impact of corrosion on mass loss, fatigue and hardness of BSt500 s steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 16(1), 63–67.
- Arasaratnam, P., Sivakumaran, K., & Tait, M. (2011). True stress-true strain models for structural steel elements. *International Scholarly Research Notices*, 2011(1), 656401.
- Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (1998). An introduction to microstructures, processing and design. (No Title).
- Askeland, D. R., & Phule, P. P. (1998). The science and engineering of materials, 4th. In: PWS publisher, Boston, MA.
- ASTM International. (2021). Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. In (Vol. ASTM G31-21). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2023). Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials. In (Vol. ASTM E92-23). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2025). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. In (Vol. ASTM E8/E8M-25). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Bani, S. (2024). Investigating Effects of Corrosion on Industrial-Coated Mild Steel Pipelines in Acidic Environment.
- Bardal, E. (2004). *Corrosion and protection*. Springer.
- Bentur, A., Berke, N., & Diamond, S. (1997). *Steel corrosion in concrete: fundamentals and civil engineering practice*. CRC press.
- Bigdeli, F., Javidi, M., & Pakshir, M. (2021). A comparative study of mechanical properties and corrosion behavior of fusion-bonded epoxy and liquid epoxy coatings and their service life in drill pipe applications. *Materials Research Express*, 8(2). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abe313>

- Broomfield, J. P. (2023). *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair*. Crc Press.
- Bruno, M., Esposito, L., Iannitti, G., & Scherillo, F. (2023). Discontinuous Yielding of Fe E420 under high strain rate Loading. *Applied Sciences*, 13(8), 5164.
- Buruiană, D. L., Mureșan, A. C., Bogatu, N., Ghisman, V., Herbei, E. E., & Bașliu, V. (2024). Corrosion tendency of S235 steel in 3.5% NaCl solution and drinking water during six months of exposure. *Materials*, 17(23), 5979.
- Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: an introduction*. John wiley & sons.
- Candelaria, A., & Pinedo, C. (2003). Influence of the heat treatment on the corrosion resistance of the martensitic stainless steel type AISI 420. *Journal of materials Science letters*, 22(16).
- Chen, Y., Ma, B., & Lu, R. (2024). Experimental assessment of mechanical properties of corroded low-alloy structural steel. *Buildings*, 14(5), 1457.
- Chen, Z., Nie, S., Han, W., Tang, M., Yang, B., & Elchalakani, M. (2023). A study on static properties of high-performance steel after corrosion damage. *Journal of Constructional Steel Research*, 207, 107970.
- Cheng, C., Huang, G., & Wu, W. (2025). Effect of tensile stress on the corrosion morphology and multifractal characteristics of DH36 steel in a neutral salt spray environment. *Corrosion Science*, 243, 112583.
- Costa, R., Barbosa, M. L. S., Silva, F. J. G., Sousa, S. R., Sousa, V. F. C., & Ferreira, B. O. (2023). Study of the Chlorine Influence on the Corrosion of Three Steels to Be Used in Water Treatment Municipal Facilities. *Materials (Basel)*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/ma16062514>
- Do Kweon, H., Kim, J. W., Song, O., & Oh, D. (2021). Determination of true stress-strain curve of type 304 and 316 stainless steels using a typical tensile test and finite element analysis. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(2), 647–656.
- Doruk, M. (2012). *Metalik malzemeler ve korozyon*. Korozyon Derneği.
- Dwivedi, D., Lepková, K., & Becker, T. (2017). Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods. *RSC advances*, 7(8), 4580–4610.
- Eken, T., Kardelen, K., Celebi, N., & Oktem, F. (2016). PITTING CORROSION BEHAVIOUR OF ST 37 STRUCTURAL STEEL IN SEVERAL CORROSIVE ENVIRONMENTS. 33.
- Ezzeldin, I., El Naggar, H., Newhook, J., & Jarjoura, G. (2022). Accelerated wet/dry corrosion test for buried corrugated mild steel. *Case Studies in Construction Materials*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01152>
- Fontana, M. G. (1986). Corrosion engineering.
- Freire, L., Nóvoa, X. R., Montemor, M. F., & Carmezim, M. J. (2009). Study of passive films formed on mild steel in alkaline media by the application of anodic potentials. *Materials Chemistry and Physics*, 114(2), 962–972. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.11.012>
- Gadow, H., & Motawea, M. (2017). Investigation of the corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid solution by using ginger roots extract. *RSC advances*, 7(40), 24576–24588.
- Gassama, D., A. Diagne, A., Yade, I., Fall, M., & Faty, S. (2015). Investigations on the corrosion of constructional steels in different aqueous and simulated atmospheric environments. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 29(2), 299–310. <https://doi.org/10.4314/bcse.v29i2.12>

- Gerengi, H., Sen, N., Uygur, I., & Solomon, M. M. (2019). Corrosion response of ultra-high strength steels used for automotive applications. *Materials Research Express*, 6(8), 0865a0866.
- Gonçalves, M. C., & Margarido, F. (2015). Materials for construction and civil engineering. *Cham, Switzerland: Springer*.
- Groysman, A. (2009). Corrosion mechanism and corrosion factors. In *Corrosion for everybody* (pp. 1–51). Springer.
- Guo, P., La Plante, E. C., Wang, B., Chen, X., Balonis, M., Bauchy, M., & Sant, G. (2018). Direct observation of pitting corrosion evolutions on carbon steel surfaces at the nano-to-micro- scales. *Scientific Reports*, 8(1), 7990. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26340-5>
- Hahn, G. T. (1962). A model for yielding with special reference to the yield-point phenomena of iron and related bcc metals. *Acta metallurgica*, 10(8), 727–738.
- Harmi Tjahjanti, P., Kurniawan, M., Firdaus, R., & Iswanto, A. T. (2020). Experimental study of corrosion rate on st60 steel as a result of immersion in HCl, NaOH, and NaCl solutions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 725, 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/725/1/012038>
- Hou, Y., Lei, D., Li, S., Yang, W., & Li, C.-Q. (2016). Experimental Investigation on Corrosion Effect on Mechanical Properties of Buried Metal Pipes. *International Journal of Corrosion*, 2016, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2016/5808372>
- Ibrahimi, B. E., Nardeli, J. V., & Guo, L. (2021). An overview of corrosion. *Sustainable corrosion inhibitors I: fundamentals, methodologies, and industrial applications*, 1–19.
- International Organization for Standardization. (2019). Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature. In. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Jafar, S. A., Aabid, A. A., & Humadi, J. I. (2022). Corrosion behavior of carbon steel in 1 M, 2 M, and 3 M HCl solutions. *Materials Today: Proceedings*, 57, 412–417. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.295>
- Janoušek, J., Hřeben, S., Špirit, Z., Strejcius, J., & Kasl, J. (2017). Fatigue performance of blade steel T552 in a corrosive environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*,
- Jones, D. A. (1996). Principles and prevention. *Corrosion*, 2, 168.
- Kang, S., Jeong, S., & Ahn, Y.-S. (2021). Effect of discontinuous yielding on the strain hardening behavior of fine-grained twinning-induced plasticity steel. *Frontiers in Materials*, 8, 599534.
- Koch, G. (2017). 1 - Cost of corrosion. In A. M. El-Sherik (Ed.), *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies* (pp. 3–30). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00001-2>
- Kordas, G. (2022). Corrosion Barrier Coatings: Progress and Perspectives of the Chemical Route. *Corrosion and Materials Degradation*, 3(3), 376–413. <https://www.mdpi.com/2624-5558/3/3/23>
- Lawal, S. L., & Afolalu, S. A. (2024). Overview of Corrosion Types and Effects of Grain Size Variation on Corrosion Resistance of Steel. 2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG),
- Li, C.-Q., & Yang, W. (2021). *Steel corrosion and degradation of its mechanical properties*. CRC Press.

- Li, J., Zhao, M., & Jiang, Q. (2002). Temperature-dependent corrosion resistance of several alloys in alkali industrial environment. *Materials and Corrosion*, 53(4), 269–273.
- Li, K., Sun, L., Cao, W., Chen, S., Chen, Z., Wang, Y., & Li, W. (2022). Pitting corrosion of 304 stainless steel in secondary water supply system. *Corrosion Communications*, 7, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2021.11.010>
- Lipinski, T., & Pietraszak, J. (2023). EFFECT OF 10% NaCl ON BASIC CARBON STRUCTURAL P235TR2 STEEL AT 10 °C. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF035>
- Liu, Z., Wang, Y., Zhai, Y., Qiao, Y., Zheng, C., Wang, D., Shi, X., Lu, H., & Liu, C. (2022). Corrosion behavior of low alloy steel used for new pipeline exposed to H₂S-saturated solution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(77), 33000–33013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.203>
- Lopes, C., Donato, M., & Ramgi, P. (2016). Comparative corrosion behavior of titanium alloys (ti-15mo and ti-6al-4v) for dental implants applications: A review. 35, 05–14. <https://doi.org/10.19228/j.cpm.2016.35.04>
- López, D. A., Schreiner, W. H., de Sánchez, S. R., & Simison, S. N. (2003). The influence of carbon steel microstructure on corrosion layers: An XPS and SEM characterization. *Applied Surface Science*, 207(1), 69–85. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)01218-7](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)01218-7)
- Lyon, S. B., Bingham, R., & Mills, D. J. (2017). Advances in corrosion protection by organic coatings: What we know and what we would like to know. *Progress in Organic Coatings*, 102, 2–7.
- Ma, Y., Li, Y., & Wang, F. (2009). Corrosion of low carbon steel in atmospheric environments of different chloride content. *Corrosion Science*, 51(5), 997–1006.
- Marcus, P., & Oudar, J. (2002). *Corrosion mechanisms in theory and practice*. Marcel Dekker New York.
- Mattsson, E. (2023). *Basic corrosion technology for scientists and engineers*. CRC Press.
- Menteş, T. (2014). *Boru hattı taşımacılığında kullanılan St37 kalite çeliğin kaynaklı halde korozyon davranışının incelenmesi* Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Mohammed, H. K., Jafar, S. A., Humadi, J. I., Sehgal, S., Saxena, K. K., Abdullah, G. H., Saeed, L. I., Salman, M. S., & Abdullah, W. S. (2023). Investigation of carbon steel corrosion rate in different acidic environments. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.792>
- Muresan, A. C., Buruiana, D., Ghisman, V., Emanuela, H., & Lucica, B. (2025). Corrosion Behavior of S235JR Carbon Steel in 0.5 M HCl Solution During 24 Weeks. *Metals*, 15, 1092. <https://doi.org/10.3390/met15101092>
- Odio, B., Chinwuko, E., Chukwuneke, J., & Sinebe, J. (2014). Investigation of the effect of corrosion on mild steel in five different environments. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 3(7), 306–310.
- Onaran, K. (2014). Malzeme Bilimi, 13. *Baskı, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul*, 383.
- Palanivelu, S., Avudaiappan, S., & Maureira, N. (2025). Corrosion behaviour of mild steel in diverse environments: a comparative study of hot-rolled and cold-rolled specimens. *Journal of King Saud University: Engineering Sciences*, 37. <https://doi.org/10.1007/s44444-025-00038-2>
- Popov, B. N. (2015). *Corrosion engineering: principles and solved problems*. Elsevier.
- Qiu, H., Ueji, R., & Inoue, T. (2022). Yield-point phenomenon and plastic bands in ferrite-pearlite steels. *Materials*, 16(1), 195.
- Quej-Ake, L. M., Rivera-Olvera, J. N., Domínguez-Aguilar, Y. d. R., Avelino-Jiménez, I. A., Garibay-Febles, V., & Zapata-Peñasco, I. (2020). Analysis of the

- physicochemical, mechanical, and electrochemical parameters and their impact on the internal and external SCC of carbon steel pipelines. *Materials*, 13(24), 5771.
- Revie, R. W. (2008). *Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering*. John Wiley & Sons.
- Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2025). *Corrosion and corrosion control*. John Wiley & Sons.
- Roberge, P. R. (2000). *Handbook of corrosion engineering* (Vol. 1128). McGraw-hill New York.
- Roberge, P. R., & Eng, P. (2005). Corrosion engineering. *Principles and Practice*, 1.
- Sadowski, A. J., Rotter, J. M., Stafford, P. J., Reinke, T., & Ummenhofer, T. (2017). On the gradient of the yield plateau in structural carbon steels. *Journal of Constructional Steel Research*, 130, 120–130.
- Saikia, M., Dutta, T., Jadhav, N., & Kalita, D. J. (2025). Insights into the development of corrosion protection coatings. *Polymers*, 17(11), 1548.
- Selvaraj, R., & Bhuvaneshwari, B. (2009). Characterization and development of organic coatings for steel rebars in concrete. *Port Electrochim Acta*, 27, 657–670.
- Singh, R. (2014). *Corrosion control for offshore structures: cathodic protection and high-efficiency Coating*. Gulf Professional Publishing.
- Song, G.-L., & Feng, Z. (2020). Modification, degradation and evaluation of a few organic coatings for some marine applications. *Corrosion and Materials Degradation*, 1(3).
- Song, G., Atrens, A., St John, D., Wu, X., & Nairn, J. (1997). The anodic dissolution of magnesium in chloride and sulphate solutions. *Corrosion Science*, 39(10-11), 1981–2004.
- Sørensen, P. A., Kiil, S., Dam-Johansen, K., & Weinell, C. E. (2009). Anticorrosive coatings: a review. *Journal of coatings technology and research*, 6(2), 135–176.
- Soyyigit, A. (2009). *7075-T6 Alüminyum Alaşımında Yapay Olarak Oluşturulan Oyukların Yorulma Dayanımına Etkisi* (Publication Number 29171396) [Master's, Sakarya Üniversitesi (Turkey)]. ProQuest Dissertations & Theses Global. Turkey. <https://www.proquest.com/dissertations-theses/7075-t6-alüminyum-alaşımında-yapay-olarak/docview/2707539455/se-2?accountid=139676>
- Struers. *Struers LaboForce-50 Instruction Manual*. S. ApS.
- Sun, H., Yoshida, F., Ohmori, M., & Ma, X. (2003). Effect of strain rate on Lüders band propagating velocity and Lüders strain for annealed mild steel under uniaxial tension. *Materials Letters*, 57(29), 4535–4539.
- Tewary, N. K., Kundu, A., Nandi, R., Saha, J. K., & Ghosh, S. K. (2016). Microstructural characterisation and corrosion performance of old railway girder bridge steel and modern weathering structural steel. *Corrosion Science*, 113, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.10.004>
- Uzorh, A. (2013). Corrosion properties of plain carbon steels. *Int. J. Eng. Sci*, 2(11), 18–24.
- Valcarce, M. B., & Vázquez, M. (2008). Carbon steel passivity examined in alkaline solutions: The effect of chloride and nitrite ions. *Electrochimica Acta*, 53(15), 5007–5015.
- Watkins, E., Griffiths, C. M., Richards, C. A., Potts, S.-J., Batchelor, C., Barker, P., Searle, J., & Jewell, E. (2024). Improving the corrosion performance of organically coated steel using a sol–gel overcoat. *Materials*, 17(5), 1075.

- World Steel in Figures*. (2024). World Steel Association. Retrieved 25 Nisan from <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2024.pdf>
- Yadav, M., Dey, I., & Ghosh, S. (2022). A comparative study on the microstructure, hardness and corrosion resistance of epoxy coated and plain rebars. *Materials Research Express*, 9(5), 056504.

EK-1

KATILIM BELGESİ



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER	
Adı Soyadı:	Tolga ÇELİK
Uyruğu:	T.C
Orcid Numarası:	0009-0009-3002-3274

EĞİTİM BİLGİLERİ	
Lisans	
Üniversite:	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fakülte:	Mühendislik Mimarlık Fakültesi
Bölümü:	Makine Mühendisliği Bölümü
Mezuniyet Yılı:	2014
Yüksek Lisans	
Üniversite:	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
Enstitü:	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı:	Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Mezuniyet Yılı:	2026

Tezden Üretilen Makaleler ve Bildiriler
Çelik, T., Kılıç, S. (2025). Corrosion Tendencies and Outcomes of Steels Under Various Environmental Conditions. Ahi Evran 5th International Congress on Scientific Research, Dubai, UAE, (May, 16-18).