

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PASLANMAYA MARUZ KALMIŞ BETONARME KİRİŞLERİN
BURULMA DAYANIMI

Ahmet İhsan TURAN

Danışman: Doç. Dr. Hakan YALÇINER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN
2019

Her Hakkı Saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Doç. Dr. Hakan YALÇINER danışmanlığında, Ahmet İhsan TURAN tarafından hazırlanan bu çalışma 20/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği/~~oy çokluğu~~ (3/3) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr.Üyesi Yaşar A YAZ

İmza: 

Üye : Doç. Dr. Hakan YALÇINER

İmza: 

Üye : Dr. Öğr.Üyesi Atila KUMBASAROĞLU

İmza: 

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun 04 / 07 / 2019 tarih ve 25 / 11 / 2019 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“Paslanmaya Maruz Kalmış Betonarme Kirişlerin Burulma Dayanımı” isimli “Yüksek Lisans” tezini tarafımda intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 20/06/2019

Ahmet İhsan TURAN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PASLANMAYA MARUZ KALMIŞ BETONARME KİRİŞLERİN BURULMA DAYANIMI

Ahmet İhsan TURAN

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hakan YALÇINER

Betonarme donatısında meydana gelen paslanma sonucu ortaya çıkan olumsuz sonuçlar, betonarme donatılarındaki korozyonun araştırılması için önemini korumaktadır. Korozyon betonarme yapıların performans seviyelerini olumsuz etkilemesinin yanında servis ömürlerini de kısaltarak ekonomik anlamda zarar vermekte ve ilerleyen aşamalarında yapıların yıkımlarına kadar sonuçlar doğurabilmektedir. Meydana gelen korozyon ile donatı kesit alanının azalması, korozyon ürününün ortaya çıkardığı hacimsel artış ile betonun çatlaması ve beton-donatı arasındaki aderans kuvvetinin azalması gibi olumsuz sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Bu sonuçlar ile betonarme elemanlarının, taşıma gücü kapasiteleri, eğilme ve burulma dayanımları azalmakta ve hedeflenen yapı performansından uzaklaşmaktadır. Paslanmış betonarme elemanlarının eğilme davranışlarının tahmin edilmesine ilişkin çalışmalar mevcut literatürde yeteri kadar mevcut iken; paslanmış betonarme elemanlarının basit burulma etkisi altındaki davranışları henüz çalışılmamıştır. Bu amaçla üretilmiş olan C25 beton sınıfına ait 6 adet betonarme kirişi hızlandırılmış korozyon yöntemi de kullanılarak farklı oranlarda paslandırılmıştır. Gerçek korozyon oranlarının elde edilmesi için yükleme deneylerinden sonra betonarme kirişleri kırılmış ve çıkartılan betonarme donatıları için önce mekanik ardından kimyasal temizleme işlemleri uygulanmıştır. Tüm sargı ve boyuna donatılarının gerçek kütle kayıplarının bulunması amacıyla hassas terazide donatıların son kütleleri kayıt altına alınmış ve ilk kütleleri ile karşılaştırılarak gerçek korozyon oranları da elde edilmiştir. Deney sonucunda gerçek korozyon oranlarının betonarme kirişlerin burulma momenti kapasitesine etkileri, moment-eğrilik ilişkileri, çatlak genişliği ve dağılımları incelenmiştir. Korozyonlu betonarme kirişlerin burulma davranışları incelenerek; burulma dayanımlarının korozyon oranına bağlı olarak geliştirilen amprik model yardımı ile korozyona uğramış betonarme kirişlerin burulma momentlerinin tahmin edilebilmesi ve böylelikle mevcut yapıların değerlendirilmesi için bir model geliştirilmiştir.

2019, 76 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Betonarme, Burulma Momenti, Çelik Donatı, Korozyon, Kiriş.

ABSTRACT

Master Thesis

TORSIONAL STRENGTH OF RC BEAMS SUBJECTED TO CORROSION

Ahmet İhsan TURAN

Erzincan Binali Yıldırım University
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hakan YALÇINER

The negative results resulting from the corrosion of reinforced concrete reinforcement are important for the investigation of corrosion in the reinforced concrete reinforcement. Corrosion affects the performance levels of reinforced concrete structures in addition to shortening the service life of the economic sense, and in the following stages of the destruction of structures can lead to destruction. With the resulting corrosion; the reduction of the reinforcement cross-sectional area leads to negative results such as the volume increase caused by the corrosion product and the decrease in the bond strength between the concrete and the reinforcement. With these results, the bearing capacity, bending and torsional strength of reinforced concrete elements are reduced and the targeted building performance is avoided. Studies on estimating the bending behavior of rusted reinforced concrete elements are sufficiently available in the current literature; The behavior of rusted reinforced concrete elements under the effect of simple torsion has not been studied yet. For this purpose, 6 reinforced concrete beams of C25 concrete class were rusted at different rates by using accelerated corrosion method. In order to obtain the actual corrosion rates, the reinforced concrete beams reinforcements were removed by mechanical and chemical cleaning before the beams were removed after the loading tests. In order to find the actual mass losses of all windings and longitudinal reinforcements, the masses of the reinforcements in the precision balance were recorded and compared with the first masses and the actual corrosion rates were also obtained. At the end of the experiment, the effects of the actual corrosion rates on the torsional moment capacity of the reinforced concrete beams, moment-curvature relations, crack width and distribution were investigated. Corroded reinforced concrete beams torsion behavior by examining; It is thought that torsional strength can be a model for estimating the torsional moments of corroded reinforced concrete beams with the help of empirical model which is developed depending on the corrosion rate and thus to evaluate existing structures.

2019, 76 Pages

Keywords: Corrosion, Steel bars, Pure Torsion, Beams, Reinforced Concrete.

TEŞEKKÜR

Çocukluk hayalim olan İnşaat Mühendisliği Bölümüne adımımı attığım ilk günden itibaren desteklerini bir an olsun üzerimizden esirgemeyen, bilgi ve tecübeleriyle yolumuzu aydınlatıp, ufkumuzu açan başta Rektörümüz Prof. Dr. Akın LEVENT'e Dekanımız Prof. Dr. Ahmet BARAN'a çok değerli bilim insanı yüksek lisans tez danışmanı hocam, Sayın Doç. Dr. Hakan YALÇINER'e Sayın Dr. Öğr. Üyesi Atıla KUMBASAROĞLU'na, Houston Üniversitesi'nden Prof. Dr. Yi-Lung Mo'ya çok değerli meslektaşlarım Enis DOĞRU'ya, Aqludin KARİMİ'ye, Rameen KOHİSTANİ'ye, Mehmet Fırat MERMİTE'e, Umytjan YANGİBAYEV'e, Uğurcan ERGÜN'e Alper ÇELİK'e, Zeynep Leyla TAŞĞIN'a ve sevgileriyle, dualarıyla beni her zaman cesaretlendiren, destekleyen canım aileme şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışması Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Tarafından FBA-2017-490 proje numarası ile desteklenmiş olup bu projenin gerçekleşmesine büyük katkı sunan Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine ve sağlamış oldukları desteklerden ötürü TORUNLAR GYO şirketine teşekkürü bir borç bilirim.

Ahmet İhsan TURAN

Temmuz, 2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Burulma Deneyleri	3
2.2. Korozyon Deneyleri	7
3. KURAMSAL TEMELLER.....	9
3.1. Basit Burulma Davranışı	9
3.2. Basit Burulma Hesabı.....	12
3.2.1. TS500 (2000) Yönetmeliğine Göre Burulma Hesabı.....	12
3.2.2. ACI 318-02 Yönetmeliğine Göre Burulma Hesabı	12
3.3. Korozyon ve Betonarme.....	13
3.3.1. Korozyon Tipleri	15
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	17
4.1. Materyal.....	17
4.1.1. Donatı Mekanik Özellikleri	18
4.1.2. Betonarme Kirişlerin Donatı Kafeslerinin Hazırlanması	19
4.2. Yöntem	25
4.2.1. Hızlandırılmış Korozyon Yöntemi	25
4.2.2. Burulma Deney Düzenegi.....	29
4.2.3. Burulma Deneyi Ölçüm Düzenegi.....	31
5. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	35
5.1. Hızlandırılmış Korozyon Deneyi Sonuçları	35
5.1.1. Çekme Deneyi Sonuçları	49
5.2. Burulma Momenti – Dönme Açısı Değerleri	51
5.3. Burulma Momenti- Gerilme Sonuçları.....	61

5.4. Deney Sonrası Çatlak Dağılımı	62
6. SONUÇLAR.....	71
KAYNAKLAR	72
EKLER.....	76
Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar	76
ÖZGEÇMİŞ.....	77



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği (T42/40-50-60).....	4
Şekil 2.2. Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği (T70/40-50-60).....	4
Şekil 2.3. Kiriş Kesitleri Yang vd. (2013)	5
Şekil 3.1. Basit Burulma Altındaki Donatısız Bir Kirişin Kırılması	9
Şekil 3.2. Basit Burulma Altındaki Donatılı Bir Kirişte Gözlenen Çatlaklar (Celep ve Kumbasar, 1996)	10
Şekil 3.3. Burulma Durumları.....	10
Şekil 3.4 Uygunluk Burulması.....	11
Şekil 3.5. Korozyona Uğramış Betonarme Kiriş (Erzincan, 2018).....	14
Şekil 4. 1. Betonarme Kirişlerin Kesit Özellikleri.....	17
Şekil 4.2. Betonarme Kirişlerin ön yüzü ve arka yüzü	18
Şekil 4.3. Çelik Donatıya Ait Gerilme-Birim Deformasyon Grafiği.....	19
Şekil 4.4. Betonarme Donatıları.....	19
Şekil 4.5. Betonarme donatılarının Hazırlanması: (a) Donatı Mekanik Temizleme İşlemi, (b) Donatıların kodlanması.....	20
Şekil 4.6. Betonarme Donatılarının Tartılması	20
Şekil 4.7. Betonarme Kiriş Donatı Bağlanması	21
Şekil 4.8. Betonarme Kirişlerin Donatı Kafesleri	21
Şekil 4.9. Betonarme Kirişler İçin Hazırlanan Kalıplar.....	22
Şekil 4.10. Beton Döküm İşlemi	22
Şekil 4.11. Küp Numune Alımı.....	23
Şekil 4.12. Kalıptan Çıkarılan Betonarme Kirişler	24
Şekil 4.13. Beton Basınç Deneyleri	24
Şekil 4.14. Bakır Kabloların Donatılara Bağlanması.....	26
Şekil 4.15. Paslandırma Düzeneği: (a) Hızlandırılmış Korozyon Deney Düzeneği, (b) Deney Düzeneği Şematik Gösterimi	27
Şekil 4.16. Faraday Kanunu'na Göre Gerçek Pas Oranlarının Karşılaştırılması (Yalciner vd. 2012).....	28
Şekil 4.17. Deney Yükleme Düzeneği	29
Şekil 4.18. Kiriş Kenarlarının Pahlanması (oval yapılması).....	30
Şekil 4.19. Mesnet Bölgelerine Kauçuk Sarma İşlemi	30
Şekil 4.20. Deney Düzeneği Şematik Gösterimi.....	31

Şekil 4.21. Betonarme Donatısına Gerinim Ölçer Uygulama Aşamaları: (a) Beton Yüzeyinin Açılması, (b) Donatı Yüzeyinin Pürüzsüz Hale Getirilmesi.....	32
Şekil 4.22. Betonarme Donatısına Gerinim Ölçer Uygulama Aşamaları: (a) Gerinim pulu yapıştırılması, (b) Yüzeylerin tamir harcı ile kapatılması.....	33
Şekil 4.23. Betonarme Kiriş Yüzeyine Yapıştırılan Gerinim Ölçer.....	34
Şekil 5.1. Cairnes vd. 2019 Tarafından Hazırlanmış Korozyon Mekanizması.....	35
Şekil 5.2. Havuzdan Kirişlerin Çıkarılması.....	36
Şekil 5.3. Deneysel Sonrası Betonarme Kirişleri.....	37
Şekil 5.4. Betonarme Kirişlerin Kırımı.....	38
Şekil 5.5. Betondan Çıkarılan Donatılar.....	38
Şekil 5.6. Betonarme Kirişlerin Donatı Kafesleri (B2-B3-B4-B5-B6-B7 Kirişleri).....	39
Şekil 5.7. Donatıların Kimyasal Temizleme Aşaması.....	40
Şekil 5.8. Donatıları Mekanik Temizleme Aşaması.....	40
Şekil 5.9. Korozyon Ürününden Arındırılan Betonarme Donatılarının Tartılması.....	41
Şekil 5.10. Boyuna Donatılarda Oluşan Korozyon Dağılımı.....	45
Şekil 5.11. Etriyelerdeki Korozyon Dağılımı.....	45
Şekil 5.12. Paslanmış B2 Kirişi Donatı Kafesi.....	46
Şekil 5.13. Paslanmış B3 Kirişi Donatı Kafesi.....	46
Şekil 5.14. Paslanmış B4 Kirişi Donatı Kafesi.....	46
Şekil 5.15. Paslanmış B5 Kirişi Donatı Kafesi.....	47
Şekil 5.16. Paslanmış B6 Kirişi Donatı Kafesi.....	47
Şekil 5.17. Paslanmış B7 Kirişi Donatı Kafesi.....	48
Şekil 5.18. Korozyona Uğramış Donatıların Mekanik Özellikleri, L1 Boyuna Donatıları.....	49
Şekil 5.19. Korozyona Uğramış Donatıların Mekanik Özellikleri, L3 Boyuna Donatıları.....	50
Şekil 5.20. Enine Donatıların (T9) Gerilme-Gerinim Grafiği.....	50
Şekil 5.21. B1 Betonarme Kirişi Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği.....	51
Şekil 5.22. B2 Betonarme Kirişi Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği.....	52
Şekil 5.23. B3 Betonarme Kirişi Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği.....	52
Şekil 5.24. B4 Betonarme Kirişi Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği.....	53
Şekil 5.25. B5 Kirişi Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği.....	53
Şekil 5.26. B6 Betonarme Kirişi Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği.....	54
Şekil 5.27. B7 Betonarme Kirişi Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği.....	54
Şekil 5.28. Tüm Kirişlere Ait Enerji Kapasiteleri.....	56

Şekil 5.29. Betonarme Kirişlerin Deneysel Burulma Momenti - Birim Dönme Açılarının Karşılaştırılması: (a) B1-B4 (b) B5-B7	57
Şekil 5. 30. Burulma Momenti - Gerinim Eğrisi, Boyuna Donatılar	61
Şekil 5.31. Burulma Momenti - Gerinim Eğrisi, Etriyeler.....	62
Şekil 5. 32. Betonarme Kirişlerin Çatlak Haritaları.....	65
Şekil 5.33. Betonarme Kirişlerin Çatlak Haritaları	66
Şekil 5.34. B1 Kirişi Çatlak Dağılımı	67
Şekil 5.35. B2 Kirişi Çatlak Dağılımı	67
Şekil 5.36. B3 Kirişi Çatlak Dağılımı	68
Şekil 5.37. B4 Kirişi Çatlak Dağılımı	68
Şekil 5.38. B5 Kirişi Çatlak Dağılımı	69
Şekil 5.39. B6 Kirişi Çatlak Dağılımı	69
Şekil 5.40. B7 Kirişi Çatlak Dağılımı	70

TABLULAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. T-C42S (40-50-60) ve T-C70S (40-50-60) Deneysel ve ACI tarafından Hesaplanan Burulma Dayanımı	5
Tablo 2. 2. İlk Çatlak ve Maksimum Yük Durumu için Burulma Momenti- Birim Dönme Açısı Değerleri Rashidi vd. (2016).....	6
Tablo 2. 3. Numunelere Ait Moment ve Dönme Değerleri Rashidi vd. (2016)	7
Tablo 5.1. Boyuna donatı ve Etriyelerin İlk Kütleleri.....	42
Tablo 5.2. Korozyon Sonrası Boyuna Donatı ve Etriye Kütleleri	43
Tablo 5.3. Gravimetrik Test sonuçları	44
Tablo 5.4. Deneysel Test Sonuçları	55
Tablo 5.5. Deneysel ve Teorik Olarak Hesaplanan Burulma Momenti Değerleri.....	59

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

A_o	Kayma Akısının Takip Ettiği Yolun İçinde Kalan Alan
A_s	Donatı Kesit Alanı
A_{sl}	Korozyonsuz Boyuna Donatı Alanı
A_{sl}'	Boyuna Donatıların Son Kesit Alanı
A_{st}	Korozyonsuz Etriyelerin Kesit Alanı
A_{st}'	Etriyelerin Son kesit Alanı
b	Burulma Donatıları Arasındaki Mesafe
C_L	Gerçek Korozyon Oranı
C_{LL}	Boyuna Donatıların Ortalama Korozyon Oranı
C_{LL}	Burulma Donatıların Ortalama Korozyon Oranı
C_{LT}	Etriyelerin Ortalama Korozyon Oranı
C_{LT}	Baskın Diyagonal Çatlağın Olduğu Kısımda Bulunan Etriyenin Ortalama Korozyon Oranı
f_{sl}	Korozyonsuz Boyuna Donatıdaki Gerilme Değeri
f_{sl}'	Korozyonlu Boyuna Donatıdaki Gerilme Değeri
f_{st}	Korozyonsuz Etriyedeki Gerilme Değeri
f_{st}'	Korozyonlu Etriyedeki Gerilme Değeri
M_i	Donatının İlk Kütlesi
M_f	Donatının Son Kütlesi
I	Akım
t	Uygulanan Akım Saati
ΔA_{sL}	Boyuna Donatı Kesit Alanındaki Azalma
ΔA_{sT}	Etriye Kesit Alanındaki Azalma
Δ_m	Donatıda Birim Uzunluk Başına Düşen Kütle Kaybı
T_{cr}	Çatlama Momenti
T_{max}	Elde Edilen Maksimum Moment
T_{mt}	Teorik Hesaplanan Burulma Momenti
T_{mc}	Korozyonlu Betonarme Kiriş Maksimum Moment Değeri

T_{mo}	Korozyonsuz Betonarme Kiriş Maksimum Moment Değeri
T_u	Nihai Burulma Momenti
θ_{cr}	Çatlama Burulma Momentinde Dönme
θ_{max}	Maksimum Burulma Momenti Değerinde Dönme
θ_u	Ultimate Burulma Momenti Değerinde Dönme
ϵ_c	Betondaki Gerinim
ϵ_s	Donatıdaki Maksimum Gerinim
θ	Baskın Diyagonal Çatlak Açısı

Kısaltmalar

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
TS-EN	Türk Standartları Avrupa Normu
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
NACE	Ulusal Korozyon Mühendisleri Birliği
GSKD	Gayri Safi Katma Değer

1. GİRİŞ

Korozyon metal elemanlarda meydana gelen fiziksel ve kimyasal olayların bütününe verilen isimdir. Betonarme eleman içindeki korozyonun başlamasının en yaygın sebeplerinden ilki atmosferik korozyonun betonarme eleman için nüfuz etmesi ile birlikte ortamın alkalitesini düşürmesidir, ikinci bir sebep ise kloridlerin varlığına bağlı olarak donatıda bölgesel olarak meydana gelen kesit kaybıdır (Çakır, 1994).

Korozyon sürecinin ilerlemesi betonarme yapı elemanın performans seviyesini olumsuz etkilemektedir. Donatının korozyona uğraması sonucu başta donatının mekanik özelliklerinde değişim olmakla birlikte, kesit kaybına uğrayan betonarme donatısının ilk hacmi son hacmine göre 2-4 kat oranında artmakta ve betonun çatlamasına sebep olmaktadır (Bažant, 1979).

Ülkemizde 17 Ağustos 1999 Marmara depremi sonrası incelenen betonarme binaların hasar görmesinin ana sebeplerinden birinin korozyon olduğu ortaya çıkmıştır. Örneğin, Çağatay (2005) 1999 depremi sonrası yapmış olduğu çalışmada betonarme binaların beton basınç dayanımlarını tespit etmek için aldığı karot numunelerinde deniz kumu kullanıldığını tespit etmiştir. Deniz kumu kullanımı betonarme yapıda korozyonun hızla ilerlemesine yol açmıştır. Mevcut betonarme yapı stoku göz önüne alındığında özellikle köprüler, viyadükler ve su ile doğrudan veya dolaylı yoldan etkileşimi olan hemen hemen tüm yapılarda meydana gelen korozyon son yıllarda uluslararası bir sorun teşkil eder hale gelmiştir. Ülkemizdeki eski betonarme yapılarda sıkça karşılaşılan düşük beton sınıfı, yetersiz pas payı gibi etkiler korozyon oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Korozyon sonucu sadece donatıda oluşacak kesit alanındaki kaybın göz önüne alınması korozyonun sebep olduğunu birçok parametrenin ihmal edilmesine neden olmuştur. Dahası korozyona maruz kalmış betonarme yapının tepkisini modellemekte karmaşıktır. Korozyona uğramış betonarme kirişinin toplam basit burulma momenti kapasitesi; çatlak genişliği, betonun ve donatının mekanik özellikleri, kayma akısı yolu ve aderans kayma ilişkisini içerir. Doğru bir şekilde değerlendirme yapmak için tüm bu parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir. Korozyona uğramış bir yapının bu sayılan tüm parametreler ile yerinde değerlendirme yapılması ise pratik değildir. Bunlara ek olarak mevcut yapılarda her bir donatıdaki korozyon seviyelerini ve türlerini (homojen ve bölgesel) tahmin etmek hiç kolay değildir. Literatürde korozyona uğramış

yapı elemanlarından; betonarme kolonlarda histerik yük altında yapısal performansı (Ma vd., 2012; Meda vd., 2014; Yang vd, 2016) betonarme kirişlerde eğilme davranışını altında yapısal performansı (Azad vd., 2010; Bicer vd., 2018; Ahmad 2017) incelemek için çalışmalar yapılmış iken bugüne dek korozyona maruz kalmış betonarme kirişlerin burulma yükü etkisi altındaki yapısal davranışı ile ilgili literatürde hiçbir çalışma yapılmamıştır.

Betonarme yapı elemanlarında eğilme ve kesme yüklerine ek olarak burulma yükleri de oluşmaktadır. Burulma yükleri yapıya eğilme ve kesme yükleri ile birlikte etki edebildiği gibi tek başına da etkiyebilir. Burulma etkisi yapıda genellikle kütle ile ağırlık merkezinin üst üste çakışmadığı durumlarda meydana gelmekle birlikte betonarme kenar kirişlerinde, merdiven kirişlerinde veya eksenleri planda eğrisel olan betonarme kirişlerde görülmektedir Berktaş (1995).

Betonarme kirişlerin burulma davranışı, beton basınç dayanımı, kiriş tipi, donatı oranı ve burulma tipleri gibi birçok parametreye bağlı olarak çok sayıda deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir fakat korozyona maruz kalmış betonarme kirişlerin burulma momenti altındaki davranışı için literatürde hiçbir çalışma yapılmamıştır. Bu deneysel çalışmada geliştirilen model ile korozyona maruz kalmış betonarme kirişlerin basit burulma moment kapasitelerini tahmin etmek için kullanılacak pratik bir model geliştirilmiştir. B gelecekte yapılacak olan çalışmalara ışık tutması düşünülmektedir

Yapılan araştırmalar sonucu Türkiye'nin yıllık toplam korozyon kaybının Gayri Safi Katma Değerinin (GSKD) % 4.26 civarında olduğu hesaplanmıştır. Bu değer ise yıllık doğrudan korozyon kaybı: 22.81 Milyar Amerikan Doları göstermektedir. Ulusal korozyon mühendisleri birliği (NACE)'nin 2012 yılında yaptığı çalışmaya göre ABD'de korozyonun ekonomik anlamda verdiği zararın 276 milyar dolar olduğu ve bu maliyetin yaklaşık 4 milyar dolarının sadece köprülerin korozyon sonucu oluşan hasarlarını onarımı için kullanıldığı belirtilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Burulma Deneyleri

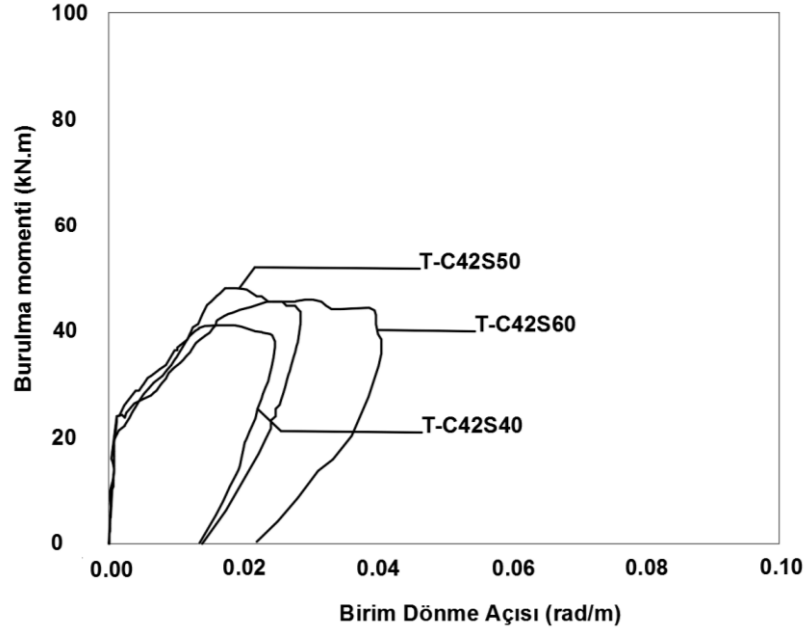
Burulma momentine maruz kalan taşıyıcı yapı elemanları, betonarme binaların tasarım aşamasında hedeflenen yapısal performans seviyelerini etkileyebilir. Sadece sismik olaylar değil aynı zamanda yapının kullanım ömrü süresince servis yükleri de yapıda burulma momentleri oluşturabilir. Şimdiye kadar birçok analitik ve deneysel çalışma Hsu vd. (1985) ve Mo vd. (2006) yapılmış olup burulma momenti etkisi altında kalan betonarme yapı elemanları için tasarım kodları geliştirilmiştir Hsu vd. (1985) ve ACI Committee (2005).

Burulma etkisi altında korozyona maruz kalmış betonarme binaların sismik performans seviyelerini tahmin etmek için yapılan analitik çalışmalardan biride Berto vd. (2009) tarafından yapılmıştır. Berto vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada korozyondan dolayı pas payı ve donatının mekanik özelliklerindeki değişimin yapısal performans üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Ayrıca artırımsal itme analizi yaparak korozyonun plastik mafsal oluşumu üzerindeki değişimini incelemiştir. Berto vd. (2009) tarafından yapılan analitik çalışma korozyona maruz kalmış betonarme elemanların burulma davranışı hakkındaki bilgi eksikliğini yansıtmaya bakımından önem teşkil etmektedir.

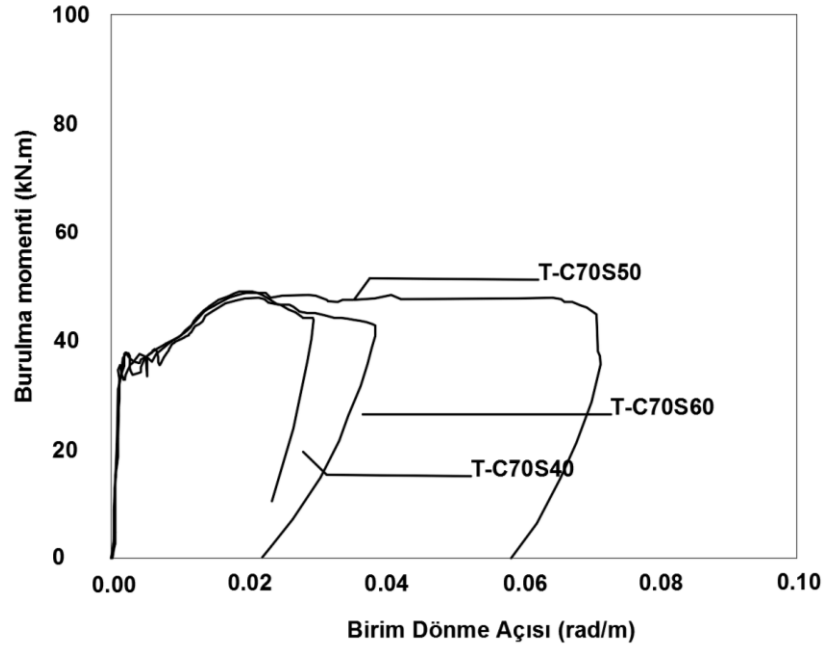
Lee vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 6 adet tam ölçekli betonarme kiriş kullanmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmada betonarme kirişleri 350 mm yüksekliğinde 300 mm genişliğinde ve 3000 mm uzunluğuna sahiptir. Donatı kafesinde 2 adet 13 mm çapında gövde donatısı ve 4 adet 16 mm çapında burulma donatısı kullanılmıştır. Üç farklı donatı kullanarak farklı akma dayanımına sahip kirişler elde edilmiştir. Betonarme kirişlerin 3 tanesi 42.2 MPa 3 tanesi ise 68.4 MPa betona basınç dayanımına sahiptir. Deney bölgesi olarak belirlediği orta açıklık bölgesindeki boyuna ve sargı donatılarına gerinim ölçerler yerleştirmiştir. Betonarme kirişlerin burulma momenti tasarımlarını ACI 318 - 04 (2014) koduna göre yapılmıştır.

Aynı etriye aralığına sahip kirişlerden akma dayanımı büyük olanın burulma momenti değerinin daha yüksek olması gerektiği fakat yaklaşık değerlere ulaştığını belirtmiştir. Çalışma sonucunda aynı miktarda donatı kullanıldığı zaman burulma momenti değerinin aynı olacağı sonucuna, yüksek burulma momenti değerlerinde beton

ezilmeden donatının aktığı sonucuna ulaşmıştır. Verilen grafik sonucunda ACI 318 - 04 (2014) kodunda verilen denklemde beton basınç dayanımının ihmal edildiğinden dolayı farklı beton basınç dayanımları için burulma momenti değerleri değişmemektedir. Şekil 2.1'de ve 2.2'de deneysel sonuçlar görülmektedir.



Şekil 2.1. Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği (T42/40-50-60)



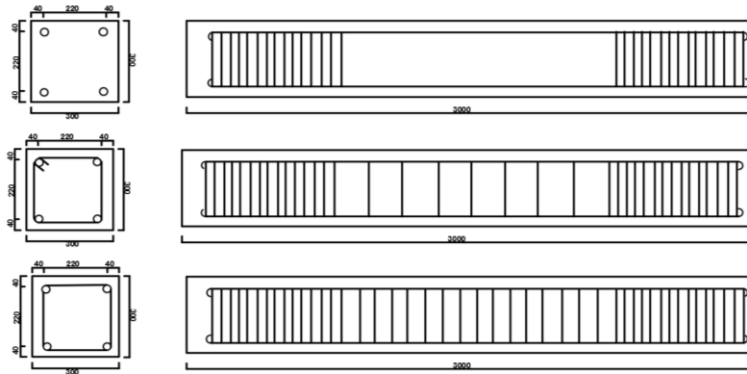
Şekil 2.2. Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği (T70/40-50-60)

Tablo 2.1. T-C42S (40-50-60) ve T-C70S (40-50-60) Deneysel ve ACI tarafından Hesaplanan Burulma Dayanımı

NUMUNELER	T_{ACI} (kN.m)	T_{den} (kN.m)	$\theta_{den,mak}$ (rad./m)
T-C42S40	37.43	41.34	0.0161
T-C42S50	56.70	48.03	0.0191
T-C42S60	80.11	45.96	0.0297
T-C70S40	37.43	49.11	0.0193
T-C70S50	56.70	48.03	0.0202
T-C70S60	80.11	48.98	0.0200

T_{ACI} : ACI tarafından hesaplanan burulma dayanımı; T_{den} : Deneysel maksimum burulma momenti
 $\theta_{den,mak}$: Maksimum burulmadaki birim dönme açısı değeri.

Yang vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada 13 adet tam ölçekli 300 mm yükseklik 300 mm genişlik ve 3000 mm uzunluğuna sahip betonarme kirişlerini burulma yükleri altında test etmiştir. Betonarme kirişleri için ultra yüksek performanslı beton kullanılmıştır. Şekil 2.3’de deneysel çalışmada kullanmış olduğu üç farklı donatı düzeni gösterilmektedir. Deneyde kullanmış olduğu parametreler çelik lif, enine donatı ve boyuna donatı oranlarıdır. Yang vd. (2013) Gerçekleştirmiş olduğu çalışma sonucunda çelik lif oranı arttıkça burulma moment değerinin arttığı sonucuna ulaşmıştır. Çelik liflerin kullanım oranına bağlı olarak oluşan ilk çatlaktan sonra liflerin çatlakların büyümesini sınırladığı sonucuna varmıştır. Boyuna ve sargı donatılarının farklı oranlarda kullanımı ile basınç diyagonal çatlak açısının değiştiğini belirtmiştir. Sonuç olarak yüksek beton basınç dayanımına sahip betonarme kirişlerde burulma momentinin tahmini için bir model geliştirmiştir.



Şekil 2. 3. Kiriş Kesitleri Yang vd. (2013)

Pawlak vd. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışma burulma momenti altındaki kirişlerin çatlaması ile ilgilidir. Basit burulma momentine ve kesme etkisine maruz kalmış betonarme kirişlerin teorik hesabı için model sunmuştur. Burulma momentine maruz kalmış betonarme kirişlerde deneysel çalışma sonucunda elde ettiği verileri literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırmıştır. Sonuç olarak burulma yükünden kaynaklı çatlakların kesin bir yolla tahmin edilebilmesi için daha fazla teorik bilgilere ihtiyaç olduğu sonucuna varılmıştır.

Rashidi vd. (2016) Yapmış olduğu çalışmada toplam 4 adet betonarme kiriş numunesi kullanmıştır. İlk numunesi donatısız, ikinci numunesi sadece boyuna donatı, üçüncü numunesi sadece etriye ve son numunesi ise etriye ile boyuna donatı kullanılarak oluşturulmuştur. Numune boyutları 600 mm uzunluk, 100 mm genişlik ve 100 mm yüksekliktedir. Enine ve boyuna donatının birlikte kullanıldığı kiriş numunesi donatısız kiriş numunesine burulma dayanımı %95 sünekliği ise %50 artış göstermiş olduğu sonucuna ulaşmıştır. Burulma dayanımında enine donatıların boyuna donatılara göre daha baskın olduğu sonucuna varırken maksimum performans için birlikte kullanımının da kaçınılmaz olduğunu vurgulamıştır. Tablo 2.2’de deneysel sonuçları görülmektedir.

Tablo 2. 2. İlk Çatlak ve Maksimum Yük Durumu için Burulma Momenti- Birim Dönme Açısı Değerleri Rashidi vd. (2016)

Test Beam	İlk Çatlak Durumu		Maksimum Durum	
	Burulma Momenti (kN.m)	Birim Dönme Açısı (rad/m)	Burulma Momenti (kN.m)	Birim Dönme Açısı (rad/m)
F2-L00-S00	79.1	0.0153	88.5	0.0183
F1-L56-S00	68.0	0.0091	73.3	0.0111
F1-L56-S35	65.6	0.0095	75.3	0.0355
F1-L56-S70	66.4	0.0095	86.7	0.0448
F2-L56-S00	61.6	0.0090	66.1	0.0113
F2-L56-S35	72.0	0.0143	85.6	0.0363
F2-L56-S70	79.2	0.0125	109.8	0.0515
F2-L88-S00	87.2	0.0137	95.1	0.0218
SS-F2-L127-S70	64.0	0.0118	119.3	0.0766

Tablo 2. 3. Numunelere Ait Moment ve Dönme Değerleri Rashidi vd. (2016)

Örnek No	Dönme Açısı(°)	Kesitin Moment Değeri (Kg.cm)	Çatlama momenti (Kg.cm)	Kesitin Maksimum Burulma (Kg.cm)
“1	8.16	7850	5870	5870
2	8.78	8500	5870	6500
3	9.16	11500	5870	8320
4	12.20	15250	5870	10200

2.2. Korozyon deneyleri

Auyeung vd. (2000) geliştirdiği modelde, beton basınç mukavemeti 28 MPa dır. Deneysel çalışmasında kullanmış olduğu korozyon oranları ise %0 ve %5.91 arasında farklı değerlerden oluşmaktadır. Auyeung vd.(2000) gerçekleştirmiş olduğu deneysel çalışmasında 178x178x355 mm lik deney numunesine 19 mm çapında betonarme donatıları yerleştirmiştir. Auyeung vd.(2000) tarafından geliştirilen Denk. 2.1’de gösterilmektedir.

$$\text{Gerçek kütle kaybı} = 0.4651xF - 0.5624 \quad (2.1)$$

Yalciner vd. (2012) tarafından geliştirilen modelde 23MPa ve 51 MPa beton basınç mukavemetine sahip numuneler kullanılmıştır. Her bir beton sınıfı için 15mm, 30mm ve 45 mm paspayı kullanmıştır. Yalciner vd. (2012) yapmış olduğu deneysel çalışmada %0 ve %18.75 arasında korozyon değerleri elde etmiştir. Yalciner vd. (2012) tarafından geliştirilen denklem Denk. 2.2’de gösterilmektedir.

$$\text{Gerçek kütle kaybı} = 0.703F - 0.15 \quad (2.2)$$

El Maaddawy vd. (2006) tarafından geliştirilen modelde 35 MPa beton basınç sınıfı kullanılmıştır. İki farklı (102 mm ve 204 mm) yüksekliğe sahip beton silindirlere üç farklı çapta (11.3, 16 ve 19.5 mm) donatılar yerleştirmiştir ve %0 ile % 39.3 arasında korozyon oranları elde etmiştir. El Maaddawy vd. (2006) tarafından geliştirilen Denk. 2.3’de gösterilmektedir.

$$\text{Gerçek kütle kaybı} = 0.44F \quad (2.3)$$

Paul vd. (2016) tarafından yapılan deneysel çalışmada iki farklı beton basınç mukavemeti (28 ve 26 MPa) kullanılmıştır. Üç farklı kesit özellikleri için birbirinden farklı paspayları göz önüne alınmıştır. Paul vd. (2016) tarafından geliştirilen Denk. 2.4'de gösterilmektedir.

$$\text{Gerçek kütle kaybı} = 1.0939F - 8.2744 \quad (2.4)$$

Yukarda sunulan deneysel çalışmalardan elde edilen modellerin tümünde kullanılan numuneler küçük boyutlardadır. Bu sebepten dolayı tam ölçekli betonarme elemanda uygulanacak olan hızlandırılmış korozyon yönteminden elde edilecek gerçek kütle kaybı değerlerinin tahmin etmeyi güçleştirmektedir.

Biçer vd. (2018) yapmış olduğu deneysel çalışmada 2500 mm uzunluk, 250 mm genişlik ve 400 mm yüksekliğe sahip tam ölçekli betonarme kiriş kullanmıştır. Numunelerinin hepsi 25 MPa beton basınç dayanımına sahiptir. Betonarme kirişlerinden tüm boyuna ve enine donatıları çıkartılarak gerçek korozyon oranları elde edilmiştir. Biçer vd. (2018) tarafından geliştirilen Denk. 2.5'de gösterilmektedir.

$$\text{Gerçek kütle kaybı} = 0.0003F^2 - 1.843F + 4580.2 \quad (2.5)$$

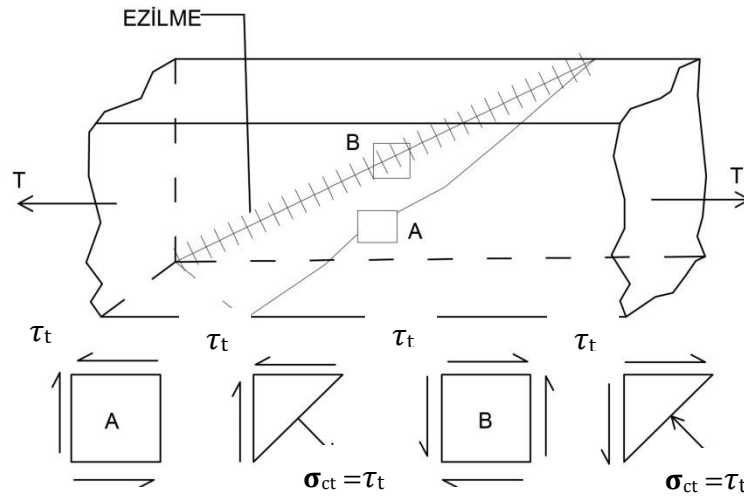
Ch vd. (2006) yapmış olduğu çalışmada doğal aşınmayı simüle etmek için tuz püskürtülerek kademeli olarak korozyona uğratan donatıların mekanik davranışını değerlendirme amaçlı deneysel bir çalışma yapmıştır. Korozyona maruz kalma süresine paralel olarak kütle kaybı olduğunu gözlemlemiştir. Buna ek olarak çekme dayanımında ve çekme sünekliği değerinin artan korozyon oranı ile birlikte ciddi bir azalış gösterdiğini belirtmektedir. Korozyon deneyleri sonrasında artan orana bağlı olarak çaptaki azalmayı hesaplamak için Denk. 2.6'yı önermektedir. Verilen denklemde d_r son çapı d ilk çapı a ise yüzde olarak korozyon oranını vermektedir.

$$d_r = d\sqrt{1-a} \quad (2.6)$$

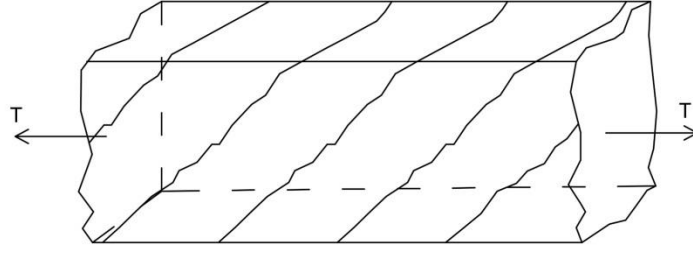
3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Basit burulma davranışı

Betonarme taşıyıcı yapı elemanları yük etkisi altında kesme ve eğilme kuvvetlerinin haricinde burulma momenti etkisine de maruz kalır. Burulma momenti, sistemin geometrisinden veya simetrik olmayan yük uygulamalarından kaynaklanabilir. Pratikte tüm yapı elemanları için burulma hesabı yapılması gerekmez, çünkü çoğu kez burulma momenti diğer etkilere oranla ihmal edilebilecek kadar küçüktür (Ersoy, 1975). Burulma etkisi; farklı yük veya açıklığa sahip komşu döşemelerin arasındaki kirişlerde, betonarme binaların kenar kirişlerinde, merdiven kirişlerinde ve/veya eksenleri planda eğrisel olan kirişlerde sıklıkla görülmektedir. Ayrıca ızgara sistemler, düzleminde eğri köprüler ve ortotropik kabuklarda burulma sisteminin ayrılmaz bir parçasıdır (Ersoy, 1975). Dikdörtgen kesitli, donatısız beton bir kiriş, basit burulma altında deneye tabi tutulduğunda, ilk çatlamanın oluşması ile son derece ani ve gevrek biçimde kırılır. ODTÜ’de denenen bu tür bir kirişin kırılma biçimi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi, çatlaklar kirişin üç yüzünde asal çekme gerilmelerine dik yönde oluşurken, dördüncü yüzde ezilme gözlenmektedir. Ancak, etriye ve boyuna donatı birlikte kullanıldığında davranış değişmekte ve kiriş ilk çatlakların oluşması ile kırılmamaktadır. Bu durumda, Şekil 3.2’de gösterildiği gibi kırılma konumuna ulaşılmadan asal çekme gerilmelerine dik yönde çok sayıda çatlak oluşmaktadır. Etriye ve boyuna donatının varlığı, burulmadaki taşıma gücünü de büyük ölçüde artırmaktadır.

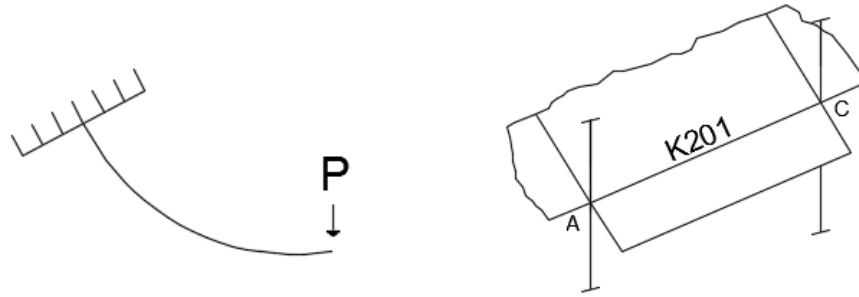


Şekil 3.1. Basit Burulma Altındaki Donatısız Bir Kirişin Kırılması (Ersoy, 1975).



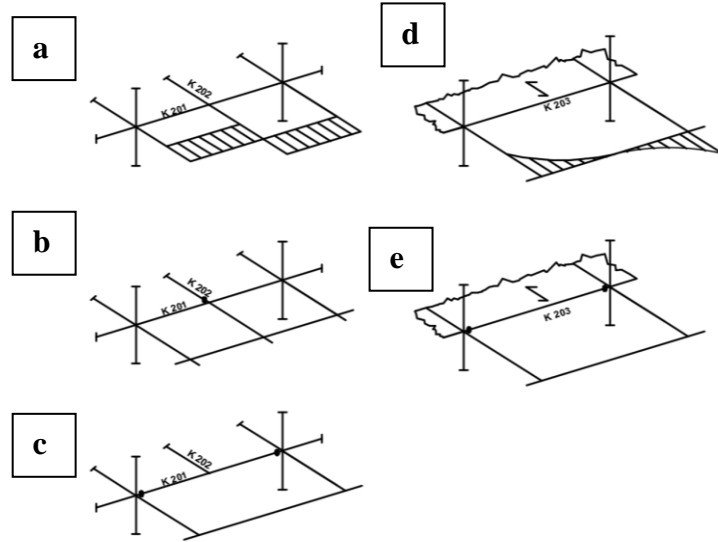
Şekil 3.2. Basit Burulma Altındaki Donatılı Bir Kirişte Gözlenen Çatlaklar (Celep ve Kumbasar, 1996)

Betonarme yapı elemanında yük altında oluşan burulma momenti denge ve uygunluk burulması olarak iki kısımda incelenebilir. Şekil 3.3’de görülen Denge Burulması, statik bakımdan belirli burulma etkisi olarak da isimlendirilen bu tür burulma momenti dış kuvvetlerden denge denklemleri kullanılarak belirlenebilir. Bu tür burulma momentinin ihmal edilmesi taşıyıcı sistemde dengenin sağlanamamasına sebep olabilir (Celep ve Kumbasar, 1996).



Şekil 3.3. Burulma Durumları (Celep ve Kumbasar, 1996)

Uygunluk Burulması: Eğer bir sistemde burulma momentinin bulunması denge için zorunlu koşul değil ise, söz konusu burulma, “uygunluk burulması”dır. Sistem elastik sınırlar içindeyken denge koşulunda burulma momenti yer almakta ise de, bu aşamadan sonra sistemin stabilitesini bozmadan, belirli noktalarda oluşturulacak plastik mafsallarla denge için burulmaya gereksinme kalmayabilir. Yapılarda uygunluk burulmasına, denge burulmasına oranla daha sık rastlanır. Şekil 3.4’de uygunluk burulması örnekleri görülmektedir.



Şekil 3.4 Uygunluk Burulması (Celep ve Kumbasar, 1996)

Şekil 3.4'a'da K201 kirişine K202 kirişinin saplanmış olmasından dolayı burulma momenti oluşturduğu görülmektedir. Şekil 3.4'a'nın ilerleyen aşamaları olan Şekil 3.4'b ve Şekil 3.4'c görülmektedir. Şekil 3.4'b de görülen k 202 kirişi'nde oluşan plastik mafsallık artık k201 kirişine burulma momenti aktaramaz ancak mevcut durum dengede olduğu için burulma momenti vardır ve denge burulması durumunu almıştır. Şekil 3.4'c incelendiği zaman ise k201 kirişinin uçlarında oluşan mafsallaşmadan dolayı artık sistemde denge burulmasına gerek kalmaz ve sistem uygunluk burulması halini alır. Böylece iki ucu mafsallı kiriş gibi davranan k201 kirişi açıklık momentinin artmasına sebep olmaktadır. Sistemde dengenin sağlanabilmesi için artık burulma momentine ihtiyaç duyulmayacak olsa bile sistemin dengesi için yeterli dönme kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Oluşan plastik mafsallaşmadan sonra k202 kiriş sistemde serbestçe dönebilecektir. Şekil 3.4'd ise burulma momenti kirişe döşeme tarafından aktarılmaktadır. Şekil 3.4'de gösterilen k203 kirişinde plastik mafsalların oluşması ile sistemde dengede kalabilmesi için burulma momentine ihtiyacı yoktur.

Artan burulma momenti değerleri ile kayma gerilmeleri ve bunlardan dolayı asal çekme ile basınç gerilmeleri de artmaktadır. Beton malzeme özelliği olarak çekme dayanımı basınç dayanımına göre oldukça düşük değerlerde olduğundan dolayı betonarme elemanda çatlaklar oluşmaktadır. Ancak oluşan çatlakların bir bölgede yoğunlaşması ile kesitin davranışı değişerek yüzeyden ayrılmaya sebep olmaktadır. Böylece davranış değişmektedir.

3.2. Basit Burulma Hesabı

Tez çalışmasının bu bölümünde TS500 (2000) yönetmeliği ve Amerikan Beton Enstitüsüne ait olan ACI 318-02 Yönetmeliğine göre basit burulma moment hesabı anlatılmıştır.

3.2.1. TS500 (2000) Yönetmeliğine göre burulma hesabı

TS500 yönetmeliğinde yer alan T_{cr} (Burulmada çatlama dayanımı) değeri için Denk. 3.1 kullanılmaktadır. Denk. 3.1'de yer alan f_{ctd} değeri betonun karakteristik beton basınç dayanımını S değeri şekil faktörünü belirtmektedir.

$$T_{cr} = 1,35 \cdot f_{ctd} \cdot S \quad (3.1)$$

Burulma momenti hesabı yapılacak kirişin tasarım moment değeri (T_d), burulmada çatlama momenti değerine (T_{cr}) (yalnız uygunluk burulması olması koşulunda) eşit olduğu varsayılacaktır. TS500 yönetmeliğinde yer alan (T_d) için belirtilen durum ihmal edilelerek minimum etriye donatısı sadece kesme için hesaplanmaktadır. Burulma altındaki kiriş için minimum etriye donatısı alanı Denk. 3.2'de verilmektedir.

$$A_{ot} = \frac{T_d}{2 \cdot A_e \cdot f_{ywd}} \cdot S \quad (3.2)$$

Burulmanın etkidiği durumlar da, A_e ile belirtilen alanı çevreleyen sargı donatısının kesit alanı A_{ot} değerinden küçük olamaz ve buna ek olarak burulma momenti için gerekli olan sargı donatısı ile aynı hacimde boyuna donatı olması şarttır. Gerekli olan boyuna donatı alanı ise Denk. 3.3'den hesaplanabilmektedir.

$$A_{sl} = \frac{A_{ot}}{s} \cdot u_e \cdot \frac{f_{ywd}}{f_{yd}} \quad (3.3)$$

3.2.2. ACI 318-02 Yönetmeliğine göre burulma hesabı

Burulma hesabı için Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) tarafından yayınlanan 318-02 (2012) yönetmeliğinde yer alan burulma momenti için hesap ve tasarımı bu kısımda belirtilecektir. Yönetmelikte yer alan içi dolu kesitlerin burulmada çatlama değeri için Denk. 3.4 kullanılmalıdır.

$$T_{cr} = \frac{\sqrt{f_c'}}{3} \cdot \frac{A_c^2}{P_c} \quad (3.4)$$

Betonarme yapı elemanında çatlaklar oluştuğundan sonra burulma momenti (uzay kafes analogisindeki gibi) boyuna donatılar, sargı donatıları ve beton basınç kuvvetleri tarafından karşılanmaktadır (Fang ve Chui, 2005).

$$T_n = \frac{2f_{yw}A_{ot} A_o}{s} \cdot \cot\theta \quad (3.5)$$

Kesit burulma momentini Denk. 3.5'dan hesaplanabilmektedir. Gerekli olan boyuna donatı ise Denk. 3.6'dan hesaplanabilmektedir.

$$A_{sl} = \frac{A_{ot}}{s} \cdot P_h \cdot \frac{f_{ywd}}{f_{yd}} \cdot \cot^2\theta \quad (3.6)$$

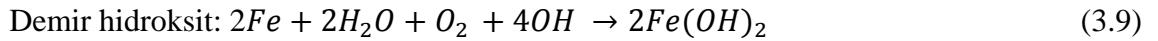
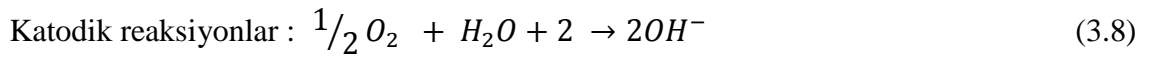
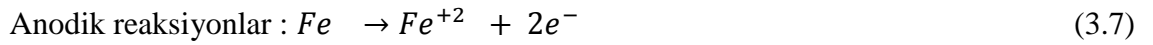
3.3. Korozyon ve Betonarme

Korozyon malzemelerin doğada bulunan en kararlı (en düşük enerjili) durumları olan oksit haline geçmeleri olayıdır (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002). Doğada bulunan metallerin çoğu element hâlinde kararlı durumda değildirler. Uygun bir çevre ortamında üzerinde taşıdığı enerjisi geri vererek doğada bulunduğu eski bileşik hâllerine dönmeye çalışmaktadırlar. Şekil 3.5'de korozyona uğramış betonarme kiriş görülmektedir. Korozyon reaksiyonlarında daima serbest enerji azalması söz konusu olur. Metallerin korozyona yatkınlığı doğrudan bu serbest enerji değişimine bağlıdır.



Şekil 3.5. Korozyonlu Betonarme Kiriş (Erzincan Kapalı Olimpik Havuzu, 2018)

Mevcut betonarme yapılarda kullanılan çelik yalın halde atmosferik ve sulu etkilere karşısında zarar görmektedir. Betonarme bir yapı elemanında ise çevresini saran betonun bazik özelliğinden dolayı korozyon etkilerine karşı kendisini kısmen koruyabilir. Çeliğin sulu ortamda korozyona uğraması elektrokimyasal bir olaydır. Bu olayın gerçekleşmesi için birtakım koşullar vardır aksi halde korozyon olayı durur. Sürecin devam edebilmesi için; anodik reaksiyonlar, katodik reaksiyonlar ve bu reaksiyonlar arasında iyon ve elektron alışverişi olarak açıklanabilir.



Betonun elektrik direnci ve mevcut iyon oranı çelik donatı korozyonunu doğrudan etkilemektedir. Betonun direnci korozyonu azaltan iyon oranı ise korozyonu artıran bir etmendir. Korozyonun oluşumunu etkileyen çevresel etmenleri iki ana başlık halinde anlatabiliriz. Bunlardan birincisi karbonatlaşma diğeri ise klorür saldırısıdır.

Betonarme bir yapı elemanında karbonatlaşma beton tabakasının en dış lifinden başlayarak numunenin iç kısımlarına kadar ilerleyen bir yapıya sahiptir. Oluşum mekanizması ise atmosferde bulunan karbondioksitin, çimento ile sulu ortamda reaksiyona girerek kalsiyum hidroksit ürünü oluşturması şeklindedir. Temel olarak karbonatlaşmanın oluşumu için nemli ortam karbondioksit ve kalsiyum hidroksite ihtiyaç vardır. Yüzeyde hızlı olan karbonatlaşma hızı numunenin iç kısımlarına ilerledikçe yavaşlamaktadır (Baradan vd. 2002). Karbonatlaşma sonucunda donatının atmosfere açık hale gelmesi ile korozyon süreci başlamış olacaktır. Denklem 3.10'de karbonatlaşma denklemi verilmiştir.



Verilen denklemde beton içerisinde oluşan Ca(OH)_2 atmosferdeki CO_2 ile birleşerek CaCO_3 'ü oluşturmaktadır. Bu olay sonucunda ph seviyesi düşer. Donatıda meydana gelen en zararlı olayı klorür iyonları tetiklemektedir. Donatı üzerindeki koruyucu film tabakası klorür iyonları varlığıyla bozulmaktadır. Klorür iyonlarının donatı ile etkileşimiyle birlikte anot ve katot arasında iyon transferi artar. Ortamın ph seviyesini düşüren klorür iyonları asidik değeri artırır. Klorür tepkimesinde ortamda demir iyonları ve hidroksit iyonlarının sürekli bulunmasından dolayı oluşan korozyon mekanizması devam etmektedir. Denklem 3.11'de klorür tepkimesi görülmektedir.



Klorür iyonlarının donatıya nüfuz etmesinin en yaygın biçimi betonda ki çatlaklardan girerek donatıya ulaşmasıdır. Beton karışımında bulunan klorür miktarları TS EN 206-1 Standartlarına göre kontrol edilmesi korozyon açısından büyük önem taşımaktadır.

3.3.1. Korozyon Tipleri

Korozyon süreci genel olarak anot ve katotların dağılımına bağlıdır. Korozyon olayının metallerin fiziki yapısında meydana getirdiği değişiklikler farklılık göstermektedir. Başlıca korozyon tipleri üniform, çatlak, galvanik ve oyuklanma korozyonudur.

Üniform korozyon donatı yüzeyi boyunca eşit bir dağılım sergileyerek oluşan korozyon türüdür. Korozyon hızı donatının her noktasında aynı hızla ilerlemesi sonucu kesit kaybıda her noktada eşit olmaktadır. Hasar görmüş yapılarda doğrudan atmosfer ile

temas içinde bulunan metal çoğunlukla bu tip korozyona maruz kalmaktadır. En az zararlı olan korozyon çeşididir. Çünkü metal delinmeden ve kırılmadan uzun süre kullanılmaya devam edilebilir (Onaran, 2009).

Bir diğer korozyon türü ise çukur korozyonudur. Oluşumu genellikle donatıda oyuk ve delik meydana gelmesiyle oluşur. Çukur korozyon oluşan şeklin durumuna göre farklı isimlerde almaktadır. Genel olarak çukur korozyonun meydana gelmesi klorür girişi ile olmaktadır (Gulikers, 2005).

Galvanik korozyon iki farklı türden metalin uygun elektrolit etkisinde görülen korozyon tipidir. Bu şekilde metallere anodik olan diğerinin paslanmasına sebep olur.

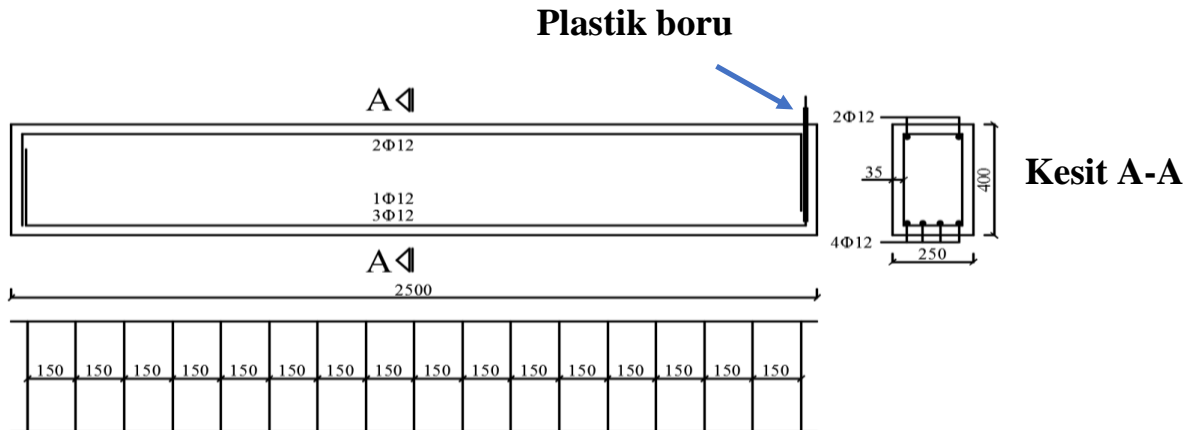
Metalin dış yüzeyinde oluşan çatlakta meydana gelen korozyon tipine ise çatlak korozyonu denilmektedir. Çatlak korozyonun oluşumdaki temel neden çatlayan metalde iç ve dış yüzeydeki oksijen yoğunluğu farkıdır.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

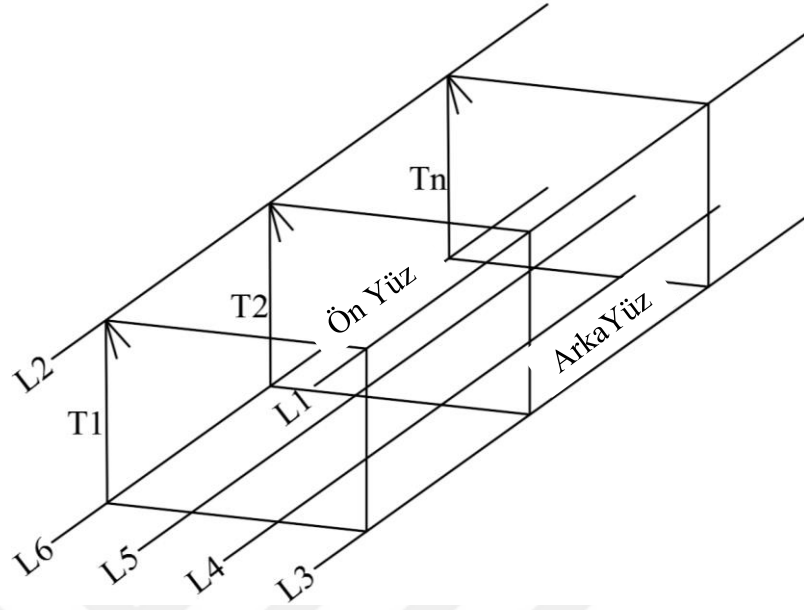
Tez çalışmasının bu bölümünde deneysel çalışma kapsamında üretilmiş olan betonarme kiriş numunelerinin malzeme ve kesit özellikleri, uygulanan hızlandırılmış korozyon yöntemi, deney yükleme ve ölçüm düzenekleri detaylı olarak anlatılmıştır. Verilen bu bilgiler ışığında yapılan çalışmanın daha sağlıklı bir şekilde anlaşılması amaçlanmıştır.

4.1. Materyal

Tez çalışması kapsamında 7 adet tam ölçekli ve geleneksel betonarme yapılarındaki betonarme kirişlerini temsil edebilecek betonarme numuneler üretilmiştir. Deneye tabi tutulan betonarme kirişlerinin kesit özellikleri Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Şekil 4.1-4.2'de betonarme kirişleri 2500 mm açıklığa 400 mm yüksekliğe ve 250 mm genişliğe sahiptir. Çalışma kapsamında deneye tabi tutulan betonarme kirişlerinin teorik olarak hesaplanan burulma dayanımları ACI 318 (2005) standartlarına göre 15 kN.m olacak şekilde tasarlanmıştır. Donatı kafesleri için TS500 (2000) standartlarına uygun 4 adet 12 mm çapında nervürlü burulma donatısı, minimum eğilme şartını sağlamak için 2 adet 12 mm çapında nervürlü eğilme donatısı ve 8 mm çapında iki kollu etriye kullanılmıştır. Betonarme kirişinde tüm etriye aralıkları 150 mm dir. Tasarımı yapılan betonarme kirişlerinde kullanılan pas paylarının beton yüzeyinden donatı merkezine olan mesafesi 25 mm'dir.



Şekil 4. 1. Betonarme Kirişlerin Kesit Özellikleri

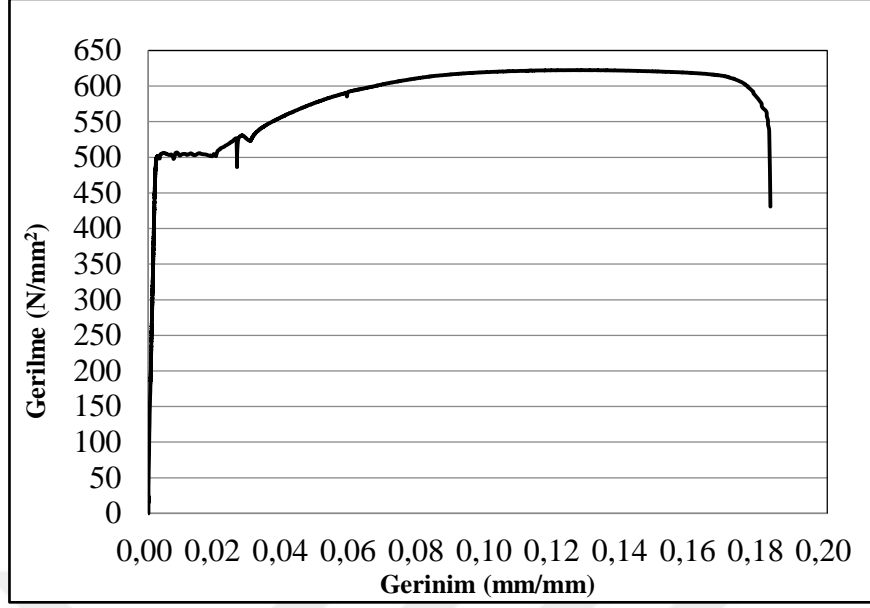


Şekil 4.2. Betonarme Kirişlerin Ön yüzü ve Arka Yüzü

Şekil 4.2’de belirtilen L1, L2, L3, L4, L5 ve L6 olarak tanımlananlar kirişteki boyuna donatıları T1, T2, Tn olarak tanımlananlar ise betonarme kirişteki etriyeleri temsil etmektedir.

4.1.1 Donatı Mekanik Özellikleri

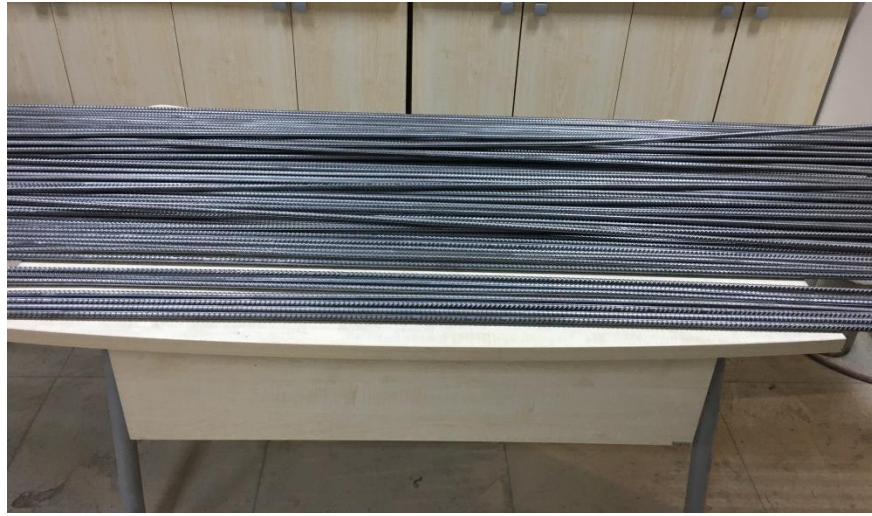
Çalışma kapsamında kullanılan betonarme donatıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için, burulma deneyleri öncesinde rastgele seçilen 6 adet donatı için ASTM A370 (ASTM 2008) standartlarına göre çekme deneyi yapılarak mekanik özellikler elde edilmiştir. Betonarme donatılarının hesaplanan ortalama mekanik özellikleri 12 mm çapındaki donatı için; akma dayanımı 506 MPa, kopma dayanımı 608 MPa bu değerlere karşılık gelen gerilme değerleri ise sırasıyla 0.0150 ve 0.1738 olup 8 mm çapındaki donatı için; akma dayanımı 987 MPa, kopma dayanımı 1177 MPa bu değerlere karşılık gelen gerilme değerleri ise sırasıyla 0.0021 ve 0.0996 değerlerindedir. Betonarme donatılarından 12 mm çaptaki için elde edilen gerilme-gerinim grafiği Şekil 4.3’de gösterilmektedir. Korozyona uğramış betonarme kirişlerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, burulma deneylerinden sonra tüm betonarme donatıları beton içerisinden çıkartılarak çekme testleri yapılmıştır.



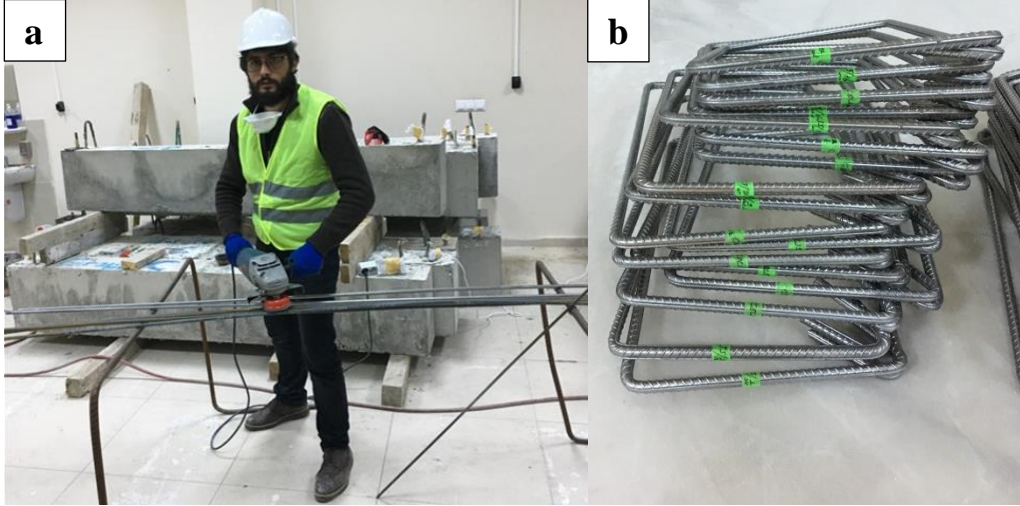
Şekil 4.3. Çelik Donatıya Ait Gerilme-Birim Deformasyon Grafiği

4.1.2 Betonarme Kirişlerin Donatı Kafeslerinin Hazırlanması

Şekil 4.4’de görüldüğü üzere betonarme donatılar tasarım aşamasında belirlenen ölçülerde kesilmiştir. Kesim işlerinin tamamlanmasından sonra tüm donatılara mekanik temizleme işlemi uygulanmıştır. Bu şekilde donatıların ilk kütlelerini etkileyecek her türlü toz, toprak, atık vb. yabancı malzeme donatı yüzeyinden arındırılmıştır. Şekil 4.5’de çelik donatılar için uygulanan mekanik temizleme işlemi ve kodlama işlemi gösterilmektedir.

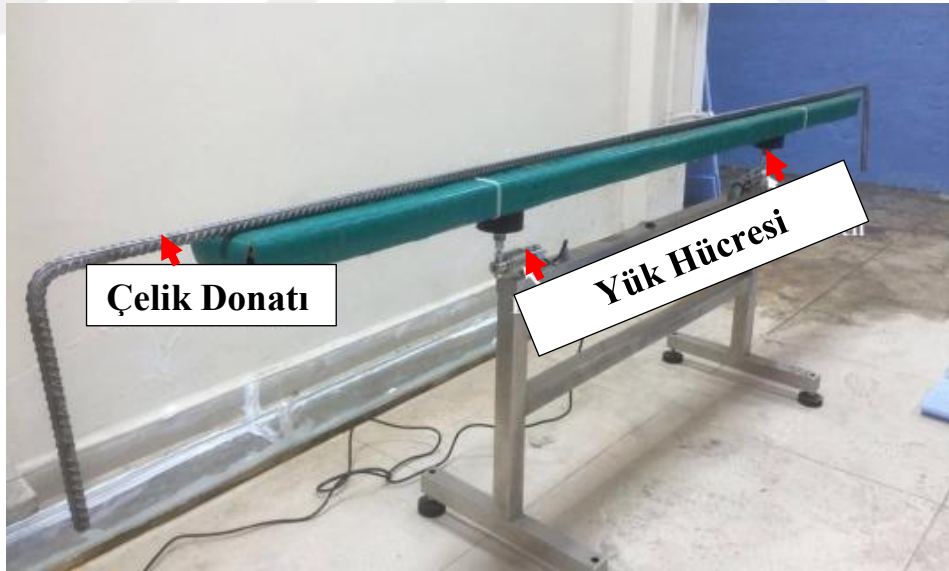


Şekil 4.4. Betonarme Donatıları



Şekil 4.5. Betonarme Donatılarının Hazırlanması: (a) Donatı Mekanik Temizleme, İşlemi (b) Donatıların Kodlanması

Mekanik temizleme işlemleri tamamlanan donatılar kodlandıktan sonra Şekil 4.6'de görülen 0.05 gr hassasiyete sahip iki noktadan yük hücreli bir terazide tartılarak ilk kütleleri kayıt altına alınmıştır. Kodlama işlemi ile deney sonrasında betonardan çıkartılan donatıların karışmaması amaçlanmıştır.



Şekil 4.6. Betonarme Donatılarının Tartılması

Yapılan tartımlar sonucunda kayıt altına alınan betonarme donatılarının ilk kütleleri Bölüm 4'de deney sonuçları kısmında Tablo 5.2'de verilmiştir. Tartım işleminden sonra betonarme donatıları bağlanarak Şekil 4.7'da ve Şekil 4.8'de gösterildiği şekilde donatı kafesleri hazırlanmıştır.



Şekil 4.7. Betonarme Kiriş Donatılarının Bağlanması



Şekil 4.8. Betonarme Kirişlerin Donatı Kafesleri

Çalışma kapsamında su yalıtımlı ply-wood kalıplar kullanılmıştır. Belirlenen ölçülerde kesilen ply-wood kalıplar birleştirilerek montaj işlemleri yapılmıştır. Beton döküm işleminden önce kalıpların içi temizlenmiş ve kalıp yağı ile yağlanmıştır. Bu şekilde betonarme kirişler kalıplarından daha rahat çıkarılmış ve düzgün yüzeyli bir beton elde edilmiştir. Şekil 4.9’de çalışma kapsamında imalatı yapılan kalıp işleri gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Betonarme Kirişler İçin Hazırlanan Kalıplar

Beton döküm işleri TS 500 (2000) standartlarına uygun şekilde yapılmıştır. Şekil 4.10'da çalışma kapsamında beton döküm işleri gösterilmektedir. Katkısız hazır beton kullanılarak aynı gün ve tek mikserden tek aşamada beton döküm işleri gerçekleştirilmiştir. Betonun homojen şekilde yerleşmesi ve sıkışması için belirli aralıklarla yönetmeliklere TS1247 (1984) uygun şekilde vibratör kullanılmıştır.



Şekil 4.10. Beton Döküm İşlemi

Tez çalışması kapsamında kullanılacak betonarme kirişlerinin beton basınç dayanımlarını tespit etmek için beton döküm işlemleri sırasında 3'er adet 150 x 150 x 150 mm küp numuneleri ve 150 x 300 mm boyutlarında silindir numuneleri TS EN-206 (2000) standartlarına uygun şekilde alınmıştır. Şekil 4.11'da beton dökümü sırasında

alınan küp numuneleri görülmektedir. Kullanılan numune kalıpları su emmez ve su sızdırmaz özelliktedir. Küp numune alımında her bir kalıbın içi yağlanmıştır. İki tabaka halinde kalıplara doldurulan betonun sıkıştırma işlemi 16 mm çapında düz nervürlü çubuk kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 4.11. Küp Numune Alımı

Silindir beton numunelerin basınç dayanımları ASTM C39M tarafından açıklanan standartlara göre elde edilmiştir. Beton silindir numuneleri burulma deneylerinin başladığı gün kırılmıştır elde edilen beton basınç dayanımı 30 MPa'dır. Döküm işlemi tamamlanmış olan taze betonun su içeriği, çimento hidratasyonunun tamamlanabilmesi için uygun düzeydedir. Ancak beton dökümünün ardından geçen süre içinde betonun yeterli malzeme özelliklerine erişmesi için geçen sürede nem ve sıcaklık gibi durumları kontrol altında tutmak gereklidir. Yeterince bakımı yapılmayan betonda başlangıçta mikro düzeyde olan çatlaklar zamanla genişlemektedir. Beton yüzeyindeki karbondioksit difüzyonu yüzey boyunca homojen bir dağılım sergilemez oluşan çatlaklar ile bu durum daha belirsiz bir hal almaktadır. Çatlağın olduğu bölgelerde pH seviyesinin düşmesiyle birlikte donatıda çukur korozyon oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Çukur korozyon oluşumu ile birlikte donatı boyunca homojen bir şekilde korozyon dağılımından uzaklaşmaktadır. Bu sebeplerden dolayı beton dökümünden itibaren ilk 7 gün süresi boyunca kürlenme işlemi dikkatli bir şekilde yapılmıştır. Beton dökümü tamamlandıktan 5 gün sonra betonarme kirişleri Şekil 4.12'de görüldüğü gibi kalıplarından çıkarılmıştır. 28 gün sonra betonarme numunelerinin beton basınç dayanımlarını tespit etmek için yapılan beton basınç

dayanım deneyi Şekil 4.13’da görülmektedir. Deney sonucunda ortalama küp ve silindir numunelerinin sırasıyla beton basınç dayanımları 38 ve 30 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.12. Kalıptan Çıkarılan Betonarme Kirişler



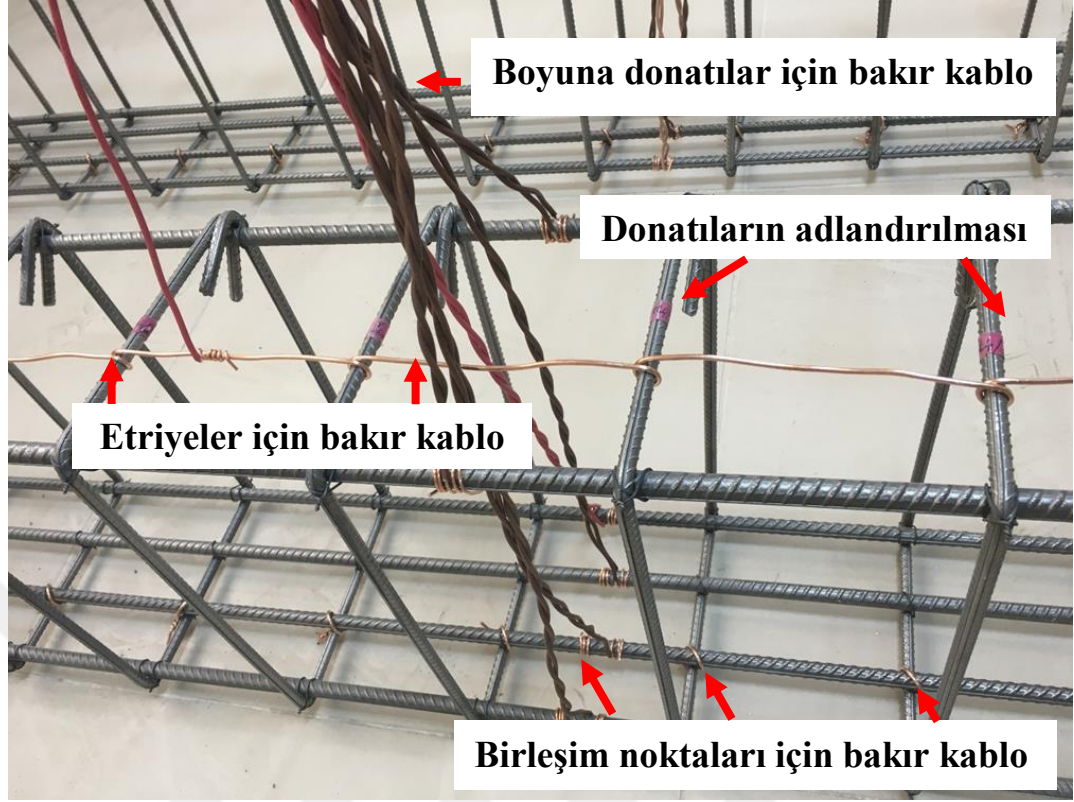
Şekil 4.13. Beton Basınç Deneyleri

4.2. Yöntem

4.2.1. Hızlandırılmış Korozyon Yöntemi

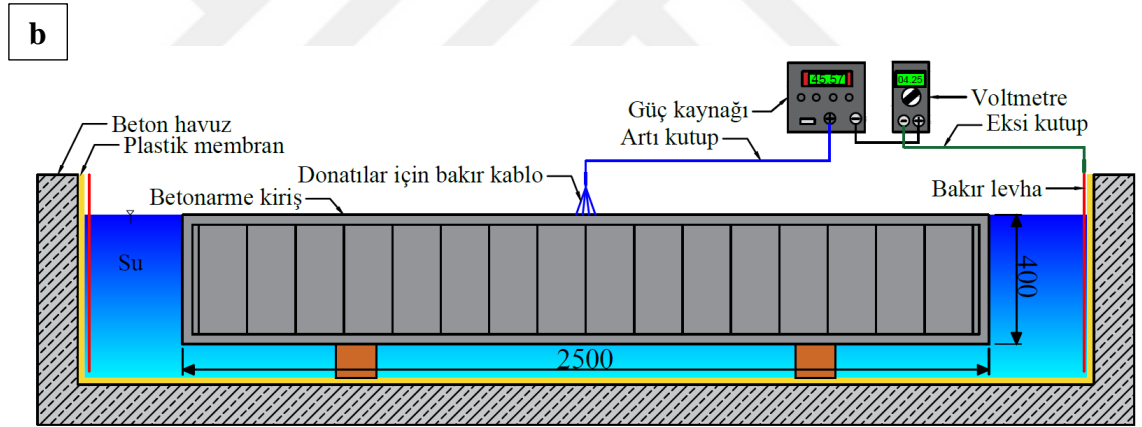
Hızlandırılmış korozyon yöntemi tamamlanması uzun yıllar sürecek korozyon sürecini aylar içinde tamamlamayı sağlayan bir yöntemdir. Tez çalışması kapsamında kullanılan hızlandırılmış korozyon yöntemi Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 13 Mart Yapı Mekaniği laboratuvarın da tam ölçekli bakır kaplı bir paslandırma havuzunda gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma kapsamında 6 adet betonarme kirişi hızlandırılmış korozyon yöntemi kullanılarak %18.7 %15.8 %11.0 %8.1 %6.6 ve %6.5 oranların da paslandırılmış ve bir adet betonarme kirişi kontrol amaçlı kullanılacağı için korozyona maruz bırakılmamıştır.

Paslandırma havuzunda deney sırasında olası elektrik kaçaklarına karşı havuzun tüm iç yüzeyleri plastik membran ile kaplanmıştır. Korozyonun yapılarda ilerlerken izlediği yolu veya dağılımını tahmin etmek oldukça güçtür. Bu sebepten dolayı yapılan bu çalışmada donatı boyunca eşit bir paslanma dağılımı elde etmek için Yalciner vd. (2017) yılında yaptığı yöntem referans alınarak Şekil 4.14'de görüldüğü gibi tüm boyuna donatı ve sargı donatılarından bakır kablolar geçirilmiş ve bu kabloların doğrudan donatılar ile teması sağlanmıştır. Bu şekilde sistem üzerinden uygulanan akımın tüm donatı yüzeyi boyunca sağlıklı bir şekilde ilerlemesi amaçlanmıştır. Donatılara bağlanan bakır kabloların hepsi için TS EN 50525-2-31 (2012) standartlarına uygun 4mm çapında bakır kablolar kullanılmıştır. Yalıtımlı dış kaplamasından ayrılan bakır kablolar etriye ve boyuna donatılarına bağlandıkları kısımlarda donatı çevresinde bir tam tur sarılmış ve bir sonraki donatıya devam ettirilerek bu işlem tekrarlanmıştır. Bakır kabloların tek parça halinde kullanımı ile aralarından oluşacak olası bir temassızlık durumunun önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Etriye ve boyuna donatıların birleşim yerlerinde de aralıklı olarak bağ teli yerine 4 mm bakır kabloların kullanımı devreden geçen akımın iletiminde katkıda bulunması amaçlanmıştır.



Şekil 4.14. Bakır Kabloların Donatılara Bağlanması

Şekil 4.15’de çalışma kapsamında kullanılan paslandırma düzeneği gösterilmektedir. Şekil 4.15’de gösterilen devre elemanları 60 volt 10 amper kapasitesinde ayarlanabilir güç kaynakları, devreden geçen akımların kontrollü bir şekilde kayıt altına alınması için voltmetreler, bu voltmetrelerin bilgisayara çoklu olarak bağlanmasında kullanılacak olan RS232 bağlantı kablosu ve tüm havuzu çevreleyen bakır plakadan oluşmaktadır. Elektrik devresinin tamamlanabilmesi için; güç kaynağının artı kutbu donatılarla bağlanmış bakır kablolarla, eksi kutbu ise betonarme havuzunu çevreleyen bakır plakaya bağlanmıştır. Paslanmanın kontrollü şekilde yapılabilmesi için sisteme bağlı voltmetreler yardımıyla her 60 saniye için sistemden geçen akım bilgisayar ortamında kayıt altına alınmıştır.

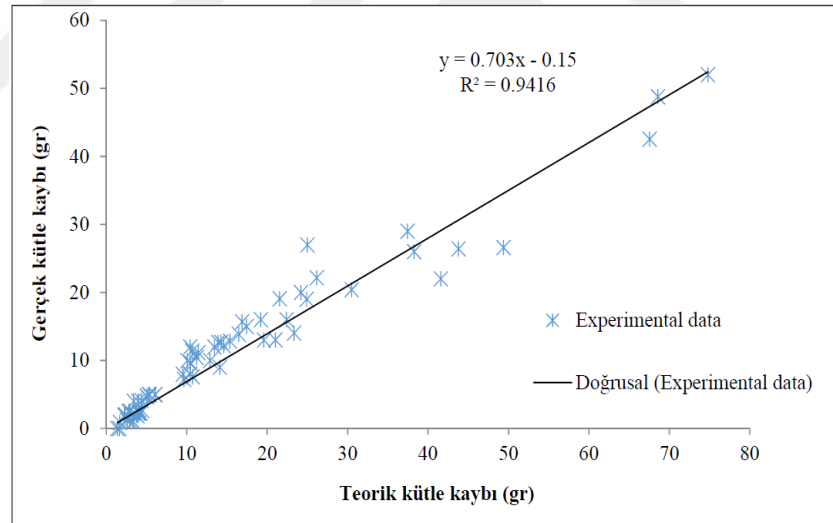


Şekil 4.15. Paslandırma düzeneği: (a) Hızlandırılmış korozyon deney düzeneği, (b) Deney düzeneği şematik gösterimi

Hedeflenen teorik korozyon oranlarına ulaşmak için deney süreleri ve teorik paslanma oranları Faraday Kanununa göre hesaplanabilmektedir. (Bae vd., 2009; X.Liu vd., 2018; Nossoni 2015 ve Wang vd, 2004) de yapmış oldukları çalışmalarda donatıların kütle kayıplarını Faraday Kanunu'nu kullanarak hesaplamış iken, (Coronelli 2002 ve Stanish vd, 1999) ise yüzde olarak çaptaki azalmayı ilk çapa bölerek hesaplamıştır.

$$m = \frac{t(s) \times I(A) \times 55.847}{n \times 96,487} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de t saniyeyi I sistemden geçen akımı, n değeri korozyon sürecinde üretilen veya harcanan elektron miktarını, 55.847 değeri metalin atomik kütlesini (gr/mol), 96.487 (A.sn/mol) ise Faraday sabitini göstermektedir. Teorik paslanma hesabında kullanılan Faraday Kanunu çelik donatılara yalın halde akım verilerek gerçekleştirilmiştir. Fakat betonun içindeki donatıda korozyonun hemen başlamadığı betonun çeliğe karşı koruyucu etkisi ile paslanma olayının başlaması için belirli bir süreye yani bir enerjinin oluşumuna ihtiyacı vardır. Bu sebeplerden dolayı gerçek kütle kaybı Faraday Kanunu’na göre hesaplanan (teorik) kütle kaybından her zaman daha düşüktür. Yalciner vd. (2012) yapmış olduğu çalışmada gerçek korozyon oranı ile Faraday Kanunu’na göre hesaplanmış teorik kütle kaybını karşılaştırmışlardır. Yalciner vd. (2012) hızlandırılmış korozyon yöntemi ile hedeflenen pas oranına daha yakın sonuçlar veren bir model geliştirmiştir. Şekil 4.16’de sunulan grafikte hedeflenen korozyon oranlarının Faraday kanunu kullanılarak elde edilmesi için gerekli olan ilişki gösterilmektedir.



Şekil 4.16. Faraday Kanunu’na göre gerçek pas oranlarının karşılaştırılması (Yalciner vd. 2012)

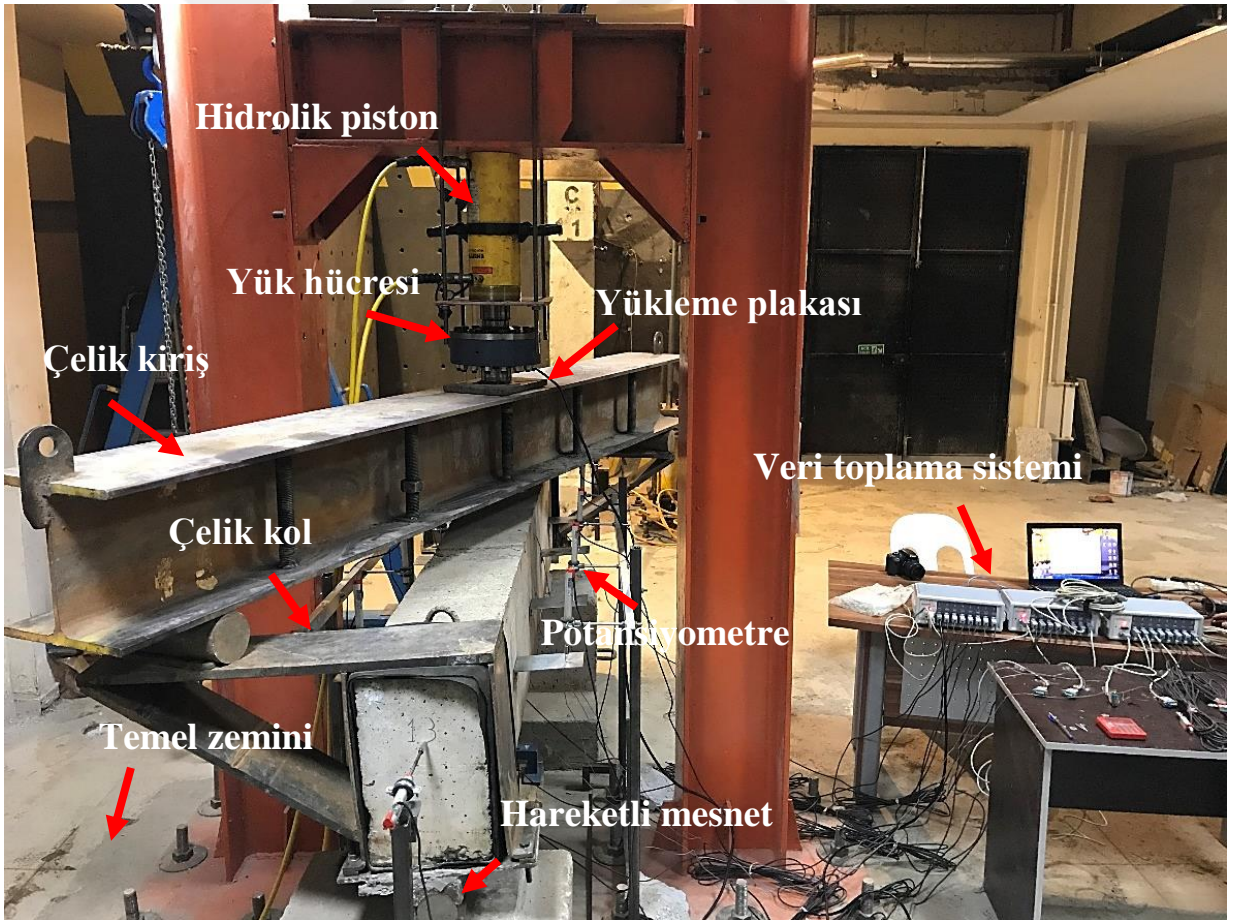
Faraday kanunu sadece hedeflenen pas oranlarını daha yakın bir şekilde teorik olarak elde etmek amaçlı kullanılmıştır. Betonarme donatılarındaki gerçek korozyon oranlarını elde etmek için burulma deneylerinden sonra betonun kırılarak ve içerisinden donatıların çıkartılması ile elde edilmiştir. Gerçek pas oranlarının hesaplanması için Denklem 4.2 kullanılmıştır. Denklem 4.2’de C_L korozyon oranını, W_i donatıların korozyona uğramadan önceki ilk kütlesini, W_f ise korozyona uğradıktan sonra mekanik

ve kimyasal temizliği yapılarak hassas terazi ile tartılan donatıların son kütlesini temsil etmektedir.

$$C_L(\%) = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100\% \quad (4.2)$$

4.2.2. Burulma Deney Düzenegi

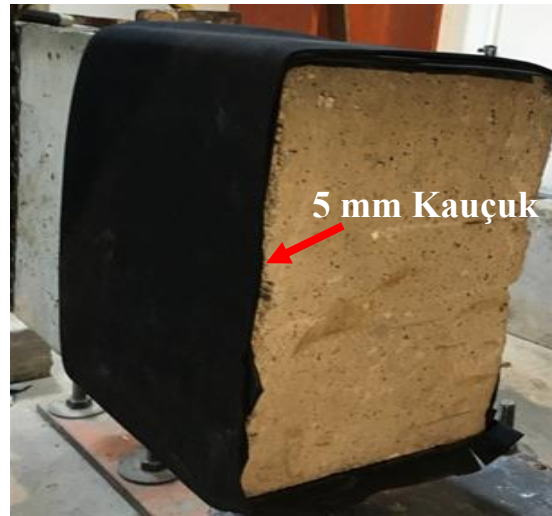
Tüm betonarme kiriş numunelerine Şekil 4.17’da görüldüğü üzere aynı ölçüm ve deney düzenegi uygulanarak deneyleri gerçekleştirilmiştir. Burulma yükü yükleme çerçevesine sabit 60 ton kapasiteli çift yönlü (basınç-çekme) çalışabilen hidrolik pompa yardımıyla sağlanmıştır. Uygulanan yükü 100 ton kapasiteye sahip yük hücresi deney düzeneginin kirişe sarılmış olan kollarına aktaracak ve betonarme kiriş üzerinde burulma momenti oluşturmuştur.



Kirişin iki mesnet bölgesi genişliği kadar kısmını saran çelik kolları yerleştirilmeden önce kirişin kenar kısımlarına Şekil 4.18’de görüldüğü üzere pahlama işlemi yapılmıştır. Tüm kirişlerde pahlama işlemi aynı oranda yapılarak kesit farklılıkları oluşmamıştır. Korozyondan dolayı mesnet göçmelerinin önüne geçilmesi için mesnet bölgeleri Şekil 4.19’de görüldüğü gibi 5 mm neopren kauçuk ile sarılmıştır. Bu şekilde hem mesnet bölgeleri korunmuş hem de kiriş ile çelik kollar arasında kalan boşluklarında önüne geçilerek yükün sağlıklı bir şekilde kiriş boyunca iletimi sağlanmıştır. Mesnetlenme şekli olarak hareketli mesnet kullanılması ile betonarme kirişlerinin eksen boyunca serbestçe dönmesine olanak sağlanmıştır.



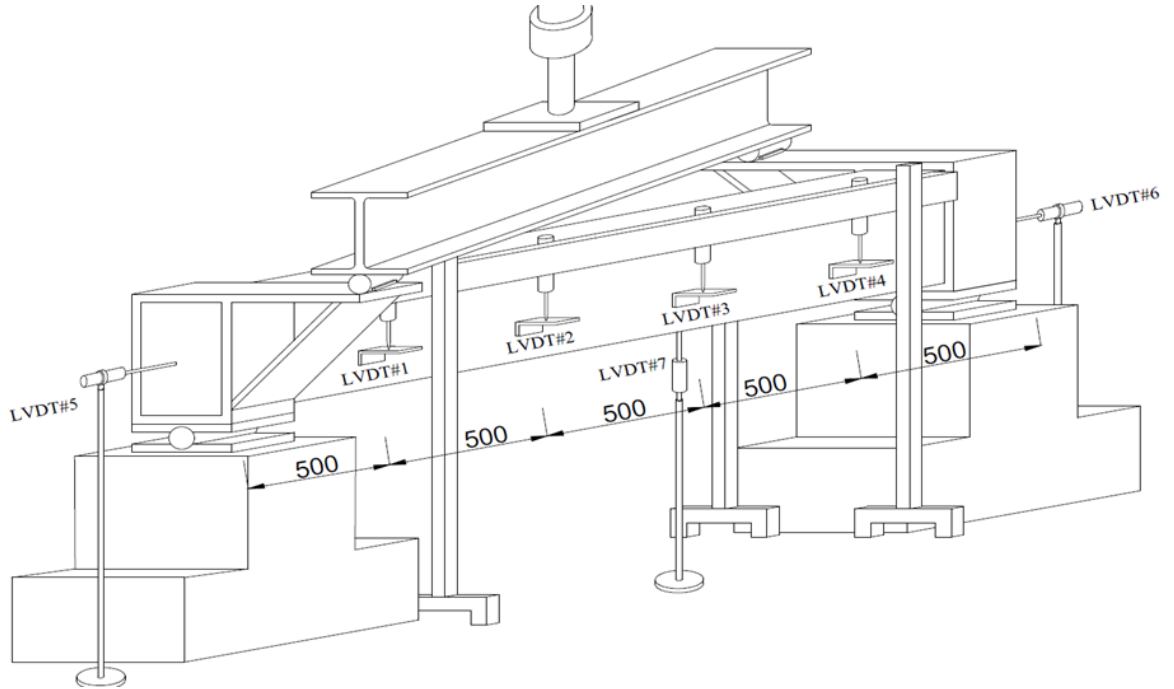
Şekil 4.18. Kiriş Kenarlarının Pahlanması (oval yapılması)



Şekil 4.19. Mesnet bölgelerine kauçuk sarma işlemi

4.2.3. Burulma Deneyi Ölçüm Düzenegi

Elde edilen tüm veriler 8 kanallı veri toplama sistemi kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Burulma deneyi sonucunda burulma momenti yükü, birim dönme açısı ve birim uzama değerleri elde edilmiştir. Uygulanan yük sonrası oluşan dönme açısı değerleri kirişin üzerine sabitlenen plakalar ve kirişten bağımsız olan 8 adet potansiyometre ile elde edilmiştir. Potansiyometreler arası mesafeler merkezden merkeze 500 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Deney sırasında meydana gelen birim uzama değerleri ise kirişin iki ucuna yerleştirilen potansiyometrik lineer cetveller sayesinde elde edilmiştir.



LVDT#1, 2, 3, 4 ve bunlara simetrik kirişin arka yüzünde bulunan LVDT#7, 8, 9, 10: Dönme açısını ölçmek için LVDT#5 ve LVDT#6: Toplam boydaki uzama değerini ölçmek için, LVDT#7: Düşey yer değiştirmeyi ölçmek için gerekli olan.

Şekil 4.20. Deney düzenegi şematik gösterimi

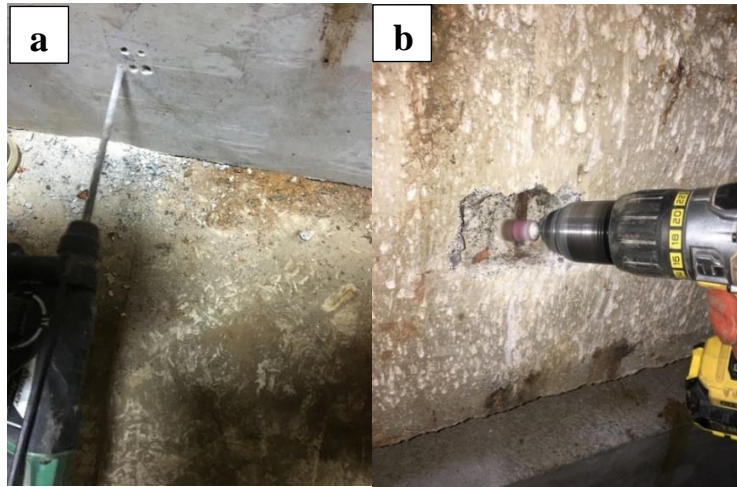
Şekil 4.20’da gösterilen potansiyometrik cetvellerden elde edilen veriler Denklem 4.3’de kullanılarak betonarme kirişe ait birim dönme açısı değerleri hesaplanmıştır. LVDT#1, LVDT#2, LVDT#3, LVDT#4, LVDT#8, LVDT#9, LVDT#10 ve LVDT#11’den elde edilen değerlerin mutlak değer içinde toplamı LVDT’ler arası kol açıklığı (Ls) değerine bölünerek dönme açısı değerleri hesaplanmıştır. Dönme açısı değerinin toplam deney bölgesi uzunluğuna (L) bölünmesiyle birim dönme açısı hesaplanmıştır. Deney numunesinin boydaki toplam uzamasını belirlemek için LVDT#5

ve LVDT#6'dan elde edilen değerler Denklem 4.4'de kullanılarak boydaki toplam uzama değeri elde edilmiştir.

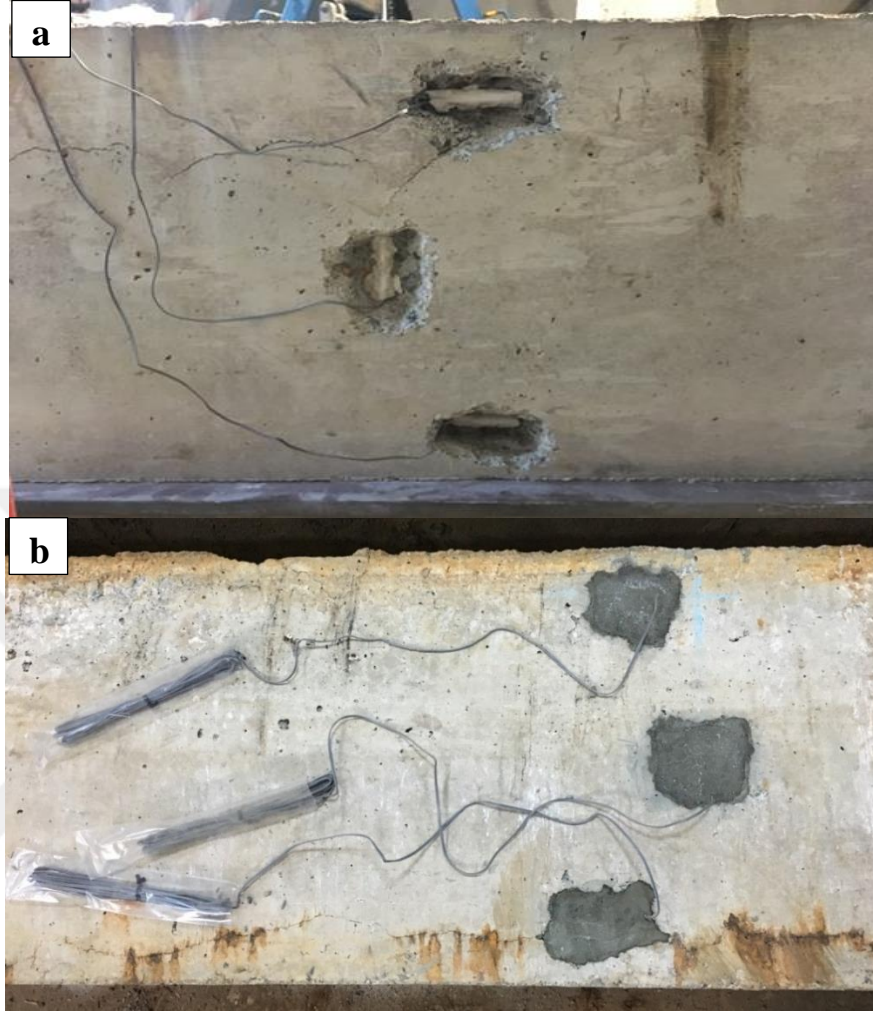
$$\emptyset = \frac{\left(\frac{L_1+L_2+L_3+L_4+L_8+L_9+L_{10}+L_{11}}{L_s} \right)}{L} \quad (4.3)$$

$$\Delta l = L_5 + L_6 \quad (4.4)$$

Betonarme kirişlerdeki boyuna ve enine donatılara gerinim pulları yapıştırılarak yükleme sırasındaki birim şekil değiştirme değerlerinin ölümü yapılmıştır. Bu işlemin paslandırma süreci tamamlandıktan sonra gerçekleştirilmiş olmasının sebebi korozyon sonucu meydana gelecek pas ürününün hassas devre düzeneğinin çalışma performansını olumsuz etkilemesidir. Korozyonu tamamlanan betonarme kiriş numunelerinin Bölüm 3 şekil 3.1'de görülen alt-üst burulma donatısı ve dokuz numaralı etriyesi donatı tespit cihazı ile belirlenmiş ve beton yüzeyleri açılmıştır. Donatı yüzeyleri gerinim pulu yapıştırılması için pürüzsüz hale getirilmiştir. Temizlenen donatı yüzeyleri aseton ile temizlenerek temiz bir yüzey elde edilmiştir. 10 mm uzunluğunda kullanılan gerinim ölçerler donatı yüzeyine yapıştırılmadan önce alt yüzeylerine yapıştırıcısı srlmştir. Donatı yüzeyine uygulanan gerinim ölçerlerin deney esnasında zarar görmemeleri için üzerleri kaplama malzemesi ile kapatılmıştır. Açılan kısımlar betonarme kiriş ile aynı beton basıncı dayanımına sahip yapısal tamir harcı ile kapatılarak deneye hazır hale getirilmiştir (şekil 4.21-4.22).



şekil 4.21. Betonarme Donatısına Gerinim ler Uygulama Aşamaları: (a) Beton yüzeyinin açılması, (b) Donatı yüzeyinin pürüzsüz hale getirilmesi.



Şekil 4.22. Betonarme Donatısına Gerinim Ölçer Uygulama Aşamaları: (a) Gerinim pulu yapıştırılması, (b) Yüzeylerin tamir harcı ile kapatılması

Betonarme donatılarında donatıda kullanılan 10 mm'lik gerinim ölçerler beton için tercih edilmemiştir. Şekil 4.23'de görülen 30 mm'lik gerinim ölçerler kullanılarak beton yüzeyinden daha sağlıklı veri alınması sağlanmıştır. Kirişlerin beton yüzeyine yapıştırılacak olan şekil değiştirme ölçerler uygulanmadan önce beton yüzeyi zımparalanmış pürüzsüz hale getirilmiştir. Gerinim ölçerin yüzeyine uygulanan yapıştırıcı beton yüzeyi içinde kullanılmıştır yapıştırıcının kuruması ile kaplama malzemesi kullanılarak koruma altına alınmıştır. Sonuç olarak beton yüzeyine uygulanan gerinim ölçer ile betonun en dış lifine ait şekil değiştirme değerleri ölçülmüştür.



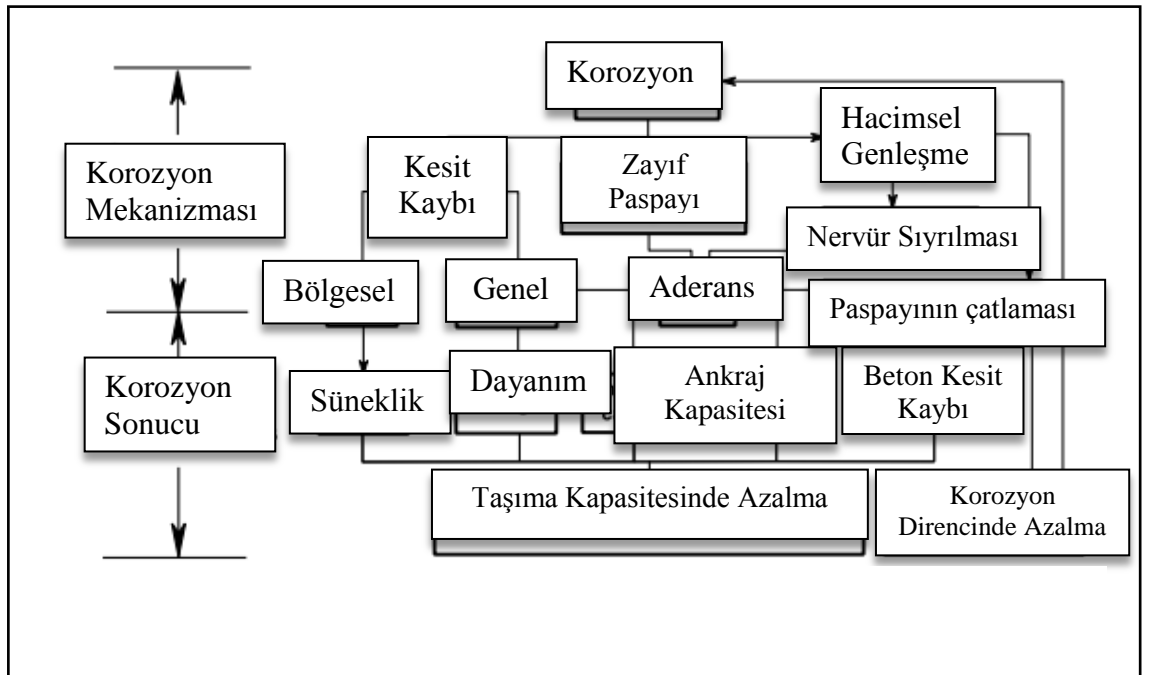
Şekil 4.23. Betonarme kiriş yüzeyine yapıştırılan gerinim ölçer

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Tez çalışmasının bu bölümünde Bölüm 3’de anlatılmış olan 6 adet paslanmaya maruz bırakılmış 1 adet paslandırılmamış betonarme kiriş numunelerinin basit burulma momenti etkisi altındaki deneyleri sonucunda elde edilen değerleri incelenmiştir. Deney sonucunda elde edilen burulma momenti-birim dönme açısı değerleri, oluşan çatlak dağılımları ve deneylerden önce tamamlanmış olan korozyon dağılımları tüm kiriş numuneleri için belirtilmiştir. Elde edilen veriler sonucunda geliştirilen modelde tezin bu kısmında sunulmuştur.

5.1. Hızlandırılmış Korozyon Deneyi Sonuçları

Korozyona uğramış bir yapının gerçek davranışını tahmin etmek ve kalan servis ömrünü belirlemek paslanmaya maruz kalmış binalar için son derece önemlidir. Korozyon hem donatının hem de betonun mekanik özelliklerine zarar vermektedir. Cairns vd. (1999) tarafından hazırlanmış olan korozyon mekanizması ve sonuçları Şekil 5.1’de görülmektedir.



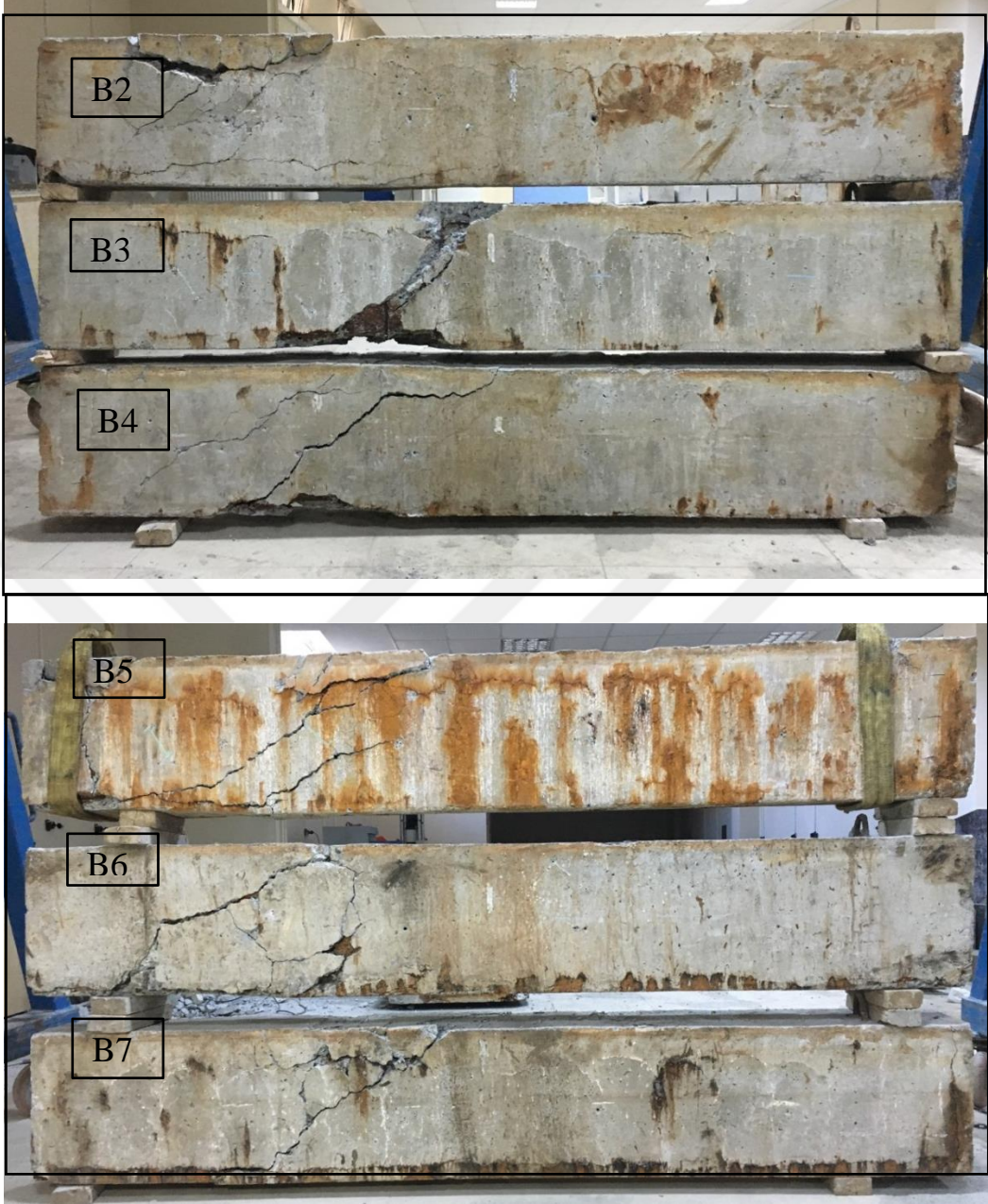
Şekil 5.1. Cairnes vd. 2019 Tarafından Hazırlanmış Korozyon Mekanizması.

Paslandırılmaya maruz bırakılmış Şekil 4.15’de görülen 6 adet betonarme kiriş numunelerinin paslandırma işlemi tamamlandıktan sonra Şekil 5.2’de görüldüğü üzere vinç yardımıyla tam ölçekli bakır paslandırma havuzundan çıkartılmış kurumaya bırakılmıştır. 3 ton kapasiteli seyyar vinç ile gerçekleştirilen bu taşıma işlemlerinde 2 ton kapasiteli halatlar kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Kirişlerin Havuzdan Çıkarılması.

Paslandırılmamış B1 kirişi hariç diğer tüm kirişler vinç yardımıyla üst üste yerleştirilmiştir. Kirişlerin aynı yüzeylerinde oluşan baskın diyagonal çatlakları Şekil 5.3’de net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.3. Yükleme Deneylerinden Sonra Betonarme Kirişleri.

Burulma deneyleri gerekleŖen betonarme kiriŖlerin deney sonrası çatlak dağılımları incelenmiŖtir. Daha sonra tüm numuneler kırılarak ilerinden betonarme donatıları ıkarılmıŖtır. Beton kırılmaları hilti yardımıyla Ŗekil 5.4’de ve Ŗekil 5.5’de görüldüğü üzere yapılmıŖtır.



Ŗekil 5.4. Betonarme KiriŖlerin Kırımı.



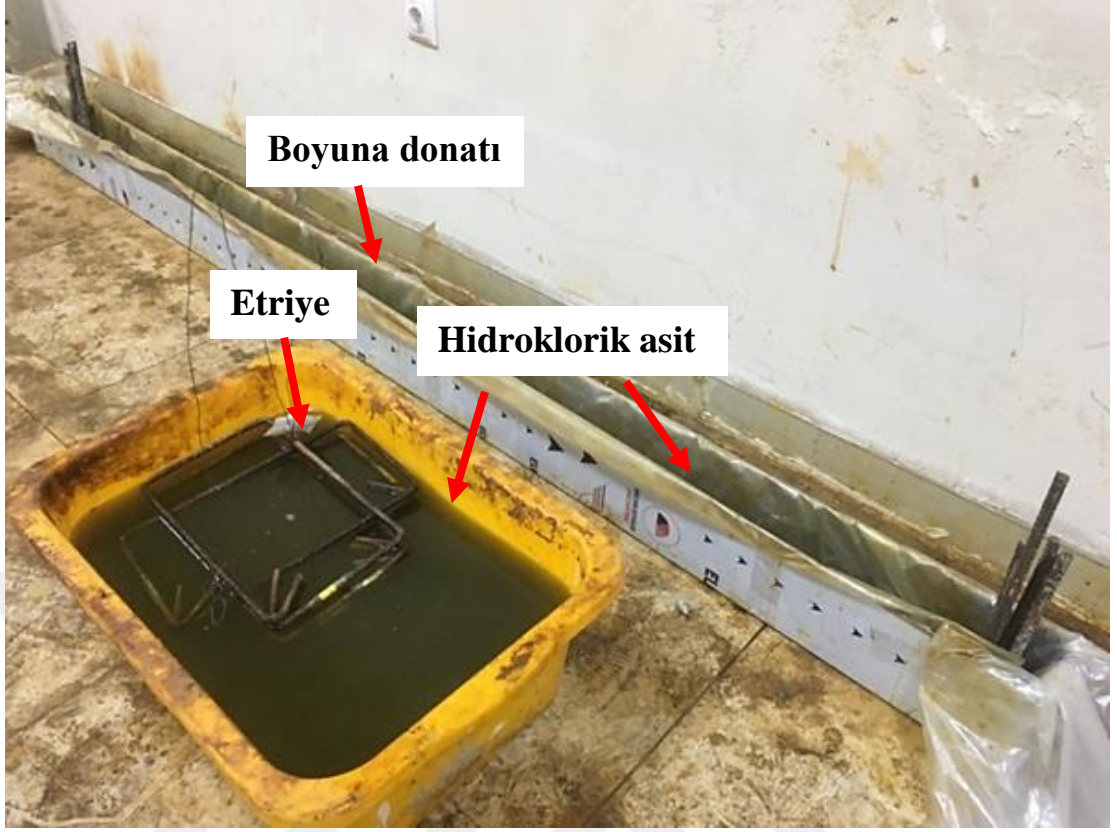
Ŗekil 5.5. Betondan ıkarılan Donatılar.

Kırım işlemlerinin tamamlanmasından sonra betonarme donatı kafesleri betondan ayrılmıştır. Şekil 5.6'da tüm betonarme kirişlerin donatı kafesleri görülmektedir.



Şekil 5.6. Betonarme kirişlerin donatı kafesleri (B2-B3-B4-B5-B6-B7 Kirişleri)

Şekil 5.6'da görülen tüm betonarme donatıları ASTM G1-03 (2003) standartlarına uygun şekilde kimyasal ve mekanik yöntemler kullanılarak temizlenmiştir. ASTM G1-03 (2003) yönetmeliğine göre betonarme donatıları önce kimyasal ardından mekanik temizlemeye maruz bırakılmıştır. Şekil 5.7'de görüldüğü üzere kimyasal temizleme için alüminyum bir havuz inşaa edilmiş ve içerisine kullanılacak olan su kütlesinin %5'i kadar hidroklorik asit ilave edilerek donatılar 30 dakika boyunca bu karışımda bekletilmiştir. Şekil 5.8'de görülen mekanik temizleme için tel fırça ve taş motoruna özel bir başlık takılarak yapılmıştır. Tartım sonuçlarını etkileyecek tüm beton parçaları donatı yüzeyinden uzaklaştırılmıştır.



Şekil 5.7. Donatıların Kimyasal Temizleme Aşaması



Yapılan mekanik temizleme işleminde donatıların nervürlerinin Yapılan kimyasal ve mekanik temizleme işlemlerin ardından tüm boyuna ve sargı donatıları Şekil 5.9’da görüldüğü üzere tekrardan 0.05 gr hassasiyete sahip iki noktadan yük hücreli terazide tartılmıştır.



Şekil 5.9. Korozyon Ürününden Arındırılan Betonarme Donatılarının Tartılması

Gerçek pas oranlarının hesaplanması için Denk. 5.1 kullanılmıştır. Denk. 5.1’de C_L korozyon oranını, W_i donatıların korozyona uğramadan önceki ilk kütlesini, W_f ise korozyona uğradıktan sonra mekanik ve kimyasal temizliği yapılarak hassas terazi ile tartılan donatıların son kütlesini temsil etmektedir.

$$C_L = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100\% \quad (5.1)$$

Mekanik ve kimyasal temizleme işlemlerinin tamamlanmasından ardından tüm boyuna ve donatılar ve etriyeler tartılarak elde edilen gravimetrik test sonuçları Tablo 5.1’de ve 5.2’de verilmiştir. Yalciner vd. (2017) yılında yaptığı model referans alınarak hesaplanan teorik korozyon oranları ile gravimetrik test sonuçlarından elde edilen

korozyon oranları birbirlerine yakın değerler çıkmıştır. Değerlerde ki farklılıkların ana sebebi ise farklı beton sınıfı ve betonun homojen olmamasından kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Tablo 5.1. Boyuna donatı ve Etriyelerin İlk Kütleleri

Kod	B1 C_L=%0	B2 C_L=%6.5	B3 C_L=%6.7	B4 C_L=%8.1	B5 C_L=%11.0	B6 C_L=%15.8	B7 C_L=%18.7
L1		2538	2637.5	2588	2668.0	2653.5	2610.5
L2		2609.5	2618.0	2531	2632.0	2538.0	2680.5
L3		2609.5	2578.5	2457	2625.0	2601.0	2569.0
L4		2595	2523.0	2656.5	2602.5	2538.5	2626.0
L5		2959	2800.5	2948.5	2958.0	2946.0	2971.5
L6		2545	2627.0	2602	2608.0	2526.5	2581.0
S1	PASLANDIRILMAMIş KIRIş NUMUNESİ	464.5	472.5	534.5	464.0	477.5	531.5
S2		478.5	493.0	487.5	470.5	478.0	528.5
S3		477	472.0	489.5	469.5	463.5	479.0
S4		490	483.0	490	469.0	470.0	478.5
S5		492.5	481.0	536	482.0	478.5	513.0
S6		494	476.0	488	462.5	477.5	472.5
S7		493	470.0	479.5	475.5	479.5	468.5
S8		492.5	490.0	470.5	469.5	478.5	477.5
S9		492	482.0	486.5	478.0	471.5	466.0
S10		490	478.5	488	479.0	467.5	524.0
S11		494	469.0	480.5	493.5	474.5	469.5
S12		486.5	477.5	466.5	480.0	466.0	486.5
S13		480.5	478.0	472.5	478.5	477.0	481.5
S14		476.5	472.0	478	475.0	471.0	483.5
S15		491.5	472.5	478	481.5	473.5	482.0
S16		471	475.5	478.5	475.0	474.5	474.5
S17		487.5	465.0	477.5	479.5	465.0	516.5

Tablo 5.2. Korozyon Sonrası Boyuna Donatı ve Etriye Kütleleri

Kod	B1 C_L=%0	B2 C_L=%6.5	B3 C_L=%6.7	B4 C_L=%8.1	B5 C_L=%11.0	B6 C_L=%15.8	B7 C_L=%18.7
L1		2437.0	2560.0	2506.0	2473.0	2284.5	2161.5
L2		2526.5	2497.5	2377.5	2372.5	2437.5	2338.0
L3		2452.0	2437.5	2264.5	2352.5	2161.0	2160.5
L4		2514.0	2440.5	2481.5	2410.0	2315.5	2311.5
L5		2700.0	2540.0	2629.0	2573.0	2439.5	2593.5
L6		2361.0	2472.5	2476.5	2271.5	2238.0	2067.5
S1	PASLANDIRILMAMIŞ KIRIŞ NUMUNESİ	427.0	419.0	494.5	407.0	414.5	375.0
S2		453.0	473.5	463.0	416.5	447.0	417.0
S3		452.5	440.0	461.5	416.5	425.0	403.5
S4		467.0	452.5	458.0	414.0	415.0	418.0
S5		467.5	454.5	501.5	429.5	431.0	405.0
S6		472.5	453.5	463.5	407.5	414.0	410.0
S7		473.5	443.5	453.5	420.0	426.5	399.5
S8		470.0	466.0	445.5	418.0	431.5	410.0
S9		471.5	456.5	458.5	406.5	418.5	407.0
S10		466.5	455.5	462.0	424.5	404.0	414.0
S11		471.0	447.0	450.5	438.0	417.0	404.5
S12		463.5	453.5	439.0	418.5	417.5	375.0
S13		456.5	446.5	447.0	434.0	414.5	408.0
S14		454.0	450.0	448.0	424.5	427.0	403.5
S15		469.5	451.5	454.0	428.5	416.0	421.0
S16		448.0	453.5	453.0	426.5	424.5	412.5
S17		448.5	412.0	438.5	391.0	405.0	377.0

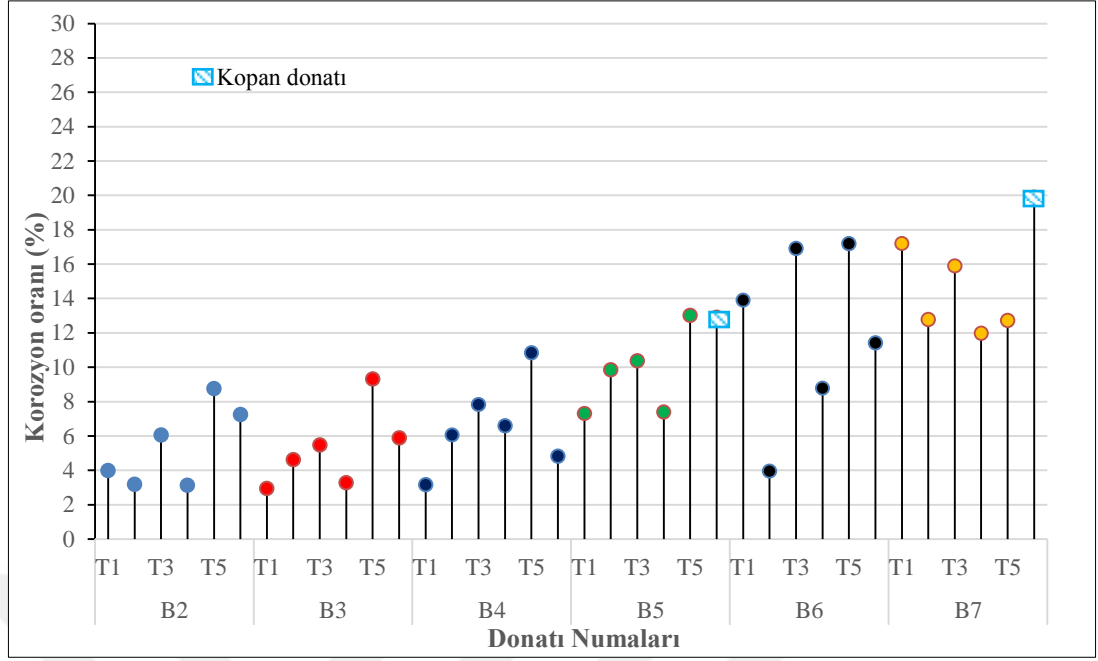
Tablo 5.3. Gravimetrik test sonuçları

Numune	İlk kütle (g)		Son kütle (g)		Gerçek korozyon oranı (%)		ΔAs (mm ²)		Uygulanan akım-saat (A.h)
	T	L	T	L	C _{LT}	C _{LL}	ΔA _{sT}	ΔA _{sL}	
B1	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B2	8251.5	15856.0	7832.0	14990.5	5.08	5.46	2.56	6.17	1882.8
B3	8107.5	15784.5	7628.5	14948.0	5.91	5.30	2.97	5.99	1536.3
B4	8281.5	15783.0	7791.5	14735.0	5.92	6.64	2.97	7.51	1503.6
B5	8082.5	16093.5	7121.0	14452.5	11.90	10.20	5.98	11.53	2562.3
B6	8043.5	15803.5	7148.5	13876.0	11.13	12.20	5.59	13.79	3623.9
B7	8333.0	16038.5	6860.5	13632.5	17.67	15.00	8.88	16.96	4384.8

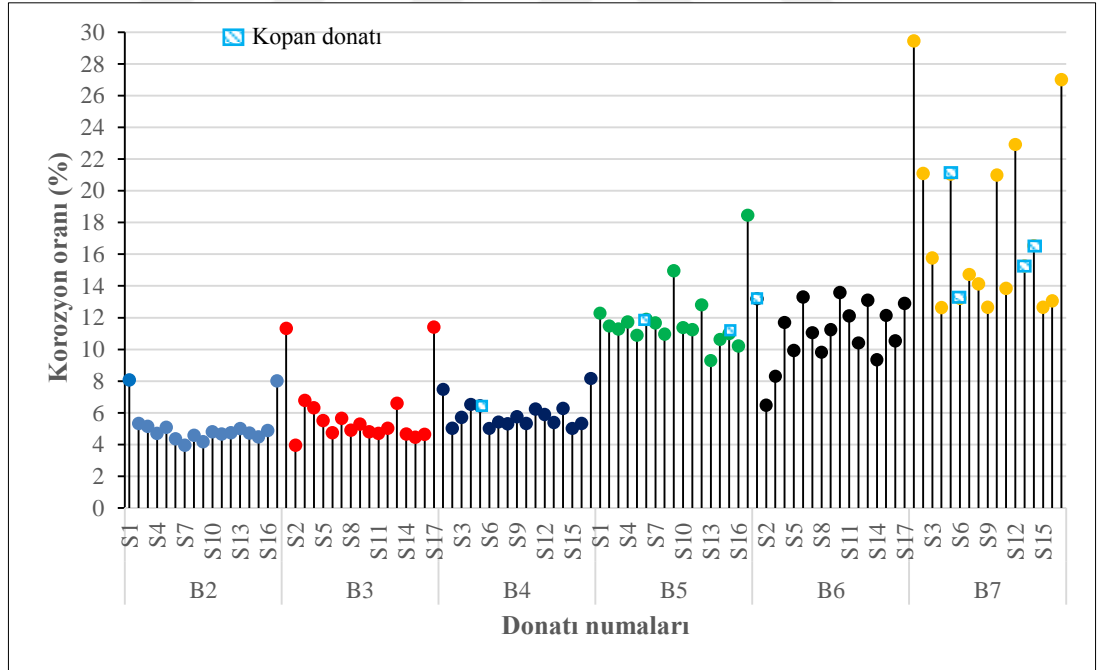
T: Etriyelerin toplam kütlesi. L: Boyuna donatılarının toplam kütlesi. C_{LT}: Boyuna donatılarının ortalama korozyon oranı.

C_{LL}: Etriyelerin ortalama korozyon oranı. ΔAs (mm²): Ortalama kesit kaybı

Gerçek korozyon oranlarının tespit etmek amaçlı betonun kırılarak içerisinde betonarme donatılarının çıkarılması tekniği mevcut literatür de fazla yer almamaktadır. Yapılan bu çalışma kapsamında tüm betonarme kiriş numuneleri için elde edilen korozyon oranları değerleri boyuna donatı için Şekil 5.10'da etriyeler için Şekil 5.11'de görüldüğü üzere ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 5.10'da ve Şekil 5.11'de görülen korozyon oranları aynı kiriş numunesine ait donatılarda kendi içlerinde farklılık gösterebilmektedir. Bu farklılık donatının ilk kütlesi ve betonarme kirişi içindeki bulunduğu konumdan kaynaklanmaktadır. Sargı donatılarının boyuna donatılara göre fazla korozyon oranına sahip olmasının sebeplerinden biride bu nedendir.



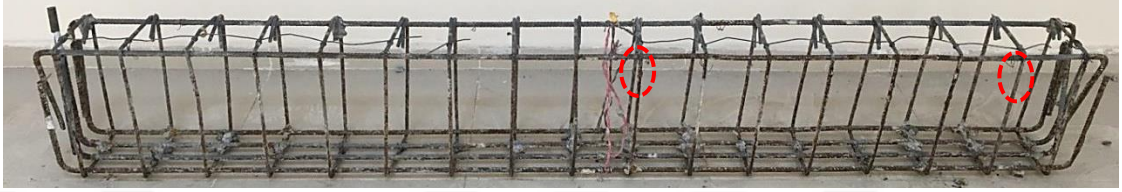
Şekil 5.10. Boyuna donatılarda oluşan korozyon dağılımı



Şekil 5.11. Etriyelerdeki korozyon dağılımı

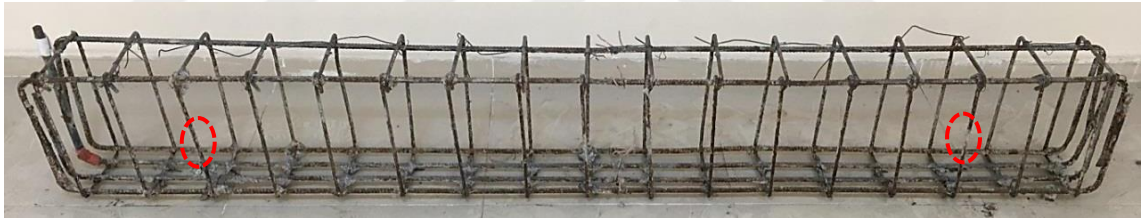
Betonarme kirişlerinin tartımları sonrası elde edilen gerçek korozyon oranları ve gözlem sonucu donatıların detaylı incelemesi yapılmıştır. Şekil 5.11’de görülen B2 numaralı betonarme kirişi en düşük korozyon oranına (%5.3) sahip kiriştir. Deney sonrası yapılan

gözlemlerde kopan hiçbir donatı bulunmamaktadır. Mesnet bölgelerinde kısmen incelmeler mevcuttur. Paslanmanın homojen bir dağılım sergilemesi için tüm boyuna ve enine donatılardan geçen bakır kablolar erimeden işlevlerini yerine getirmiştir. Donatı kafes Şekil 5.12 ile 5.17 arasında şekillerde kırmızı kesik çizgi ile gösterilen donatılar kopma noktasına kadar incelmış seviyede beyaz kesikli çizgideki donatılar ise kopmuş donatılardır.



Şekil 5.12. Paslanmış B2 Kirişi Donatı Kafesi

Şekil 5.13’de görülen B3 numaralı betonarme kirişi %5.5 korozyon oranına sahiptir. B2 numaralı kirişe göre donatı kesit kaybı daha fazladır ve donatılardaki incelmeler kiriş boyunca dağılmış bir durumdadır.



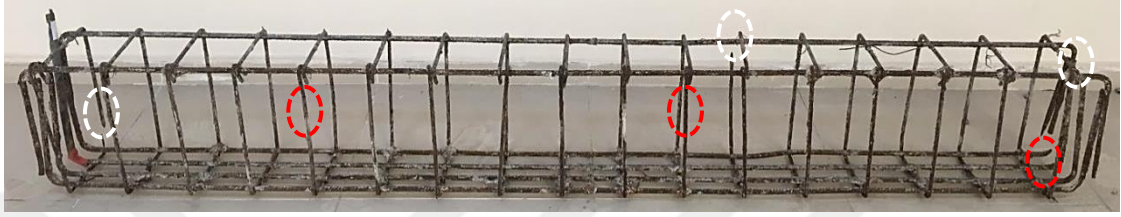
Şekil 5.13. Paslanmış B3 Kirişi Donatı Kafesi

Şekil 5.14’de görülen B4 numaralı betonarme kirişi %6.39 korozyon oranına sahiptir. B2 ve B3 kirişlerinde gözlenmeyen donatı kopması B4 kirişinde mevcuttur. Tüm donatıların homojen bir şekilde paslanmış olduğu gözlenmiştir ve bir adet etriye paslanmadan dolayı kopmuştur.



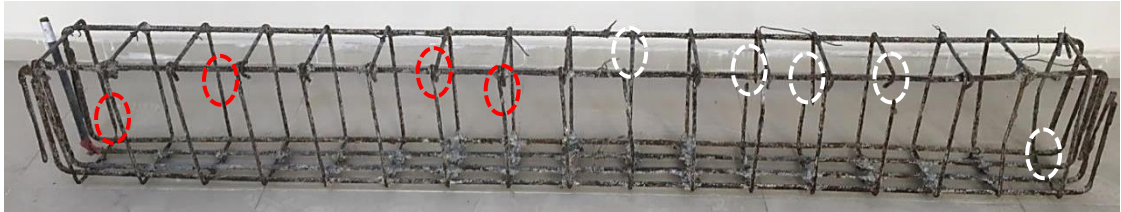
Şekil 5.14. Paslanmış B4 Kirişi Donatı Kafesi

Şekil 5.15’de görülen B5 numaralı betonarme kirişi %10.76 korozyon oranına sahiptir. Pas oranı arttıkça betonarme donatılarının çaptaki azalmaları ve bunun ilerlemesi sonucu kopması B5 kirişinde görülmektedir. Boyuna donatı ve etriyelerin birleşim bölgelerinde incelmeler gözlenmiştir. B5 kirişinde bir adet boyuna donatısı iki adet sargı donatısı kopmuştur. Boyuna donatı gönye kısmından etriyelerden bir tanesi boyuna donatıya yakın kısmında diğeri ise orta bölgesinden kopmuştur.



Şekil 5.15. Paslanmış B5 Kirişi Donatı Kafesi

Şekil 5.16’da görülen B6 numaralı betonarme kirişi %11.83 korozyon oranına sahiptir. İkinci en yüksek korozyon oranına sahip olan B6 kirişinde 4 adet sargı donatısı ve 1 adet boyuna donatı kopmuştur. B5 kirişine göre tüm sargı donatıları boyuna donatı ve sargı donatısının birleşim yerlerinden kopacak düzeyde incelmıştır. Etriyelerin genellikle orta kısımlarından koptuğu gözlenmiştir.



Şekil 5.16. Paslanmış B6 Kirişi Donatı Kafesi

Şekil 5.17’de görülen B7 numaralı betonarme kirişi %15.91 korozyon oranına sahiptir. Çalışmanın en yüksek korozyon oranına sahip kirişi olan B7 kirişinde 7 adet etriye 2 adet boyuna donatı kopmuştur. Kopan etriyeler diğer kiriş numunelerinde olduğu gibi genellikle orta kısımlarından kopmuşlardır. Boyuna donatıların ise uç kısımlarından koptuğu gözlenmiştir.



Şekil 5.17. Paslanmış B7 Kirişi Donatı Kafesi

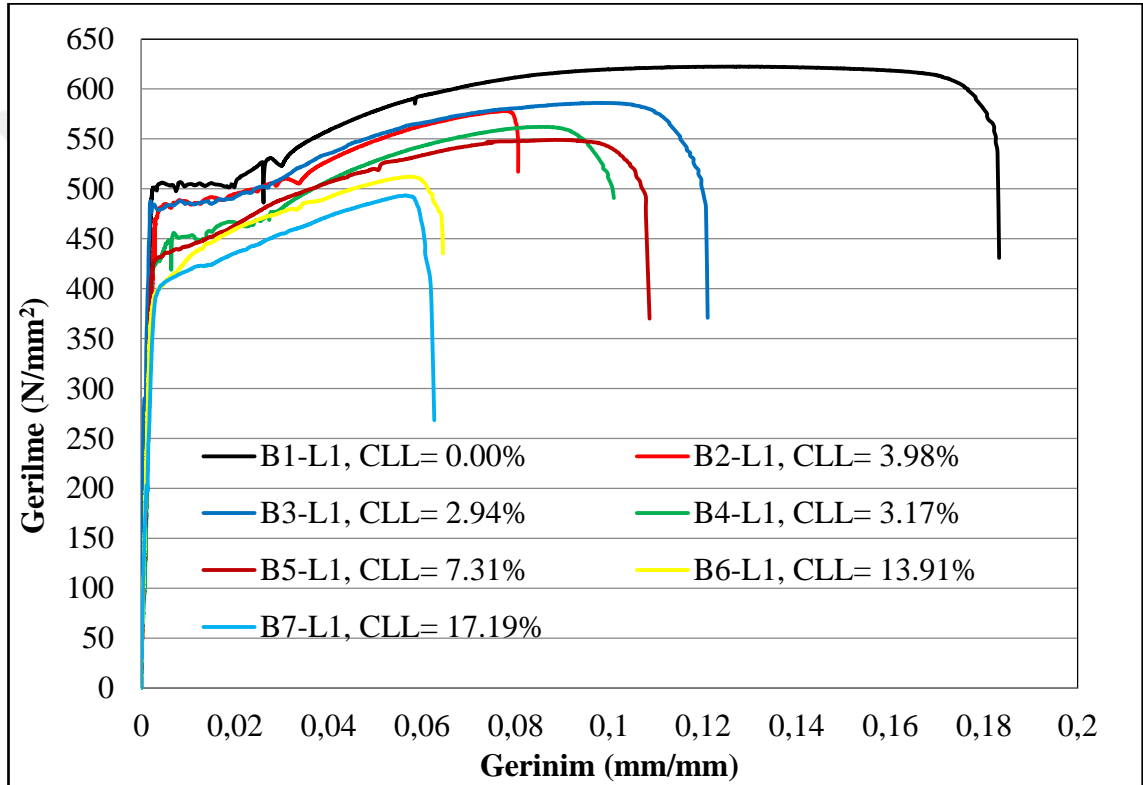
Korozyona uğramış tüm betonarme kiriş numunelerinde homojen bir paslanma dağılımı olduğu üzerlerden geçen bakırların akımı her bölgeye taşıdığı gözlenmiştir. Pas oranı arttıkça boyuna donatı ve sargı donatılarının birleşim yerlerinin incelmesine etriyelerin ise genellikle orta kısımlarından koptuğu sonucuna varılmıştır. Paslandırma havuzunda su seviyesinin kirişlerin üstüne kadar çıkması ile birlikte basınç bölgesindeki donatılarında paslanması homojen bir şekilde olmuştur.

Faraday kanununa (teorik) göre hesaplanan korozyon oranları ile gerçek korozyon oranları arasında farklılıklar bulunmaktadır. Faraday tarafından elde edilen kütle kaybını tahmin etmek için kullanılan modelde kullanılan çelik çubuklar yalın halde elektrik akımına maruz bırakılarak elde edilmiştir. Fakat beton içerisinde gömülü çelik çubuklara elektrik akımı uygulandığı zaman Faraday Kanuna göre hesaplanan korozyon oranı ile gerçek korozyon oranı arasında farklılık olmaktadır.

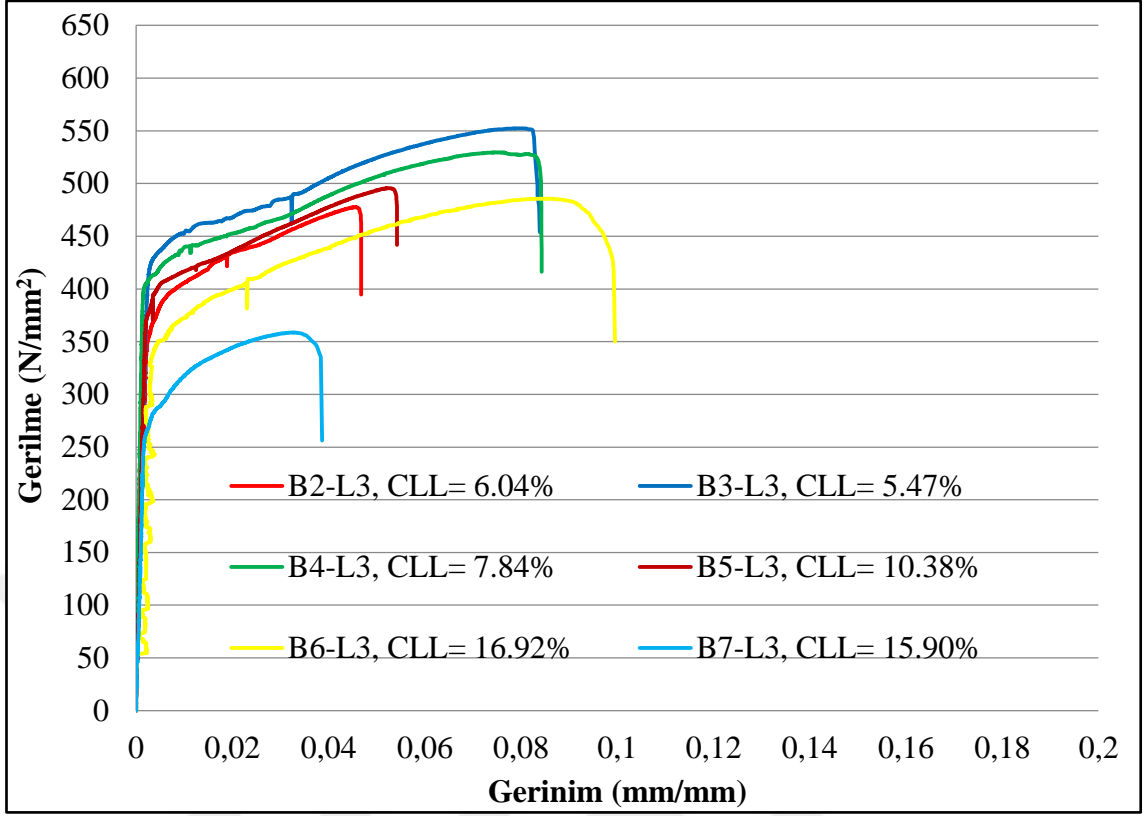
Betonarme donatısı yalın halde elektrik akımına karşı dirençsiz bir durumdadır. Fakat betonun bazik yapısından dolayı içindeki donatının korozyon hızı oldukça yavaştır. Bu sebepten dolayı korozyon süreci elektrik akımı uygulandığı andan itibaren kütle kaybı başlamamaktadır. Mevcut literatürde de bu konu ile ilgili farklı çalışmalar yapılmıştır ve beton içerisinde ki donatılarda kütle kaybını tahmin etmek için farklı modeller geliştirilmiştir. Betonarme kirişlerden elde edilen deneysel veriler kullanılarak Faraday kanununa göre betonarme eleman içerisindeki donatıların kütle kaybını tahmin etmek için yeni bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model mevcut literatürdeki diğer modellerle karşılaştırılmıştır.

5.1.1. Çekme Deneyi Sonuçları

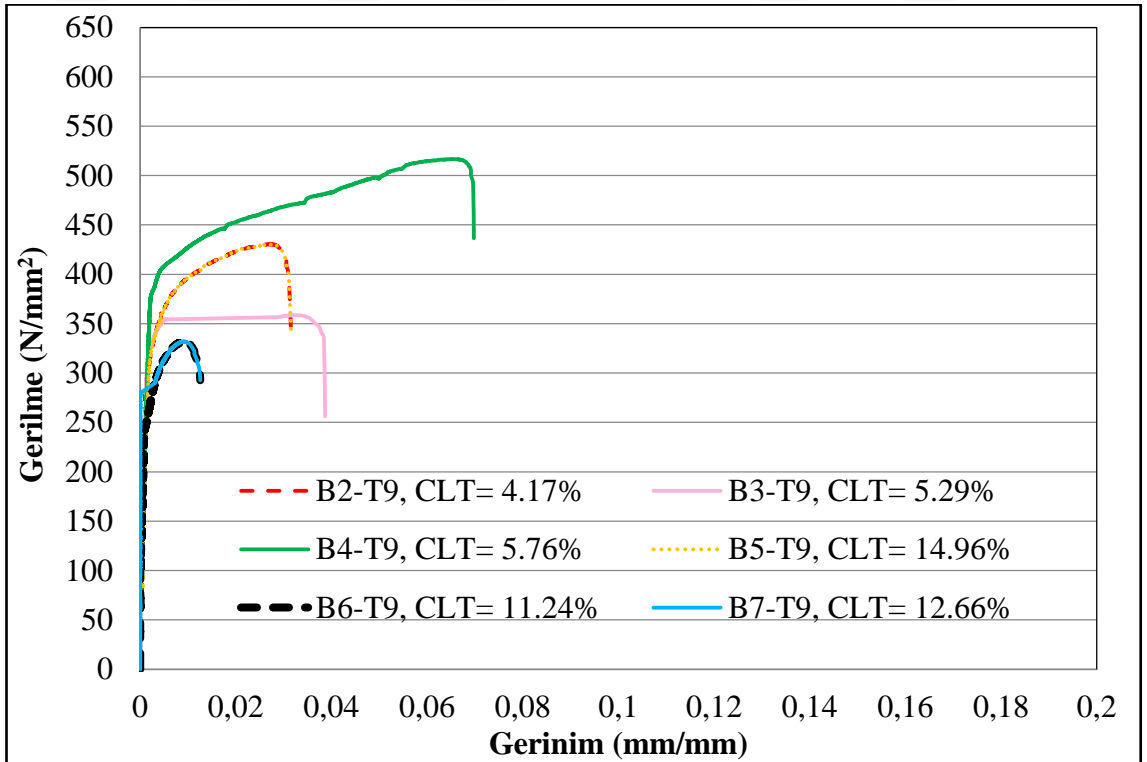
Burulma deneyleri gerçekleştirildikten sonra beton kırılarak çıkarılan temizlik ve tartım işlemleri tamamlanan donatılar uygun boylarda kesilerek çekme deneyine hazır hale getirilmişlerdir. Çekme deneyi için donatılardan deney öncesi gerinim ölçer yapıştırılanlar seçilmiştir. Toplamda 13 adet 12 mm çapında boyuna donatı ve 7 adet 8 mm çapında etriye test edilmiştir. Çekme deneyi gerçekleştirilen donatıların mekanik özellikleri Şekil 5.18'de, Şekil 5.19'de ve Şekil 5.20'da görülmektedir.



Şekil 5. 18. Korozyona uğramış donatıların mekanik özellikleri, L1 boyuna donatıları



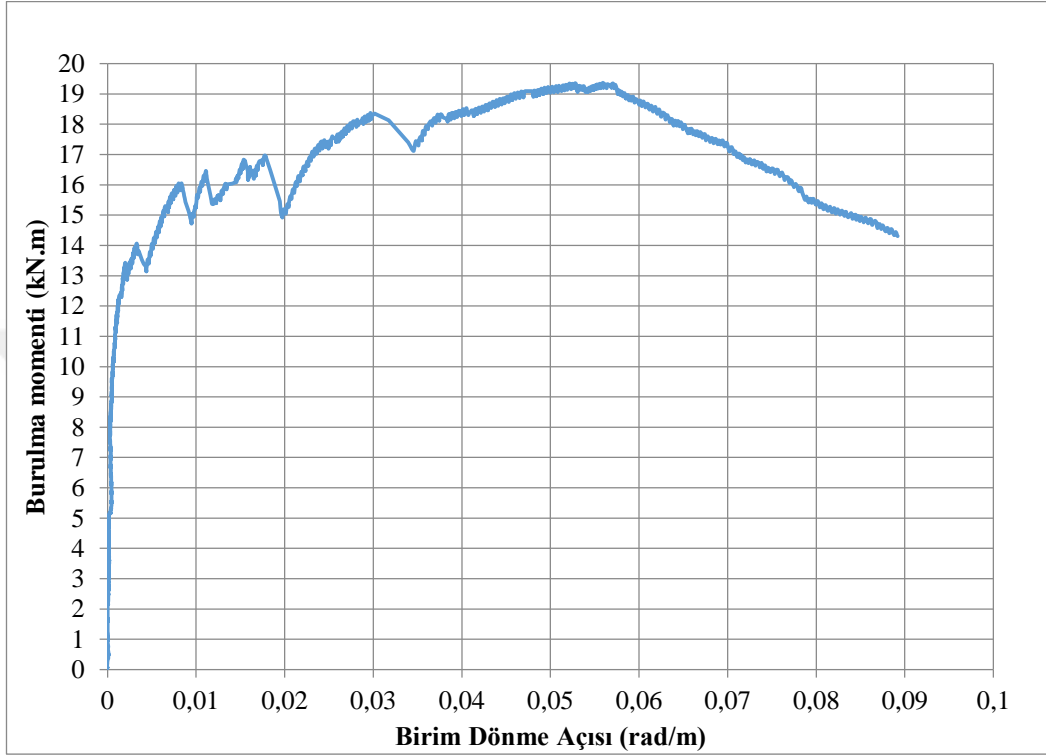
Şekil 5.19. Korozyona uğramış donatıların mekanik özellikleri, L3 boyuna donatıları



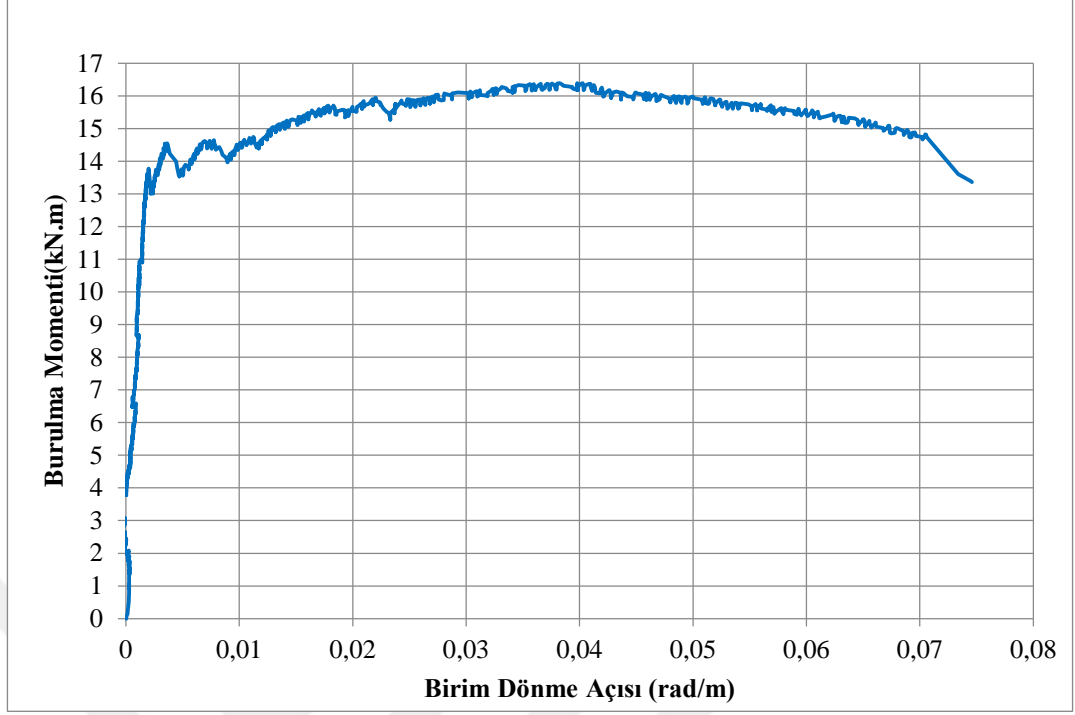
Şekil 5.20. Enine Donatıların(T9) Gerilme-Gerinim Grafiği

5.2. Burulma Momenti – Dönme Açısı Değerleri

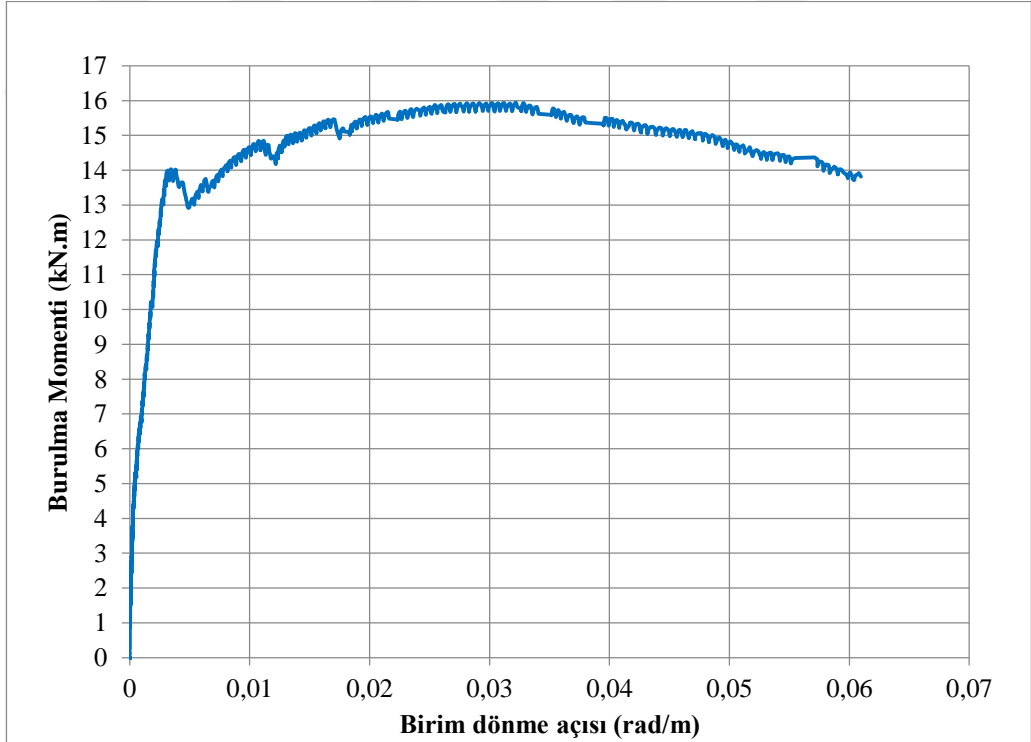
Betonarme kirişlerden her birinden deneysel olarak elde edilen birim dönme açısı değerleri Şekil 5.21-5.27’de gösterilmiştir.



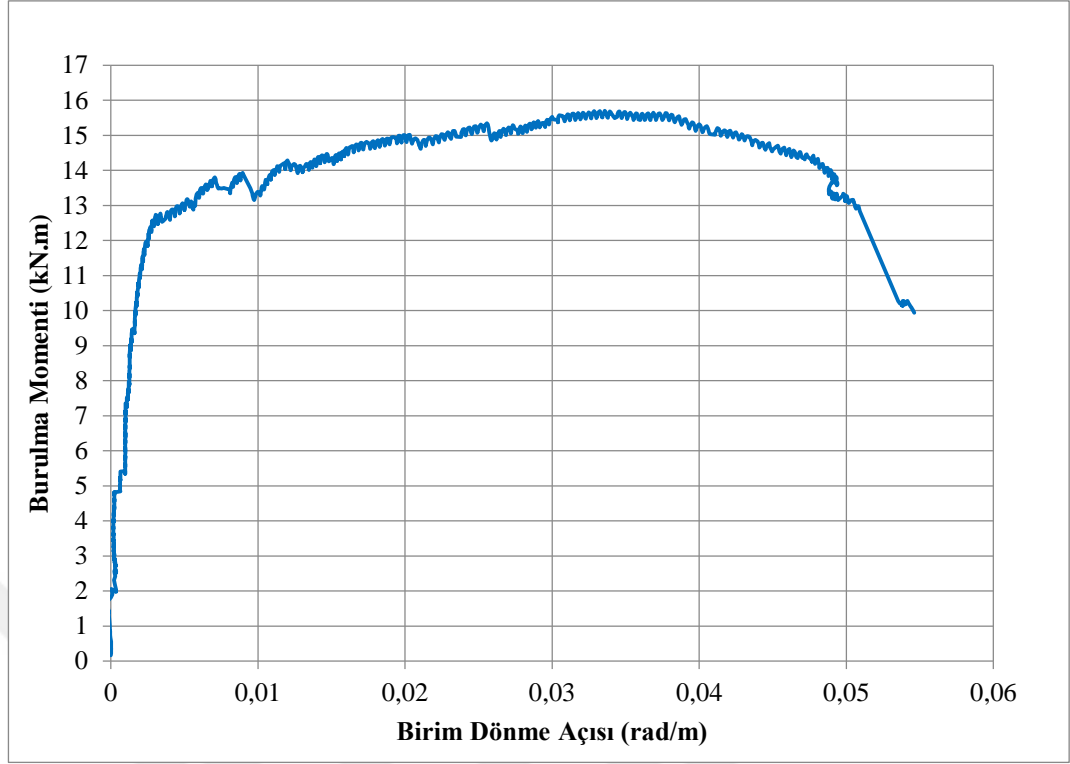
Şekil 5. 21. B1 Betonarme Kirişi Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği



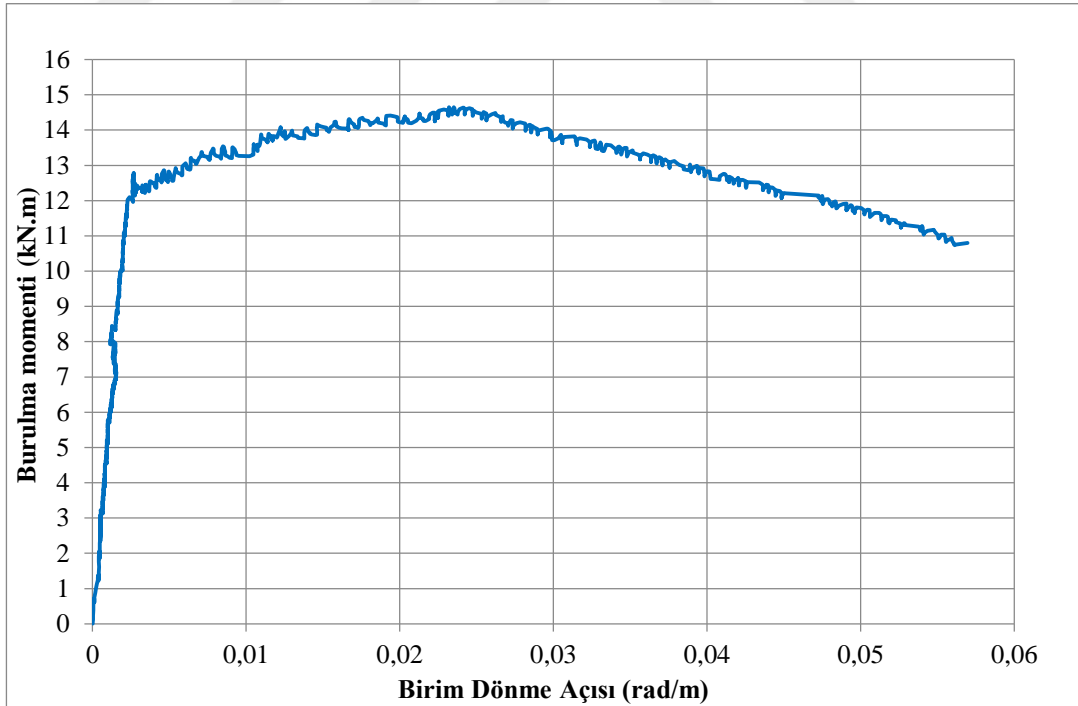
Şekil 5.22. B2 Betonarme Kirişi Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği



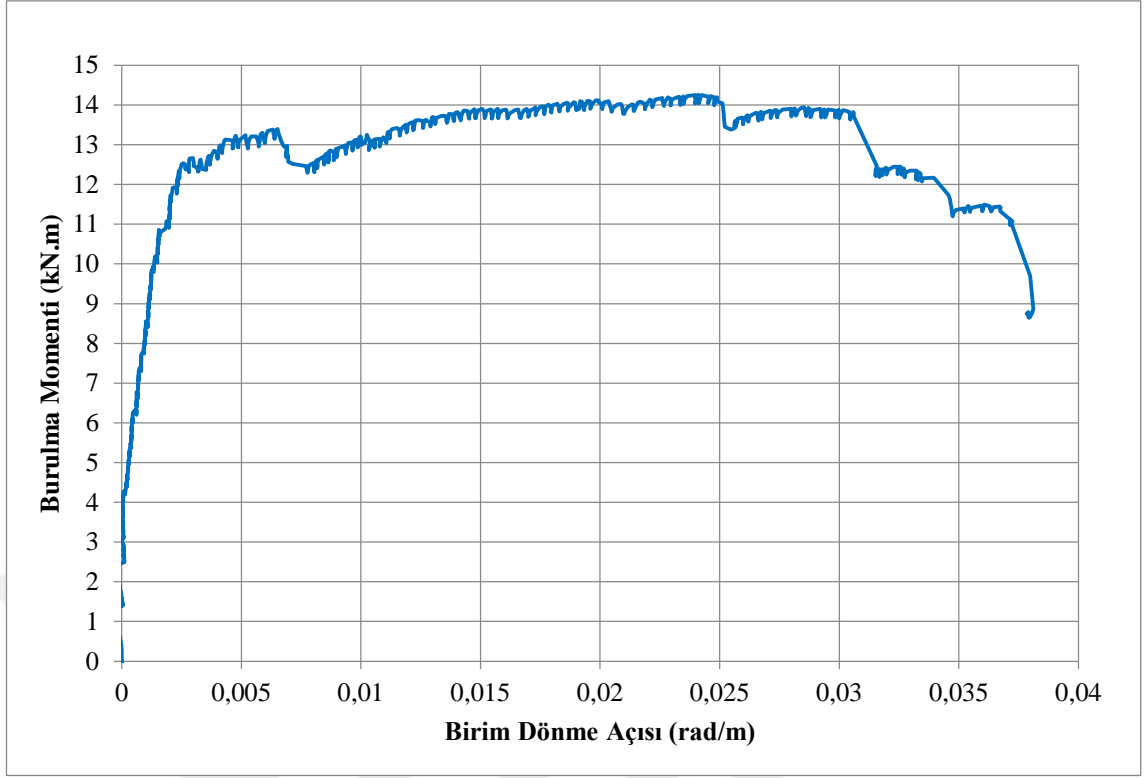
Şekil 5. 23. B3 Betonarme Kirişi Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği



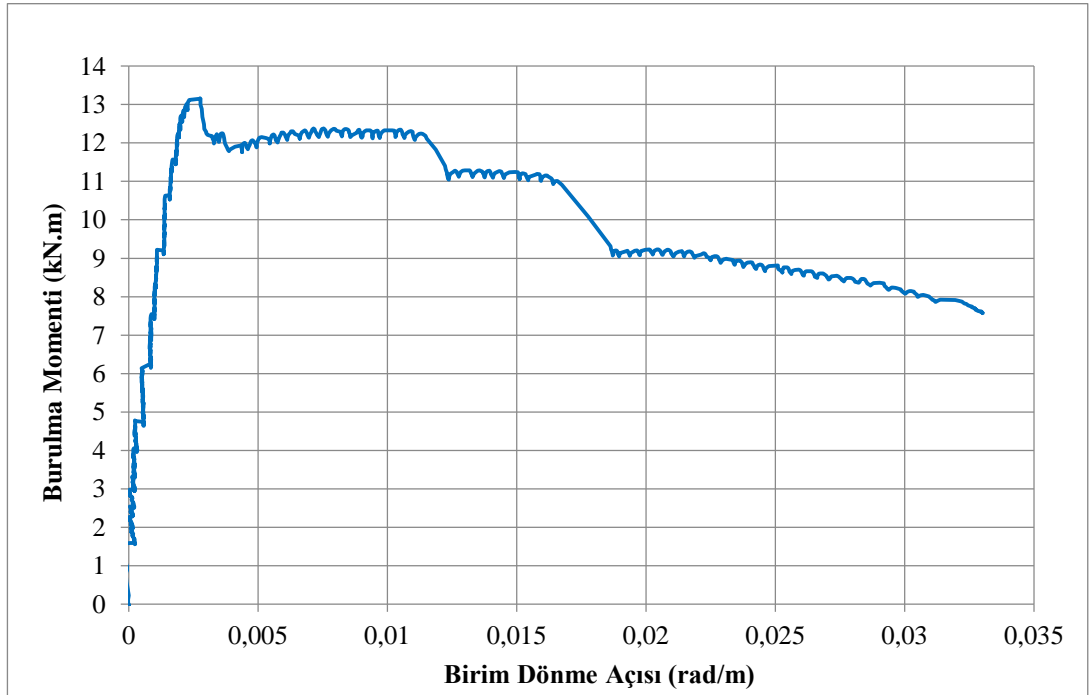
Şekil 5.24. B4 Betonarme Kirişi Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği



Şekil 5.25. B5 Kirişi Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği



Şekil 5. 26. B6 Betonarme Kirişi Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği



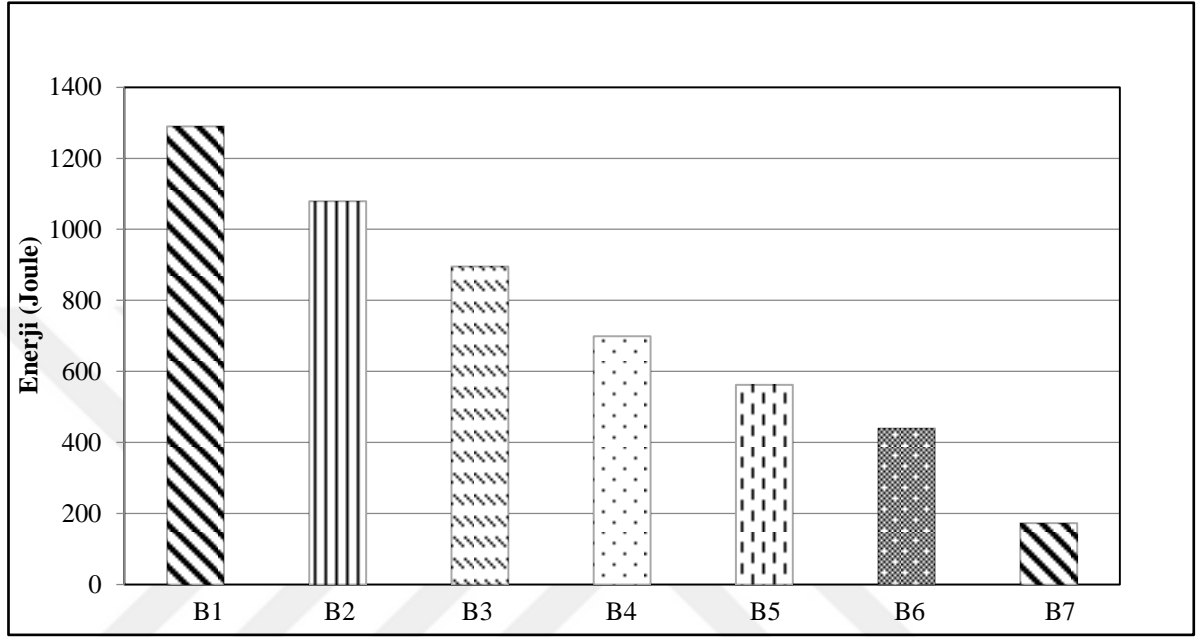
Şekil 5.27. B7 Betonarme Kirişi Burulma Momenti - Birim Dönme Açısı Grafiği

Tablo 5.4. Deneysel Test Sonuçları

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	
C_{LT} (%)	0.0	5.08	5.91	5.92	11.90	11.13	17.67	
C_{LL} (%)	0.0	5.46	5.30	6.64	10.20	12.20	15.00	
T_{cr} (kN.m)	14.07	13.70	13.78	12.60	12.07	12.47	12.58	
T_y (kN.m)	14.96	14.50	14.11	13.19	12.70	12.58	akmadı	
T_{max} (kN.m)	19.37	16.40	15.94	15.70	14.65	14.26	13.16	
T_u (kN.m)	16.46	14.82	13.82	13.39	12.45	12.11	11.19	
θ_{cr} (rad/m)	0.0033	0.0020	0.0030	0.0031	0.0024	0.0028	0.0020	
θ_y (rad/m)	0.0008	0.0019	0.0023	0.0020	0.0024	0.0013	akmadı	
θ_{max} (rad/m)	0.0559	0.0398	0.0322	0.0336	0.0235	0.0241	0.0028	
θ_u (rad/m)	0.0747	0.0705	0.0609	0.0488	0.0425	0.0334	0.0151	
ε_c	0.0117	0.0040	0.0047	0.0017	x	0.0011	x	
ε_s	T9	0.0291	0.0254	0.0295	0.0281	0.0012	0.0026	0.0007
	L1	0.0310	0.0187	0.0142	0.0139	0.0011	0.0067	0.0002
	L3	0.0287	0.0180	0.0144	0.0204	0.0077	0.0115	0.0007

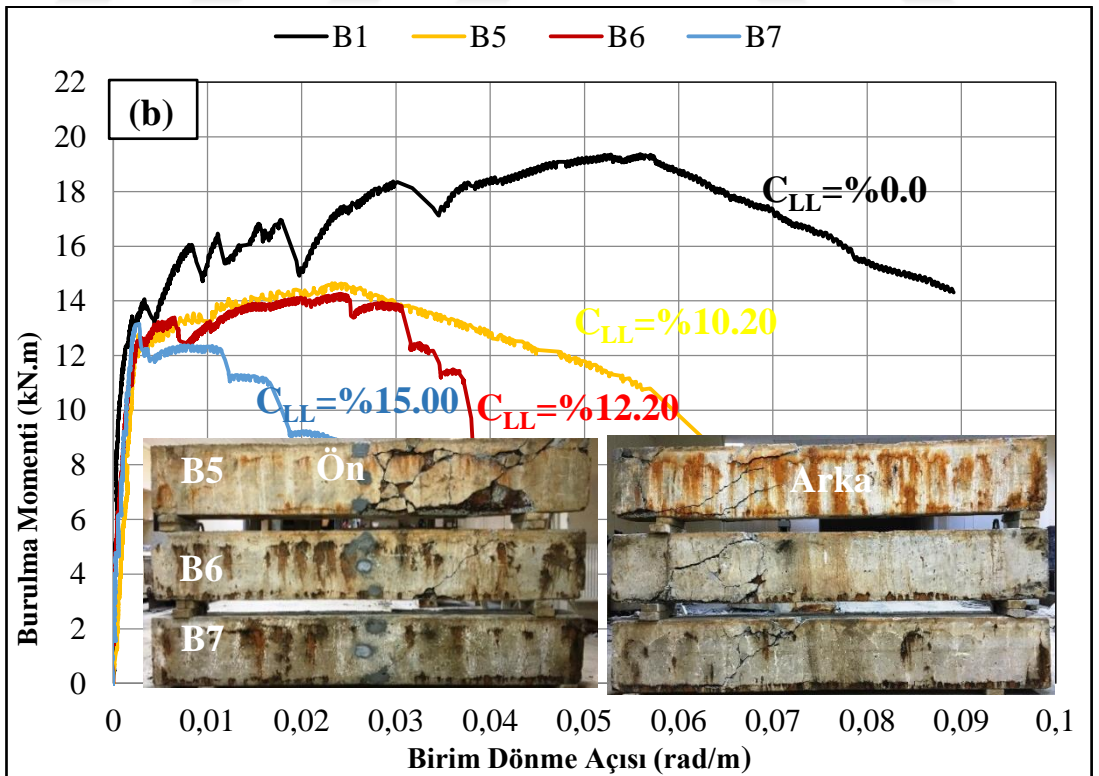
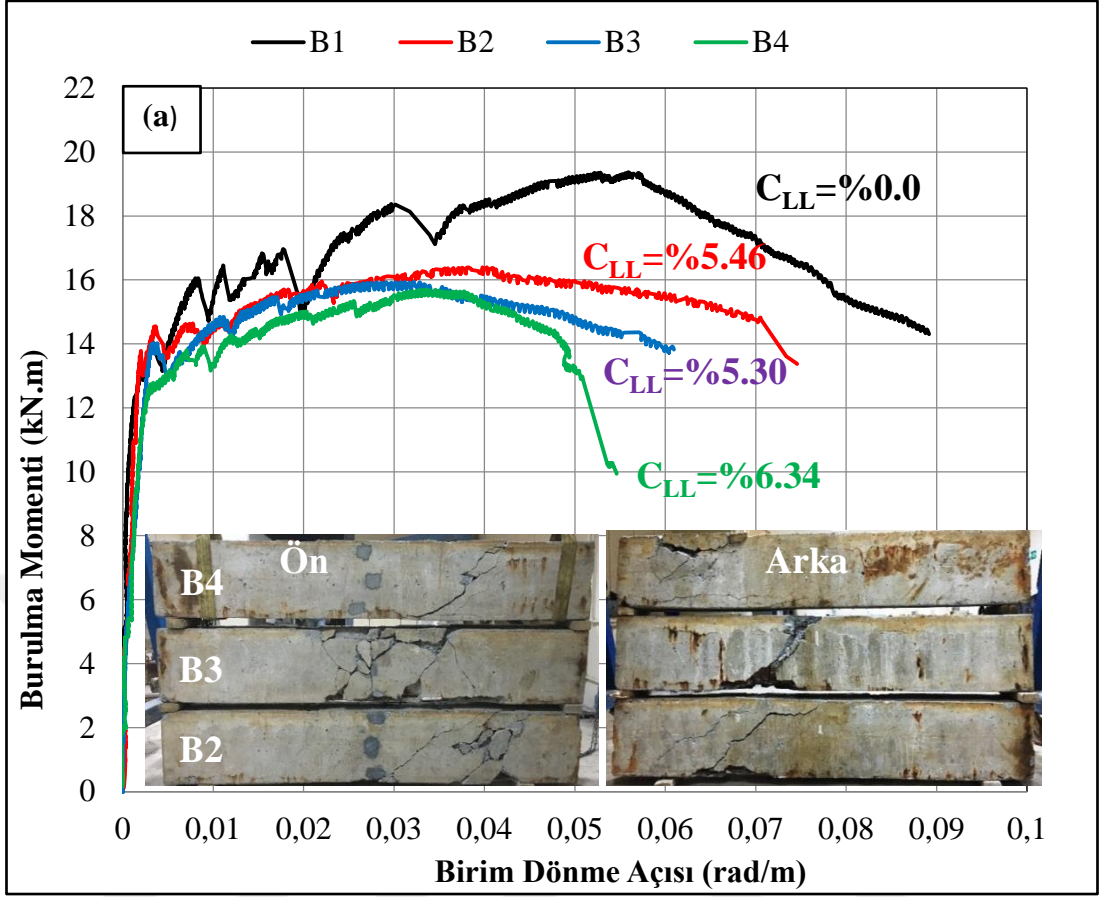
Elde edilen burulma momenti-birim dönme açısı eğrileri ve Tablo 5.4'deki test sonuçlarına dayanarak çatlama öncesi kirişin doğrusal bir davranış sergilediği söylenebilir. Beton basınç dayanımının bir fonksiyonu olan T_{cr} ve akma torku korozyon seviyelerindeki artıştan önemli ölçüde etkilenmedi. Çatlama ve akmadaki burulma moment değerleri B1 kirişi baz alındığında en fazla korozyon oranına sahip B7 kirişinde bu değerler sırasıyla %10 ve %16 azalış göstermiştir. Korozyonun elastik bölgedeki küçük etkisi çatlama momentinden sonra daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 5.27'de gösterilen tüm davranışlar belirtmektedir ki. Çatlama momentinden sonra maksimum moment kapasitesi ve süneklik oranı korozyona uğramayan B1 kirişine oranla diğer kirişlerde önemli derecede azalış göstermiştir. B1 kirişinin maksimum burulma momentine korozyon seviyesi %5.46 olan B2 kirişinin maksimum burulma momenti %15 azalmıştır. Yaklaşık olarak aynı boyuna donatıları aynı korozyon oranına sahip B2 (C_{LL} = %5.46, C_{LT} = %5.08) ye kıyasla B3 (C_{LL} = %5.30, C_{LT} = %5.91) kirişindeki etriyeler daha yüksek korozyon oranına sahip olduğu için B1 kirişine oranla maksimum burulma momenti %18 azalmıştır. Tüm kirişler ele alındığı zaman paslanmamış B1 kirişinin T_{max} değerine göre B4, B5, B6 ve B7 kirişlerindeki azalışlar sırasıyla %19, %24, %26 ve %32 değerlerindedir. Tablo 5.4 ve Şekil 5.28 incelendiği zaman

korozyonun betonarme kirişleri etkileyen en etkili yapısal parametre süneklik değerlerindeki azalışlar olmuştur. Paslanmamış B1 kirişi baz alındığında süneklik oranları B2, B3, B4, B5, B6, B7 kirişleri için sırasıyla %16.34, %30.58, %45.80, %56.41, %65.93 ve %86.80 azalış göstermiştir.



Şekil 5.28. Tüm kirişlere ait enerji kapasiteleri

En yüksek korozyon oranına sahip B7 kirişi çatlama burulma momentine erişmeden göçmeye ulaşmıştır. B2 kirişinde etriye ve boyuna donatının her ikisini de kopmamasına rağmen süneklik oranındaki belirgin azalma korozyondan dolayı oluşan çatlak genişliklerinin uygulanan yük birlikte artmasından kaynaklanmaktadır. Buna ek olarak bir diğer sebep ise boyuna donatılara oranla kütleleri daha az olan etriyelerde oluşan çukur korozyonun etkileridir. Korozyon seviyesi arttıkça ise donatılarda kopmalar meydana gelmektedir. Süneklik oranlarının azalmasına diğer bir neden ise donatıların daha az stres taşımasına neden olan geniş çatlakların oluşmasıdır. Korozyon seviyeleri arttıkça boyuna ve enine donatılarda kaydedilen gerilme değerleri azalmıştır. Beton paspayının azalması ve böylece donatıların daha az gerilme almaları korozyona uğramış betonarme kirişlerin dayanımını düşürmüştür.



Şekil 5.29. Betonarme Kirişlerin Deneysel Burulma Momenti - Birim Dönme Açılarının Karşılaştırılması: (a) B1-B4 (b) B5-B7

Tasarım kodlarında verilen burulma denklemleri ince cidarlı tüp analogisi ve uzay kafes modeli kullanılarak geliştirilmiştir. ACI 318-14 (2014) tasarım koduna göre hesaplanacak burulma momenti için boyuna donatı ve etriyenin akma dayanımı değerleri bilinmelidir. Deneysel olarak elde edilen T_{max} değerleri ile Raush tarafından önerilen truss analogi yöntemine göre kuvveti dengesi kullanılarak elde edilen T_{mt} değerleri ile karşılaştırılmıştır. T_{mt} değerleri hesaplanırken farklı korozyon seviyelerine sahip etriye ve boyuna donatılardan kaydedilen gerinim değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Denk. 5.1’de gösterilmektedir.

$$T_{mt} = [A_{sl\dots n} \times f_{sl\dots n} \times \cos(\theta) + A_{st} \times f_{st} \times \sin(\theta)] \times \sin(\theta) \frac{2A_o}{b} \quad (5.1)$$

Burada A_{sl} ve A_{st} sırasıyla korozyona maruz kalmamış boyuna donatı ile etriyenin kesit alanını ifade etmektedir. F_{sl} ve F_{st} ise sırasıyla boyuna ve etriyenin gerilme değerlerini ifade etmektedir. A_o kayma akısı yönünde çevrelenen kapalı alanı b . boyuna donatıları arasındaki mesafeyi ve θ truss analogisinde yer alan baskın diyagonal çatlak açısıdır. Gravimetrik test sonuçlarına ve korozyona uğramış donatıların yeni gerilme değerleri çekme testi yapılarak sırasıyla F_{st}' ve F_{sl}' elde edilmiştir. A_{st}' ve A_{sl}' çubukların korozyon sonucu son kesit alanlarını ifade etmektedir. Bu veriler ışığında T_{mt} elde edilerek T_{max} değerleri ile karşılaştırılmaktadır.

Tablo 5.5’de deneysel olarak elde edilen çatlak açıları T_{mt} kapasitelerini hesaplamada kullanılmıştır. Paslanmamış kirişte oluşan çatlak açıları kirişin her iki yüzündede yaklaşık olarak aynı değerlerdedir. Fakat korozyona uğrayan betonarme kirişlerde oluşan basınç çatlakları korozyon dağılımının tüm kiriş içinde özdeş olmadığından dolayı ön ve arka yüzlerde farklı açı değerlerini almıştır. Bu nedenle teorik burulma momenti değerinin hesaplanması eşitlikteki olduğu gibi her açı değeri için yeniden hesaplanmıştır. Kirişlerin ön ve arka yüzlerinden oluşan açılara göre hesaplanan iki T_{mt} değerinin ortalaması o kirişin teorik maksimum burulma momenti değeri olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.5. Deneysel ve Teorik Olarak Hesaplanan Burulma Momenti Değerleri.

Beam	Steel bar	A_{st}' (mm ²)	f_{sl}' (MPa)	A_{st}' - T9 (mm ²)	f_{st}' -T9 (MPa)	T_{mt} (kN.m)	T_{max} (kN.m)	r
B1	L1	113.10	531.02			45° 47°		
	L2	113.10	529.86			25.42 25.91		
	L3	113.10	527.00	50.27	508.74	Ortalama:	19.37	1.33
	L6	113.10	530.05			25.67		
B2	L1	108.60	492.53			40° 44°		
	L2	109.50	486.77			19.49 20.56	16.40	
	L3	106.27	429.25	48.17	429.15	Ortalama:		1.22
	L6	104.92	422.43			20.02		
B3	L1	109.77	487.81			57° 49°		
	L2	107.89	471.18			23.07 22.45		
	L3	106.91	462.60	47.61	468.08	Ortalama:	15.94	1.43
	L6	106.45	455.11			22.76		
B4	L1	109.51	451.81			35° 37°		
	L2	106.24	436.05			17.60 18.34		
	L3	104.24	453.06	47.37	465.75	Ortalama:	15.70	1.14
	L6	107.64	436.18			17.97		
B5	L1	104.83	205.05			46° 35°		
	L2	101.95	409.15			13.18 11.27		
	L3	101.36	411.76	42.75	280.99	Ortalama:	14.65	0.83
	L6	98.50	230.18			12.23		
B6	L1	97.37	414.36			54° 64°		
	L2	108.62	380.15			16.17 15.37		
	L3	93.97	377.16	44.62	280.46	Ortalama:	14.26	1.11
	L6	100.18	425.25			15.77		
B7	L1	93.64	58.27			56° 53°		
	L2	98.65	100.20			4.59 4.49		
	L3	95.11	108.24	43.90	137.32	Ortalama:	13.16	0.35
	L6	90.60	57.25			4.54		

Tablo 5.5’de gösterilen; donatılardan elde edilen gerilme değerleri, betonarme kirişinin değişen mekanik özellikleri ve oluşan çatlak açıları ile betonarme kirişin basit burulma moment kapasitesini tahmin etmek için yeterli değildir. Tablo 5.5’de gösterilen çatlama açısı, kesit alanı ve gerilme değerleri ışığında truss analojisi ile iyi tahmin edilebilen burulma momenti değerleri olabilir (B4 ve B6). En yüksek korozyon oranına sahip B7 kirişinde hesaplanan teorik burulma momenti değerinin deneysel deney sonucuna oranı 0.35’tir. Korozyon sadece etriyelerin kesit alanında azalma sağlar ve yalnızca gerilmelerde değişiklik yaparsa maksimum burulma momenti kapasitesi Denk. 5.1’e göre hesaplanabilir. Korozyon dolayı oluşan diğer etkiler (örneğin. korozyon çatlakları, aderans kaybı, beton ve çelikte meydana gelen mekanik özelliklerinde azalma) nedeniyle korozyona maruz kalmış betonarme kirişlerin burulma momenti kapasitesinin hesaplanmasında kalıcı moment değerleri oluşturur. Boyuna donatı ve enine donatının oluşturduğu çapraz basınç diyagonal dirençler, aderans kayma ilişkisi ve korozyonun karmaşık bilinmeyen birçok parametresi mevcuttur.

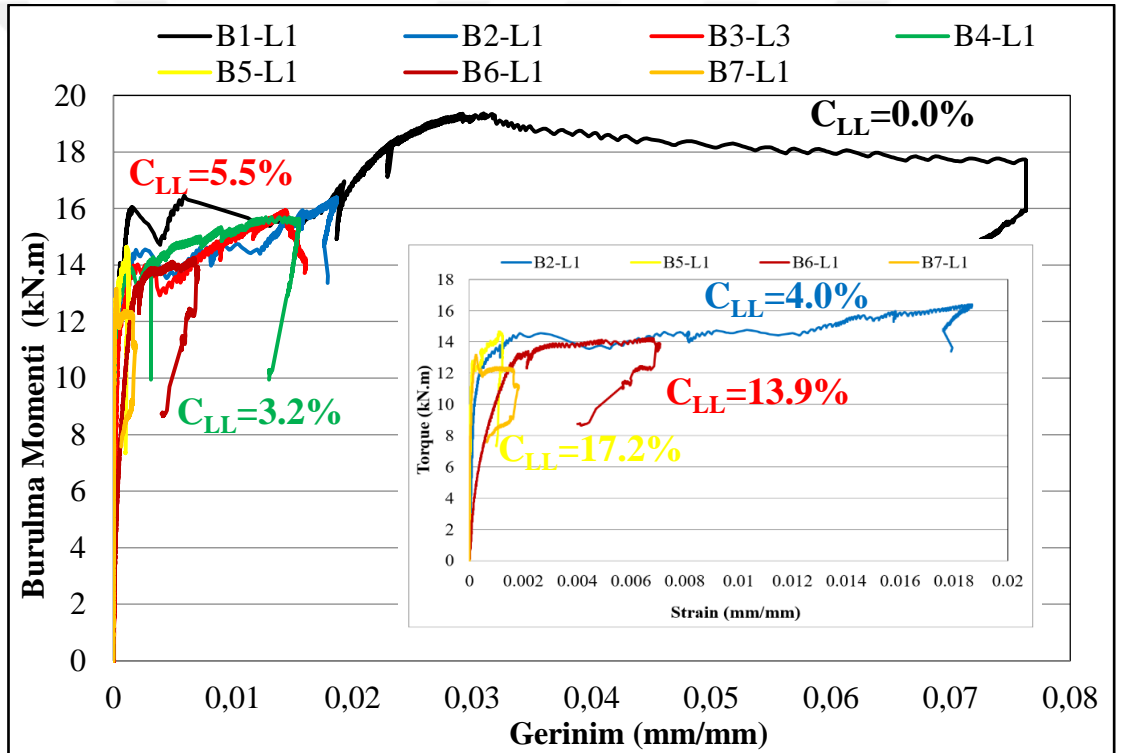
Dahası truss analojisinde çatlama açılarını tahmin etmek için korozyon etkilerini kullanmakta hiç kolay değildir. Korozyona maruz kalmış betonarme elemanda uzay kafes analojisi veya sonlu elemanlar metodu için her bir donatının gerçek korozyon seviyesini tespit etmek hiç pratik değildir. Bu çalışma korozyona maruz kalmış betonarme kirişlerinin maksimum basit burulma moment kapasitelerini tahmin etmek için kullanılacak pratik bir model sunmayı amaçlamıştır. Denk. 5.2’de boyuna donatı ve enine donatı çubuklarında hesaplanan ortalama korozyon seviyeleri ile deneysel olarak elde edilen burulma momenti değerlerini kullanarak korozyona uğramış betonarme kirişlerinin maksimum burulma moment kapasitelerini tahmin etmek için önerilmiştir.

$$\frac{T_{mo}}{T_{mc}} = (1 - 0.034\Delta A_{SL} + 0.012\Delta A_{SL}^2 + 0.0072\Delta A_{ST} - 0.0017\Delta A_{ST}^2) \quad (5.2)$$

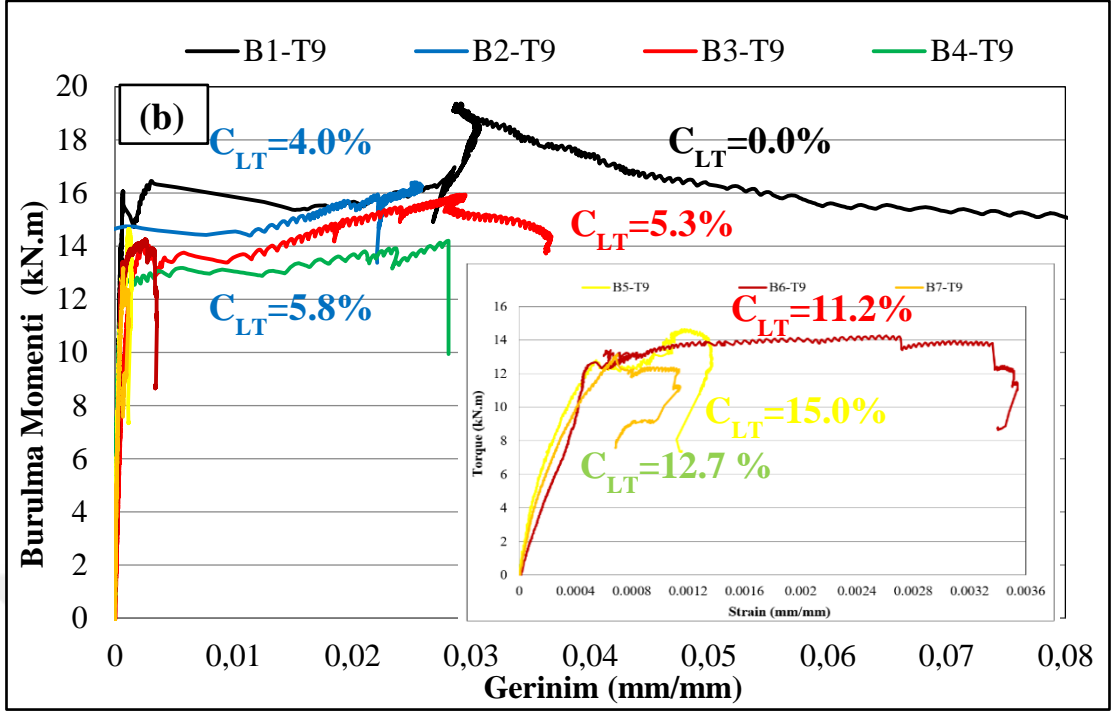
Verilen Denk. 5.2’de T_{mo} ve T_{mt} korozyona uğramış betonarme kirişlerin maksimum burulma momenti değerleridir. ΔA_{SL} ve ΔA_{ST} ise sırasıyla boyuna donatı ve etriyelerin kesit alanındaki azalmayı ifade eder. Bu değer donatıların betondan çıkartılarak hassas bir gravimetrik çalışma sonucu elde edilmiştir.

5.3. Burulma Momenti- Gerilme Sonuçları

Korozyona maruz kalmış betonarme kirişlerin süneklik oranının azalmasının nedenlerinden biride Şekil 5.30'da görüldüğü üzere paslanma ile meydana gelen çatlakların genişleyerek daha betonarme donatısının daha az gerilme almasına neden olmaktadır. Şekil 5.30'da ve Şekil 5.31'de verilen korozyon oranları-gerinim değerleri burulma deneyleri sırasında kaydedilen değerlerdir. Şekil 5.30'da Şekil 5.31'de görüldüğü üzere korozyon seviyelerinin artmasıyla birlikte boyuna ve enine donatılarda kaydedilen gerilme değerleri azalmıştır. Beton paspayı tabakasının çatlamasıyla daha az gerilme alan donatılar betonarme kirişin dayanımını düşürmüştür.



Şekil 5. 30. Burulma Momenti - Gerinim Eğrisi, boyuna donatılar



Şekil 5.31. Burulma Momenti - Gerinim Eğrisi, Etriyeler

5.4. Deney Sonrası Çatlak Dağılımı

7 adet betonarme kiriş numuneleri hızlandırılmış korozyon ve burulma deneyleri tamamlandıktan sonra kirişlerde oluşan çatlak dağılımları detaylı olarak bu kısımda anlatılacaktır.

Yük altında betonarme elemanın çatlama süreci doğal bir süreçtir. Betonun düşük çekme dayanımı uygulanan yük ile aşıldığı zaman elemanda çatlaklar oluşmaya başlayacaktır. Bu duruma ek olarak betonarme elemanlarda gelişecek olan korozyon süreci de bu çatlakları oluşturmakta ve mevcut çatlakların da genişlemesine sebep olmaktadır. Şekil 5.34'de betonarme kirişlerinin boyuna donatı eksenine göre kırılma açıları ile betonarme kirişlerinin detaylı kırılma haritalarını göstermektedir. Şekil 5.35'de ve Şekil 5.36'de L1 ve L3 (kirişin ön yüzü) L2 ve L6 (kirişin arka yüzü) kirişteki burulma donatılarının gerçek korozyon oranlarını göstermektedir. Sarı renkle gösterilen çizgi ise kirişte deney sonucunda oluşan baskın diyagonal çatlakın olduğu kısımda bulunan etriyenin gerçek korozyon oranını göstermektedir.

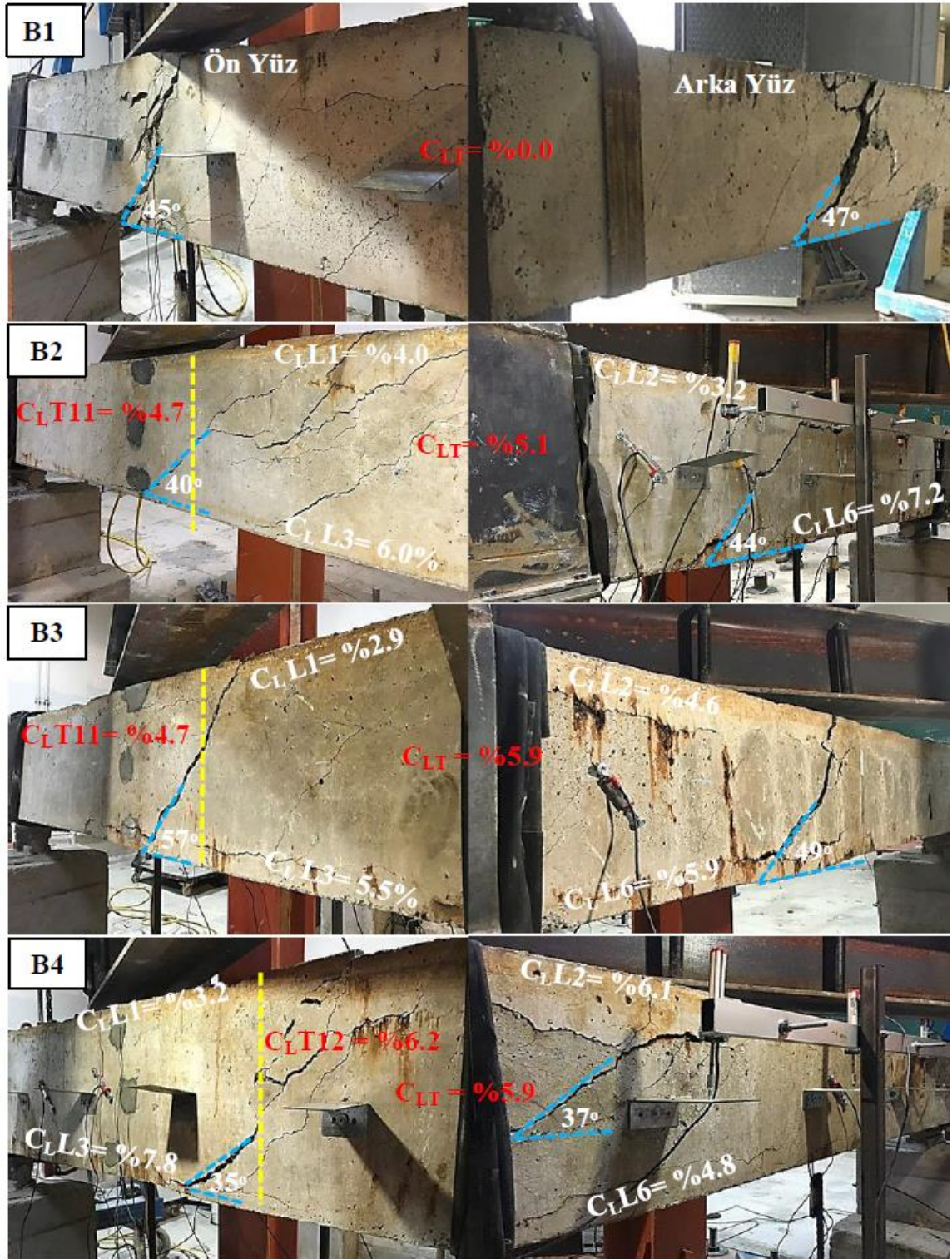
B1 olarak kodlanan korozyona uğramamış betonarme kirişinde oluşan ana çatlak 45° ile meydana gelmiştir. Oluşan çatlak açıları ACI 318 (2014) koduna uyumlu şekilde referans edilmiştir. Paslanmamış B1 kirişinin üst yüzünde oluşan ilk çatlak daha sonra kirişin ön ve arka yüzlerindeki iki büyük çatlakla ilişkilidir. Şekil 5.32’de gösterildiği gibi burulma diyagonal çekme çatlaklarının sarmal formu korozyonsuz kirişte enerji emilim kapasitesinin dağılımının iyi bir şekilde olduğunu göstermektedir. Paslandırılmamış B1 kirişinde burulma bileşenleri (boyuna donatılar, enine donatılar ve basınç diyagonalleri) uygulanan kuvvete karşı koymuş bu da betonda bir dizi çatlak oluşumuna sebep olmaktadır.

Şekil 5.35’de ve Şekil 5.36’de korozyona uğramış betonarme kirişler için gözlemlenen 2 ana kırılma modunu göstermektedir. Bunlardan ilki donatı çevresinde oluşan korozyon ürünü ile beton paspayının derinliklerinde meydana gelen hacimsel genişleme sebebiyle beton örtüsünün kırılması ve aderans kuvvetindeki azalıştır. Korozyon olması durumunda ise sarmal ve diyagonal çatlaklar B1 kirişine göre iyi bir dağılım göstermemiştir. Korozyona uğramış betonarme kirişler için gözlemlenen bir diğer ana gözlem ise oluşan ana diyagonal çatlakların farklı konumlarda meydana gelmiş olmasıdır. Korozyon mekanizmasının kirişin her noktasında eşit bir dağılım göstermemektedir. Burulma yükü kirişin her iki ucundan dönme meydana getirecek şekilde oluşmaktadır. Bu şekilde oluşan yük aktarımı beton ve donatının korozyona uğramasından dolayı meydana gelen mekanik özelliklerindeki azalmadan dolayı eleman içinde bu yükün aktarımı kiriş boyunca sağlanamamaktadır. Buna ek olarak paslanmamış kirişte ön ve arka yüzünde ölçülen çatlak açısı değerleri ($45-47^\circ$) farklılık göstermiş olup. Betonarme kirişlerde varsayılan kesit boyunca oluşan kayma akısının eşit olması durumunda korozyona uğramış betonarme kirişler için geçerli olmamaktadır.

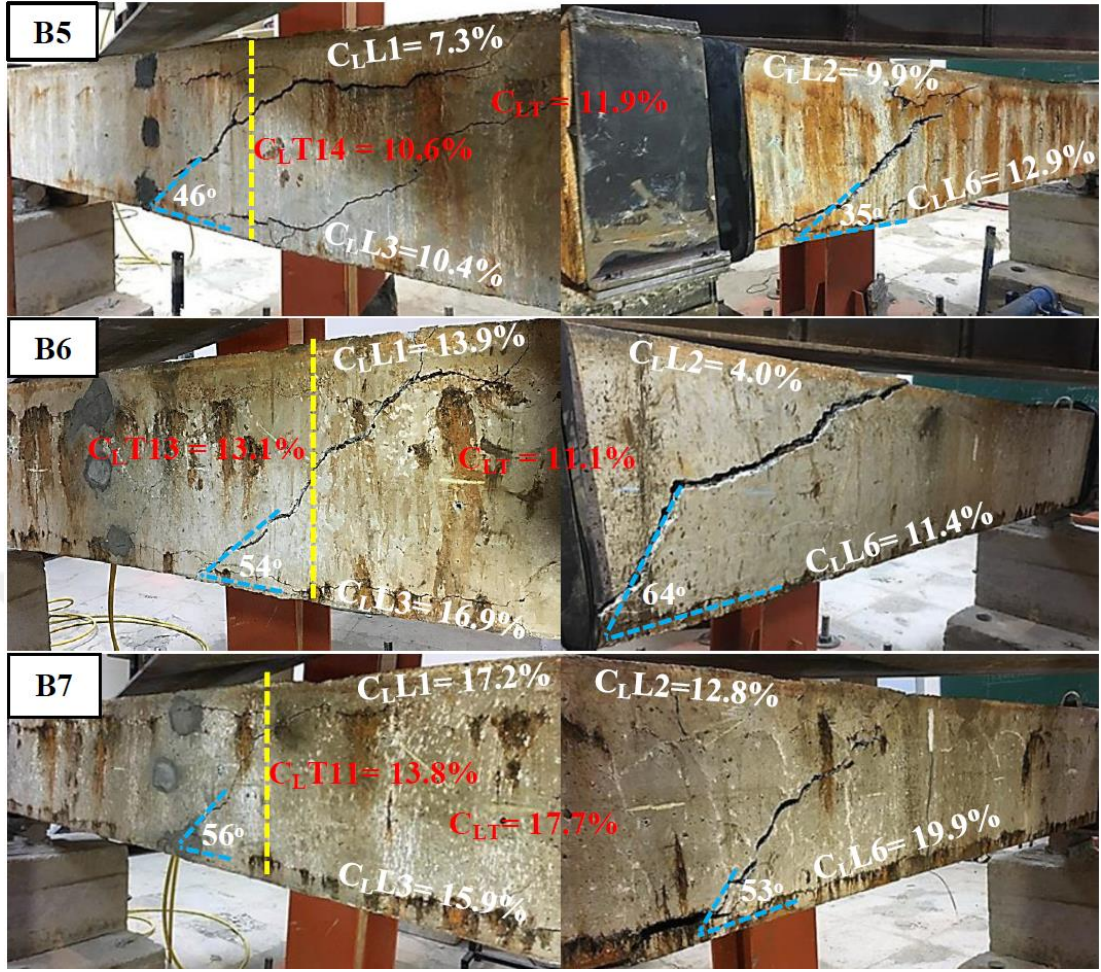
Deneysel sonuçlar süneklik diyagonal çatlama ve maksimum burulma momenti değerlerinin korozyon seviyesindeki artış ile azalış gösterdiğini bir diğer burulma bileşeni olan diyagonal çatlak açılarının ise doğrusal olmayan bir ilişkisi olduğunu göstermektedir.

B5 kirişinin ortalama korozyon oranı B6 kirişine göre daha düşük olmasına rağmen daha çarpıcı çatlak dağılımı oluşmuştur. B5 kirişindeki kırılma modu donatılarda kiriş boyunca düzgün yayılı olmayan bir şekilde korozyon dağılımı ile gerçekleşmiştir. B6 kirişinde oluşan ana çatlakların eğimi kiriş derinliği boyunca değişiklik göstermiştir.

Betonarme elemanlarının basit burulma moment altında oluşan basınç diyagonalleri uzay kafes anolojisinin denklemlerine göre etriye için gerekli boyuna donatı oranına bağlıdır Mitchell vd. (1974) ve Hsu vd. (1985) Aynı korozyon süresi içinde boyuna donatılar etriyelere oranla daha az kesit kaybına uğramaktadırlar buda etriyelerin başlangıç kütlelerinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte deneyleri gerçekleştirilen betonarme kirişlerin ön ve arka yüzleri göz önüne alınarak belirli bir korozyon seviyesine azalmış veya artırılmış numuneye ait çatlama açıları için belirli bir sonuç alınamamıştır. En yüksek korozyon oranına sahip B6 ($C_{LL} = \%12.20$, $C_{LT} = \%11.13$) ve B7 ($C_{LL} = \%15.0$, $C_{LT} = \%17.67$) kirişleri için ölçülen diyagonal çatlama açılara B1 kirişine kıyasla artış göstermiştir. B6 ve B7 kirişlerinde artalan diyagonal çatlama açıları dönme kapasitelerinde ki kayıptan ve korozyondan dolayı çaplarında azalma meydana gelen etriyelerin kopmasından kaynaklanmaktadır.

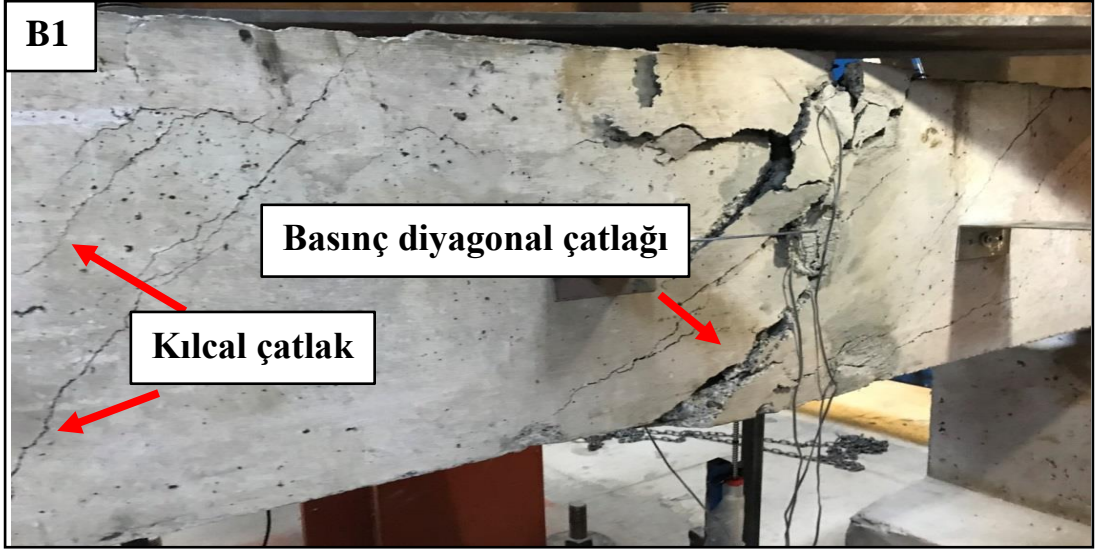


Şekil 5. 32. Betonarme Kirişlerin Çatlak Haritaları

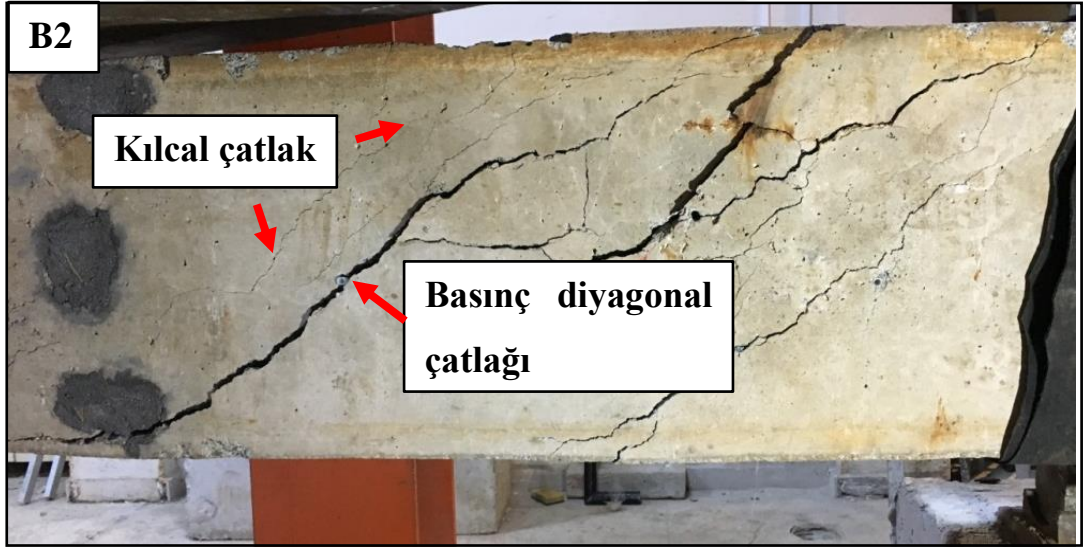


Şekil 5.33. Betonarme Kirişlerin Çatlak Haritaları

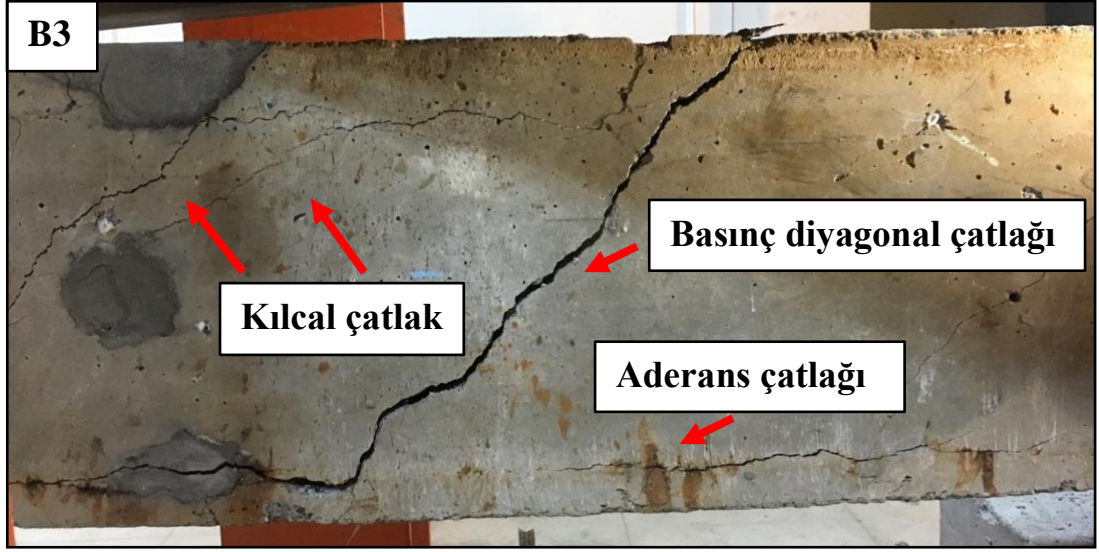
Şekil 5.32’de ve Şekil 5.33’de C_{LL} (%): Boyuna donatıların korozyon oranını, C_{LT} (%): Etriyelerin ortalama korozyon oranını, C_{LT} (%): Baskın diyagonal çatlağın meydana geldiği yerdeki etriyenin korozyon oranını temsil etmektedir. Şekil 5.32’de görülen paslanmamış B1 numaralı kirişte burulma yükü altında ilk çatlağın oluşmasından sonra diğer çatlaklarda bu çatlağın etrafından oluşmaya başlamıştır. Yükün artmasıyla birlikte ilk çatlak genişlemekte ve çevresinde oluşan çatlaklarda kısmen kılcak halde kalırken bir bölümünde genişlemektedir.



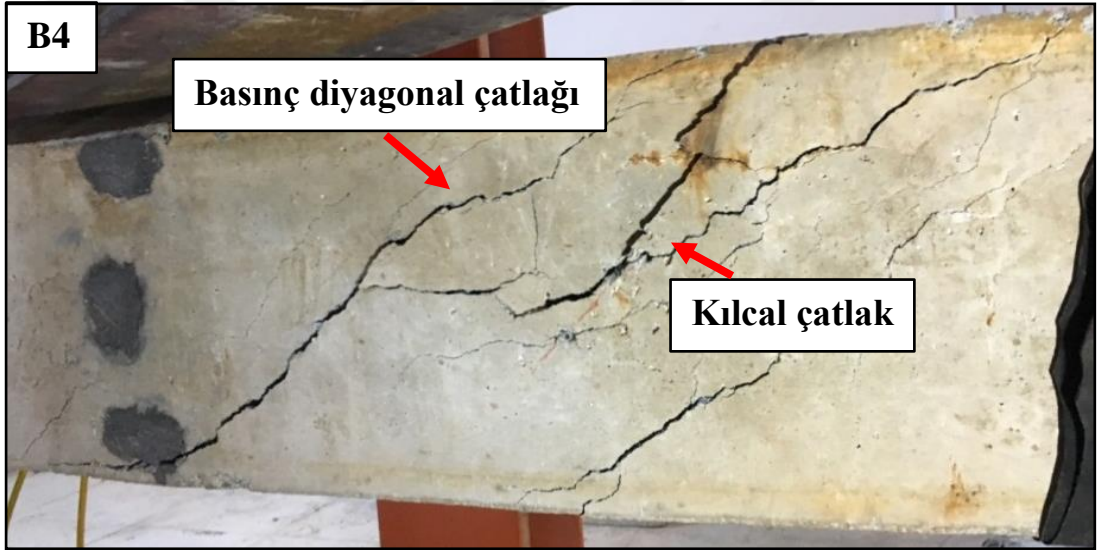
Şekil 5.34. B1 Kirişi Çatlak Dağılımı



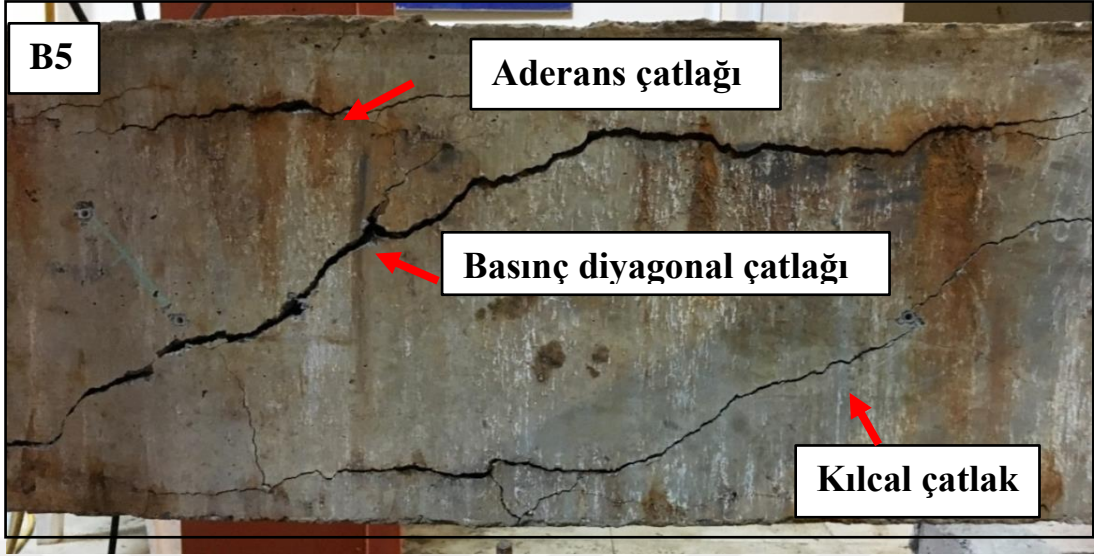
Şekil 5.35. B2 Kirişi Çatlak Dağılımı



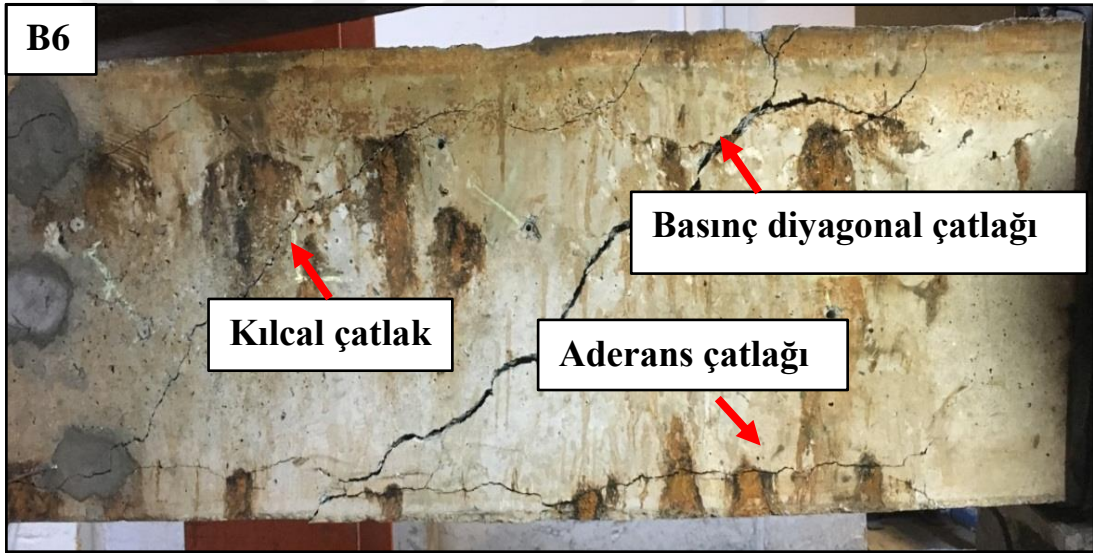
Şekil 5.36. B3 Kirişi Çatlak Dağılımı



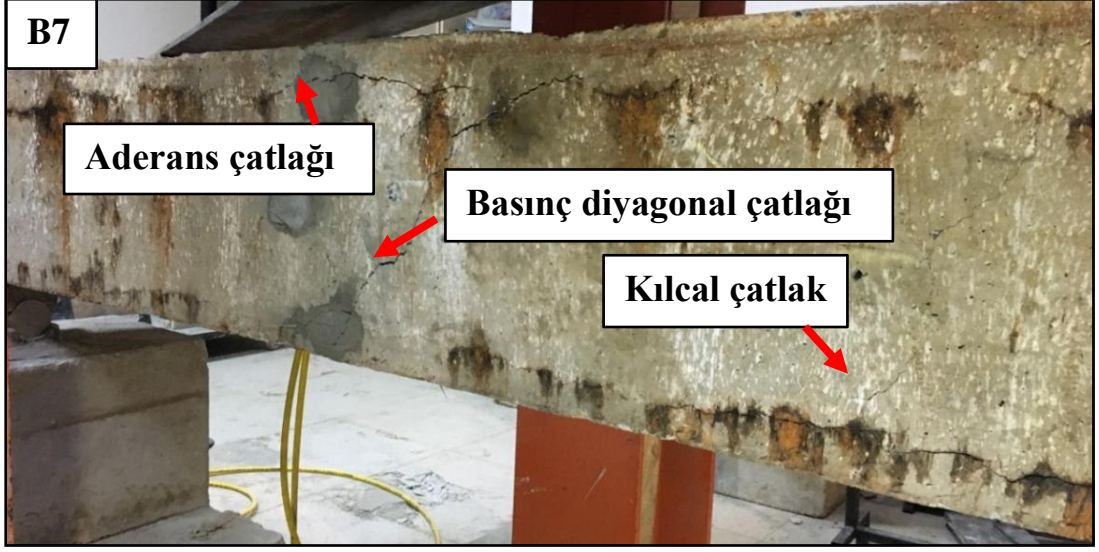
Şekil 5. 37. B4 Kirişi Çatlak Dağılımı



Şekil 5.38. B5 Kirişi Çatlak Dağılımı



Şekil 5.39. B6 Kirişi Çatlak Dağılımı



Şekil 5.40. B7 Kirişi Çatlak Dağılımı

6. SONUÇLAR

Korozyona uğramış betonarme kirişlerin basit burulma momenti etkisi altındaki yapısal davranışını incelemek için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Gerçek korozyon oranları beton kırılarak içerisinden donatılar çıkartılarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçları göstermektedir ki betonarme kirişlerin burulma moment kapasiteleri ve süneklik oranları boyuna donatı ve etriyelerdeki korozyon oranının miktarına bağlı olarak azalış göstermiştir. Etriyelerin ilk kütlesinden dolayı aynı korozyon süresinde etriyelerin mekanik özellikleri boyuna donatıların mekanik özelliklerine göre daha fazla etkilenmiştir. Bu yüzden korozyonun korozyona uğramış betonarme kirişlerin süneklik oranlarına etkisi burulma moment kapasitesilerine etkisiyle karşılaştırıldığı zaman daha büyük önem arz etmektedir. Korozyona uğramış betonarme kirişlerin burulma rijitlikleri T_{cr} değerine kadar önemli derecede etkilenmemektedir. Hızlandırılmış korozyon deneyi sonucunda oluşan ilk çatlaklar burulma deneyleri sırasında çatlama burulma momenti değerinden sonra genişleyerek daha baskın etkiler göstermiştir.

Deneysel çalışmadan elde edilen ana gözlemlerden biride korozyona uğramış betonarme kirişlerde oluşan baskın diyagonal çatlakların lokasyonlarında değişiklikler meydana gelmesidir. Buna ek olarak çatlama açılarının betonarme kirişte doğrusal bir davranış gösterememesinin sebebi ise kayma akısının uniform olmamasıdır.

Korozyona uğramış betonarme kirişlerin burulma moment kapasitelerindeki azalma sadece donatıların kesit alanlarındaki azalmadan değil aynı zamanda değişen çatlak oluşumlarından da etkilenmektedir. Korozyona maruz kalmış beton ile donatının mekanik özelliklerindeki değişim ve aderans kuvveti mekanizmasını da göz önünde bulundurarak sonlu elemanlar metodunda çözümler yaparak gerçekleştirilen bir deneysel çalışma ilerde daha iyi tahminler sunabilir.

Önerilen model ile basit burulma moment etkisi altında korozyona uğramış betonarme kirişlerin pratik bir şekilde değerlendirilme sağlayacağına inanılmaktadır. Korozyona uğramış donatıların dağılımının burulma etkisi altındaki etkilerini tanımlamak için daha ileri çalışmalarda sonlu elemanlar metodunu kullanmanın fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 318. (2005) "Building code requirements for reinforced concrete and commentary", *American Concrete Institute Farmington Hills*, MI:429.
- Ahmad, S. (2017) "Prediction of residual flexural strength of corroded reinforced concrete beams", *Anti Corrosion Methods and Materials*, 64(1), 69-74.
- Akman, M, S. (1997) "Betonlarda Karbonatlaşma ve Yeniden Alkalizasyon Süreçleri", *Türkiye İnşaat Mühendisliği 14. Teknik Kongresi İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi*, Yayın No, 26.
- ASTM (American Standards for Testing and Materials). (2005) "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", *C39M-05*, *West Conshohocken*, PA.
- ASTM (American Standards for Testing and Materials). (2008) "Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products", *A370-08a*, *West Conshohocken*, PA.
- Auyeung, Y., Balaguru, P. and Chung, L. (2000) "Bond behavior of corroded reinforcement bars", *Journal of Materials Science*, 97(2), 214-220.
- Azad, A. K., Ahmad. S., and Al-Gohi. BHA. (2010) "Flexural strength of corroded reinforced concrete beams", *Magazine of Concrete Research*, 62(6), 405-414.
- Bae, SW. and Belarbi, A. (2009) "Effects of corrosion of steel reinforcement on RC columns wrapped with FRP sheets", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 23(1), 20-31.
- Baradan, B., Yazıcı, H., ve Ün, H. (2002) "Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)", *İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, 1. Baskı.
- Bazant, Z, P. (1979) "Physical Model for Steel Corrosion in Sea Structures Theory", *Journal of the Structural Division*, pp. 1137-1153.
- Berktaş, İ. (1995) "Betonarme I-Taşıma Gücü ve Kesit Hesapları", *İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi*, İstanbul.
- Berto, L., Vitaliani, R., Saetta, A., and Simioni, P. (2009) "Seismic assessment of existing RC structures affected by degradation phenomena", *Structural Safety*, 31(4), 284-297.
- Bicer, K., Yalciner, H., Pekrioglu, BA., ve Kumbasaroglu, A. (2018) "Effect of corrosion on flexural strength of reinforced concrete beams with polypropylene fibers", *Construction and Building Materials*, 185, 574-588.
- Cairns, B., E.E, Russell. and L.D, Travis. (1999) "The Research Scanning Polarimeter: Calibration and ground-based measurements", **In Polarization:**

Measurement, Analysis, and Remote Sensing II. 18 Jul. 1999. Denver. Col,
Proc. SPIE. vol. 3754. pp. 186

- Celep, Z., ve Kumbasar, N. (1996) "Betonarme Yapılar", *Sema Matbaacılık*, İstanbul.
- Ch, A, Apostolopoulos., M, Papadopoulos., and S, Pantelakis. (2006) "Tensile behaviour of corroded reinforcing steel bars BSt 500s", *Construction and Building Materials*, pp. 782-789.
- Coronelli., D. (2002) "Corrosion cracking and bond strength modeling for corroded bars in reinforced concrete", *American Concrete Institute Structural Journal*, 99 (3), 267–276.
- Çağatay, İ. H. (2005) "Experimental Evaluation of Buildings Damaged in Recent Earthquakes in Turkey", *Engineering Failure Analysis*, 12, 440-452.
- Çakır, A. F. (1994) "Türkiye'nin Metalik Korozyon Kaybı", *IV.Korozyon Sempozyumu, 25-27 Ekim*, İTÜ İstanbul, s.1-8.
- El, Maaddawy, T., Chahrour, A. and Soudki. K. (2006) "Effect of fiber-reinforced polymer wraps on corrosion activity and concrete cracking in chloride-contaminated concrete cylinders", *Journal of Composites for Construction*, 10(2), 139-147.
- El, Maaddawy, T., Soudki, K., and Topper, T. (2005) "Long-term performance of corrosion-damaged reinforced concrete beams", *American Concrete Institute Structural Journal*, 102(5), 649–56.
- Ersoy, U. (1975) "Betonarmede Burulma", *Güven Kitabevi*, Ankara.
- Hsu, TTC., and Mo, YL. (1985a) "Softening of concrete in torsional members–Theory and tests", *American Concrete Institute Journal of Proceeding*, 82(3), 290–303.
- Hsu, TTC, and Mo, YL. (1985b) "Softening of concrete in torsional members-Design recommendations", *American Concrete Institute Journal of Proceeding*, 82(4), 443–452.
- J, Gulikers. (2005) "Theoretical considerations on the supposed linear relationship between concrete resistivity and corrosion rate of steel reinforcement", *Materials and Corrosion*, 56 (6), pp. 393-403.
- Luu, CH., Mo, YL., Hsu, and TTC. (2017) "Development of CSMM-based shell element for reinforced concrete structures", *Engineering Structures*, 132, 778–790.
- Ma, Y., Che. Y., and Gong. J. (2012) "Behavior of corrosion damaged circular reinforced concrete columns under cyclic loading", *Construction and Building Materials*, 29, 548-556.

- Meda, A., Mostosi, S., Rinaldi, Z., and Riva, P. (2014) “Experimental evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns”, *Engineering Structures*, 76, 112-23.
- Mitchell, D., and Collins, MP. (1974) “Diagonal compression field theory-a rational model for structural concrete in pure torsion”, *American Concrete Institute Journal of Proceeding*, 71(8), 396–408.
- Mo, YL., and Fan, Y. (2006) “Torsional design of hybrid concrete box girders”, *Journal of Bridge Engineering*, 11(3), 329–339.
- M, Rashidi., H, and Takhtfiroozeh. (2016) “The Evaluation of Torsional Strength in Reinforced Concrete Beam”, *Mechanics, Materials Science & Engineering*, Vol 7. pp. 76-84.
- Nossoni, G. (2015) “Modeling the Corrosion Rate of Steel Reinforcement in FRP-Wrapped Concrete”, *Journal of Composites for Construction*, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000625. 04015068.
- Paul, SC., Babafemi, AJ., Conradie, K., and van, Zijl, GP. (2016) “Applied voltage on corrosion mass loss and cracking behavior of steel-reinforced SHCC and mortar specimens”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(5), 1-9.
- Pawlak, W., and Kaminski, M. (2012) “Cracking of reinforced concrete beams under torsion theory and experimental research” , *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 12, 368–75.
- Stanish, K., and Hooton, RD. (1999) “Pantazopoulou SJ. Corrosion effects on bond strength in reinforced concrete”, *American Concrete Institute Structural Journal*, 96(6), 915–21.
- TS EN 206-1 (2002) “Beton-Bölüm 1: Özellik. Performans. İmalat ve Uygunluk”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS500 (2000). “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 1247. (1985) “Mixing. Placing and Curing of Concrete. Turkish Standards”, *Turkish Institution* , Ankara, Normal weather conditions.
- Wang, CY., Shih, CC., Hong, SC., and Hwang, WC. (2004) “Rehabilitation of cracked and corroded reinforced concrete beams with fiber-reinforced plastic patches”, *Journal of Composites for Construction*, 8(3), 219–28.
- X, Liu., and Y, Li. (2018) “Experimental study of seismic behavior of partially corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened with FRP composites with large deformability”, *Construction and Building Materials*, 191, 1071–1081.
- Yalciner, H., Eren, O., and Sensoy, S. (2012) “An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete

cover strength and corrosion level”, *Cement and Concrete Research*, 42(5), 643–655.

Yang, I. H., Joh, C., Lee, J.W., and Kim, B-S. (2013) “Torsional behavior of ultra-high performance concrete squared beams”, *Engineering Structures*, 56, 372–83.

Yang, SY., Song, XB., Jia, HX., Chen, X., and Liu, XL. (2016) “Experimental research on hysteretic behaviors of corroded reinforced concrete columns with different maximum amounts of corrosion of rebar”, *Construction and Building Materials*, 121, 319-327.



EKLER

Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

Yalçiner H., Kumbasaroğlu A., Turan A.İ. , "Torsional behavior of reinforced concrete beams with corroded reinforcement", STRUCTURE, vol.20, pp.476-488, 2019

Turan A.İ. , Doğru E., Kumbasaroğlu A., Yalçiner H., "Pure Torsional Moment Capacities of Full-Scale Reinforced Concrete Beams Subjected to Corrosion", International Symposium for Environmental Science and Engineering Research, KONYA, TÜRKİYE, 25-27 Mayıs 2019, pp.171-171



ÖZGEÇMİŞ

Ahmet İhsan TURAN, 1992 yılında Sarıkaya'da doğmuştur. İlk öğrenimini Hacı Hafıza Saygan ilköğretim okulunda, ortaöğrenimini Mecdude Başakıncı ilköğretim okulunda, lise eğitimini Muratpaşa Lisesinde tamamlamıştır. 2010 yılında Akdeniz Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesinde Biyoloji Bölümünü kazanmış 2 sene bu bölümde eğitim hayatını sürdürmüştür. 2012 senesinde Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazanmıştır. 2016 yılında eğitimini tamamladıktan sonra aynı sene Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2019 yılında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başlamıştır ve halen görevi devam etmektedir. Yüksek lisans eğitimi süresince 1 adet tez çalışmasından 2 adet ise farklı çalışmalardan olmak üzere 3 adet SCI yayını bulunmaktadır. Ayrıca 2 adet BAP projesinde araştırmacı ve 1 adet Tübitak projesinde bursiyer olarak yer almıştır.