

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PASLANMAYA MARUZ KALMIŞ BETONARME KİRİŞLERİN
EĞİLME ETKİSİ ALTINDA FRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

Enis DOĞRU

Danışman: Doç. Dr. Hakan YALÇINER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN
2019

Her Hakkı Saklıdır.

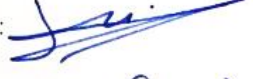
Kabul ve Onay Sayfası

Doç. Dr. Hakan YALÇINER danışmanlığında, Enis DOĞRU tarafından hazırlanan bu çalışma 26.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği (3) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN

İmza: 

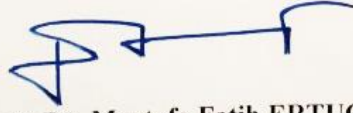
Üye : Doç. Dr. Hakan YALÇINER

İmza: 

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Atila KUMBASAROĞLU

İmza: 

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun 03/09/2019 tarih ve 35/24... 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 KALMIŞ BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME ETKİSİ ALTINDA FRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ” 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. 01/07/2019



Enis DOĞRU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PASLANMAYA MARUZ KALMIŞ BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME ETKİSİ ALTINDA FRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

Enis DOĞRU

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hakan YALÇINER

Betonarme binalarda yetersiz işçilik, yetersiz paspayı, projeye uygun olmayan malzeme, yıpratıcı çevresel etkiler vb. nedenlerle donatı korozyonuna uğramış eleman kesitlerine sıkça rastlanmaktadır. Özellikle mevcut binaların sismik değerlendirmesi sırasında korozyon etkilerinin çok yönlü olarak göz önüne alınması önerilmektedir. Kesitte donatı çapının azalması, aderans kaybı, beton çatlakları ve donatının mekanik özelliklerinin değişmesi, korozyonun başlıca sonuçlarıdır. Deprem bölgelerinde yer alan binalarda korozyonun yapısal davranış üzerindeki olumsuz etkileri araştırılmaktadır. Donatının paslanmaya karşı direnç gösterememesi, deprem etkisi altında yapısal performans ve yapısal güvenliğe olumsuz yönde etki etmekte olduğu bilinmektedir. Paslanma sonucu donatıda kütle-kesit kaybı meydana gelmekte, herhangi bir yük olmaksızın beton çatlamakta, aderans kaybı oluşmakta, donatının mekanik özellikleri olumsuz yönde değişmektedir.

İç etkilerin yanında dış etkiler açısından özellikle yapıların geometrisi nedeniyle karşılaşması muhtemel eğilme, kesme ve eğilme etkileri ile kesitin mekanik özellikleri değişecektir. Betonarme yapılarda ortaya çıkan bu olumsuz sonuçları gidermek için farklı onarım/güçlendirme yöntemleri vardır. Lif Takviyeli Polimer [(Fiber Reinforced Polymer)] ile güçlendirme yöntemi araştırılmasına ihtiyaç duyulan en önemli yöntemlerden birisidir.

Proje kapsamında yapısal analizde ihmal edilen eğilme etkisi dikkate alınarak bir deneysel çalışma yürütülecektir. Bu çalışmada 8 adet 25x40x250 cm boyutlardaki kiriş numuneleri imal edilecektir. İlk aşamada kiriş numuneleri hızlandırılmış korozyon metodu kullanılarak farklı pas oranlarında paslandırılacaktır. Paslandırma sonucunda deney numunelerinin eğilme etkisi altındaki davranış, süneklik, yük-deplasman ilişkisi, moment-eğrilik ilişkileri, aderans-kayma ilişkisi, çatlak genişliği ve dağılımları incelenecektir. İkinci aşamada ise farklı pas oranlarında paslanmış olan betonarme kirişler FRP ile güçlendirilerek FRP'nin korozyon ve eğilme üzerindeki etkisi incelenecektir. Elde edilen sonuçlar, farklı pas oranlarına sahip betonarme kirişlerde eğilme dayanımının, güçlendirme öncesi/sonrası karşılaştırmasına bağlı olarak yapının sismik performans seviyelerinin daha sağlıklı değerlendirilmesine yardımcı olacaktır.

2019, 48 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Eğilme Etkisi, FRP, Korozyon, Güçlendirme

ABSTRACT

Master Thesis

STRENGTHENING OF RC BEAMS SUBJECTED TO CORROSION UNDER THE EFFECT OF FLEXURAL

Enis DOĞRU

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hakan YALÇINER

As a result of the failure of the strengthening to resist corrosion, it is known to have a negative effect on the structural performance and structural safety under the influence of the earthquake. During the seismic evaluation of existing buildings, it is recommended to consider the corrosion effects in a multidimensional manner. Reduction of reinforcement diameter, loss of adherence, change of concrete cracks and mechanical properties of reinforcement are the main results of corrosion. As a result of corrosion, mass-section loss occurs in the reinforcement, concrete is cracked without any load, loss of adherence occurs, mechanical properties of reinforcement are adversely changed. There are different strengthening / reinforcement methods to solve these negative consequences in reinforced concrete structures. Fiber Reinforced Polymer is one of the most important methods that need to be investigated. In the scope of the project, an experimental study was carried out by considering the bending effect in structural analysis. In this study, 8 x 25x40x250 cm beam samples were produced. As a result of rusting, the behavior of the test specimens under bending, ductility, load-displacement relationship, moment-curvature relationship, adherence-slip relationship, crack width and distribution were investigated. Secondly, reinforced concrete beams rusted with 6%, 10% and 18% strengthened by FRP were investigated and the effect of FRP on corrosion and bending was investigated. The results obtained have helped to better evaluate the seismic performance levels of the building due to the comparison of the bending strength of reinforced concrete beams with different rust ratios before / after reinforcement.

2019, 48 Pages

Keywords: Flexural Effect, FRP, Corrosion, Strengthening

TEŞEKKÜR

Erzincan Üniversitesi İnşaat mühendisliği bölümünü, bölüm ikincisi fakülte üçüncüsü olarak bitirip mesleğime başlamış olduğum, tekrar öğretim hayatına dönsem yine inşaat mühendisi olurum dediğim ve bu mesleği daha altıncı sınıfta bana duvar örmeyi, çatı yapmayı öğreterek bu mesleği sevdiren rahmetli dedem Ekrem DOĞRU'ya, her türlü imkânları bize sağlayan üniversitemizin dekanlık ve rektörlüğüne, akademik eğitim hayatını bana tanıştıran ve öğreten, kendisi ile çalışma imkânı bulabilme şansına sahip olduğum başta danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Hakan YALÇINER'e, yardımlarını esirgemeyen, Dr. Öğr. Üyesi Atilla KUMBASAROĞLU'na, çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen meslektaşım Aş. Gör. Ahmet İhsan TURAN, Aqludin KARİMİ'ye, Rameen KOHİSTANİ'ye, Mehmet Fırat MERMİT'e, Umytjan YANGİBAYEV'e, yüksek lisans hayatımda her zaman yanımda olan, sevgileri ile beni tetikleyen canım aileme, benimle birlikte akademik yolda yürüyen eşime, bütün içtenlikle şükranlarımı sunarım.

Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Tarafından FBA-2017-490 proje ile desteklenmiş olup büyük katkı sunan Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Enis DOĞRU

Temmuz, 2019

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. KURAMSAL TEMELLER.....	7
3.1. Onarım ve Güçlendirme.....	7
3.2. Korozyon.....	7
3.3. FRP	8
3.3.1. FRP ürünlerinin özellikleri:	9
3.3.2. FRP kullanım alanları	10
3.3.3. Karbon şerit plakalar	10
3.3.3.1. Karbon şerit plakaların özellikleri.....	10
3.4. Birim Şekil Değişirme Ölçme.....	11
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	13
4.1 Materyal.....	13
4.1.1. Donatı mekanik özellikleri	16
4.1.2. Betonarme kirişlere hızlandırılmış korozyon yöntem hazırlığı.....	16
4.1.3. Beton dökümü.....	18
4.2. Yöntem	19
4.2.1. Hızlandırılmış Paslandırma Yöntemi	19
4.2.1.1. Faraday kanunu	20
4.2.2. Yalciner (2012) geliştirilen model	20
4.2.2. Paslandırma Havuzu.....	22

4.2.3. Betonarme Kirişlerin Korozyona Uğraması.....	24
4.2.4. Betonarme Kirişlere FRP Uygulama Yöntemi	25
4.2.5. Betonarme Kirişlerin Deney Sonrası Kırılıp Donatıların Çıkarılması.....	26
4.2.6. Betonarme Kirişlerin Mekanik ve Kimyasal Temizlenmesi.....	27
4.2.7. Betonarme Kirişlerin Gruplandırılması	28
4.2.8. Yükleme Düzeneği.....	30
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	34
5.1. Korozyon Değerleri.....	34
5.2. Yükleme Sonuçları.....	37
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	45
KAYNAKLAR	46
EKLER.....	48
Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar	48
ÖZGEÇMİŞ	49

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Homojen bir çubuğa P yükünün yüklenmesi	12
Şekil 4.1. Betonarme kirişlerin kafes düzeni	13
Şekil 4.2. Hazırlanan betonarme kiriş kafes düzeni detayı	13
Şekil 4.3. Mekanik temizleme için hazırlanan betonarme demir numuneleri.....	14
Şekil 4.4. Deney için mekanik yöntemle temizlenen donatılar.....	14
Şekil 4.5. Donatıların iki noktadan yük hücreli hassas terazi ile ölçümü	15
Şekil 4.6. Betonarme kirişlerin etriyelerinin ayrılması	15
Şekil 4.7. Kirişler için tartılıp gruplandırılan ve etiketlenen etriyeler	15
Şekil 4.8. Çelik donatıya ait gerilme – birim deformasyon eğrisi	16
Şekil 4.9. Betonarme kirişlerin uygulanan bakır tellerin üç boyutlu bağlantı detayı.....	17
Şekil 4.10. Kalıp içinde donatı kafeslerine bağlanan bakır tellerin bağlantı detayı.....	17
Şekil 4.11. Betonarme kirişlerin kalıp içinde görünümü	18
Şekil 4.12. Hazırlanan kalıp ve donatılara beton dökümü	18
Şekil 4.13. Dökülen betondan numune alımı	19
Şekil 4.14. Betonarme numunelerinin kür süresi boyunca sulanması	19
Şekil 4.15. Deney için hazırlanan betonarme numuneler	19
Şekil 4.16. Faraday Kanunu gerçek pas oranlarının karşılaştırılması (Yalciner vd. 2012)	21
Şekil 4.17. Hızlandırılmış paslandırma yöntemi için kullanılan düzenek	22
Şekil 4.18. Hızlandırılmış paslandırma yöntemi için kullanılan üç boyutlu düzenek	23
Şekil 4.19. Hızlandırılmış paslandırma yöntemi için kullanılan şematik detay gösterimi	23
Şekil 4.20. Betonarme kirişlerin hızlandırılmış korozyona tabi tutulması.....	24
Şekil 4.21. FRP malzemesi yapılmadan betonarme kirişin yüzey temizliği.....	25
Şekil 4.22. FRP malzemesinin sikadur 30 ile kirişe yapıştırılması.....	25
Şekil 4.23. FRP malzemesi uygulanmış betonarme kirişler	26
Şekil 4.24. Betonarme kirişlerin hilti ile kırılarak çelik kafes sisteminin çıkarılması	26
Şekil 4.25. Betonarme kiriş içerisinden çıkarılıp mekanik temizleme yapılan donatılar	27
Şekil 4.26. Betonarme kiriş içerisinden çıkarılıp temizlenen çelik etriye donatıları	27
Şekil 4.27. Korozyona maruz kalmış donatılarda kopmalar	27

Şekil 4.28. Betonarme donatıları hidroklorik asit ile kimyasal temizleme	28
Şekil 4.29. Korozyona maruz kalmamış kirişler	29
Şekil 4.30. Korozyona maruz kalmış ve CFRP ile güçlendirilmiş kirişler	29
Şekil 4.31. Korozyona maruz kalmış kirişler	30
Şekil 4.32. Deneyde kullanılan yükleme düzeneği	30
Şekil 4.33. Deneyde kullanılan yükleme düzeneğinin üç boyutlu gösterimi	31
Şekil 4.34. Kirişlerde kullanılan hareketli ve sabit mesnet	31
Şekil 4.35. Yük – Yerdeğiştirme için kiriş ortasına yerleştirilen LVDT	32
Şekil 4.36. 12 adet eğrilik ölçmek için yerleştirilen LVDT	32
Şekil 4.37. Gerilim pulu betonarme kiriş üzerindeki görseli	33
Şekil 4.38. Betonarme kiriş üzerindeki çatlak ölçerler	33
Şekil 5.1. Boyuna donatılarda oluşan korozyon dağılımı	34
Şekil 5.2. Etriyelerde oluşan korozyon dağılımı	34
Şekil 5.3. B1 ve B1F kirişin yük - deplasman değerlerinin karşılaştırılması	37
Şekil 5.4. B1, B3 ve B3F kirişi yük - deplasman değerlerinin karşılaştırılması	38
Şekil 5.5. B1, B4 ve B4F kirişi yük - deplasman değerlerinin karşılaştırılması	39
Şekil 5.6. B1, B5 ve B5F kirişi yük - deplasman değerlerinin karşılaştırılması	41
Şekil 5.7. Tüm betonarme kirişlerin yük - deplasman değerlerinin karşılaştırılması	43

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 5.1. Boyuna donatı ve Etriyelerin İlk Kütleleri	35
Tablo 5.2. Korozyon Sonrası Boyuna Donatı ve Etriye Kütleleri	36
Tablo 5.3. B1 ve B1F kirişi yük-deplasman değerlerinin karşılaştırılması.....	37
Tablo 5.4. B1, B3 ve B3F kirişi yük-deplasman değerlerinin karşılaştırılması.....	39
Tablo 5.5. B1, B4 ve B4F kirişi yük-deplasman değerlerinin karşılaştırılması.....	40
Tablo 5.6. B1, B4 ve B4F kirişi yük-deplasman değerlerinin karşılaştırılması.....	41
Tablo 5.7 Tüm betonarme kirişlerin yük-deplasman değerlerinin karşılaştırılması	43



SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

CL	Korozyon Oranı
I	Sistemden Geçen Akım
t	Sistemden Geçen Akım Saniye Olarak
W_i	Donatıların İlk Kütlesi
W_f	Donatıların Son Kütlesi
$\%$	Yüzde
δ	Yayılım Çubuk Uzunluğu

Kısaltmalar

ASTM	American Society for Testing and Materials
ACI	American Concrete Institute
BA	Betonarme Kiriş
FRP	Fiber Reinforced Polymer
GFRP	Glass Reinforced Polymer
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
TS	Türk Standartları
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polimer(Karbon Lif Takviyeli Polimer)

1. GİRİŞ

Betonarme binalarda yetersiz işçilik, yetersiz paspayı, projeye uygun olmaması, dış etkiler vb. nedenlerle korozyona uğramış yapılara rastlanmaktadır. İç etkilerin yanında dış etkiler açısından özellikle yapıların geometrisi nedeniyle karşılaşması muhtemel eğilme, kesme ve burulma etkileri ile kesitin mekanik özellikleri değişecektir. Günümüzde bulunan binaların olası bir deprem altında değerlendirilmesi, bu deprem etkisinin de korozyon oranlarının göz önüne alınması önerilmektedir. Korozyonun başlıca etkenlerinde donatı çapında azalma, aderans kaybı, beton çatlakları ve betonarme yapı içerisinde bulunan donatının mekanik özelliklerinin değişmesidir. Donatının paslanmaya karşı direnç gösterememesi, deprem etkisi altında yapısal performans ve yapısal güvenliğe olumsuz yönde etki etmekte olduğu bilinmektedir. Paslanma sonucu donatıda kütle-kesit kaybı meydana gelmekte, herhangi bir yük olmaksızın beton çatlamakta, aderans kaybı oluşmakta, donatının mekanik özellikleri olumsuz yönde değişmektedir.

Geleneksel olarak betonarme kirişler dış yük veya moment etkilerini basınç bölgesinde betonun mukavemetiyle çekme bölgesinde ise donatının mukavemeti sonucu oluşan kuvvet çifti ile karşılar. Son dönemlerde yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahip kompozit malzemeler betonarme kirişlerdeki çekme donatısının görevini üstelenecek şekilde geliştirilmeye başlandı. Özellikle Lif Donatılı Polimer [FRP (Fiber Reinforced Polymer)] kompozitler yüksek mukavemet, yüksek elastisite modülü, düşük yoğunluk ve korozyona karşı dirençli özelliklere sahip olarak, betonarme yapı için rehabilite de uygun olurlar. FRP kompozitler bir polimer matrisi içinde bulunan yüksek mukavemetli liflerden oluşur. FRP'nin mukavemetini sağlayan matris elyaflar durabiliteyi sağlamakla birlikte dış yük ve moment etkisini de kesite homojen olarak dağıtabilmektedir (Cameron, 2012). Sonuç olarak uygun şekilde kullanıldığında, rehabilite edilen elemanlarda bile taşıma kapasitesini ve sünekliliğini büyük ölçüde artırmaktadır. Bu durumda yapısal elemanlar ne kadar deplasman yaparsa o kadar deprem enerjisi sönümleyebilmektedir. FRP'nin arzulanan bu üstün özelliklerinin yanında, FRP ile güçlendirilmiş bir yapı elemanının FRP-beton ara yüzündeki yapışmanın azalmasından dolayı erken göçebilmesi şeklinde zayıf kabul edilen bir özelliği de bulunmaktadır. Bu özellik FRP'nin tam dayanımına ulaşmadan kendi etkisini bütünüyle kaybetmesine ve göçme davranışının daha ağır bir şekilde sonuçlanmasına neden olur. Bu nedenle

FRP'nin uygulandığı bölgenin korozyondan kaynaklanan paspayının çatlaması sebepleriyle kirişin çekme bölgesinde bulun betonun onarılması gerekmektedir.

Proje kapsamında yapısal analizde eğilme etkisi dikkate alınarak bir deneysel çalışma yürütülecektir. Bu çalışmada 8 adet 25x40x250 cm boyutlardaki kiriş numuneleri imal edildi. İlk aşamada kiriş numuneleri hızlandırılmış korozyon metodu kullanılarak %0, %6,2, %10,5 ve %15,09 oranlarında paslandırılacaktır. Paslandırma sonucunda deney numunelerinin eğilme etkisi altındaki davranış, süneklik, yük-deplasman ilişkisi, moment-eğrilik ilişkileri, aderans-kayma ilişkisi, çatlak genişliği ve dağılımları incelenecektir. İkinci aşamada ise %0, %6,2, %10,5 ve %15,09 oranlarında paslanmış olan betonarme kirişler FRP ile güçlendirilerek FRP'nin korozyon ve eğilme davranışı üzerindeki etkisi incelenecektir. Elde edilen sonuçlar, farklı pas oranlarına sahip betonarme kirişlerde eğilme dayanımının, güçlendirme öncesi/sonrası karşılaştırmasına bağlı olarak yapının sismik performans seviyelerinin daha sağlıklı değerlendirilmesine yardımcı olacaktır.

Zaman içerisinde korozyona uğrayan donatıların beton örtüsünde oluşturduğu çatlaklar ile burulma etkisi sonucunda kayma donatısının yetersiz kalması ve yapı elemanında oluşan eğik çatlaklar, buna bağlı olarak değişen pas seviyeleri ve artan eğik çatlaklar, betonarme yapılarda yapı stokunun sismik olarak gözden geçirilmesi halinde onarım-güçlendirme bir ihtiyaç haline dönüşmektedir. Bu ihtiyaç, kullanım amacı veya servis yüklerinin değişmesi ile ortaya çıkabildiği gibi herhangi bir deprem sonucunda da oluşabilir. Onarım ve güçlendirme amaçlı FRP en yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. FRP, malzeme özelliği olarak yüksek çekme dayanımına sahip olması, farklı elastisite modüllerine sahip olarak farklı dönme miktarları ile hedeflenen performansın sağlanması, uygulama süresinin kısa oluşu, yapı elemanına bir ara bağlayıcı malzeme (epoksi) kullanılması suretiyle uygulanmasının kolay oluşu, diğer yöntemlerde ihtiyaç duyulan demir-kalıp işçiliğini gerektirmemesi, yapı yüküne ilave yükler oluşturmaması, uygulandığı yapı elemanının korozyona ve kimyasal etkilere karşı direncini artırmasının yanında, yapının taşıma kapasitene ciddi katkılar sağlaması, sünekliği artırması, vb. gibi avantajlara sahip olarak diğer yöntemlere göre kullanımı son yirmi yılda artmıştır.

Çalışmanın amacı aşağıda aşamalarına uygun şekilde maddeler halinde sunulmaktadır:

- Hızlandırılmış paslandırma yöntemi ile kısa zamanda hızlı bir şekilde farklı paslanma oranlarının elde edilmesi sağlanacak ve paslanmış betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışları izlenecektir.
- Farklı paslanma oranlarına sahip olarak eğilme deneyi gerçekleştirilmiş betonarme kirişler FRP ile güçlendirilecek ve tekrar eğilme etkisine maruz bırakılarak yapı performans seviyesine etkisi izlenecektir

Amaca uygun şekilde yürütülecek projenin sonuçlandırılması ile birlikte, paslanmaya maruz kalmış betonarme kiriş elemanlarının eğilme etkisi altındaki davranışı ile FRP'yle güçlendirme işlemi yapıldıktan sonra tekrar eğilme etkisi altındaki davranışlarının karşılaştırmasının yapılmasıyla elde edilen yeni yaklaşımlar, literatürde bugüne dek yapılan deneye dayalı (ampirik) çalışmalar ile karşılaştırılacak ve yapının performans seviyesine etkileri ortaya konulacaktır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Korozyon, çevresel etkiler nedeniyle metal ve çevresi arasında elektrokimyasal süreç sonucunda meydana gelen, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişimlerdir. Korozyon elektro-kimyasal bir süreçtir (ACI-222R-01 2001).

Yalçiner vd. (2012) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada elde ettiği gerçek korozyon oranı ile Faraday kanununa göre hesaplanmış teorik kütle kaybını karşılaştırarak, hızlandırılmış korozyon yöntemi ile hedeflenen pas oranına daha yakın sonuç veren bir model geliştirmiştir.

Mevcut literatürde betonarme elemanların FRP ile güçlendirilmesi üzerine birçok deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda FRP'nin kesme donatısı olarak kullanılması önerilmekle birlikte, kesme davranışından kaynaklanan gevrek kırılmanın önlenmesi veya eğilme davranışına bağlı olarak elde edilen daha fazla süneklik özelliği ele alınmıştır. FRP'nin özellikle taşıyıcı yapı elemanlarının birleşim bölgeleri olan düğüm noktalarındaki donatı sıklaştırmasından dolayı oluşan gerilme yığılmalarına bağlı gelişen hasarların önlenmesinde güçlendirme amaçlı olarak da kullanımı önerilmektedir. FRP'nin avantajlı özelliklerinin yanında, taşıyıcı sistem ile birlikte ele alındığında, sistemin mekanik karakteristiğine bağlı olarak özellikle eğilme bölgesinde FRP'nin kendi katmanlarında oluşan bozulmalar veya kesme/çekme bölgelerinde de FRP'nin kopması/sıyrılması gibi dezavantajlara da sahiptir. Bunun çözümü için son dönemlerde yaygın bir biçimde, taşıyıcı sistemin genel davranışına uygun olarak çeşitli ankraj sistemleri geliştirilmeye başlanmıştır.

Narayanan R. ve Karem-Palanjian AS (1986), betonarme kirişlerdeki burulma davranışını çelik liflerin etkisi incelemiştir. Belirli oranlarda çelik liflerin enine donatı ile birlikte kullanılmasının, % 60 oranlarda burulma kapasitesini arttırabildiği ileri sürmüştür.

Norris vd. (1997), kirişlerin davranışını belirlemek için yaptıkları Hasarlı betonarme kirişlerin FRP elyaflarla güçlendirilmesi adlı deneysel çalışmada, kirişin çekme bölgesine ve çevresine farklı açılarda FRP malzemeyi sikadur epoksi ile betonarme kirişe yapıştırarak kirişin kesme ve eğilme mukavemetini arttırmayı amaçlamış. Deney sonuçlarında kiriş dayanımında ki artışlar gözlemlenmiştir.

Ehsani vd. (1997), FRP ile güçlendirilen dolgu duvarlarda kayma davranışı inceleyerek, güçlendirilen dolgu duvarların mukavemetlerin ve sünekliklerinin arttığını göstermiştir. Ayrıca liflerin yönü, taşıma gücünde herhangi bir değişiklik yapmazken elemanın rijitliği üzerinde etkili olduğunu belirtmiştir.

Tom Norris vd. (1997) betonarme kirişlerin Karbon FRP ile güçlendirilmesi çalışmalarında CFRP plakaların kirişlerin mukavemetini ve rijitliğini arttırdığını gözlemlemişler, CFRP liflerin çatlaklara dik olamaması kirişin sünek bir davranış gösterdiğini gözlemlemişler, CFRP plakaların dezavantajı olarak CFRP plakaların uçlarındaki gerilme yığılmalarından dolayı beton ezilmiş ve gevrek kırılma olduğunu gözlemlemişler.

Saadetmenesh H. vd. (1997) yapmış oldukları çalışmasında hasar görmüş kolonlara FRP malzemesi uygulayarak FRP'nin kolonun süneklik ve mukavemetini önemli ölçüde arttırdığını, yük-deplasman grafiklerinde iyileşmeler gözlemlemişlerdir.

Panchacharam S. ve Belarbi A. (2002) tarafından FRP kompozit güçlendirme sistemi kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin burulma dayanımını incelemek amacıyla deneysel bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada; FRP sargılama yönü (kiriş eksenine paralel ya da düz), FRP sargılamada sarılan kat sayısı, kirişin güçlendirilen yüzey sayısı (kirişin 3 ya da 4 yüzü), sargılama şekli (sürekli veya aralıklı), ankraj etkisi (U ankraj) parametreleri değişken olarak kullanılmıştır.

Grace vd. (2003), FRP liflerin farklı açılarla sarılması ile deney kirişlerin yük altındaki davranışlarını incelemiştir. Yapmış olduğu deneysel çalışmanın sonucunda FRP ile güçlendirilen kirişlerin güçlendirilmemiş kirişlerden %53 oranında fazla yük taşıdığı gözlemlemiştir.

Çetinkaya vd. (2004), betonarme kirişlerin lifli polimer malzemeler kullanarak onarım ve güçlendirilmesi çalışmasında 4 adet betonarme kirişin FRP malzemeler ile güçlendirip her bir kiriş için yük-deplasman eğrisi çizilerek güçlendirme öncesi ve sonrası davranışları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak betonarme kirişlerin FRP ile güçlendirilmesinin taşıma gücüne çok büyük katkı sağladığını belirtmiştir.

Özcan Z. (2015), betonarme kirişlerin kompozit malzemeler ile güçlendirilmesi çalışmasında 8 adet betonarme kiriş FRP ile güçlendirilerek üç noktalı eğilme deneyleri

gerçekleştirmiş. Yük-yer değiştirme, yük-şekil değiştirme grafiklerini elde ederek deneysel çalışmanın sonucunda FRP liflerin betonarme kirişlerin moment kapasitesini arttırdığı kanıtlamıştır.

Çalışma kapsamında; geleneksel yöntemlerle tasarlanan betonarme kirişlerin hızlandırılmış paslandırma yöntemi ile farklı pas oranlarındaki eğilme etkisinde ve FRP ile güçlendirilerek FRP-korozyon-eğilme etkisine maruz kaldığı yapı performans seviyesinin karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmesi sayesinde literatüre yeni bir pencere açılması ve hesaba katılmayan parametrelerin ele alınmasıyla ortaya çıkan farklı sonuçların tartışılması hedeflenmektedir. Böylece korozyona tabi tutulan betonarme kirişler ile yürütülecek olan çalışma, bu alandaki birçok ileriki çalışmaya referans olabilecek ve gerekli ihtiya ı karşılayarak bu alanda yeni bir sayfanın açılmasına katkı sağlayabilecektir. Literatürde benzeri bulunmayan bu çalışma ile korozyona maruz kalmış betonarme binaların değerlendirilmesi ve analizinde çok daha sağlıklı ve gerçekçi sonuçların elde edilmesine olanak sağlayabilecektir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Onarım ve Güçlendirme

Onarım: Bir yapı dış ve iç etkilere kaynaklı hasar alarak öngörülen güvenlik düzeyinin azalması nedeniyle yapının tekrar güvenli düzeyine çıkarılması

Onarım da ki amaç; Yapıyı onarımda güvenlik düzeyine tekrar çıkararak yapıyı kullanılabilecek hale getirmek,

Güçlendirme: Hasar almamış bir yapının kullanım amaçları vb. değişikliklerden dolayı yapının öngörülen güvenlik düzeyini artırmak için yapılan işlemdir.

Güçlendirme de amaç; Yapıyı kullanım amacının değişmesi nedeniyle ile güçlendirerek daha yüksek taşıma kapasitesi ve sünekliğine ulaştırmaktır.

3.2. Korozyon

Elektrokimyasal süreç sonunda metalde ve metalin çevresinde çevresel vb. etkiler nedeniyle metal malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerin değişmesine korozyon denir. Elektro-kimyasal süreçtir. (ACI-222R-01. 2001). Metallerin önlem alınmadan atmosferde açık halde bulunması sonucu korozyona uğramaması kaçınılmazdır. Betonun içerisinde bulunarak betonarme yapıyı oluşturan donatı çeliğini oksit tabakası korumaktadır. Oksit tabakası, portland çimentonun beton karışımının da kullanılması ile çimentonun hidrate olması ile ortaya çıkan Ca(OH)_2 ortamın pH değerini sabitlemesi ile oluşmaktadır. pH değeri; havadaki CO_2 'nin betona difüzyonu sonucunda Ca(OH)_2 ile reaksiyona girip betonun pH değerinin 9'un altına düşürmesi veya klorür iyonların difüzyonu sonucunda ya da her iki olayın birlikte meydana gelmesi ile donatı pasivasyonu kırılır (Apostolopoulos and Papadakis, 2008).

Uniform ve oyuklanma tipi olarak iki çeşit korozyona sıkça rastlanmaktadır. Uniform korozyon karbonatlaşma ile meydana gelirken, oyuklanma tipi korozyon klorür etkisiyle oluşur. Bu iki korozyon tipinin betonarme yapıda oluşması sonucu donatı çapında azalma, donatı çeliği ile beton arasında pas tabakası oluşmaktadır. Oluşan bu tabaka donatı ile beton arasındaki aderansı azaltmaktadır. Bununla birlikte donatının mekanik özellikleri değişmektedir (Lee and Cho, 2009).

Gelişen teknolojiyle birlikte betonarme yapılar geçtiğimiz yüzyılın ortalarından günümüze dek artan bir kullanıma sahiptir. Günümüzde betonarme yapılarda görülen hasarların ana sebebi korozyonun ortaya çıkardığı olumsuz etkilerdir. Beton, kimyasal karakteristiği bakımından bazik özellik gösterip çeliği pas etkilerine karşı korumaktadır. Bunun yanında beton yapı elemanları içindeki çelik donatı; yağmur, nem ve asidik/bazik özellikteki kimyasal kaçaklardan etkilenecek, korozif iyonların çimento hamurunu karbonatlaştırmaması sonucu çelik donatıyı çevreleyen pH'ı azaltır ve sonuçta beton içindeki korozif iyonlar donatı çelik yüzeyindeki pasif filmi bozarak korozyonu başlatır. Özellikle kesme donatılarında meydana gelecek yüksek paslanma değerleri yapı elemanında gevrek kırılmaya yol açacaktır. Donatı korozyonu, yapı ve betonarme elemanların ötelenme kapasitelerini donatı kesit alanlarında oluşan kesit kayıplarıyla doğru orantılı olarak düşürmekte, donatı ve beton arasındaki aderans kuvvetlerinin azalmasına ve donatı ile beton arasındaki yük aktarımının aksamasına neden olmaktadır. Bunların yanı sıra korozyona uğrayan çelik donatıların hacmi, çeliğin korozyona uğraması sonucu korozyon artıkları nedeniyle genişlemekte, bu da oluşturduğu basınçla beton örtüsünde çatlaklara neden olup betonun işlevini kaybetmesiyle sonuçlanmaktadır. Oluşan bu çatlaklar atmosferik korozyonun oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Yapılan çalışmalar daha çok kirişlerin moment taşıma kapasiteleri, yük-deplasman ilişkileri ve sünekliği üzerine yoğunlaştığından, aderans-donatı sıyrılması, çatlak dağılımı gibi parametreler göz ardı edilmiştir.

3.3. FRP

Lif katmanlı polimerle güçlendirilmiş betonarme yapılar, betonun çelik levha, mantolama, haricen art çekme gibi klasik çekme bölgesine yeni bir çekme donatısı eklemekle aynıdır. Geleneksel malzemelere göre FRP malzemelerin çok kolay yapıştırılması, hafif olduğu için yapıyı ağırlaştırmaması, çekme mukavemetinin yüksek olması, korozyona uğramaması gibi büyük özellikleri mevcuttur. FRP malzemenin en kesitinin çok ince olması, kolay uygulanması ve güzel görünüme sahip olması büyük avantaj sağlar. Çelik levha, mantolama gibi geleneksel güçlendirilmelerle FRP malzemesi karşılaştırıldığında FRP malzeme pahalı gibi gözükabilir. Uygulama işçiliği göz önüne alınarak malzeme ile birlikte daha ekonomiktir. Bu malzemenin uygulanması sonucunda malzemenin uygulanması ve denetimi gibi kurallara uymalıdır. FRP çeşitleri cam, bazalt, aramid, kevlar ve karbon gibi fiziksel özellikleri fazla olan kompozit

sistemlerden üretilen malzemelerdir. Çeşitli epoksilerle kompozit sistem oluşturulmaktadır. FRP malzemeler tek ve çift yönlü kumaşlar, çubuklar ve şeritle şeklinde üretilmektedir.

3.3.1. FRP ürünlerinin özellikleri:

FRP ürünleri reçine matrisine gömülmüş, eğilme davranışından dolayı dayanımı yüksek olan lifli kompozit malzemedir. İçerisinde bulunan lifler, yükün belirli bir kısmını karşılamasının yanında dayanımını ve rijitliğini sağlamaktadır. Matris, liflerin kenetlenmesinde görev yapmakta ve kesme gerilmeleri boyunca liften life gerilme transferini sağlamaktadır. En yaygın kullanılan lifler; cam, karbon ve aramid, matrisler ise; polyester, vinyl ester veya fenoliklerdir (ACI 440.1R, 2006).

İstenilen özellikleri liflerden oluşturmak için doğrultuları farklı şekilde yerleştirilebilmekte ve hem doğal, hem de sentetik olabilmektedir. Buna ek olarak ticari olarak diğerlerinden fazla kullanılanlar sentetik yapıya sahip olanlardır. İnşaat mühendisliğinde yapılan çelik ve betonarme yapılarda yaygın olarak kullanılan lif tipleri cam (GFRP) ve karbondur (CFRP). En fazla üretilerek geniş kullanım alanlarına sahip olan cam liflerdir. Laminant olarak adlandırılan ve yapı yüzeyine dıştan yapıştırılarak yapıyı güçlendiren malzemeler günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Laminatlar istenilen kalınlıkta ince katmanların ve matrislerin bir araya gelerek birleşmesiyle elde edilmektedir. Katmanların küme şeklinde sıralanması, karşılayacağı yük miktarına göre mekanik ve fiziksel özelliklerin arttıracağı doğrultuda tabakalarda bulunan fiberler o doğrultuları, yerleştirilmektedir. Lifi oluşturulması ve yüzey şeklinin verilmesinde termoset ve termoplastik reçineler görev almaktadır. Elemanları bir arada küme şeklinde tutan termoset ve termoplastik reçinelerin işlem sırasında aşınma nedeninden dolayı lifi (fiberi) korumak için malzemeler uygulanır. Bu malzemelere lubrikant adı verilir. (ACI 440.1R, 2006).

Avantajları;

- Yüksek dayanım
- Hafif olması
- İletken olmayan bir yapıya sahip olması
- Belirlenen şeklin verilmesi

- Korozyona karşı çok dayanıklı
- Yorulma dayanımının yüksek olması
- Isı iletkenliğinin düşük olması
- Geçirgenliğinin iyi olması

Dez avantajları;

- Lif doğrultusuna bağlı olarak dayanımının değişmesi
- Düz yüzeyden aderans sorunlarıyla karşılaşma
- Pahalı oluşu

3.3.2. FRP kullanım alanları

Bina kiriş ve kolonlarında, büyük açıklı döşemelerde, özellikle taşıma kapasitesi artışı olan köprülerde, sehim yapan kiriş, döşeme ve balkonlarda, kesilmiş döşemelerin tamirinde kullanılır.

3.3.3. Karbon şerit plakalar

Ülkemizde betonarme yapıların proje, uygulama ve kullanımında yapılan hatalar, betonarme yapının ömrünü azaltmaktadır. Bu durumda yapıyı kullanabilmek ve yapının kullanılabilir ömrünü artırmak için yapının taşıyıcı ve yükü aktaran elemanlarına bir takım müdahale ve değişiklikler yapılır. Yapılan bu değişikliklerin amacı, uygulandığı yere göre iyileştirme, güçlendirme ve onarım olarak açıklanır. Karbon şerit plakalar bu malzemelerden biridir. Belirli ebatlarda olan plakaların içine epoksi katılmış tek yönlü ve tek parça dondurulmuş karbon elyafın şerit şekline getirilmiş halidir.

3.3.3.1. Karbon şerit plakaların özellikleri

Gelecekte ve günümüzde çok geniş bir kullanım alanına sahip olan hafiflik ve yüksek dayanıklılık gibi üstün özelliklere sahip olan malzemedir. Kullanım kolaylığı ve uygulama pratikliğinin yanında fiyat/performans oranında yüksek olduğu görülmektedir.

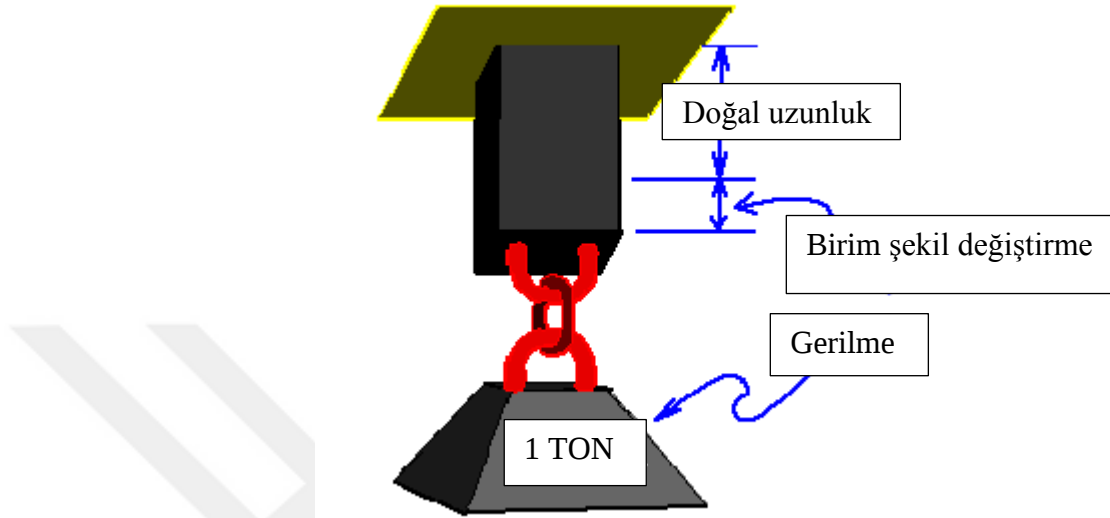
AVANTAJLARI

- Çok hafiftir.
- Dayanımı yüksektir.
- Kesit ebatlarını ince olduğundan dolayı artırmaz
- Elastisite modülü yüksektir.
- Kimyasallara dayanımı yüksektir.
- Kolay ve hızlı uygulama
- Hatalı işçilik olasılığı düşük
- Yorulma dayanımı yüksek
- Yüksek mukavemet
- Düşük yoğunluk
- Korozyon direnci
- Düşük sürtünme ve yıpranma
- Elektrik iletkenliği
- Mükemmel yorulma direnci
- Sünme direnci yüksek
- Titreşim söndürme yüksek
- Isı iletkenliği yüksek
- Sıcaklıkta direnci yüksek
- Geçirgenlik
- Isıl genleşme düşük

3.4. Birim Şekil Değiştirme Ölçme

Son zamanlarda, ölçme aletlerini doğrudan kullanarak, parçada ortaya çıkan gerilmelerin ölçülmesi en önemli mühendislik problemlerindendir. Daha öncede bu amaçlar için mekanik-extensometre'ler kullanılmıştır. Mekanik-extensometrelerin; gerekli gauge uzunluğu 12 mm den az değil, hacimleri, elverişsiz yer şartları vb. durumlar gibi dezavantajları vardı. Bu yüzden genellikle gerilme problemleri emniyet faktörü göz önüne alınarak çözülmüştür.

Birim şekil değıştirme; Parçanın dış kuvvete maruz kalması, birim şekil değıştirme ve gerilim alanıdır. Gerilimi doğrudan ölçemezsin ama etkisini ölçer bilirsin. Birim şekil değıştirme ile gerilme arasındaki ilişkiler bilinirse gerilme hesaplanabilir.



Şekil 3.1. Homojen bir çubuğa P yükünün yüklenmesi

Strain'ini iyice anlamak için şekildeki gibi L boyunda homojen bir çubuğun P kuvvetinin etkisinde kalmaktadır. Homojen çubuğumuz P kuvveti ile uzar veya kısalır. (δL) uzayan veya kısalan uzunluk değışimini doğrusal yayılımlıdır. (δL) yayılımı çubuk uzunlu P yükü için L uzunluğuna bağlıdır. Yani strain her durumda birim uzunluk başına yayılmalıdır.

Birim şekil değıştirme formül olarak;

$$\text{Birim şekil değıştirme} = \delta L / L \quad (3.1)$$

sonucu çıkar. Elastisite modülü doğrudan gerilme altında elastik malzemelerde;

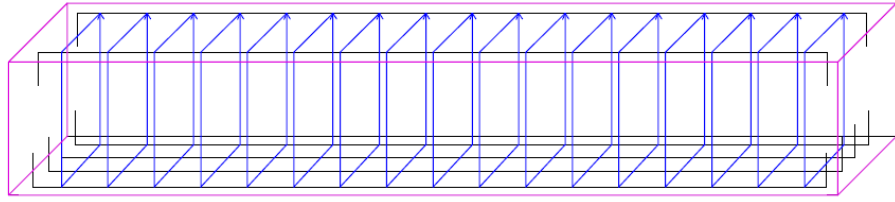
$$\text{Elastisite modülü} = \text{Gerilme} / \text{Birim şekil değıştirme} \quad (3.2)$$

4. MATERİYAL ve YÖNTEM

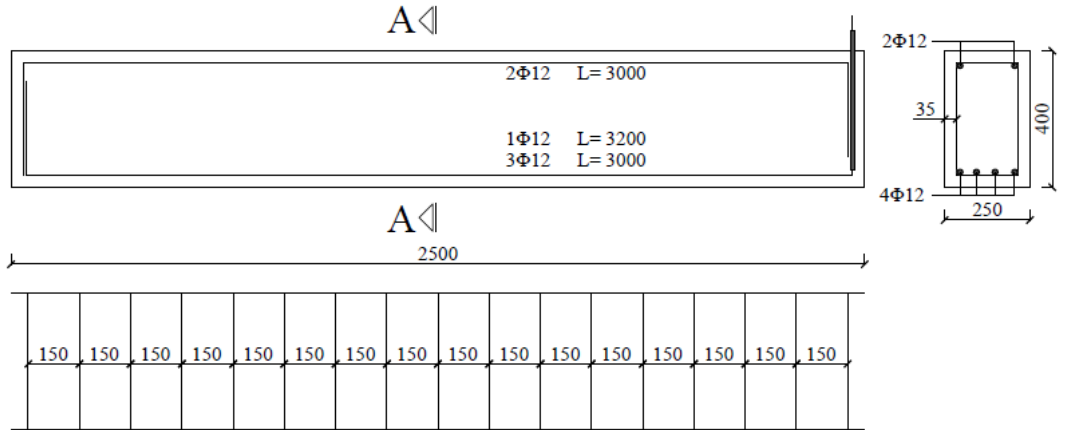
4.1 Materyal

Çalışma kapsamında S420 özdeş sınıflı çelik donatı kafesi ve beton sınıfı aynı olan 8 adet betonarme kiriş için Şekil 4.1’de görülen kafes sistemi oluşturulmuştur. Betonarme kirişlerinin Şekil 4.1.’de gösterilen kesit özellikleri 250 mm genişliğine, 400 mm yüksekliğine ve 2500 mm açıklığından oluşmaktadır.

TS500 (2000) standartlarına uygun olarak donatı kafesi, 2 adet 12 mm çapında nervürlü basınç donatısı, 4 adet 12 mm çapında çekme donatısı ve 8 mm çapında iki kollu etriye kullanılmıştır. Tüm betonarme kirişlerinde etriye aralıkları 150 mm’dir. Pas payı mesafesi yani beton yüzeyinden donatı merkezine olan mesafesi 25 mm’dir.



Şekil 4.1. Betonarme kirişlerin kafes düzeni



Şekil 4.2. Hazırlanan betonarme kiriş kafes düzeni detayı

Hazırlanan donatı numuneleri tartımda maksimum hassaslık nedeni ile hızlandırılmış paslandırma yöntemi için deney öncesi beton dökülmeden önce mekanik temizleme, deney sonrası beton kırıldıktan sonra mekanik ve kimyasal temizlenme uygulanmıştır.

Bu şekilde donatıların ilk kütlelerini etkileyecek her türlü toz, toprak, atık vb. yabancı malzeme donatı yüzeyinden arındırılmıştır.



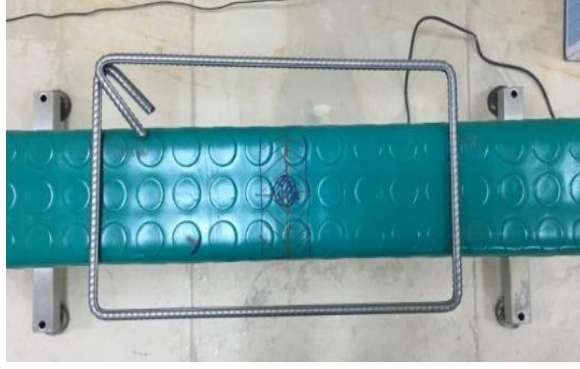
Şekil 4.3. Mekanik temizleme için hazırlanan betonarme demir numuneleri

Şekil 4.3’de görüldüğü gibi mekanik olarak beton dökülmeden önce betonarme donatıları taş motoru ile temizlenerek hazırlanmıştır.



Şekil 4.4. Deney için mekanik yöntemle temizlenen donatılar

Temizlenen donatılar maksimum hassaslıkta çalıştığımız iki noktadan yük hücreli terazide deney öncesi ve sonrası aynı şekilde tartılması için bükülüp donatı kafes sistemindeki şekline getirilmiştir.



Şekil 4.5. Donatıların iki noktadan yük hücreli hassas terazi ile ölçümü

Beton dökülmeden önce kafes sistemini oluşturan etriye ve montaj donatılar Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de görüldüğü gibi tartım işlemleri bütün deney kirişleri için gerçekleştirilmiştir. Tartım da tüm donatılar deney sonrasında hilti ile kırılıp donatılar beton içerisinden çıkarıldığında karışma olmaması ve aynı donatının tartıldığından emin olmak için tüm donatılar teker teker isimlendirildi.



Şekil 4.6. Betonarme kirişlerin etriyelerinin ayrılması

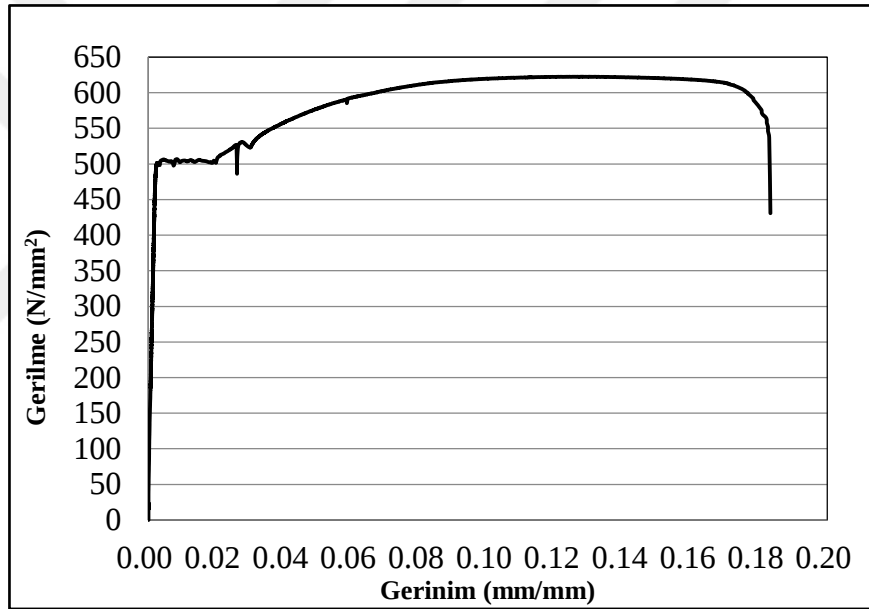


Şekil 4.7. Kirişler için tartılıp gruplandırılan ve etiketlenen etriyeler

4.1.1. Donatı mekanik özellikleri

ASTM A370 (ASTM 2008) standartlarına göre deney düzeneğinde kullanılan donatıların mekanik özellikleri eğilme deneyi öncesinde 6 adet donatı için çekme deneyi yapılarak elde edilmiştir.

12 mm çapındaki betonarme donatılarının ortalama mekanik özellikleri; kopma dayanımı 608 MPa, akma dayanımı 506 MPa, gerilme değeri 0.0150 ve 0.1738'dir. Şekil 4.8. da 12 mm çapındaki gerilme-gerinim değerleri gösterilmektedir. Korozyona uğramış betonarme kirişler eğilme deneyinden sonra betonarme içerisinde bulunan demir donatıların çıkartılması ile çekme testi tekrardan yapılmıştır.

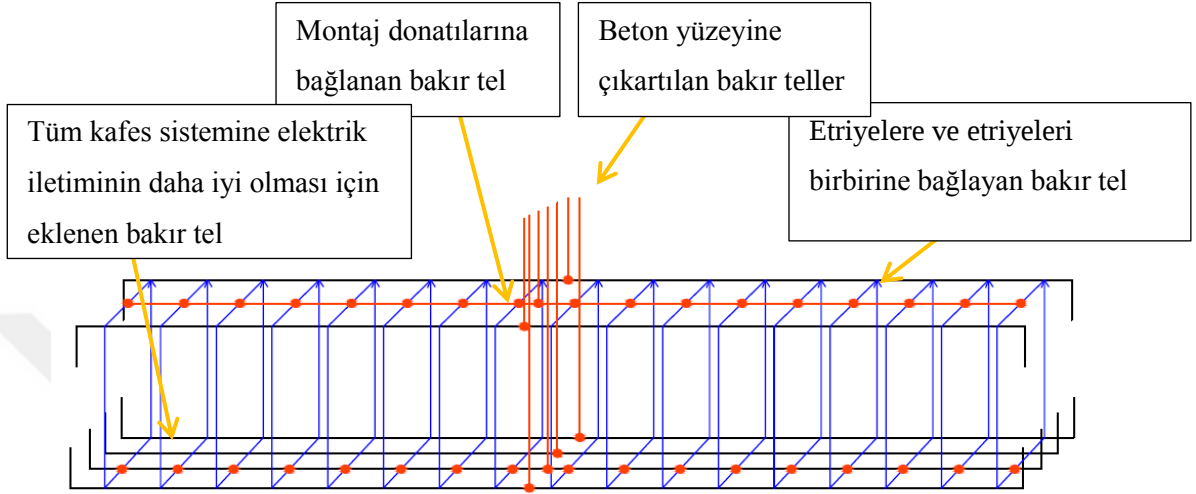


Şekil 4.8. Çelik donatıya ait gerilme – birim deformasyon eğrisi

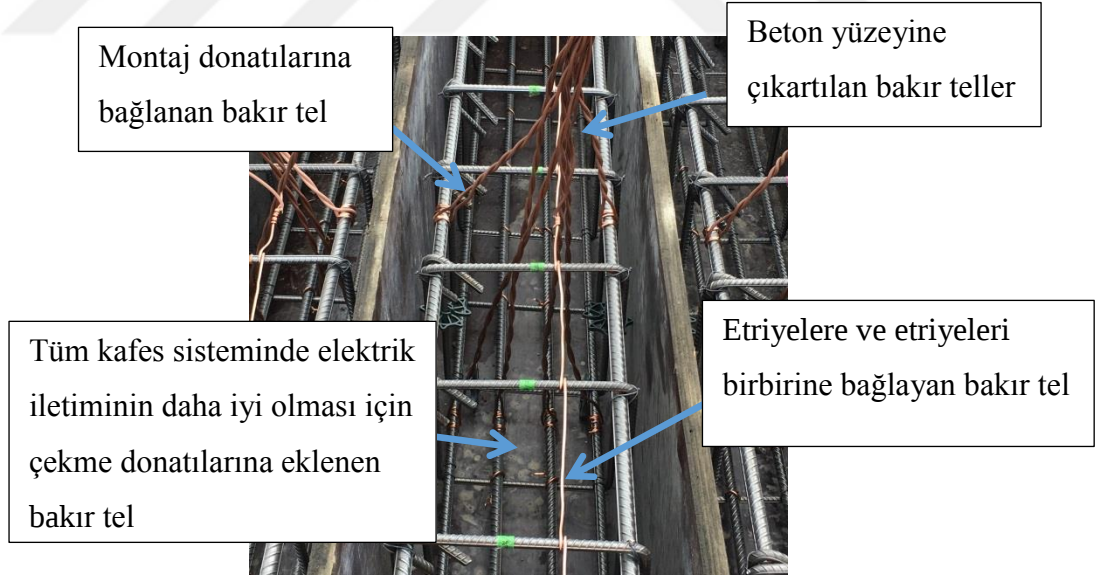
4.1.2. Betonarme kirişlere hızlandırılmış korozyon yöntem hazırlığı

Tartım işlemleri gerçekleştirildikten sonra kafes sistemi hazırlandı. Hazırlanan kafes sisteminde Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da görüldüğü gibi hızlandırılmış paslandırma yöntemi için kafes sistemini oluşturan donatılara bakır tel bağlandı. Bakır teller etriyelere ve montaj donatılarına bağlandı. Tüm betonarme kirişlerdeki etriyelere bakır tel döndürülerek birbiri ile bağlantılı olarak bağlandı. Basınç ve çekmedeki tüm donatılara ayrıca etriyeleri birbirine bağlayan bakır tele, beton yüzeyinden dışarıda kalacak şekilde bakır tel bağlandı. Dışarı uzatılan bakır tellerin; elektrik kaçmasını, noktasal paslanmayı önlemek ve akımın beton içerisinde daha iyi iletilmesini sağlamak

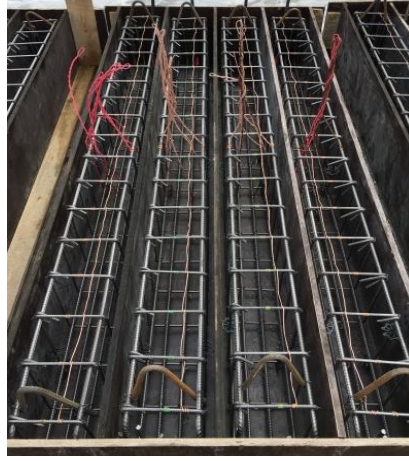
amacı ile Şekil 4.9’da görülen bakır kısımların plastik kısımları donatıya değen tarafları hariç çıkartılmamıştır. Çok hassas çalışılan bu çalışmada herhangi bir akım iletilmesini engelleyici bir durum karşılığında Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da görüldüğü çekme donatısına değen etriyelere bakır tel bağlanmıştır.



Şekil 4.9. Betonarme kirişlerin uygulanan bakır tellerin üç boyutlu bağlantı detayı



Şekil 4.10. Kalıp içinde donatı kafeslerine bağlanan bakır tellerin bağlantı detayı



Şekil 4.11. Betonarme kirişlerin kalıp içinde görünümü

4.1.3. Beton dökümü

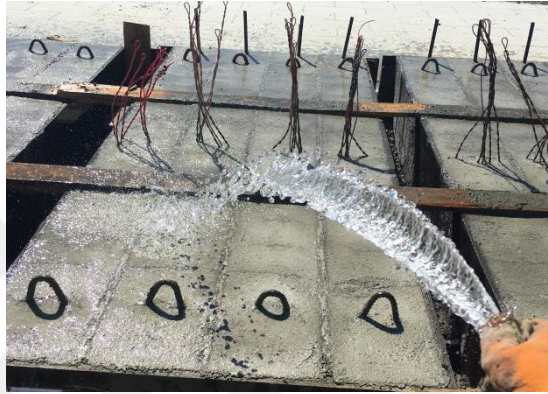
Bu çalışmada normal dayanımlı özdeş beton basınç dayanımı 30 MPa olan 8 adet betonarme kiriş dökülmüştür. Kiriş kalıpları su yalıtımlı ply-wood malzemeler kullanılarak oluşturulmuştur. Beton dökümü esnasında betonun kolayca yerleşmesi ve segregasyonsuz bir yüzey oluşması için vibratör kullanılmıştır. Tüm betonarme kirişler için hazır beton kullanılarak aynı beton mikserinden aynı zamanda tüm kirişler dökülerek elde edilmiştir. Dökülen kirişler dayanımını iyice kazanması ve çatlakların oluşumunu engellemek için sulanmıştır. 7 gün priz alması için beklendikten sonra kalıpları sökülüştür. Beton döküm esnasında 9 adet 15x15x15 cm adet küp şeklinde numuneler alınarak aynı betonarme kirişleri ile aynı ortamda muhafaza edilmiştir. Betonarme numunelerinin 28 günlük sonuçları ortalama 40 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.12. Hazırlanan kalıp ve donatılara beton dökümü



Şekil 4.13. Dökülen betondan numune alımı



Şekil 4.14. Betonarme numunelerinin kür süresi boyunca sulanması



Şekil 4.15. Deney için hazırlanan betonarme numuneler

4.2. Yöntem

4.2.1. Hızlandırılmış Paslandırma Yöntemi

Hızlandırılmış paslandırma yönteminde Faraday kanunu ve Yalciner vd. (2012) tarafından geliştirilen model kullanılmıştır. Yalciner (2012)'in yaptığı çalışmada geliştirmiş olduğu model hedeflenen pas oranlarına daha yakın sonuçları elde etmeye yardımcıdır. Hedeflenen pas oranlarına daha yakın sonuç elde etmek için %8 pas

oranında Yalciner (2012)' in oluşturduğu model , %15 ve %18 pas oranlarında ise Faraday kanununun modeli kullanılmıştır.

4.2.1.1. Faraday kanunu

Teorik olarak betonarme donatılarında meydana gelen kütle kaybı Faraday kanununa göre hesaplanabilmektedir.

$$m = \frac{t(s) \times I(A) \times 55.847}{2 \times 96.487} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1. Betonarme donatılarında meydana gelen kütle kaybı

t=saniye (sn), I=sistemden geçen akım (Amper), 55.847 metalin atomik kütlesi, Faraday sabitini 96,487 (A.sn/mol) göstermektedir.

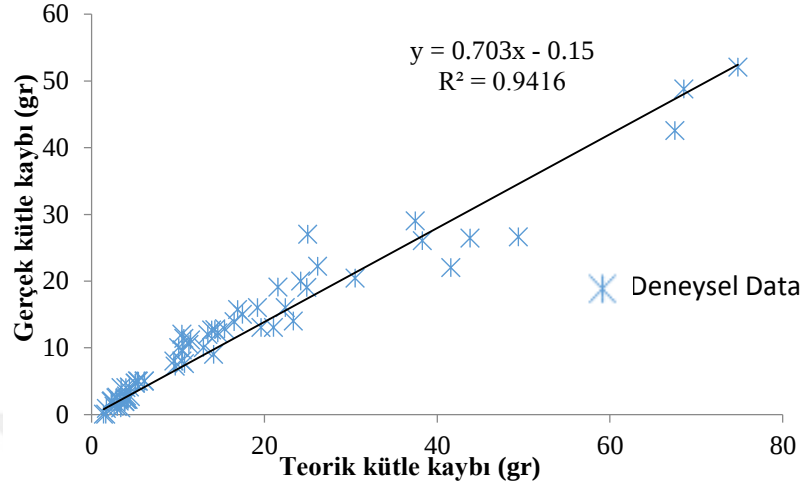
Denklem (4.1)'e göre sistemden geçen her bir saniyedeki akımın kayıt edilmesi ile birlikte hedeflenen kütle kaybı ve buna bağlı olarak paslandırma oranları elde edilmiştir.

Betonun heterojen yapısından dolayı sistemden her saniyede geçen akım eşit olmayabilir. Bundan dolayı teorik olarak hesaplanan pas oranları gerçek pas oranlarından her zaman bir miktar fazladır. Buna karşın Faraday kanuna göre sistemden geçen akım her 60 saniye için kayıt edilmiştir. Betonarme donatılarının hedeflenen pas oranlarına ulaşmaları için gerekli süre hesaplanmakta ve sistem bu süre zarfını dikkate alarak belirlenen zamanda kapatılmaktadır. Yine Faraday kanununa göre çelik donatılar beton içinde olmadan doğrudan elektrik akımına tabi tutularak sistem elektrik akım düzeneğine başladığı andan itibaren paslanma ve kütle kaybı yaşanmaktadır. Ancak çelik donatılar beton içerisinde olduğu zaman kütle kaybı ve paslanma için belli bir miktar enerji potansiyeline ve süreye ihtiyaç vardır. (Yalciner, 2012).

4.2.2. Yalciner (2012) geliştirilen model

Yalciner vd. (2012) deneysel paslandırma çalışmasında, ulaşılan gerçek pas oranları Faraday Kanunu'na göre hesaplanan pas oranları ile karşılaştırılmıştır. Yalciner vd.(2012) tarafından yapılan çalışmada hızlandırılmış paslandırma ile hedeflenen pas oranlarına daha yakın sonuçları elde etmeye yarayan deneysel bir model geliştirilmiştir.

Şekil 4.16’ da sunulan grafikte, Faraday Kanunu’na göre hedeflenen pas oranları ve elde edilen gerçek pas oranları için geliştirilen denklem gösterilmektedir.



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

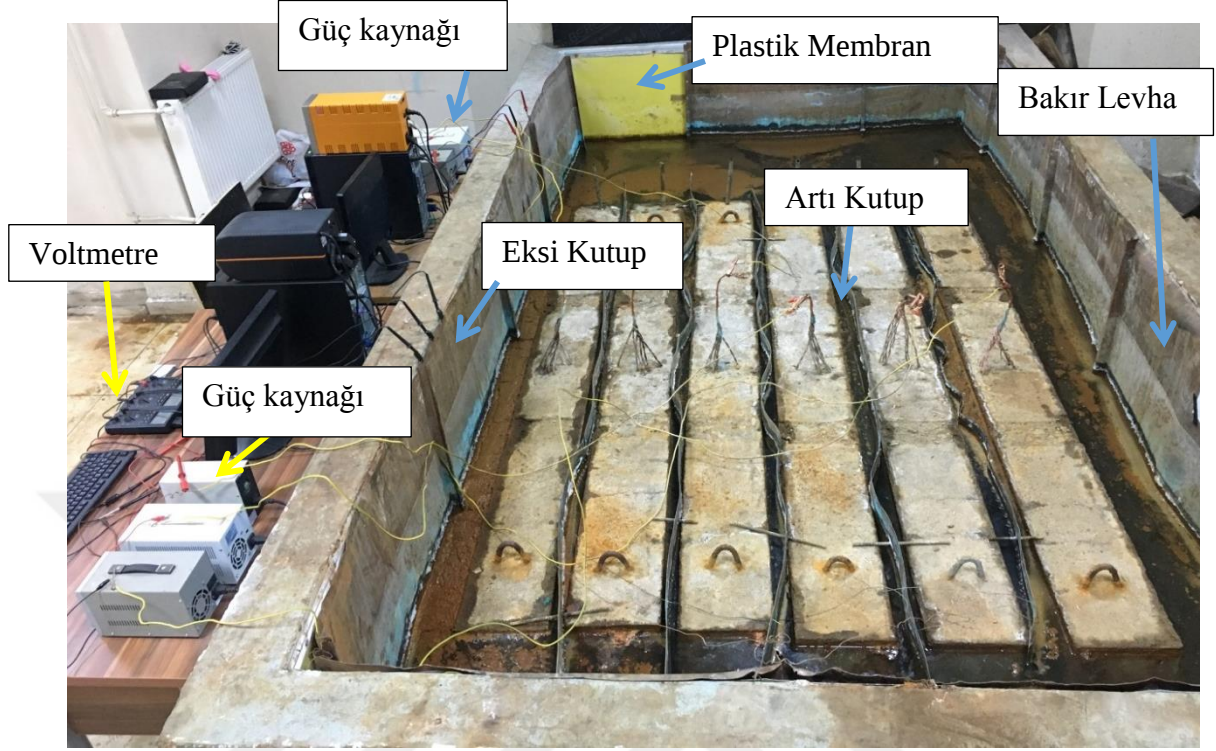
Şekil 4.16’da gösterilen grafikte, Faraday kanunu göre beklenen ya da hedeflenen pas oranları ve elde edilecek olan gerçek pas oranları için denklem gösterilmektedir. Bu denklem çok daha hassas ve birbirine yakın korozyon oranlarının elde edilmesi için kullanılmıştır. Faraday kanunu sadece deney sırasında korozyon oranlarını kontrol etmek için kullanılmıştır. Gerçek pas oranları betonarme kirişlerin eğilme deneyinden sonra kırılarak içerisinde boyuna donatıların ve etriyelerin çıkartılıp kütlelerinin tekrar tartılıp hesaplanması ile elde edilmiştir.

ASTM G1-03 (2003) standartlarında mekanik ve kimyasal olarak temizleme yöntemleri uygulanarak donatı yüzeyindeki pas ürünü kaldırılmış ve tüm donatılar tekrardan tartılarak gerçek pas oranları elde edilmiştir. Gerçek pas oranlarının hesaplanması için Denk 4.2 kullanılmıştır:

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

Denklem 4.2’de C_L korozyon oranını, W_i betonarme donatıların paslanmadan önceki kütlesini, W_f ise paslanmış ve ardından pas ürünü kaldırılarak mekanik ve kimyasal olarak temizlenmiş, sonra tekrar tartılarak elde edilen donatıların son kütlelerini ifade etmektedir. Tartım da özel bir tartı olan iki noktadan yük hücreli hassas terazi kullanılmıştır.

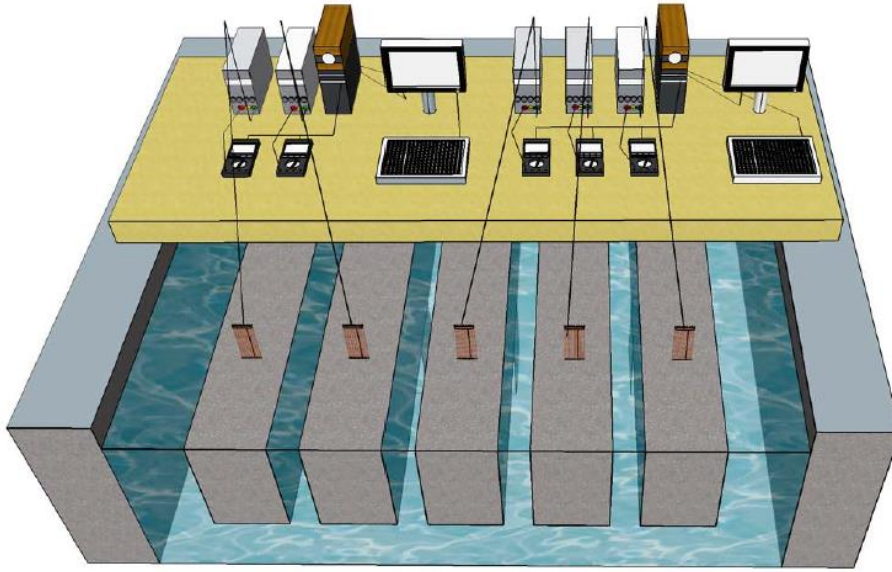
4.2.2. Paslandırma Havuzu



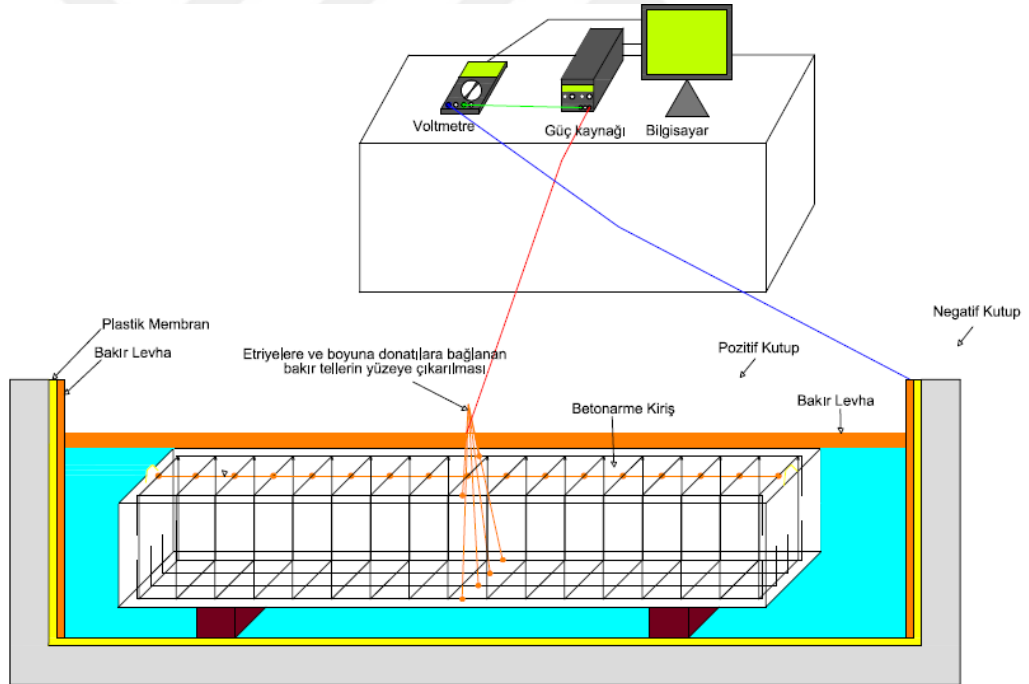
Şekil 4.17. Hızlandırılmış paslandırma yöntemi için kullanılan düzenek

Yüksekliği 85 cm, genişliği 175 cm boyutlarında olan Şekil 4.17’de gösterilen tam ölçekli paslandırma havuzunda 6 adet betonarme kiriş 2’şer adet %8, %15 ve % 18 pas oranlarında hızlandırılmış paslandırma yönetimine tabi tutulmuştur. Havuzun betonarme olması ve olası elektririk akım kaçaklarını önlemek amacı ile paslandırma havuzunun tüm alt ve iç yüzeyleri plastik mebran ile kaplanmıştır.

60 vol kapasitesindeki ayarlanabilir güç kaynakları ile betonarme kirişlerin tam ortasından çıkan, kirişin basıç, çekme ve etriyedonatılarına bağlanmış bakır kablolarına pozitif yükleme olarak bağlanmıştır.



Şekil 4.18. Hızlandırılmış paslandırma yöntemi için kullanılan üç boyutlu düzenek



Şekil 4.19. Hızlandırılmış paslandırma yöntemi için kullanılan şematik detay gösterimi

Paslandırma havuzunun etrafında ve kirişler arasında bulunan bakır levhalar; eksi yükleme kısmı olup elektriksel akım devresini sağlayacak ayrıca betonarme elemanlarının her yüzeyinde eşit pas oranlarının elde edilmesine imkân sağlayacaktır. Sistemden geçen akım 60 saniyede bir kayıt edilerek kontrollü paslanma sağlanmıştır. Bu kontrol her bir betonarme kiriş için voltmetreler; güç kaynağı (artı kutup) ile bakır levha (eksi kutup) arasına yerleştirilmiş, sistemden geçen akım 60 saniyede bir

bilgisayar aracılığı ile kayıt edilmiştir. Bu kontrol her bir betonarme kiriş için teker teker uygulanmıştır.

4.2.3. Betonarme Kirişlerin Korozyona Uğraması

Betonarme kirişler hızlandırılmış paslandırma yöntemi ile paslandırmaya maruz bırakılmıştır. Paslandırma havuzunda ve havuzdan çıkan betonarme kiriş numunelerine bakılarak betonarme kirişlerde çelik demirin paslanma sonucu hacminin artması ile betonarme kirişlerde çatlaklar oluşmasına ve bu çatlaklardan metalin doğada bulunduğu mineralli halline dönmek istemesi ile metal mineralleri Şekil 4.20’de görüldüğü gibi bu çatlaklardan sızmaktadır.



Şekil 4.20. Betonarme kirişlerin hızlandırılmış korozyona tabi tutulması

4.2.4. Betonarme Kirişlere FRP Uygulama Yöntemi

FRP ile güçlendirilen kirişlere Şekil 4.21'e görüldüğü gibi FRP uygulanacak bölgelere taş motoru ile yüzey temizlenip, yüzeyde bulunan tozlar ıslak bezle temizlenmiştir. FRP'nin yapıştırılacak bölgelere ve FRP'nin kendi yüzeyine, FRP yapıştırma malzemesi olan Şekil 4.22'de görüldüğü gibi Sikadur 30 sürülerek FRP malzemesini betonarme kiriş üzerine yapıştırılmıştır.



Şekil 4.21. FRP malzemesi yapılmadan betonarme kirişin yüzey temizliği



Şekil 4.22. FRP malzemesinin sikadur 30 ile kirişe yapıştırılması



Şekil 4.23. FRP malzemesi uygulanmış betonarme kirişler

4.2.5. Betonarme Kirişlerin Deney Sonrası Kırılıp Donatıların Çıkarılması

Deney sonrası paslanmaya maruz bırakılmış betonarme kirişlerin çelik kafes sistemi mekanik ve kimyasal temizleme işlemi için Şekil 4.24’de görüldüğü gibi hilti ile kırılarak çıkarılmıştır.



Şekil 4.24. Betonarme kirişlerin hilti ile kırılarak çelik kafes sisteminin çıkarılması

4.2.6. Betonarme Kirişlerin Mekanik ve Kimyasal Temizlenmesi



Şekil 4.25. Betonarme kiriş içerisinden çıkarılıp mekanik temizleme yapılan donatılar



Şekil 4.26. Betonarme kiriş içerisinden çıkarılıp temizlenen çelik etriye donatıları



Şekil 4.27. Korozyona maruz kalmış donatılarda kopmalar

Betonarme yapılarda korozyon çeşidi olarak en çok rastlanan uniform ve oyuklanma tipi korozyondur. Her ne kadar uniform korozyon oluşması için tüm etriye ve donatı

kirişlerinden bakır tel geçirilip betonarme kirişin havuz içerisinde hızlandırılmış korozyona maruz bırakılsa da çıkartılan elik numunelerinde yer yer oyuklanma tipi korozyon görülmüştür. şekil 4.27’da görüldüğü gibi bazı etriyelerin korozyondan dolayı parçalandığı hatta etriyeler de kopukluk gözlemlenmiştir.



şekil 4.28. Betonarme donatıları hidroklorik asit ile kimyasal temizleme

Betonarme kirişlerin hilti ile kırılıp çıkarılan elik kafes sistemi taş motoruna takılan elik tel fırça ile temizlendikten sonra şekil 4.28’de görüldüğü gibi hidroklorik asitte kimyasal temizle işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu kimyasal temizleme işleminden sonra numuneler ilk tartımdan sonra elik numunelerde oluşan ktle kaybını gözlemleye bilmek için ikinci tartıma hazırlanmıştır. Tüm numuneler tekrar tartılıp gerçek pas oranları hesaplanmıştır.

4.2.7. Betonarme Kirişlerin Gruplandırılması

Betonarme kirişler;

- B3F(%6,2), B4F(%10,5) ve B5F(%15,09) pas oranlarına sahip sika-carbodur plaka (CFRP) ile güçlendirilmiş betonarme kirişleri temsil etmektedir.
- B1(%6,2), B2(%10,5) ve B3(%15,09) pas oranlarına sahip güçlendirilmemiş betonarme kirişleri temsil etmektedir.

- B1 olarak adlandırılmış bir adet paslandırılmamış ve güçlendirilmemiş betonarme kirişini, B1F olarak adlandırılmış bir adet paslandırılmamış ama güçlendirilmiş betonarme kirişini temsil etmektedir.



Şekil 4.29. Korozyona maruz kalmamış kirişler

B1: Paslandırılmamış ve güçlendirilmemiş betonarme kiriş

B1F: Paslandırılmamış ama güçlendirilmiş betonarme kiriş



Şekil 4.30. Korozyona maruz kalmış ve CFRP ile güçlendirilmiş kirişler

B3F: %6,2 oranında paslandırılmış ve sika Carbodur plaka ile güçlendirilmiş kiriş

B4F: %10,5 oranında paslandırılmış ve sika Carbodur plaka ile güçlendirilmiş kiriş

B5F: %15,09 oranında paslandırılmış ve sika Carbodur plaka ile güçlendirilmiş kiriş



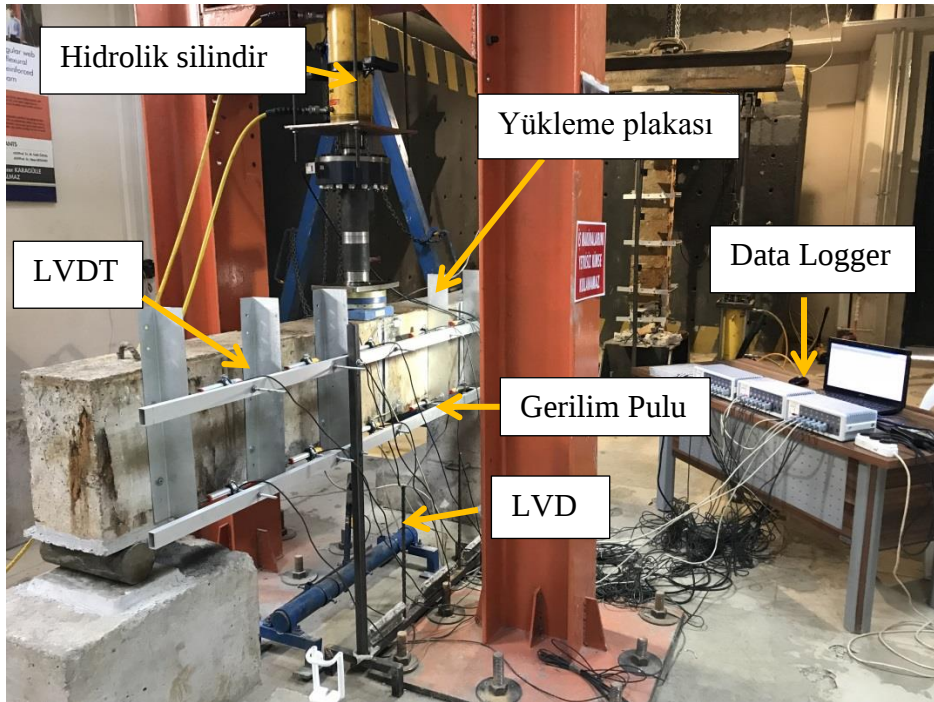
Şekil 4.31. Korozyona maruz kalmış kirişler

B3: Sadece %6,2 oranında paslandırılmış betonarme kiriş

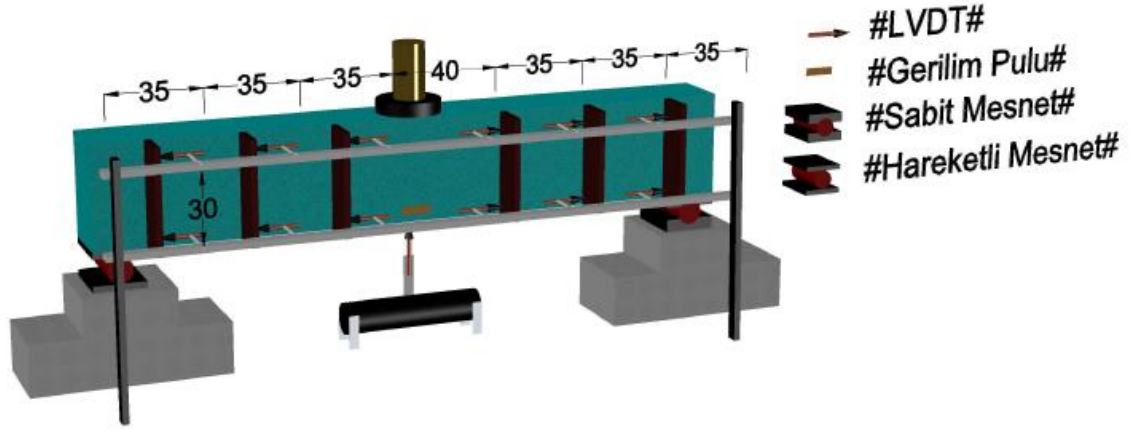
B4: Sadece %10,5 oranında paslandırılmış betonarme kiriş

B5: Sadece %15,09 oranında paslandırılmış betonarme kiriş

4.2.8. Yükleme Düzeneği



Şekil 4.32. Deneyde kullanılan yükleme düzeneği



Şekil 4.33. Deneyde kullanılan yükleme düzeneğinin üç boyutlu gösterimi

Tüm betonarme kirişler çalışma kapsamında Şekil 4.32 ve Şekil 4.33’de gösterilen üç noktadan yükleme yapılarak eğilme deney düzeneğine tabi tutulmaktadır. Deney düzeneğinde yükleme için gerekli çelik çerçevenin kiriş üzerine sabitlenmiş bir adet 600 KN kapasitesinde hidrolik silindir kullanılmıştır. Hidrolik silindirin altına yükü kirişlere aktaracak ve beton ezilmesini minimize etmek için kalın çelik levhalar kullanılmıştır. Deney kirişleri hidrolik silindir ile nihai göçmeye ulaşmaya kadar yüklenmiştir. Nihai göçme kirişlerin çekme donatılarından birinin kopmasına kadar devam etmiştir. Donatıların kopması ile nihai göçmeler gözlemlenmiştir. Yükleme deneyinden önce çelik mesnet plakalar Şekil 4.34’de görüldüğü gibi kirişlerin alt mesnet yüzeylerine Sikadur 31 ile yapıştırılarak monte edilmiştir.



Şekil 4.34. Kirişlerde kullanılan hareketli ve sabit mesnet

Kirişlerin orta açıklığına ve yükün uygulandığı yere bir adet 0.01 mm hassasiyetinde Şekil 4.35’de görüldüğü gibi LVDT yerleştirilmiştir. Böylece yük-yer değiştirme eş zamanlı kayıt edilerek yük-yer değiştirme grafiği oluşturulmuştur. Yer değiştirme ile yük yer değiştirme eş zamanlı olarak kayıt edilmiştir.



Şekil 4.35. Yük – Yerdeğiştirme için kiriş ortasına yerleştirilen LVDT

Eğilmeye zorlanan bir kesitin davranışını, gerçekçi olarak moment eğrilik ilişkisinden izlemek için betonarme kirişlerin açıklık bölgesine 12 adet eğrilik ölçer yerleştirilmiştir.



Şekil 4.36. 12 adet eğrilik ölçmek için yerleştirilen LVDT

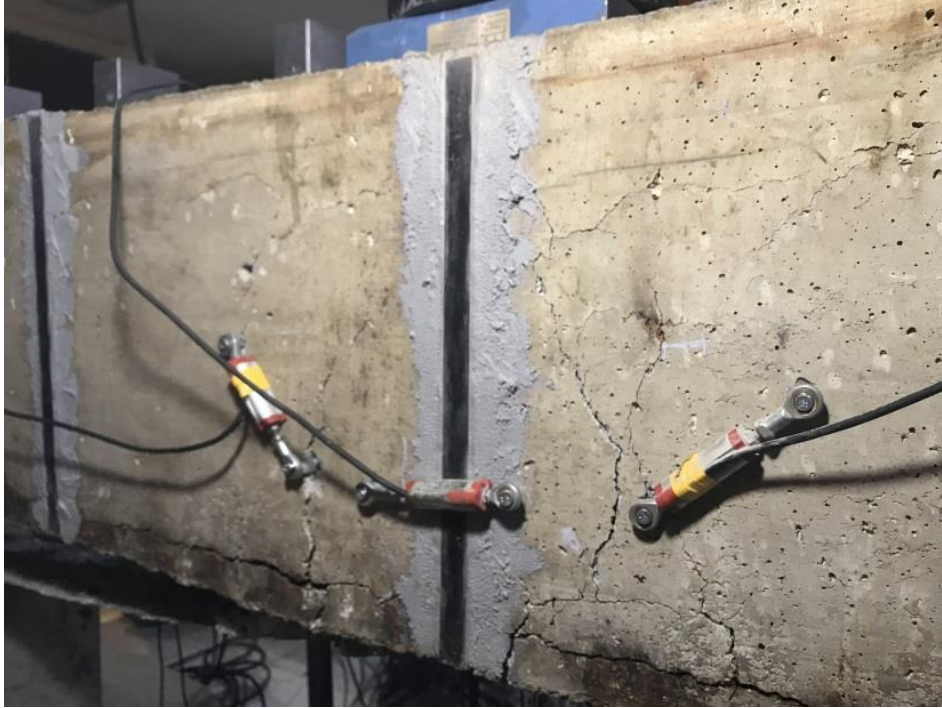
Betonarme kirişlerinde bulunan çekme donatısına bir adet gerilim pulu Şekil 4.37’de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Gerilim pulu elastik bir taşıyıcı üzerinde birbirine paralel bağlantılı ince tellerden oluşmuştur. Gerilim pulu gerinimi ölçülecek demir donatının üzerine yapıştırılmıştır. Donatıya uygulanan yükü doğru orantılı olarak gerilim pulu uzayacak ya da kısılacaktır. Pul üzerindeki teller de aynı şekilde uzunluğu değişecek ve direnci orantılı olarak azalıp artacaktır. Gerilim pullarının yapıştırılabilmesi için donatı tespit cihazı ile donatılar tespit edilerek kirişlere çok fazla zarar vermeyecek şekilde gerilim pulları yerleştirilmiştir. Açılan yüzeyler tamir harcı ile kapatılarak bekletilmiştir.



Şekil 4.37. Gerilim pulu betonarme kiriş üzerindeki görseli

Çatlak Ölçer

Her betonarme kirişe yükün uygulandığı, eğilmenin beklendiği bölgede çatlakların muhtemel oluşacağı yerlere Şekil 4.38’de görüldüğü gibi 3 adet çatlak ölçer yerleştirilmiştir.

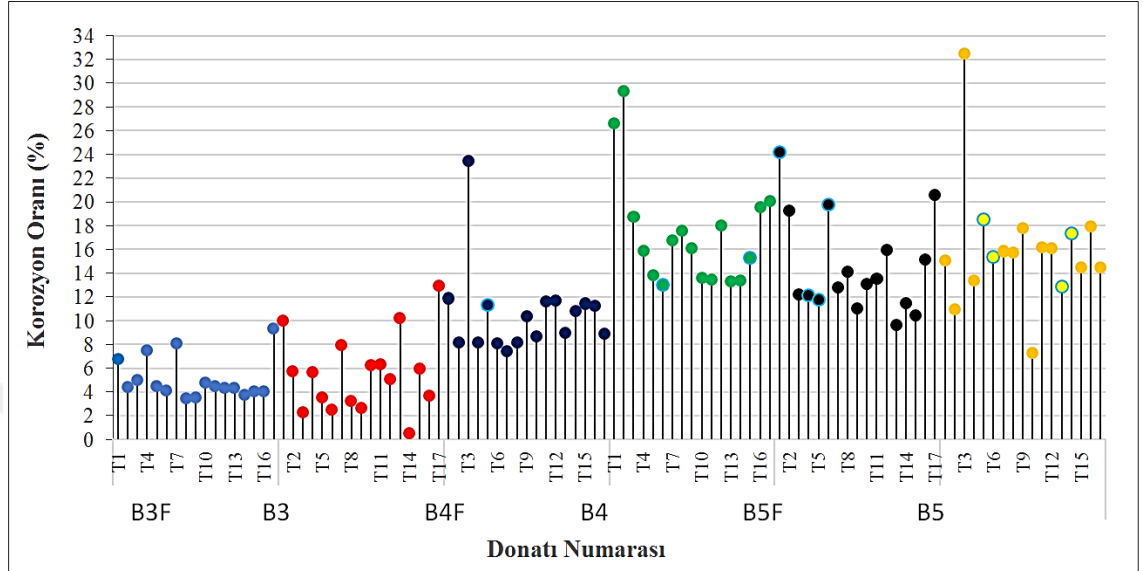


Şekil 4.38. Betonarme kiriş üzerindeki çatlak ölçerler

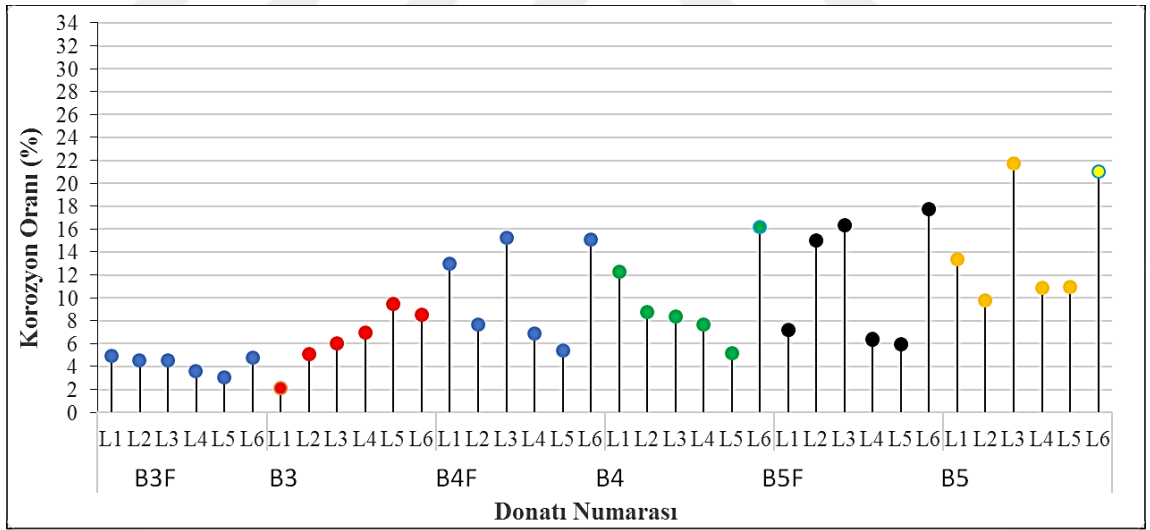
LVDT, Gerilim pulu ve Çatlak ölçerlerin deney verileri 3 adet Data logger (TestBox1001) ile değişmeyen algılayıcılarından çıkan çıkış gerinimlerini ölçerek bilgisayara aktarılmıştır.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. Korozyon Değerleri



Şekil 5.1. Boyuna donatılarda oluşan korozyon dağılımı



Şekil 5.2. Etriyelerde oluşan korozyon dağılımı

Tablo 5.1. Boyuna donatı ve Etriyelerin İlk Kütleleri

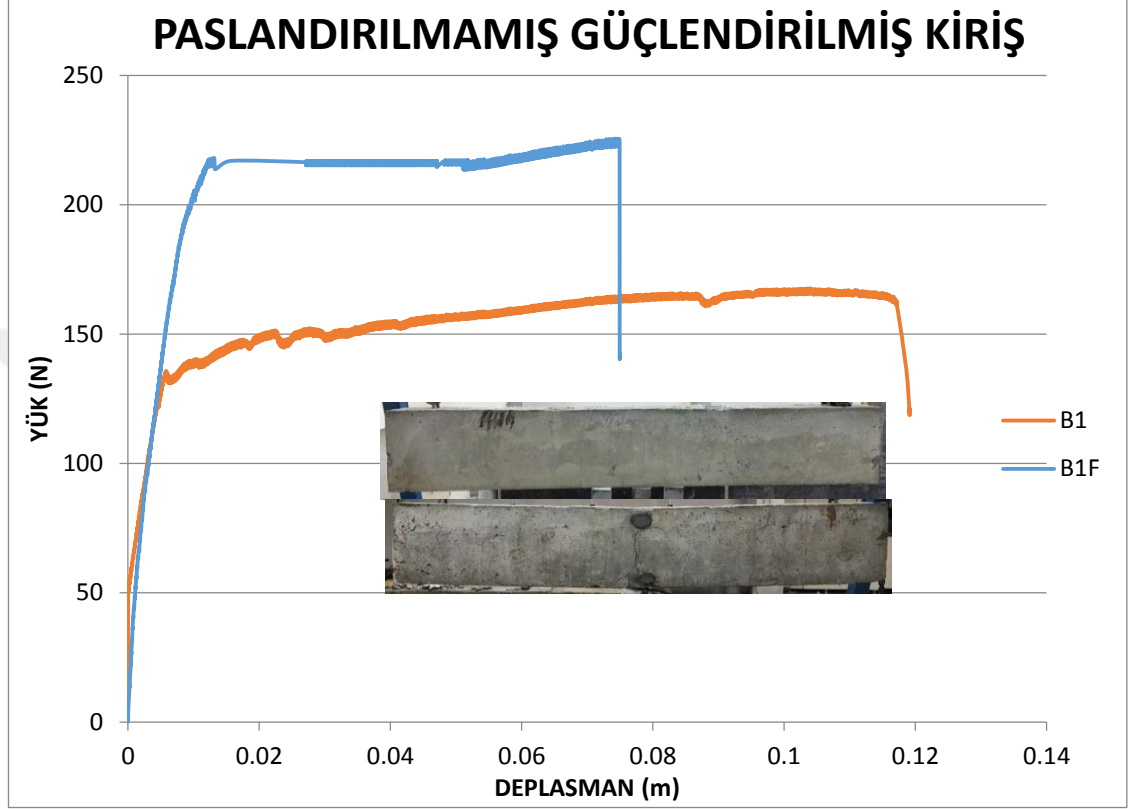
Kod	B1 C _L =%0	B3F C _L =%4.5	B3 C _L =%6.2	B4F C _L =%10.5	B4 C _L =%12.3	B5F C _L =%12.44	B5 C _L =%15.09
L1		2670	2592,5	2647,5	2555,5	2608	2523
L2		2595	2535	2577,5	2587,5	2598	2560
L3		2578	2590,5	2564	2534,5	2578	2630,5
L4		2584	2641	2599	2578	2719	2524
L5		2969,5	2958,5	2941	2941	2961	2941
L6		2614	2543,5	2521	2616,5	2543,5	2524,5
S1	PASLANDIRILMAMIŞ KİRİŞ NUMUNESİ	478	482,5	475,5	479	479	483,5
S2		479,5	472	473,0	509,5	487	478
S3		479,5	465,5	480,0	470	516,5	472,5
S4		481	477	477,5	469,5	490,5	470,5
S5		481,5	470	480	474,5	488	470
S6		486,5	469	480	471,5	479,5	466
S7		470	478	465	477	489,5	470
S8		481	469,5	477,5	478,5	484	466,5
S9		466,5	470	481	477,5	524	485,5
S10		484	482,5	476	465,5	524	472,5
S11		479,5	484,5	478	478,5	528	481
S12		471	478	479,5	480	522	490,5
S13		482,5	485	467,5	470	528,5	477,5
S14		466,5	469	491,5	474,5	530,5	480,5
S15		474	472	472	468	517	475,5
S16		492,5	468,5	478,5	475	525,5	474,5
S17		473,5	484,5	479	473	522,5	480,5

Tablo 5.2. Korozyon Sonrası Boyuna Donatı ve Etriye Kütleleri

Kod	B1 C_L=%0	B3F C_L=%4.5	B3 C_L=%6.2	B4F C_L=%10.5	B4 C_L=%12.3	B5F C_L=%12.44	B5 C_L=%15.09
L1		2538	2535,5	2304	2555,5	2421	2185,5
L2		2474,5	2405	2379	2587,5	2207	2310
L3		2460,5	2434,5	2172,5	2534,5	2156,5	2059
L4		2492	2456,5	2421,5	2578	2545,5	2250
L5		2876,5	2679	2781,5	2941	2784,5	2618,5
L6		2488	2327,5	2138,5	2616,5	2093	1994
S1	PASLANDIRILMAMIŞ KIRIŞ NUMUNESİ	445,5	434,5	419	479	363	410,5
S2		458,5	445	434,5	509,5	393	425,5
S3		455,5	455	367,5	470	453,5	319
S4		445	450	438,5	469,5	431	407,5
S5		460	453,5	425,5	474,5	430,5	383
S6		466,5	457,5	441	471,5	384,5	394,5
S7		432	440	430,5	477	427	395,5
S8		464,5	454,5	438,5	478,5	415,5	393
S9		450	457,5	431,0	477,5	466	399
S10		461	452,5	434,5	465,5	455,5	438
S11		458	454	422,5	478,5	456,5	403
S12		450,5	454	423,5	480	438,5	411,5
S13		461,5	435,5	425,5	470	477,5	416
S14		449	466,5	438,5	474,5	469,5	397
S15		455	444	418	468	463	406,5
S16		472,5	451,5	424,5	475	446	389,5
S17		429,5	422	436,5	473	415	411

5.2. Yükleme Sonuçları

Yükleme deneyleri sonucunda betonarme kirişlerine ait yük-deplasman grafikleri ve tabloları aşağıda gösterilmektedir.



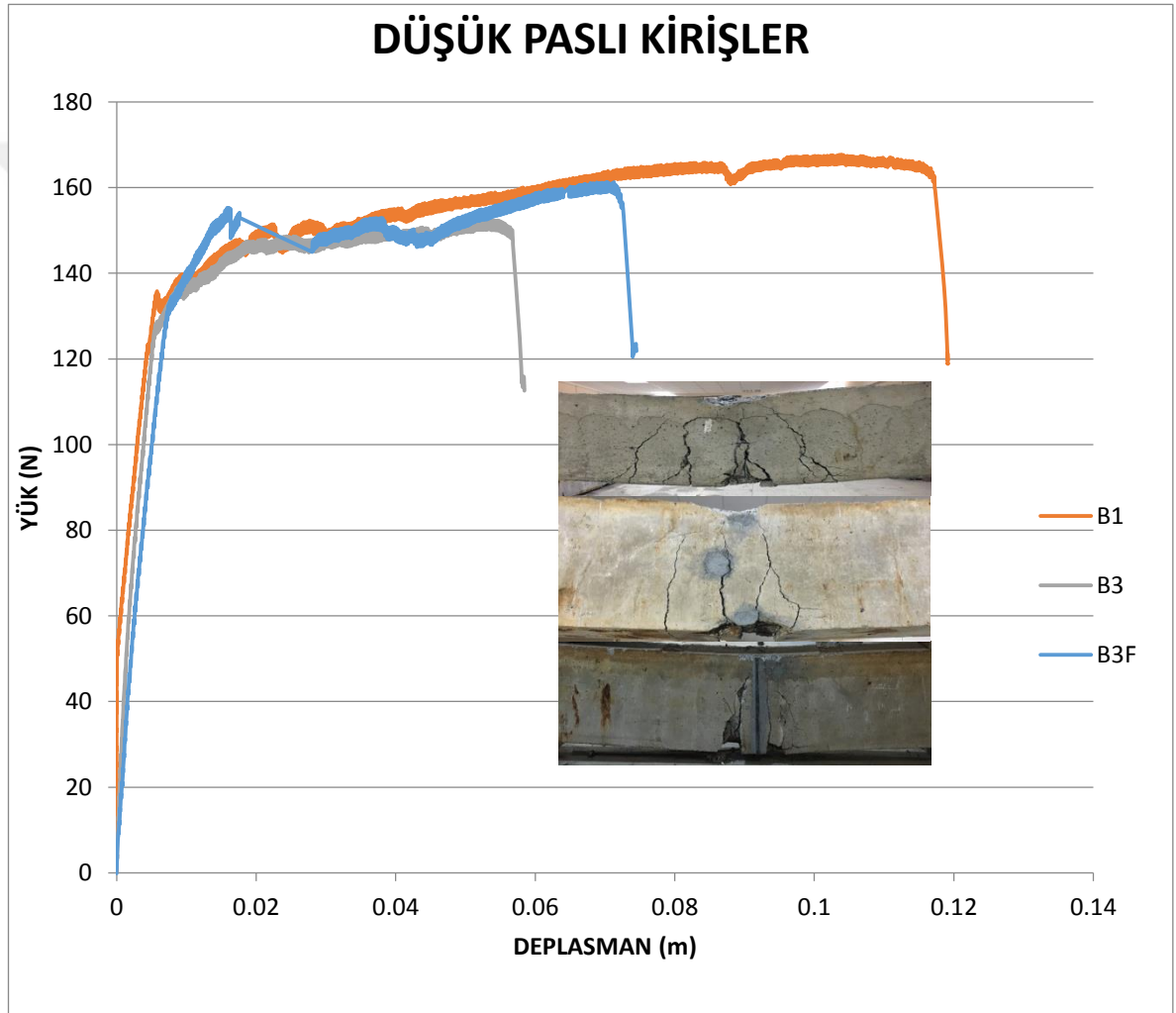
Şekil 5.3. B1 ve B1F kirişin yük - deplasman değerlerinin karşılaştırılması

Paslandırılmamış B1 kirişi ile paslandırılmamış ama güçlendirilmiş B1F kirişi eğilme etkisi altında yük deplasman grafiği incelenmiştir.

Tablo 5.3. B1 ve B1F kirişi yük-deplasman değerlerinin karşılaştırılması

	YÜK(N)	DEPLASMAN(m)
B1 KİRİŞİ	165,98	0,113
B1F KİRİŞİ	223,85	0,072

Karşılaştırılan bu iki numune arasında B1F kirişi karbon şerit plaka ile güçlendirilmesi sonucu taşıma kapasitesi artışı gözlemlenmiştir. B1F kirişinin yük kapasitesinin artışı avantaj olarak gözlemlenirken, FRP kirişin ulaştığı maksimum yükte deplasman miktarının azaldığı yapıyı gevrekleştirdiği dezavantaj olarak gözlemlenmiştir. B1F kirişi maksimum taşıma kapasitesine ulaştığında karbon şerit plaka beton yüzeyinde sıyrılmıştır. Kirişin yüksek kapasiteye ulaşması ile çekme bölgesinde donatıda kopma gözlemlenmiştir.



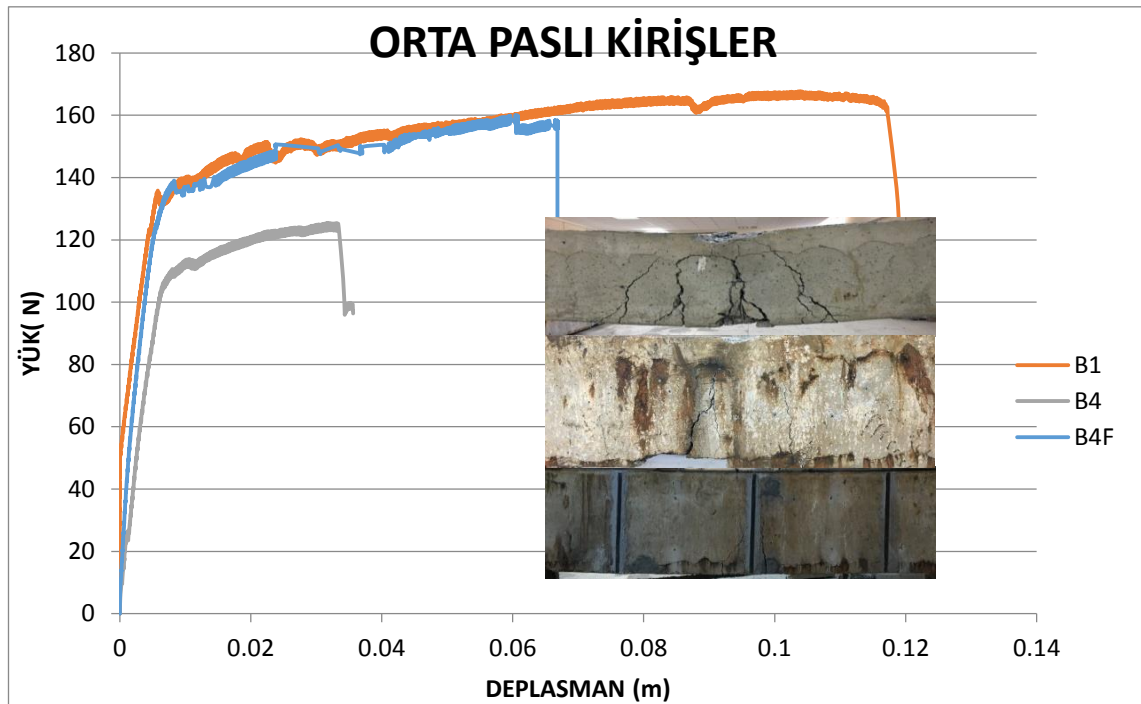
Şekil 5.4. B1, B3 ve B3F kirişi yük - deplasman değerlerinin karşılaştırılması

B1 kirişi %6 pas oranında paslandırılması sonucu B3 kirişin yük ve deplasman değerlerinin özellikle sünekliliğini gösteren deplasman değerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 5.4. B1, B3 ve B3F kirişi yük-deplasman değerlerinin karşılaştırılması

	YÜK(N)	DEPLASMAN(m)
B1 KİRİŞİ	165,98	0,113
B3 KİRİŞİ	154,21	0,052
B3F KİRİŞİ	161,00	0,069

B3 kirişinin karbon şerit plaka ile kirişin çekme bölgesine ve etriye olarak kesme kuvvetine yardımcı olması için kirişin ortasına ve iki yüzeyine 1 adet 2 mm kalınlığında şerit plaka yerleştirilmiştir. Eğilme bölgesine yerleştirilen FRP plakanın maksimum yük değerine ulaştığında plakanın beton yüzeyinden ayrıldığı gözlemlenmiş olup bu esnada eğilme bölgesinde bulunan donatıda kopma gerçekleştirilmiştir. FRP'nin yüzeyden ayrılması ile kirişte göçme gözlemlenmiştir. Kesme kuvvetini karşılaması ve seyrekte olsa sünekliliği artırması için kirişin orta bölgesine etriye görevi görmesi için konulan şerit plakadan bir katkı sağlanamamıştır.



Şekil 5.5. B1, B4 ve B4F kirişi yük - deplasman değerlerinin karşılaştırılması

B4 kirişinin FRP ile güçlendirilmesi sonucu kirişin çekme bölgesine ve kirişin yan yüzeylerine kesme kuvvetine yardımcı olması için 3 er adet iki yüzeyde toplamda altı adet kesme bölgesine 20 mm lik karbon şerit plaka ile güçlendirilmiştir.

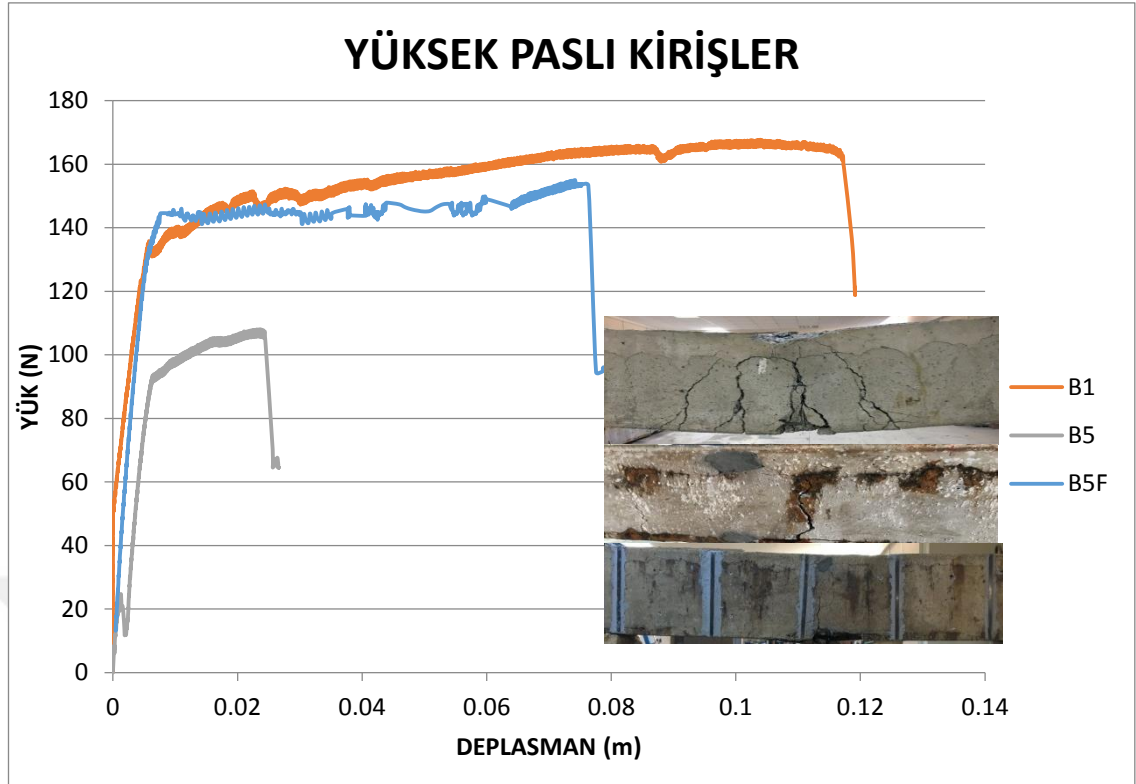
B1 kirişi %10,5 pas oranında paslandırılması sonucu B4 kirişin yük ve deplasman değerlerinin özellikle sünekliliğini gösteren deplasman değerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Kesme bölgesine konulan karbon şerit plakalardan istenilen kesme kuvveti artışı gözlenmemiştir. Bu yüzeye uygulanan plakalardan bir kazanç sağlandığı düşünülmemektedir.

Tablo 5.5. B1, B4 ve B4F kirişi yük-deplasman değerlerinin karşılaştırılması

	YÜK(N)	DEPLASMAN(m)
B1 KİRİŞİ	165,98	0,113
B4 KİRİŞİ	125,36	0,032
B4F KİRİŞİ	155,69	0,066

%10 oranında paslandırılan B4 kirişi FRP ile güçlendirilmesi sonucu taşıma yükü kapasitesinde gözlemlenen bu artış FRP plaka beton yüzeyinden sıyrılması ile kiriş göçmüştür. Plakanın taşıma yükünü ve deplasmanı artırdığı yukarıda ki tablo da net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.6. B1, B5 ve B5F kirişi yük - deplasman değerlerinin karşılaştırılması

B1 kirişi %15,09 pas oranında paslandırılması sonucu B5 kirişin yük ve deplasman değerlerinin özellikle sünekliğini gösteren deplasman değerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 5.6. B1, B4 ve B4F kirişi yük-deplasman değerlerinin karşılaştırılması

	YÜK(N)	DEPLASMAN(m)
B1 KİRİŞİ	165,98	0,113
B5 KİRİŞİ	107,74	0,22
B5F KİRİŞİ	154,70	0,73

Betonarme kirişte pas oranlarının %15,09'e yükselmesi ile yük ve deplasman değerinde büyük bir azalma gözlemlenmiştir. Bu pas oranlarında korozyon oranının fazla

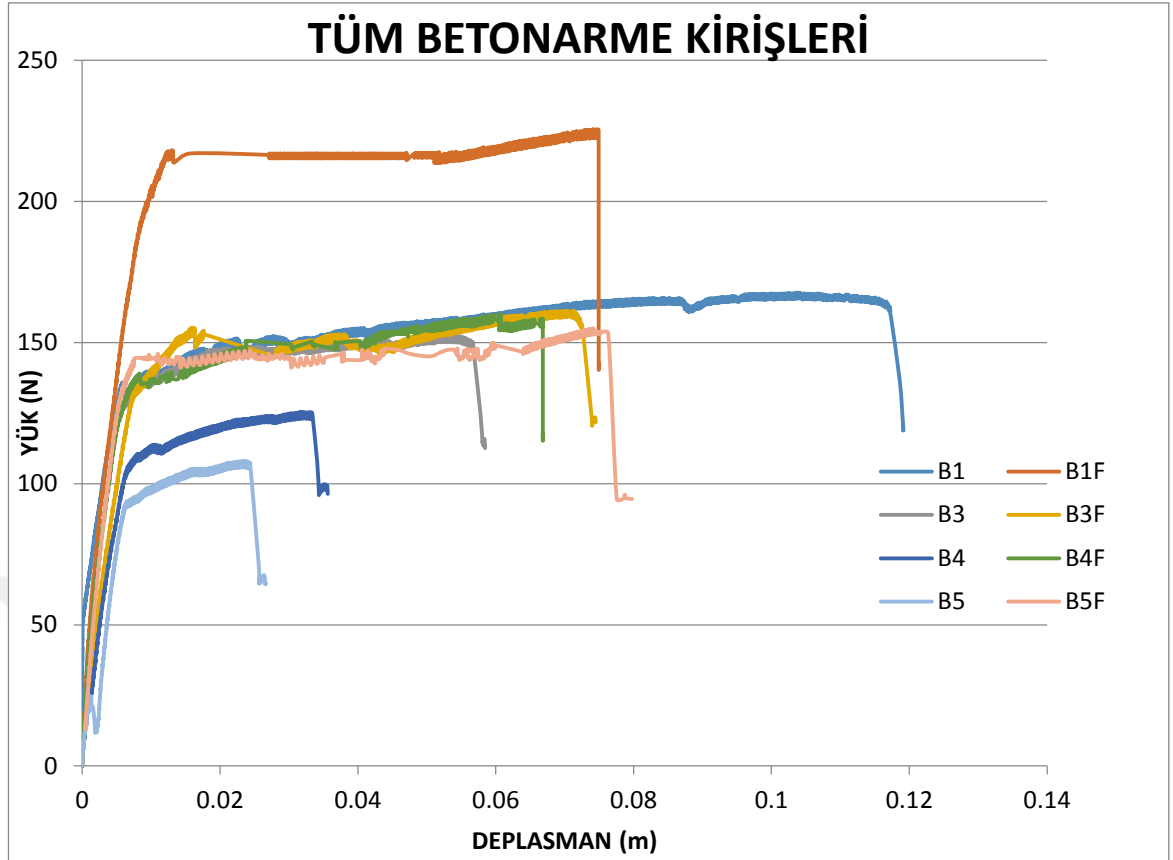
olmasından dolayı başta gözlemlenen korozyonun bir miktar sünekliliği sağlanması bu aşamada azalmıştır.

B5 kirşi çekme bölgesinde kirşin ortasında ve kirşin yan yüzeylerinde beşer adet olmak üzere 20 mm'lik FRP plakalar ile güçlendirilmiştir.

Korozyon miktarının artması ile FRP plakanın taşıma yükünü daha iyi artırdığı gözlemlenmiştir.

FRP plakalar eğilme davranışında kirşin yük kapasitesini plakalarda herhangi bir deforme olmadan, beton yüzeyinden sika yapıştırıcı ile yapıştırıldığı yüzeyden ayrılması plakaların dayanımlarının çok iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada yan yüzeylere kesme kuvvetini artırması için eklenen FRP plakalarda bir etki gözlemlenmemiştir. Yapıyı gevrek davranmaya zorlamıştır. Kirişin yanal yüzeylerine uygulanan FRP plaklar 90 derece olarak bükülemediği için U olarak bir etriye gibi kirşi saramamıştır. Bu sebepten dolayı etkisinin görülmediği tahmin edilmektedir.

Plakanın çekme bölgesinde maksimum yük değerine ulaştığında betonarme kirişin çekme bölgesinden sıyrılmıştır. Plakanın sıyrılması ile kirişin çekme bölgesindeki donatılarda kopma gerçekleşmiş kiriş göçmüştür.



Şekil 5.7. Tüm betonarme kirişlerin yük - deplasman değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 5.7 Tüm betonarme kirişlerin yük-deplasman değerlerinin karşılaştırılması

	YÜK(N)	DEPLASMAN(m)
B1 KİRİŞİ	165,98	0,113
B1F KİRİŞİ	223,85	0,072
B3 KİRİŞİ	154,21	0,052
B3F KİRİŞİ	161,00	0,069
B4 KİRİŞİ	125,36	0,032
B4F KİRİŞİ	155,69	0,066
B5 KİRİŞİ	107,74	0,022
B5F KİRİŞİ	154,70	0,073

Yukarıdaki tabloda gösterildiği üzere beton ve donatı özellikleri aynı olan 7 adet betonarme kirişlerin paslandırılması ve bu kirişlerin FRP plakalar ile güçlendirilmesi sonucu;

FRP karbon şerit plakalar;

%0 korozyon oranında betonarme kirişte %34,5 oranında taşıma kapasitesini artırırken

%6 korozyon oranında % 4,5 taşıma kapasitesi artırdığı,

%10,5 korozyon oranında % 24 taşıma yükü artırdığı,

%15,09 korozyon oranında % 43,5 taşıma yükü artışı gözlemlenmiştir.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Betonarme kirişlerin hızlandırılmış paslandırma yöntemi kullanılarak korozyona uğraması sonucu kirişlerin yük-deplasman sonuçlarında azalmalar olduğu görülmüştür.

Korozyona maruz kalmış bu kirişlerin tekrar ilk taşıma yüküne ulaşması için FRP karbon şerit plakaların kullanılması doğru bir yöntemdir. Ama plakanın yüzeyden ayrılmasını önleyecek önlemler alınmalıdır.

FRP plakalar betonarme kirişlerde taşıma gücü kapasitesini artırdığı gözlemlenmiştir.

Yapılan bu çalışmanın en önemli noktası; Betonarme kirişlerin korozyona maruz kalması ile kiriş paspaylarının FRP ile birlikte kirişten ayrıldığı gözlemlenmiştir. FRP plakaların eğilme davranışında çekme bölgesinde bulunan FRP plakanın taşıma yükü kapasitesine ulaştığından FRP plakanın epoksi ile yapıştırılan yüzeyle birlikte betonarme kirişten ayrılması. Korozyona maruz kalan bu yüzey FRP plakanın yüzeye yapıştırılmadan ayrılması buralara yeniden beton dökülmesi gerekmektedir.

FRP Plaka ile beton yüzeyi birlikte yüzeyden ayrılarak plakanın kirişe hiçbir faydası kalmadığı gözlemlenmiştir.

Kesme kuvvetine yardımcı olması için kirişin yanal yüzeylerine konulan FRP plakalar kirişi bir etriye gibi sarmadığı için kesme kuvvetine ve kirişin eğilmesinde bir etkisi olmamıştır.

Eğilme davranışında göçme yükünü artırmak için kirişin çekme bölgesine FRP plakanın yüzeyden sıyrılarak ayrılmasını önleyecek belirli aralıklarla ankraj sistemi veya uygulanan boyuna FRP plakaların üzerine enine kiriş genişliğinde FRP plakalar uygulanması gerekmektedir.

Kirişin kesme kuvvetini artırarak sünek davranış sağlaması için plakalar kiriş yanal yüzeylere U şeklinde veya bir etriye gibi saran sistem ile istenilen kesme kuvveti güçlendirilmesine ulaşılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- ACI-222R-01 (2001). "Protection of Metals in Concrete Against Corrosion", **American Concrete Institute**, Detroit.
- ACI (2006). "American Concrete Institute Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars", **ACI**, 440.1R
- Apostolopoulos CA and Papadakis VG (2008). "Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar", **Construction and Building Materials**, 22(12), 2316-2324.
- Cameron R (2012). "Strengthening of RC beams with externally bonded and anchored FRP laminate", **M.A.Sc. Thesis, McMaster University – Civil Engineering**.
- Çetinkaya N, Kaplan H ve Şenel ŞM (2004). "Betonarme kirişlerin lifli polimer malzemeler kullanılarak onarım ve güçlendirilmesi", **Pamukkale University, Engineering College. Journal of Engineering Sciences**, 3(291-298).
- Ehsani MR (1997). "FRP ile güçlendirilen dolgu duvarlarda kayma davranışını", The University of Arizona, **Journal of Composites For Construction**, 17.
- Grace NF, Ragheb WF and Abdel-Sayed G (2003). "Development and application of innovative triaxially brided ductile FRP fabric for strengthening concrete beams", **Composite Structures**.
- Lee HS and Cho YS (2009). "Evaluation of the Mechanical Properties of Steel Reinforcement Embedded in Concrete Specimen as a Function of the Degree of Reinforcement Corrosion", **Springer Science**, 81–88.
- Narayanan R and Kareem-Palajian AS (1986). "Torsion in Beams Reinforced with Bars and Fibers", **Journal of Structural Engineering**, 112(1), 53-66.
- Norris T, Saadatmanesh H and Ehsani MR (1997). "Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets". **Journal of Structural Engineering**, 123(903-911).
- Özcan Z (2015). "Deprem Sempozyumu Kocaeli", **Conference paper 2005**.
- Panchacharam S and Belarbi A (2002). "Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Composites". **First FIB Congress, Osaka, Japan, (2002)**.
- Saadetmanesh H, Ehsani MR and Jin L (1997), "Repair of Earthquake-Damaged RC Columns with FRP Wraps", **ACI-Structural Journal**, 94(20).
- Norris T, Saadatmanesh H and Ehsani MR (1997), "Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets". **Journal of Structural Engineering**, 123(7).

Türk Standartları Enstitüsü (TSE), “TS-500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları”, Birinci Baskı”, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, (2000).

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.



EKLER

Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

Doğru E, Yalciner H, Kumbasaroğlu A and Turan Aİ (2019). “Strengthening of RC Beams Subjected to Corrosion under the Effect of Flexural”, ***International Symposium for Environmental Science and Engineering Research (ISESER)***, Konya, Turkey.

Turan Aİ, Doğru E, Kumbasaroğlu A and Yalciner H (2019). “Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams With Corroded Reinforcement”, ***International Symposium for Environmental Science and Engineering Research (ISESER)***, Konya, Turkey.

Yalçiner H, Kumbasaroğlu A, Doğru E (2019). "Flexural Strength of Corroded Reinforced Concrete Beams", ***ACI STRUCTURAL JOURNAL***, 20(100-112).

ÖZGEÇMİŞ

Enis DOĞRU, 1993 yılı Erzurum doğumludur. İlköğretimini Cemal Gürsel ilköğretim okulunda, ortaöğretimini Şair Nefi ortaöğretim okulunda liseyi Atatürk Liseli 2 yıl, Hilal kent Liseli 1 yıl son sınıfı Açık öğretim liseli 1yıl okuyarak 2011 yılı liseden mezun olmuştur. 2012 yılında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesinin Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü ikinci olarak kazanmıştır. Bölümünü 2016 yılında bölüm ikincisi ve fakülte üçüncü olarak tamamladığı yılında kendi üniversitesinde İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitime başlamıştır. Mezun olur olmaz Erzincan İliç ilçesinde bulunan Anagold Altın Madeni tesisinde kalite kontrol saha şefi, Erzincan Yapı Denetim' de, Yeni Çizgi Yapı Denetim' de kontrol mühendisi olarak görev yapmış. 2018 yılının ağustos ayında girmiş olduğu Eksim Holding firmasında Erzurum İnşaat Saha Sorumlusu olarak halen görev yapmaktadır.