T.C.

AKSARAY ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KESME KAPASİTESİ YETERSİZ BETONARME KİRİŞLERİN KARBON LİFLİ POLİMERLER İLE GÜÇLENDİRİLMESİNİN STATİK VE DİNAMİK OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ramazan ORUÇ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Mehmet Aydın KÖMÜR

AKSARAY, 2019

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 162303411 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, Ramazan ORUÇ tarafından hazırlanan "**KESME KAPASİTESİ YETERSİZ BETONARME KİRİŞLERİN KARBON LİFLİ POLİMERLER İLE GÜÇLENDİRİLMESİNİN STATİK VE DİNAMİK OLARAK İNCELENMESİ"** adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Aydın KÖMÜR
Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum. .

Üye: Prof. Dr. Mehmet Emin KARA
Aksaray Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Üye: Prof. Dr. Kurtuluş SOYLUK
Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum**.**

Tez Savunma Tarihi: 22/05/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

…….

Doç. Dr. Mehmet Ali Hınıs
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

İmza

Ramazan ORUÇ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Mehmet Aydın KÖMÜR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar koşullarında bu deneysel çalışmanın yapılmasında ve tezimin hazırlanması aşamasında yardım eden Prof. Dr. Mehmet Emin Kara'ya, Doç. Dr. İbrahim Özgür Deneme'ye Öğr. Gör. Yakup BÖLÜKBAŞ'a ve Arş. Gör. Can ERENSON'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, her zaman yanımda olan sevgili eşim Melis Sıla ORUÇ'a, hayatımın her anında bana destek olan ve yol gösteren annem Şerife ORUÇ'a, babam Özcan ORUÇ'a ve kardeşim Dilara ORUÇ'a çok teşekkür ederim.

Tezimin gerçekleşmesinde 2018-012 numaralı proje ile maddi destek sağlayan Aksaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Ramazan ORUÇ
AKSARAY, 2019

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ÖZET iv
ABSTRACT v
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
ÇİZELGELER DİZİNİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR ix
1. GİRİŞ 1
1.1 Amaç ve Kapsam 3
2. LİTERATÜR ÖZETİ 4
2.1 Lifli Polimerler İle Güçlendirme Çalışmaları 4
2.2 Dinamik Ölçümler ile Yapılan Çalışmalar 11
3. MALZEME VE YÖNTEM 17
3.1 Genel 17
3.2 Kullanılan Malzemelerin Özellikleri 18
3.2.1 Beton 18
3.2.2 Donatı 19
3.2.3 Sikawrap 230-C/45 19
3.2.4 Sikadur 330 epoksi 20
3.3 Deney Elemanlarının Tasarım Detayları 20
3.4 Deney Elemanlarının Hazırlanışı 23
3.5 LP Şeritler ile Güçlendirme İşlemleri 26
3.6 Yükleme ve Deney Düzeneği 27
3.7 Ölçüm Düzeneği ve Verilerin Toplanması 28
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 31
4.1 Deneyler 31
4.1.1 1 nolu deney elemanı 31
4.1.2 2 nolu deney elemanı 32
4.1.2.1 Yükleme aşaması 32
4.1.2.2 Frekans ölçümü 34
4.1.3 3 nolu deney Elemanı 35
4.1.3.1 1. aşama yükleme 35
4.1.3.2 2. aşama yükleme 36
4.1.3.3 Frekans ölçümü 37
4.1.4 4 nolu deney elemanı 40
4.1.4.1 1. aşama yükleme 40
4.1.4.2 2. aşama yükleme 41
4.1.4.3 Frekans ölçümü 42
4.1.5 5 nolu deney elemanı 44
4.1.5.1 1. aşama yükleme 45
4.1.5.2 2. aşama yükleme 45
4.1.5.3 Frekans ölçümü 46
4.1.6 6 nolu deney elemanı 49
4.1.6.1 1. aşama yükleme 49
4.1.6.2 2. aşama yükleme 50
4.1.6.3 Frekans ölçümü 51
4.2 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 54
4.2.1 Deney elemanlarının davranışı 54

4.2.2 Kesme dayanımı 58
4.2.3 Rijitlik 59
4.2.4 Deplasman süneklik oranı 60
4.2.5 Kesme kuvveti hesabı 61
4.2.6 Frekans değişimi 64
4.2.7 Eğilme titreşimi hesabı 66
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 70
5.1 Sonuçlar 70
5.2 Öneriler 71
KAYNAKLAR 72
ÖZGEÇMİŞ 75

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KESME KAPASİTESİ YETERSİZ BETONARME KİRİŞLERİN KARBON LİFLİ POLİMERLER İLE GÜÇLENDİRİLMESİNİN STATİK VE DİNAMİK OLARAK İNCELENMESİ

Ramazan ORUÇ

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Aydın KÖMÜR

ÖZET

Bu çalışmada, kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin karbon lifli polimer şeritler ile güçlendirilmesinin kirişlerin davranışına ve dinamik özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, ikisi kontrol elemanı ve dört tanesi deney elemanı olarak toplam altı adet betonarme kiriş test edilmiştir. Çalışma, yarı-statik yükleme ve dinamik ölçüm olarak iki aşamada yapılmıştır. Güçlendirilen kirişlerde, lifli polimer şeritler 50 mm, 100 mm, 150 mm ve 200 mm aralıklarla kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları, lifli polimerler arası mesafe ve yükleme aşamaları değişkenlerinin kirişlerin davranışı ve dinamik özelliklerine etkisi açısından değerlendirilmiştir.

Deney sonuçları lifli polimerler ile güçlendirme yönteminin kesme kapasitesi yetersiz kirişlerin kesme kapasitesini artırdığını, sünek eğilme davranışı meydana geldiğini, şeritler arası mesafe azaldıkça frekans değişim oranını azalttığı dolayısıyla kirişlerin dinamik özellikleri üzerinde olumlu etkilerinin olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme kirişler, Güçlendirme, Lifli polimer, Modal analiz.

Mayıs, 2019; 75 sayfa

M.Sc. THESIS

STATIC AND DYNAMIC INVESTIGATION OF SHEAR DEFICIENT REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH CARBON FIBER REINFORCED POLYMER STRIPS

Ramazan ORUÇ

Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Aydın KÖMÜR

ABSTRACT

In this study, the effect of strengthening shear deficient reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips on the behavior and dynamic properties were experimentally investigated. For this purpose, six reinforced concrete beams were tested, as two reference members and four members strengthened with CFRP strips. Then, the study was carried out in two stages as quasi-static loading and dynamic measurement. For strengthened beams, the spacing between CFRP strips was used as 50 mm, 100 mm, 150 mm and 200 mm. The results of the study were investigated in terms of the spacing between CFRP strips and the loading stages on the behavior and dynamic properties of the beams.

The test results showed that strengthening with CFRP contributed to the shear capacity and ductile behavior and, as the spacing between the strips decreased the frequency change rate decreased.

Keywords: Reinforced concrete beams, Strengthening, Carbon fiber reinforced polymer, Modal analysis.

May, 2019; 75 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. 1 nolu deney elemanı donatı detayı. 21
Şekil 3.2. 2-6 nolu deney elemanları donatı detayı. 22
Şekil 3.3. 3 nolu deney elemanı, LP şerit detayı. 22
Şekil 3.4. 4 nolu deney elemanı, LP şerit detayı. 22
Şekil 3.5. 5 nolu deney elemanı, LP şerit detayı. 23
Şekil 3.6. 6 nolu deney elemanı LP şerit detayı. 23
Şekil 3.7. Hazırlanan donatı kafesi. 24
Şekil 3.8. Kalıpların yağlanması. 24
Şekil 3.9. Donatı kafeslerinin kalıplara yerleştirilmesi. 25
Şekil 3.10. Beton dökümünün gerçekleşmesi. 25
Şekil 3.11. Küp numunelerin kırılması. 26
Şekil 3.12. Hazırlanan yüzeylere epoksi sürülmesi. 27
Şekil 3.13. CFRP şeritlerin yapıştırılması. 27
Şekil 3.14. Yükleme ve deney düzeneği. 28
Şekil 3.15. Deney düzeneğine ait kesme ve moment diyagramı. 28
Şekil 3.16. Frekans ölçüm düzeneği. 30
Şekil 3.17. Tek eksenli ivmeölçer ve veri toplama ünitesi. 30
Şekil 4.1. 1 nolu deney elemanı Yük-Deplasman grafiği. 32
Şekil 4.2. Göçme sonrası 1 nolu deney elemanı. 32
Şekil 4.3. 2 nolu deney elemanı Yük-Deplasman grafiği. 33
Şekil 4.4. Göçme sonrası 2 nolu deney elemanı. 33
Şekil 4.5. Frekans ölçüm düzeneği ve ivmeölçer yerleşimi. 34
Şekil 4.6. 2 nolu deney elemanı hasarsız durum için SYFTD. 34
Şekil 4.7. 2 nolu deney elemanı göçme sonrası SYFTD. 35
Şekil 4.8. Frekans değişimi, 2 nolu deney elemanı. 35
Şekil 4.9. Hasar sonrası 3 nolu deney elemanı. 36
Şekil 4.10. 3 nolu deney elemanı Yük-Deplasman grafiği. 37
Şekil 4.11. Göçme sonrası 3 nolu deney elemanı. 37
Şekil 4.12. Ölçüm düzeneği ve ivmeölçer yerleşimi. 38
Şekil 4.13. 3 nolu deney elemanı güçlendirme öncesi SYFTD. 38
Şekil 4.14. 3 nolu deney elemanı güçlendirme sonrası SYFTD. 38
Şekil 4.15. 3 nolu deney elemanı hasarlı durum için SYFTD. 39
Şekil 4.16. 3 nolu deney elemanı göçme sonrası SYFTD. 39
Şekil 4.17. Frekans değişimi, 3 nolu deney elemanı. 40
Şekil 4.18. Hasar sonrası 4 nolu deney elemanı. 41
Şekil 4.19. 4 nolu deney elemanı Yük-Deplasman grafiği. 42
Şekil 4.20. Hasar sonrası 4 nolu deney elemanı. 42
Şekil 4.21. 4 nolu deney elemanı için deney düzeneği ve ivmeölçer yerleşimi. 43
Şekil 4.22. 4 nolu deney elemanı güçlendirme öncesi SYFTD. 43
Şekil 4.23. 4 nolu deney elemanı güçlendirme sonrası SYFTD. 43
Şekil 4.24. 4 nolu deney elemanı hasar sonrası SYFTD. 44
Şekil 4.25. Frekans değişimi, 4 nolu deney elemanı. 44
Şekil 4.26. Hasar sonrası 5 nolu deney elemanı. 45
Şekil 4.27. 5 nolu deney elemanı Yük-Deplasman grafiği. 46
Şekil 4.28. Göçme sonrası 5 nolu deney elemanı. 46
Şekil 4.29. Deney düzeneği ve ivmeölçer yerleşimi. 47
Şekil 4.30. 5 nolu deney elemanı güçlendirme öncesi SYFTD. 47
Şekil 4.31. 5 nolu deney elemanı güçlendirme sonrası SYFTD. 47

Şekil 4.32. 5 nolu deney elemanı hasarlı durum SYFTD. 48
Şekil 4.33. 5 nolu deney elemanı göçme sonrası SYFTD. 48
Şekil 4.34. Frekans değişimi, 4 nolu deney elemanı**.** 49
Şekil 4.35. 1. aşama yükleme sonrası 6 nolu deney elemanı. 50
Şekil 4.36. 6 nolu deney elemanı Yük-Deplasman grafiği. 51
Şekil 4.37. Göçme sonrası 6 nolu deney elemanı. 51
Şekil 4.38. Deney düzeneği ve ivmeölçer yerleşimi. 52
Şekil 4.39. 6 nolu deney elemanı güçlendirme öncesi SYFTD. 52
Şekil 4.40. 6 nolu deney elemanı güçlendirme sonrası SYFTD. 52
Şekil 4.41. 6 nolu deney elemanı hasar sonrası SYFTD. 53
Şekil 4.42. 6 nolu deney elemanı göçme sonrası SYFTD. 53
Şekil 4.43. Frekans değişimi, 6 nolu deney elemanı. 54
Şekil 4.44. Yük-Deplasman grafiği, Kontrol elemanları. 55
Şekil 4.45. Yük-Deplasman grafiği, 1 ile 3-6 nolu deney elemanları..... 56
Şekil 4.46. Yük-Deplasman grafiği, 2 ile 3-6 nolu deney elemanları..... 57
Şekil 4.47. Deney elemanlarının frekans değişim grafiği. 66
Şekil 4.48. Teorik hesaplamalar ile deney elemanlarına ait frekans değerleri. 69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. 1 m^3 beton için kullanılan malzeme oranları. 19
Çizelge 3.2. Deney elemanlarının ortalama beton basınç dayanımları (28 gün). 19
Çizelge 3.3. Donatı özellikleri. 19
Çizelge 3.4. LP şeritlerin malzeme özellikleri. 20
Çizelge 3.5. Epoksi yapıştırıcının malzeme özellikleri. 20
Çizelge 4.1. Deney elemanlarının davranışı. 58
Çizelge 4.2. Deney elemanlarının akma ve göçme yükü kapasiteleri. 58
Çizelge 4.3. Deney elemanlarına ait rijitlikler. 59
Çizelge 4.4. Deney elemanlarına ait deplasman süneklik oranı. 60
Çizelge 4.5. Deney elemanlarına ait hesaplanan ve ölçülen kesme kuvveti. 63
Çizelge 4.6. 2 nolu deney elemanı, frekans değişimi. 64
Çizelge 4.7 3 nolu deney elemanı, frekans değişimi. 64
Çizelge 4.8. 4 nolu deney elemanı, frekans değişimi. 65
Çizelge 4.9. 5 nolu deney elemanı, frekans değişimi. 65
Çizelge 4.10. 6 nolu deney elemanı, frekans değişimi. 66
Çizelge 4.11. Hesaplanan frekans değerleri. 68

SİMGELER VE KISALTMALAR

$\mathbf{a}$	Kesme Açıklığı
$\mathbf{A}$	Kesit Alanı
$\mathbf{A_f}$	CFRP Şerit Enkesit Alanı
$\mathbf{A_{sw}}$	Enine Donatı Toplam Kesit Alanı
$\mathbf{b_w}$	Kiriş Kesit Genişliği
$\mathbf{d}$	Kiriş Faydalı Yüksekliği
$\mathbf{E}$	Elastisite Modülü
$\mathbf{E_{cfrp}}$	CFRP Elastisite Modülü
$\mathbf{f}$	Doğal Frekans (Hz)
$\mathbf{f_{fv}}$	CFRP Şerit Kopma Gerilmesi
$\mathbf{f_{ywd}}$	Enine Donatı Tasarım Akma Dayanımı
$\mathbf{f_{ck}}$	Beton Karakteristik Basınç Dayanımı
$\mathbf{f_{ctd}}$	Beton Tasarım Eksenel Çekme Dayanımı
$\mathbf{f_{ctk}}$	Beton Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı
$\mathbf{G}$	Kayma Modülü
$\mathbf{I}$	Atalet Momenti
$\mathbf{i}$	Mod Sayısı
$\mathbf{K_s}$	Shear Faktörü (Dikdörtgen Kesit İçin)
$\mathbf{L}$	Kiriş Uzunluğu
$\mathbf{n_{cfrp}}$	Tek Yüzdeki CFRP Sayısı
$\mathbf{s}$	Etriye Aralığı
$\mathbf{s_f}$	CFRP Şerit Aralığı
$\mathbf{t_{cfrp}}$	CFRP Etkili Kalınlığı
$\mathbf{v}$	Poisson Oranı
$\mathbf{V_c}$	Betonun Kesme Kuvvetine Katkısı
$\mathbf{V_{cfrp}}$	CFRP Şeritlerin Kesme Kuvvetine Katkısı
$\mathbf{V_r}$	Toplam Kesme Kuvveti
$\mathbf{V_s}$	Enine Donatının Kesme Kuvvetine Katkısı
$\mathbf{w_{cfrp}}$	CFRP Şerit Genişliği
$\boldsymbol{\alpha}$	Kiriş Derinliği Katsayısı
$\boldsymbol{\gamma_{mc}}$	Beton İçin Malzeme Katsayısı
$\boldsymbol{\varepsilon_{cfrp}}$	CFRP Birim Uzaması
$\boldsymbol{\theta}$	Kiriş Ekseni İle CFRP Şerit Yapıştırılma Açısı
$\boldsymbol{\rho}$	Malzeme Özgül Ağırlığı
$\boldsymbol{\omega_i}$	i'nci Mod İçin Açısal Frekans (rad/s)
$\boldsymbol{\omega_i^{BE}}$	Bernoulli-Euler Açısal Frekans Değeri

1. GİRİŞ

Betonarme yapıyı oluşturan elemanlar eğilmeye ek olarak kesme kuvveti de taşımaktadırlar. Bu yüzden genellikle betonarme kirişlerde göçme eğilme ve kesme olmak üzere iki farklı modda gerçekleşmektedir. Söz konusu kesmeden kaynaklanan göçme mekanizması ani ve gevrek bir kırılma türüdür. Kırılma öncesi herhangi bir uyarı vermediğinden, eğilme kırılmasına göre daha az tahmin edilebilir ve daha tehlikelidir. Eğilme kırılması kesme kırılmasının aksine sünek bir kırılmadır ve göçme öncesi meydana gelen çatlaklar sayesinde uyarılar verir. Bu nedenlerden dolayı günümüzde kullanılan modern deprem yönetmeliklerinde hiçbir yapı elemanının boyutlandırılması kırılacak şekilde yapılmaz ancak öngörülemeyen nedenlerle meydana gelecek olursa kırılmanın haberli yani sünek olması istenir. Ancak, birçok betonarme yapıda kusurlu tasarım, kötü beton ve işçilik, kötü donatı düzenlemesi, bina kullanım amacının zaman içerisinde değiştirilmesi, çevresel faktörlerden kaynaklanarak donatıların korozyona uğraması vb. gibi nedenlerle kesme problemleriyle karşılaşılmaktadır.

Betonarme elemanlarda meydana gelen kesme kırılması asal çekme gerilmelerinden kaynaklanan bir kırılma türüdür. Çünkü betonun basınç ve kayma dayanımı çekme dayanımından daha yüksek olduğu için basit kayma durumunda bile kırılma asal çekme gerilmelerinden meydana gelmektedir. Söz konusu basit kayma durumunda, asal çekme ve basınç gerilmeleri kayma gerilmelerine eşit olacağı için kırılma betonun en düşük dayanımı olan çekmeden kaynaklanacaktır. Asal çekme gerilmeleri, kayma gerilmelerinin etkidiği yüzeye 45 derecelik açı yapan bir düzlem üzerinde etkiyeceğinden, kırılma asal çekme gerilmelerine ek yönde oluşan eğik çatlakla meydana gelecektir. Asal çekme gerilmelerinden oluşan bu tür çatlaklara “eğik çatlak” denir (Ersoy vd., 2010).

Günümüzde kullanılan modern yönetmeliklerin büyük çoğunluğunda kayma gerilmeleri ne kadar küçük olursa olsun, kirişlerin kesme etkisi altında ani ve gevrek kırılmasının önüne geçmek için kiriş uzunluğu boyunca belirli aralıklarla sargılama donatısı bulundurulması zorunlu kılınmıştır. Söz konusu enine donatılar kirişlerde eğilme çatlaklarını engelleyemezler fakat tekniğine uygun bir şekilde yerleştirilirlerse çatlakları kılcal düzeyde kalmasını sağlarlar. Öte yandan kullanılan enine donatılar sünekliğe katkı sağlayarak, kirişlerin gevrek kırılmasının önüne geçerler. Enine

donatılar etriye, pilye ve hasır donatı olacak şekilde üç tür olabilirler ve ayrı veya birlikte kullanılabilirler (Ersoy vd., 2010).

Güçlendirme ihtiyacı duyulan kirişlerde, yapı denetim eksikliği, kötü malzeme ve işçilik, yapıldığı dönemdeki yönetmeliklerin yetersizliği, nem, korozyon, sıcaklık, zemin tuzluluğu gibi nedenlerden dolayı kesme donatısı alanının azalması, yapının kullanım amacının değiştirilmesi gibi nedenler sıralanabilir. Kesme kapasitesi yetersiz kirişlerin güçlendirilmesi ile ilgili birçok metot öne sürülmüştür ve günümüzde de kullanılmaktadır. Kirişlerin güçlendirilmesinde, mantolama ve çelik levha uygulamalarının yanı sıra hafif ve uygulanabilirlik gibi avantajlarından dolayı karbon lifli polimerler (LP) kullanılmaya başlanılmıştır.

Bir yapı servis süresi boyunca istenmeyen birçok titreşime maruz kalmaktadır. Bu titreşimlerden dolayı yapısal elemanlara ek yüklemeler oluşmaktadır ve ek yüklemeler sonucunda yapısal elemanlarda hasarlar oluşabilmekte ve hatta toplu göçme gibi problemlerle karşılaşılmaktadır. Bu problemler bina dinamik karakteristiğinin belirlenmesini gerekli kılmaktadır.

Son zamanlarda, dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde modal analiz yöntemi mühendislik yapılarının hesaplanmasında, geliştirilmesinde ve optimize edilmesinde oldukça yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. İlk başlarda mekanik ve havacılık mühendisliği alanlarında yaygın olarak kullanılsa da, günümüzde inşaat mühendisliği, ulaştırma, uzay yapıları gibi farklı alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır. Teknolojinin gelişmesi ve mühendislik bakış açılarının farklılaşmasıyla, performans ve ekonomik kriterlerden dolayı modal analiz yöntemine olan ihtiyaç giderek artmıştır. Var olan bir yapının kontrolünde veya güçlendirme çalışmalarında modal parametrelerin belirlenmesinin önemi ortaya çıkmıştır.

Frekans birim zamandaki salınım sayısıdır. Doğal frekans ise her sistemin kendine ait bir değeri vardır ve belirli dış kuvvetlere maruz kaldıklarında yapının titreşme eğiliminde oldukları frekanslardır. Söz konusu doğal frekansların betonarme kirişler için belirlenmesi eğilme etkisinde değerlendirilmesiyle ortaya koyulabilir. Çünkü kirişler genelde boylarına dik doğrultuda ve tek bir yönde yüklenirler. Böyle yapı elemanlarında önemli iç gerilmeler ve şekildeğişimi bileşenleri, eğilme momenti ve kesme kuvveti nedeniyle oluşur. Her ne kadar kesme kuvvetinin etkisi, açıklığın

enkesit yüksekliğine oranının düşük olduğu derin kirişlerde hissedilse de, kiriş açıklığı büyüdükçe eğilme momentinin yol açtığı etkiler daha belirgin olmaktadır ve kesme kuvvetinin etkisi önemini yitirmektedir. Dolayısıyla, büyük açıklıklı kirişlerin frekans hesaplarında eğilme etkisini dikkate almak yeterli olacaktır. Eğilme etkisi altında kirişlerin frekans değerlerinin hesaplanmasında mesnet şartları, malzeme özellikleri ve kesit özelliklerine bağlıdır (Yerlici ve Luş, 2014; Chopra 2007).

1.1 Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada, kesme donatısı yetersiz betonarme kirişlerin karbon lifli polimer (LP) şeritler ile kirişlerin dış yüzeyinden yapıştırılarak güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma yükleme ve dinamik ölçüm olarak iki aşamada yapılmıştır.

Bu çalışmada, 1 adet kesme donatılı ve 5 adet kesme donatısı yetersiz toplam 6 adet betonarme kirişler basit mesnetli olarak test edilmişlerdir. Tüm deney elemanları ½ ölçekli ve aynı geometriye sahip olacak şekilde üretilmiştir. Kesme donatısı yetersiz tüm deney elemanlarında sargılama donatısı oranı ρ_w=0,00054'dir. Deneyde, kesme donatısı yetersiz olan ve kesme donatısı yeterli birer kiriş kontrol elemanı olarak belirlenmiş ve kullanılmıştır. Diğer 4 eleman ise dış yüzeyinden 50 mm genişlikteki LP şeritlerle güçlendirilmiştir. LP şeritler arası açıklık 50 mm, 100 mm, 150 mm ve 200 mm seçilmiştir. Söz konusu kirişler LP ile güçlendirmeden önce ve sonra dinamik ölçümleri yapılmış, daha sonra 120 kN yük seviyesinde her bir kirişe hasar verilip dinamik ölçümleri yapılmış ve kirişler göçmeye kadar test edilip tekrardan dinamik ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen test sonuçları kontrol elemanlarıyla karşılaştırılmış, LP uygulamasının kirişlerin göçme mekanizması üzerindeki etkileri ve dinamik ölçümlerle elde edilen frekans değişimleri değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Yapılan çalışmayla alakalı literatür özeti lifli polimerler ile güçlendirme yöntemleri ve güçlendirilmiş kirişler üzerinde yapılan dinamik ölçümler olacak şekilde iki ana başlıkta incelenmiştir.

2.1 Lifli Polimerler İle Güçlendirme Çalışmaları

Norris vd., (1997) laboratuvar koşullarında, kesme ve eğilme davranışı gösterecek şekilde üretilmiş 19 adet betonarme kiriş CFRP tabakalarla güçlendirilmiş ve her bir kirişin davranışı deneysel ve analitik yöntemlerle incelenmiştir. Yapılan çalışmada, CFRP uygulamasının etkisini incelemek için taşıma kapasitesi ve rijitlik değişimi gibi değişkenler ele alınmıştır. CFRP uygulama aşamasında üç farklı yapıştırma sistemi kullanılmış ve kirişlerin çekme bölgesine uygulanmıştır. Bunlar; kiriş boyunca tek parça tabaka halinde, tek doğrultulu levha halinde ve çapraz kat olacak şekildedir. Analitik çalışmada, ACI 1995 yönetmeliğine uygun olarak hesaplamalar yapılmış ve kontrol elemanı ve güçlendirilmiş kiriş elemanı arasındaki yük-deplasman ilişkisi belirtilmiştir. Deneysel çalışmada ise, öncelikle kontrol elemanına göçme anına kadar yükleme uygulanmış, davranışı belirlenmiş ve diğer kiriş elemanların büyük bir kısmına hasar verilip güçlendirme uygulaması yapılmıştır. Deney sonucu olarak; çekme yüzeyine uygulanan CFRP levhaların kirişlerin taşıma kapasitesi ve rijitliğinde artış sağladığı, artış büyüklüğünün ve göçme mekanizmasının CFRP levhalarının yönüyle ilişkili olduğu, kirişlerdeki çatlaklara dik olarak uygulanan CFRP liflerinde daha yüksek taşıma kapasitesi ve rijitlik elde edildiği ancak kesme ve eğilme kirişlerin her ikisinde de gevrek davranış meydana geldiği, eğimli (oblique) olarak uygulandığında ise daha düşük taşıma kapasitesi ve rijitlik sağladığı ancak sünek davranış elde edildiği gözlemlenmiştir.

Chaallal vd., (1998) yaptıkları çalışmada, betonarme kirişlerin kesme kapasitesini artırmak için yan yüzeylere CFRP uygulamasının etkisini incelemişlerdir. Bunun için, laboratuvar koşullarında üretilmiş toplam sekiz adet kiriş değerlendirilmiştir. Bunlardan ikisi kontrol elemanı olacak şekilde kesme kapasitesi yeterli, ikisi kesme kapasitesi yetersiz ve geri kalan kesme kapasitesi yetersiz dört elemana CFRP uygulaması yapılmıştır. Deneylerinde değişken olarak kirişin boy eksenine dik ve çapraz CFRP uygulamalarını belirlemişlerdir. Yapılan çalışmada; tek biçimli epoksi

kalınlığı sağlanabildiği için LP şeritlerin, levhalar halinde kullanımına göre daha avantajlı olduğu, yan yüzeylere uygulanan CFRP liflerinin kesme çatlaklarını azaltırken, kesme kapasitesini ve rijitliği artırdığı, kirişlerin yan yüzeylerine çapraz lifler halinde uygulamanın kesme kapasitesinde ve rijitlikte daha etkili olduğu sonuçlarını elde etmişlerdir.

Kachlakev ve McCurry, (2000) yaptıkları deneysel çalışmada, birisi kontrol elemanı toplam 4 adet tam ölçekli betonarme kirişe CFRP ve GFRP ile güçlendirme uygulamasının etkisini incelemişlerdir. Deney elemanları; kesme, eğilme ve kesme-eğilme davranışlarını gösterecek şekilde donatılandırılmış ve her bir kiriş aynı geometriye sahip olacak şekilde üretilmiştir. CFRP uygulaması eğilme kapasitesini artırmak, GFRP uygulaması ise kesme kapasitesini artırmak için kullanılmıştır. Deneysel çalışma aşamasında, kirişlerin kesme açıklıklarından ve eğilme bölgesinden strain ölçümleri alınmıştır. Eğilme davranışı gösteren kirişte, CFRP uygulaması kirişlerin alt yüzeylerine eğilme kapasitesi artıracak şekilde, kesme ve kesme-eğilme bileşik davranışı sergileyecek kirişlerde ise GFRP uygulaması kirişlerin yan yüzeylerine kesme bölgesine uygulanmıştır. Kiriş davranışlarını incelemek için, kirişler basit mesnetli olarak dört noktalı eğilme testine tabii tutulmuştur. Yapılan çalışmada; LP ile güçlendirme uygulamalarının, göçme davranışına, kullanılan malzemenin özelliklerine ve geometriye bağlı olarak kirişlerin kapasitesini %150 oranında artırdığı, CFRP uygulamasında deformasyonların ve çatlakların azalırken kiriş rijitliğinin arttığı, GFRP uygulamasının etriye eksikliğini karşılamada yeterli seviyede olduğu gibi sonuçlar elde edilmiştir.

Khalifa ve Nanni, (2000) T kesitli betonarme kirişlerin kesme kapasitesini artırmak için CFRP uygulaması ile güçlendirmenin etkisini incelemişlerdir. Bunun için birisi kontrol elemanı olacak şekilde toplam 6 adet kiriş üretilmiş ve çalışmada değişken olarak CFRP miktarı ve yapıştırma şematiği, uygulama şekli ve CFRP ankrajı dikkate alınmıştır. Kesme kirişlerinin üretilmesi aşamasında, kirişler kesme kapasitesi yetersiz olacak şekilde, kesme bölgelerine etriye donatıları kullanılmadan sadece boyuna donatılar kullanılarak donatılandırılması yapılmış ve tüm kirişler aynı geometriye sahip olacak şekilde üretilmiştir. Test aşamasında tüm kirişler basit mesnetli ve kesme açıklığı-etkili derinlik oranı 3 olarak dört noktadan eğilme testine tabii tutulmuştur. Yapılan çalışmada; eğer yeterli ankrajlama sağlandıysa CFRP performansının arttığı,

sadece yan yüzeylere uygulanan CFRP, U şeklinde uygulamaya göre daha az kesme katkısı sağladığı, farklı oranlardaki CFRP miktarının benzer etkiler gösterdiği sonuçları elde edilmiştir.

Lorenzis ve Nanni, (2001) çalışmalarında, near-surface mounted (NSM) tekniğiyle uygulanan CFRP çubuklarının kirişlerin kesme kapasitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, toplam sekiz adet, tam ölçekli ve T kesitli betonarme kirişler üretilmiş ve iki tanesi kontrol elemanı geri kalan altısı ise güçlendirilecek eleman olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada değişken parametre olarak; CFRP çubuklar arası mesafeler, güçlendirme biçimleri, çubuk uçlarının ankrajlanması ve kirişlerde kullanılan kesme donatılarının varlığı dikkate alınmıştır. Test prosedüründe ise, kesme açıklığı-etkili derinlik olanı 3 olacak şekilde basit mesnetli olarak mesnetlenmiş kirişlere dört noktalı eğilme testi uygulanmış, kirişlerin orta noktasındaki net deplasmanı belirlemek için kirişlerin orta noktasında ve mesnet üzerinde deplasman ölçerler (LVDT) ve CFRP çubuklar üzerindeki gerilmeleri ve birim şekil değiştirmeleri belirlemek için strain gauge kullanılmıştır. Bunun yanı sıra yükleme tipi olarak çevrimli yükleme yapılmıştır. Çalışmada, NSM tekniğiyle yapılan CFRP çubuk güçlendirmesinin kesme kapasitesini artırmada etkili bir yöntem olduğu, ACI standartlarına göre yetersiz miktarda olan etriye donatılı kirişlerin, hiç olmayan kirişlere göre %35 daha yüksek kesme kapasitesine sahip olduğu ve buna ek olarak etriye donatılı olarak güçlendirmenin daha etkili olacağı, CFRP çubuklarının sıyrılması engellemek için daha büyük aderans boyu olması gerektiği gibi sonuçlar elde edilmiştir.

Khalifa ve Nanni, (2002) yaptıkları çalışmalarında, kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin CFRP levhalarla güçlendirilmesini incelemişlerdir. Bu amaçla, laboratuvar koşullarında toplam 12 adet dikdörtgen kesitli kirişler üretmişlerdir. Deneyde kesme donatısı, kesme açıklığı-etkili derinlik oranı (a/d) ve CFRP levhalarının oranı ve dağılımı değişken olarak dikkate alınmıştır. Kirişler etriye donatısız ve etriye donatılı olacak şekilde iki ana grupta ve bu iki ana grup değişkeni a/d oranı olacak şekilde ikiye ayrılmıştır. Dikkate alınan a/d oranları ise 3 ve 4 olarak belirlenmiştir. Bunlara ek olarak, CFRP uygulama şematiği tek levha halinde, kiriş yatay eksenin dik olarak devamlı levha halinde ve kiriş yatay eksenine dik ve paralel olacak levhalar halinde belirlenmiştir. Test aşamasında, kirişler basit mesnetli olacak

şekilde dört noktalı eğilme testi uygulanmış ve yüklemesi çevrimli yükleme olacak şekilde üç yükleme aşamasında yapılmıştır. Kirişlerin orta noktasındaki net deplasmanları elde edebilmek için deplasman ölçerler yardımıyla kirişlerin orta noktasına ve mesnet noktalarına yerleştirilerek ölçümler yapılmıştır. Bunların yanı sıra, etriyeler üzerindeki birim şekil değiştirmeleri (strain) belirlemek için strain ölçümleri yapılmıştır. Çalışmada, dış yüzeylere uygulanan CFRP levhaların kesme kapasitesine katkısının a/d oranından etkilendiği, CFRP miktarında artışın ciddi oranda bir katkı sağlamadığı, kesme donatılı kirişlerde CFRP'nin kesme kapasitesini daha çok artırdığı, analitik sonuçlarla deneysel sonuçların tutarlı olduğu sonuçları elde edilmiştir.

Adhikary ve Mutsuyoshi, (2004) yaptıkları çalışmada, kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin CFRP levhalarla güçlendirilmesini incelemişlerdir. Bu amaçla, birisi kontrol elemanı olacak şekilde toplam 8 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş üretilmiştir. Tüm kirişlerin kesme kapasitesi elverişsiz olması için kiriş uzunluğunca kesme donatısı kullanılmamış sadece boyuna donatılar kullanılmıştır. Deneyde basınç dayanımı 34 MPa ve çekme dayanımı 9,8 MPa olan beton kullanılmıştır. Test aşamasında kontrol elemanı hariç tüm elemanlara CFRP uygulaması yapılmış ve tüm elemanlara basit mesnetli olarak dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Kirişlerin orta noktasındaki net deplasmanı ölçmek için deplasman ölçerler kullanılmıştır. Bunun yanı sıra çekme donatılarındaki birim şekil değiştirmeleri ve gerilmeleri belirlemek için strain ölçümleri yapılmıştır. Deney sonucunda, göçme yükü ve davranışı, yük-deplasman ilişkisi, yük-birim şekil değiştirme ilişkisi ve daha önce yapılan çalışmaların sonuçları karşılaştırılmalı olarak irdelenmiştir. CFRP uygulamasının kesme kapasitesini ve eğilme rijitliğini artırdığı, maksimum kesme dayanımının U tek parça halinde uygulamada elde edildiği, yapılan çalışmanın daha önce yapılan çalışmanın sonuçlarıyla benzer veriler elde edildiği sonuçlarına ulaşılmıştır.

Zhang ve Hsu, (2005) kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin dış yüzeylerine CFRP levhalarla güçlendirilmesi üzerine çalışmışlardır. Bu amaçla, laboratuvar koşullarında toplam 11 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Kesme kapasitesi yetersiz kirişler elde edebilmek için kirişlerde kesme donatısı kullanılmamıştır. Yapılan çalışma, kesme kapasitesi yetersiz kirişlerin CFRP levhalar ile güçlendirilmesi sonrasındaki kesme ve göçme davranışını incelemek, kesme güçlendirilmesi ile ilgili

veri tabanını geliştirmek ve deneysel ve analitik verilere dayanarak dizayn yaklaşımı önermek hedefleriyle yapılmıştır. Değişken parametre olarak kiriş eksenine göre farklı yönlerdeki CFRP levhaların uygulanması dikkate alınmıştır. Test aşamasında, tüm kirişler basit mesnetli olarak göçme anına kadar yüklenmiş ve moment-eğrilik ilişkisini ortaya koymak için kirişlerin orta noktasından strain ölçümleri alınmıştır. Bunun yanı sıra, net deplasmanı belirlemek amacıyla deplasman ölçerler kirişlerin mesnet bölgelerine ve orta noktasına konumlandırılmıştır. CFRP levhalar ile güçlendirmenin etkisini ortaya koymak için dayanım, süneklik ve göçme mekanizması gibi alt başlıklarda incelenmiştir. CFRP ile güçlendirme tekniğinin kirişlerde hizmet kabiliyetini, sünekliği ve kesme kapasitesini artırdığı, 45 ve 135 derece eğimli olarak uygulanan levhaların kesme kapasitesini artırmada ve çatlak oluşumunun önüne geçmede daha iyi performans verdiği sonuçlarına ulaşılmıştır.

Barros ve Dias, (2006) yaptıkları çalışmada, yan yüzeylere uygulanan CFRP levhaların kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin güçlendirilmesi üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Bunun için kirişler 4 ana grupta ve her grupta beş kiriş olacak şekilde incelenmiştir. Bunlar; kesme donatısız, kesme donatılı, near-surface mounted (NSM) ve externally-bonded reinforcement (EBR) teknikleri kullanılarak CFRP levhalarla güçlendirilen kirişlerdir. Çalışmada, CFRP levhalarının eğiminin, kiriş derinliğinin ve boyuna donatı oranının etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, deneysel test programı aşamasında, her bir kiriş basit mesnetli olarak dört noktalı eğilme testine tabii tutulmuştur. Kiriş orta noktasındaki net deplasmanı belirlemek için kirişlerin mesnet bölgelerine ve orta noktasına deplasman ölçer konumlandırılmıştır. Deneysel test prosedürünün yanı sıra analitik çalışma da yapılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen EBR tekniği ile CFRP uygulamasının performansı ACI ve fib yönetmelikleri ile karşılaştırılmıştır. NSM tekniği ise söz konusu yönetmeliklerde bulunmadığı için karşılaştırılması yapılamamış ancak bu konuda daha önce yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. CFRP ile güçlendirilen kirişlerin taşıma kapasitesinin önemli oranda arttığı, NSM tekniğinin, yük taşıma kapasitesinde ve deformasyon kapasitesinde en etkili yöntem olduğu, NSM tekniği ile güçlendirmede elde edilen göçme davranışı EBR tekniğine göre daha sünek olduğu, NSM tekniğinin uygulaması EBR tekniğine göre daha kolay olduğu, NSM ile güçlendirilen kirişlerin kesme donatılı kirişlere göre %9 daha fazla deplasman yaptığı, EBR tekniğinden elde edilen sonuçlar, ACI ve fib eşitlikleri ile elde edilen sonuçlara göre, %2 ile %8 daha yüksek

olduğu sonuçları elde edilmiştir.

Anil (2006) CFRP levhalar kullanılarak kesme kapasitesi yetersiz T kesitli kirişlerin güçlendirilmesini incelemiştir. Bu amaçla toplam altı adet betonarme kiriş laboratuvar şartlarında üretilmiş ve kirişler tersinir tekrarlanır yükler alında test edilmiştir. Çalışmada değişken parametreler olarak kesme açıklığı boyunca uygulanan CFRP levhaların dizilimi ve levha uçlarına uygulanan ankraj tekniği dikkate alınmıştır. Deneysel test aşamasında, her bir kiriş aynı geometriye sahip ve aynı boyuna donatı dizilimi olacak şekilde, ankastre mesnetli ve kesme açıklığı-etkili derinlik oranı 5 olarak tersinir tekrarlı yük altında test edilmiştir. Yapılan çalışmada sonuçlar göçme mekanizması ve yük-deplasman ilişkisi başlıkları altında incelenmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar ACI-440 prosedürü doğrultusunda kıyaslanmıştır. CFRP levhalarla güçlendirmenin taşıma kapasitesini artırdığı, uygulanan ankajların tersinir yük altında iyi derecede performans sergilediği, CFRP levhaların soyulmasının önüne geçtiği ve ACI-440 prosedürüne göre deneysel sonuçlarda, kesme kapasitesi yönünden, %20 daha fazla olduğu sonuçları elde edilmiştir.

Mertoğlu (2009) yüksek lisans tez çalışmasında, kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin CFRP şeritler ile güçlendirilmesi üzerine çalışmıştır. Bu amaçla, kesme kapasitesi yetersiz kirişlerden birisi kontrol elemanı ve altı tanesi güçlendirilecek deney elemanı olarak belirlenmiştir. Çalışmada değişken parametreler olarak şeritler arası mesafe ve fan ankraj uygulaması dikkate alınmıştır. Test aşamasında, tüm kirişlere basit mesnetli ve kesme açıklığı-etkili derinlik oranı 5 olarak dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Çalışmada, CFRP şeritler ile güçlendirilen kirişlerin rijitliğinin ve kesme kapasitesinin arttığı, fan ankraj uygulaması sonucunda sünek eğilme davranışı gösterdiği sonuçları elde edilmiştir.

Toptaş (2009) yüksek lisans tez çalışmasında, hasar görmüş sargılama donatısı yetersiz betonarme kirişlerin CFRP şeritler ile güçlendirilmesi üzerine çalışmıştır. Bu amaçla, bir kontrol elemanı ve altı adet güçlendirilecek deney elemanı olmak üzere toplam yedi adet deney elemanı laboratuvar şartlarında üretilmiştir. Çalışmada değişken parametreler olarak şeritler arası mesafe ve ankraj uygulaması dikkate alınmıştı. Test aşamasında, deney elemanları basit mesnetli olarak dört noktalı eğilme testine tabii tutulmuştur. Çalışma, kirişlere hasar verme ve hasar sonrası güçlendirme şeklinde iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada, CFRP şeritler ile güçlendirmenin

kirişlerin kesme kapasitesini ve rijitliğini artırdığına, ankarjsız uygulamalarda sünek eğilme davranışı elde edilemezken, ankraj uygulamalarında sünek eğilme davranışı elde edildiği sonuçları elde edilmiştir.

Rizzo ve Lorenzis, (2009) near-surface mounted (NSM) tekniği kullanılarak FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışlarını ve kapasite değişimlerini incelemişlerdir. Bu amaçla, toplam dokuz adet betonarme kiriş laboratuvar koşullarında üretilmiştir. Kirişlerde kesme kırılması meydana gelecek şekilde eğilme ve kesme donatıları kullanılmıştır. Çalışmanın yapılmasında, bu konuyla alakalı bilgi eksikliklerini gidermek amaçlanmıştır. Bu yüzden, yapılan güçlendirme yönteminin yapısal davranışı ve göçme mekanizması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneyde farklı FRP tipleri (yuvarlak çubuk ve levha), FRP malzemeler arası mesafe ve FRP malzemelerin kiriş eksenine göre eğimi gibi parametreler dikkate alınmıştır. Test programında, kirişler basit mesnetli olarak 4 noktalı eğilme testine tabii tutulmuştur. Kirişlerin içerisinde bulunan kesme donatıları üzerindeki ve FRP malzemeler üzerindeki birim şekil değiştirmeleri ifade etmek için strain gauge kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, orta nokta deplasmanları belirlemek için de kirişlerin mesnet bölgelerine ve orta noktalarına deplasman ölçer yerleştirilmiştir. NSM tekniğiyle FRP uygulamasının betonarme kirişlerin kesme kapasitesini artırmada önemli bir katkı sağladığı, NSM tekniği U şeklinde uygulamaya göre taşıma kapasitesi bakımından daha yararlı sonuç verdiği, levhalar arası mesafenin azalması ve FRP çubuklarının eğiminin artmasının kesme kapasitesi artırmada yararlı olmadığı sonuçları elde edilmiştir.

Lee vd., (2011) yaptıkları çalışmayı, T kesitli betonarme kirişlerin CFRP levhalar kullanılarak güçlendirilmesinin kirişlerin davranış ve performansındaki etkilerini incelemek amacıyla yapmışlardır. Bunun için, laboratuvar koşullarında toplam 14 adet T kesitli betonarme kiriş üretilmiştir. Deneyde değişken parametre olarak, kesme açıklığı boyunca uygulanacak CFRP levhalarının boyu (çeyrek, yarım ve tam boy), CFRP levhaların kiriş eksenine göre yaptığı açıya göre (0°/0°,90°/90°,90°/0° ve 45°/135°) ve U şeklinde yapıştırılan CFRP levha uçlarında ankraj kullanımı dikkate alınmıştır. Kirişlerden birisi kontrol elemanı olarak CFRP uygulaması yapılmadan geri kalan 13 adet ise CFRP uygulaması yapılıp, kesme açıklığı-etkili derinlik oranı 1,22 olarak 4 noktalı eğilme deneyine tabii tutulmuştur. Kirişlerin orta noktasında net

deplasmanı belirlemek için deplasman ölçerden 4 tanesi mesnet bölgelerine ve 2 tanesi kiriş orta noktasına konumlandırılmıştır. Yapılan çalışmada, kirişlerin hemen hemen hepsinde CFRP levhaların ayrılmasından dolayı kesme-eğilme göçme mekanizması oluştuğu, CFRP levhaların güçlendirme boylarının kesme kapasitesini artırmada önemli bir etkisi olduğu, CFRP levha yönlerinin kirişlerin kesme kapasitesi ve süneklik davranışında etkili olduğu, yapılan ankraj çalışmasının başlangıç rijitliği, süneklik oranı ve kesme kapasitesini önemli oranda artırdığı gibi sonuçlar elde edilmiştir.

2.2 Dinamik Ölçümler ile Yapılan Çalışmalar

Capozucca ve Cerri, (2002) yapmış oldukları deneysel çalışmada, hasar sonrası CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin statik ve dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Bu kapsamda, statik ve dinamik değişimleri gözlemleyebilmek için kontrol kirişi ve CFRP ile güçlendirilmiş kirişler kullanmışlardır. Güçlendirme işleminde değişken olarak tek katlı ve çift katlı olacak şekilde CFRP uygulaması yapmışlardır. Statik test aşamasında, kirişler basit mesnetli olacak şekilde mesnetlenip, 4 farklı yükleme aşamasında eğilme testi uygulanmıştır. Statik test sonucunda; CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerde taşıma kapasitesinin artarken maksimum deplasmanın azaldığı, çift katlı yapılan uygulamada daha düşük süneklik değerine sahip olduğu ancak tek katlı CFRP uygulamasında daha iyi bir süneklik değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Dinamik test aşamasında ise; farklı yüklemeler sonucunda, kiriş elemanların doğal frekanslarının değişimlerini gözlemlemişlerdir. Verilen hasarlar sonucunda, kirişlerin hasarsız durumdaki doğal frekanslarında %40'a varan azalmalar, CFRP uygulaması sonucunda ise doğal frekansların arttığı gözlemlenmiştir.

Bonfiglioli vd., (2004) yaptıkları çalışmalarında, hasarlı ve onarılmış betonarme kirişlerin frekans değişimlerini incelemişlerdir. Bu amaçla, statik ve dinamik analizler olarak iki ana grupta inceleme yapılmıştır ve her grupta 1 tane betonarme kiriş dikkate alınmıştır. Statik test aşamasında, kirişler basit mesnetli olarak tersinir yüklemeye maruz bırakılmış ve artan yükleme koşullarına göre farklı hasar durumları elde edilmiştir. Her iki grupta bulunan kirişler 4. yükleme sonucunda FRP uygulaması ise onarımı yapılmıştır. Dinamik test aşamasında ise statik test sonucunda elde edilen hasar durumlarına göre etki çekici ve ivmeölçer kullanılarak kirişlerin frekans değerleri ve sönüm oranları ölçülmüştür. Yapılan deneysel çalışmanın yanı sıra teorik

çalışma da yapılmış ve deneysel sonuçlarla elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Çalışmada, kirişlerde meydana gelen çatlaklardan ve FRP ile güçlendirmeden kaynaklanan rijitlik değişiminin frekans ve sönüm oranı değişimleriyle belirlenebildiği, dinamik aşamada uygulanan modal analizin hem güçlendirme de hem de rijitlik değişiminde yararlı bilgiler sağladığı, teorik sonuçların elde edilen deneysel sonuçlarla benzer ilişkiler gösterdiği, artan hasar düzeyi ile birlikte frekans değerlerinin azaldığı sonuçları elde edilmiştir.

Baghiee vd., (2009) yaptıkları çalışmalarında, 9 adet betonarme kirişin göçmeye kadar olan hasar durumlarında modal karakteristiklerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Söz konusu 9 kirişin 6'sında kirişlerin dış yüzeyine CFRP şeritler ile güçlendirme uygulaması yapılmışlardır. Bu bağlamda, statik ve dinamik testler uygulamışlardır. Dinamik test aşamasında, modal parametlerin tutarlılığını ve yapılan güçlendirme uygulamasının etkisini belirlemek için Modal Assurance Criterion (MAC), Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC) ve modal curvatures yöntemlerini kullanmışlar ve bu kriterlerin sonuçlarını karşılaştırılmalı olarak sunmuşlardır. Bu yöntemlerin yanı sıra, Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorilerinden yararlanarak hasarsız durumda modal parametrelerin güvenirliliği kıyaslanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, frekans değerlerinin hasar ve güçlendirme durumlarından etkilendiği, artan hasar koşullarında frekans değerlerinde azalma olduğu, COMAC yönteminin MAC yöntemine göre rijitlik değişimlerini daha iyi saptadığı gibi sonuçları elde etmişlerdir.

Capozucca (2009) çalışmasında, hasarlı ve CFRP çubuklarıyla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmada, hasar durumlarını artan yükleme durumlarıyla belirlemiş ve yüklemeleri akma bölgesinin altında kalacak şekilde yapmıştır. CFRP ile güçlendirme uygulaması kirişlerin alt bölgesine yani eğilme bölgesine yapıldıktan sonra aynı prosedür uygulanmış ve statik olarak kirişlerin davranışını incelemiştir. Bu bağlamda, 3 kiriş üzerinde çalışmış ve statik test aşamasında eğilme deneyini yapmıştır. Elde edilen sonuçlar Eurocode2 yönetmeliğinde bulunan teorik hesaplamalarla kıyaslamıştır. Dinamik test aşamasında ise, kirişler esnek yay yardımıyla asılarak, mesnetlenmesi serbest uç olacak şekilde yapılmış, hasarsız, hasarlı ve güçlendirilmiş aşamalardaki doğal frekans değişimlerini ve mod şekillerini incelemiştir. Yapılan çalışma soncunda, CFRP çubuk ile güçlendirilmiş kirişlerin taşıma kapasitesinin arttığı, deneysel

sonuçların teorik sonuçlarla tutarlı olduğu, artan hasar durumlarının frekans değerlerinde etkili olduğu sonuçlarını elde etmiştir.

Capozucca (2013) betonarme kirişler üzerinde yapmış olduğu deneysel çalışmada, artan yükleme sonucunda meydana gelen çatlakların kirişlerin dinamik davranışları üzerindeki etkisini incelemiştir. Çatlakları meydana getirmek için, kirişler basit mesnetli olacak şekilde mesnetlenmiş ve üç farklı yükleme aşamasında eğilme testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar teorik sonuçlarla kıyaslanmış ve sonuç bölümünde anlatılmıştır. Dinamik test aşamasında ise, çatlak seviyelerinin dinamik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için kirişler serbest uç olacak şekilde esnek yay yardımıyla mesnetlenmiş ve darbe çekici ve ivmeölçer kullanılarak dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Daha sonra deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar programı kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışma sonucunda; artan çatlak seviyelerinde frekans değerlerinde azalma meydana geldiği belirlenmiştir.

Capozucca (2013) çalışmasında, CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin dinamik değişimlerini gözlemlemeyi amaçlamıştır. Yapmış olduğu deneysel çalışmada, 6 adet kiriş hazırlamış ve bunlardan üçünde CFRP uygulaması çekme bölgesine, diğer üçünde ise CFRP çubukları kullanarak near surface method (NSM) uygulaması yapmıştır. Söz konusu uygulamayı, statik ve dinamik olarak değerlendirmiştir. Statik test aşamasında kirişler basit mesnetli olacak şekilde mesnetlenmiş ve 4 farklı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Dinamik aşamada ise, kirişler serbest uçlu olacak şekilde mesnetlenmiş, farklı hasar ve güçlendirilmiş durumlardaki doğal frekans değişimlerini değerlendirmiştir. NSM metodu kullanılarak yapılan güçlendirme işleminin frekans ölçümleri tarafından değerlendirilmediği, verilen hasar dereceleri durumunda doğal frekansların azaldığı, güçlendirme durumlarında arttığı ancak NSM yöntemiyle yapılan güçlendirme işleminin küçük frekans değişimlerini doğruladığı gibi sonuçları elde etmiştir.

Capozucca ve Bossoletti, (2015) çalışmalarında, farklı ölçekli betonarme kirişlerin serbest titreşim altında deneysel ve teorik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu yöntemlerin yanı sıra, kirişlerin sonlu elemanlar programı yardımıyla analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel ve teorik analizlerle karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Bu amaçla, ikisi kontrol elemanı diğer ikisi NSM metoduyla CFRP

çubuk uygulaması yapılarak güçlendirilmiş kirişler üretilmiş ve beş farklı yükleme durumuna göre statik ve dinamik analizlerini gerçekleştirilmiştir. Statik test aşamasında, kirişlere basit mesnetli olarak eğilme testi uygulanmış ve hedeflenen beş farklı hasar düzeyi elde edilmiştir. Dinamik çalışmada ise, etki çekici ve ivmeölçerler kullanılarak, söz konusu hasar durumlarına ve güçlendirme durumlarına göre kirişlerin dinamik ölçümleri sağlanmış ve sonuçlar sunulmuştur. CFRP çubuklar ile yapılan güçlendirmenin düşük deplasman-yüksek taşıma kapasitesi sağladığı, güçlendirilmiş kirişlerin artan hasar durumlarına göre frekans varyasyonlarının daha düşük oranda olduğu, deneysel frekans oranının güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş durumlarda sabit olduğu ve daha düşük ölçekli kirişlerde daha tutarlı sonuçlar olabileceği sonuçlarını elde etmişlerdir.

Capozucca ve Magagnini, (2016) dört farklı kiriş üzerinde yapmış oldukları çalışmalarında hasarsız ve hasarlı durumlardaki CFRP çubukların kirişlerin statik ve dinamik davranışları üzerindeki etkisini incelemişler ve sonlu elemanlar programı kullanarak elde edilen sonuçları kıyaslamışlardır. Deneylerinde parametreleri hasarsız, epoksi reçine hasarlı ve CFRP çubuk hasarlı olarak belirlemiştir. Kiriş elemanların hazırlanış sürecinde, kirişlerin alt yüzeylerinde 20 cm'lik boşluklar olacak şekilde beton dökümü gerçekleştirilmiş ve CFRP çubuk uygulamaları bu bölgelere yapılmıştır. Epoksi hasarlı durumu elde etmek için, kiriş alt bölgesine, 150 mm ve 250 mm aralıklı olacak şekilde 25 mm'lik bölgede epoksi uygulanmamıştır. CFRP çubuk hasarlı durumda ise; CFRP çubukların çapları azaltılmıştır. Statik test aşamasında, kirişler basit mesnetli olacak şekilde mesnetlenip farklı hasar durumları oluşacak şekilde dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Dinamik test aşamasında ise, her bir kiriş serbest uçlu olacak şekilde mesnetlenip, ivmeölçer ve etki çekici kullanarak doğal frekanslar elde edilmiştir. Güçlendirme yöntemlerinde kullanılan farklı hasar durumlarının, kirişlerin taşıma kapasitesinde belirgin bir farklılık oluşturmadığı, sonlu elemanlar programı kullanılarak elde edilen frekans değerlerinin deneysel sonuçlarla kıyaslanabileceği ve güçlendirme yapıldıktan sonra meydana gelen frekans değişimlerinde azalma olduğu gibi sonuçlar elde edilmiştir.

Capozucca vd., (2016) yapmış oldukları çalışmalarında, farklı mesnetleme durumlarında ve farklı hasar durumlarındaki Near Surface Method (NSM) CFRP çubuklarıyla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin doğal frekans değişimlerini

incelemişlerdir. Bu amaçla; statik test, dinamik test, teorik ve sonlu elemanlar analiz yöntemleri kullanmışlardır. Deneysel çalışma aşamasında, toplam 5 adet betonarme kiriş üretilmiş ve bunlardan 2'si farklı mesnet durumlarında olacak şekilde kontrol elemanı olarak ele alınmış ve diğer üç elemanda ise NSM CFRP çubuk ile güçlendirilmesi yapılmıştır. Statik test aşamasında kirişler farklı hasar durumları meydana getirilecek şekilde yüklenmiştir. Dinamik test aşamasında, kirişlerden ikisi serbest uçlu, diğer üçü ise mafsal uçlu olacak şekilde mesnetlenip ivmeölçer ve etki çekici kullanılarak doğal frekansları elde edilmiştir. Teorik aşamada, Euler-Bernoulli uniform beam yaklaşımı kullanılarak frekans hesaplamaları yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında, dinamik test, sonlu elemanlar ve teorik analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Uygulanan CFRP çubuk ile betonun arasındaki bağın göçmeye kadar devam ettiği, verilen hasarlardan kaynaklanan frekans düşüşlerinin dinamik analiz ile elde edilebildiği, frekans varyasyonlarının hasar düzeyiyle bağlantılı olduğu ve mesnet koşullarından etkilendiği gibi sonuçları elde etmişlerdir.

Capozucca ve Magagnini, (2018) yapmış oldukları deneysel çalışmada, hasarlı ve hasarsız durumlardaki basit mesnetli ve ölçekli kirişlerin serbest titreşim altındaki dinamik karakteristiklerini incelemişlerdir. Kirişlere hasarlar çentik şeklinde verilmiş ve daha sonra CFRP levha kullanılarak güçlendirilmesi yapılmıştır. Kiriş malzemesi olarak mermer kullanılmıştır. Malzeme olarak mermerin kullanılmasının tercihi; homojen-gevrek malzeme olması, FRP ile güçlendirme yönteminde mermer-FRP arası daha yüksek kapasitede bağ oluşması gibi nedenlerle açıklanabilir. Söz konusu kirişler, mafsal uçlu olarak mesnetlenmiş ve farklı hasar durumları elde edilecek şekilde yükleme işlemi yapılmıştır. Daha sonra her bir hasar durumu içim ayrı ayrı dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir mod şekline karşılık gelen doğal frekansları belirlemek için deneysel dinamik analiz yönteminin yanı sıra, sonlu elemanlar programı kullanılmış ve Euler-Bernoulli uniform beam yaklaşımı uygulanmıştır. Elde edilen bulgular karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Karşılaştırma sonucunda, sonlu elemanlar modeli ve teorik hesaplamaların yapılan deneysel yöntemle farklılıklar gösterdiğini belirlemişler ve bu farklılıkların yapılan mesnet modelinden kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Yapılan çalışmada, artan hasar durumlarında doğal frekans değerlerinin azaldığını dinamik test yoluyla belirlenebildiği, hasarlı ve güçlendirilmiş kirişlerin göçme mekanizmasında kirişlerin basınç bölgesindeki çentiklerin etkili olduğu gibi özel sonuçları elde etmişlerdir.

Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin LP şeritler ile güçlendirilmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır ve etraflıca incelenmiştir. Ancak, dinamik ölçümler ile ilgili yapılan çalışmalarda, kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin LP şeritler ile güçlendirilmesi ve farklı yükleme durumlarının kirişlerin doğal frekans üzerine etkisi incelenmemiştir. Bu amaçla, yapılan çalışmada, güçlendirme uygulamasının ve farklı yükleme durumlarının kirişlerin doğal frekans üzerine etkisi araştırılmıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Genel

Kesme kuvveti etkisindeki kiriş davranışını etkileyen en önemli değişkenlerden birisi de mesnetle yük arasındaki mesafenin yani kesme açıklığının kiriş faydalı yüksekliğine (a/d) oranıdır. Sargılama donatısı bulunmayan betonarme kirişlerin davranışlarının incelenmesinde a/d oranı önemli bir yer tutmaktadır. Bu amaçla, bu bölümde a/d oranının kirişlerin davranışları üzerindeki etkisi anlatılmıştır.

a/d oranının 7'den büyük olduğu durumlarda, kiriş eğilmedeki taşıma kapasitesine ulaşabilmektedir. Bu tür kirişlerde, kesme açıklığı büyük olduğundan dolayı daha büyük eğilme momenti oluşacağı için kırılma durumunda kesme kuvveti düşük düzeyde kalacak ve kırılmada kesme kuvvetinin etkisi olmayacaktır. Kirişler eğilme momenti etkisinde kırılacaktır.

a/d oranının 3 ile 7 arasında olduğu durumlarda, kirişler yük etkisi altındayken ilk önce eğilme çatlakları oluşacaktır ve artan yük seviyesiyle birlikte eğilme çatlakları tarafsız eksene doğru uzayacaktır. Bu esnada, meydana gelen çatlaklardan bir kaçı asal çekme gerilmelerine dik yönde eğikleşecektir. Bu aşamadan sonra çekme donatılarının birim uzamalarında ani bir artış meydana gelecek ve bu ani artıştan dolayı donatıya paralel aderans çatlakları oluşacaktır. Artan yük seviyesiyle birlikte oluşan çatlaklar ilerler ve kiriş ani bir şekilde kırılır. Bu tür kırılmalar gevrektir.

a/d oranı 1,5 ile 3 arasında olduğu durumlarda, kirişler üzerinde eğik çatlaklar oluşmasına rağmen eğik çekme kırılması meydana gelmez ve kirişler yük taşımaya devam ederler. Kirişe etkiyen yük asal basınç gerilmeleri yönünde mesnete aktarılır ve yük ile mesnet arasında basınç çubuğu oluşur. Bu durum meydana geldiğinde kirişlerde gergili kemer davranışı meydana gelir. Artan yük seviyesiyle birlikte, yükleme noktası altındaki beton basınç dayanımına ulaşır ve ezilmeye başlar. Bu seviyeden sonra kirişler yük taşıyamaz ve kırılma meydana gelir. Bu tür kırılmalara kayma-ezilme kırılması olarak adlandırılır.

a/d oranının 1'den küçük olduğu durumlarda ise kiriş gergili kemer davranışı gösterir. Bu durumda, çekme donatısı bir gergi gibi davranırken beton ise kemer gövdesi gibi davranır. Kiriş üzerindeki yükün mesnete aktarılması basınç çubuğu ile sağlanır ve

eğilme önemsiz hale gelir. Donatıda üzerinde oluşan gerilme sabit kaldığı için eğilme ve aderans davranışı oluşmayacaktır. Kirişte kırılma meydana gelmeden donatı akacaktır ve kiriş eğilme kapasitesine ulaşacaktır. Bu tür kirişlerin kırılması, gövdenin basınç gerilmelerinden dolayı ezilmesi veya donatı üzerinde oluşan yüksek gerilmelerden dolayı kenetlenmenin kaybolmasıyla meydana gelecektir (Ersoy vd., 2010).

Günümüzde kullanılan yönetmeliklerin büyük bir çoğunluğunda elemanların kesmeden dolayı gevrek kırılmasının önüne geçmek amacıyla enine donatıların bulundurulması zorunlu kılınmıştır. Ancak, yapı denetim eksikliği, kötü malzeme ve işçilik, yapıldığı dönemdeki yönetmeliklerin yetersizliği, nem, korozyon, sıcaklık, zemin tuzluluğu gibi nedenlerden dolayı kesme donatısı alanının azalması, yapının kullanım amacının değiştirilmesi gibi olumsuz nedenlerden dolayı betonarme kirişlerde güçlendirme ihtiyacı duyulmuştur. Kesme donatısı yetersiz betonarme kirişlerin güçlendirilmesi LP şeritlerin uygulanması ile sağlanmıştır. Yapılan çalışmada, üretilen kirişlerde kesme hasarı meydana gelecek şekilde deney düzeneği hazırlanmıştır. Bu bölümde, deney elemanlarının tasarım detayı ve hazırlanışı, kullanılan malzemeler, güçlendirme tekniği ve deney düzeneği anlatılmıştır.

3.2 Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Deney elemanlarının üretiminde ve güçlendirme uygulamasında kullanılan malzemelerin özellikleri bu bölümde anlatılmıştır. CFRP şeritlerin özellikleri ve şeritlerin kiriş yüzeylerine yapıştırılmasında kullanılan epoksi malzemesinin özellikleri ürün kataloğundaki gibi dikkate alınmıştır.

3.2.1 Beton

Tüm deney elemanlarında aynı beton basınç dayanımının 20 MPa olması hedeflenerek, Çizelge 3.1’de verilen karışım oranları dikkate alınarak beton karışımı elde edilmiştir.

Çizelge 3.1. 1 m^3 beton için kullanılan malzeme oranları.

MALZEME	AĞIRLIK (kg)	AĞIRLIKÇA ORAN (%)
KUM (0-5 mm)	690	28,75
ÇAKIL (5-12 mm)	975	40,62
PORTLAND ÇİMENTO	505	21,04
SU	230	9,6
TOPLAM	2400	100

Kiriş elemanların beton dökümü esnasında, betonun karakteristik basınç dayanımını belirlemek amacıyla toplam 5 adet küp numune alınmıştır. Daha sonra alınan numuneler teste tabi tutularak, elde edilen sonuçlar ortalama olarak Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Deney elemanlarının ortalama beton basınç dayanımları (28 gün).

Deney Eleman No	Karakteristik Basınç Dayanımı (MPa)
1	26,2
2	26,4
3	24,8
4	25,1
5	24,5
6	25,3

3.2.2 Donatı

Deney elemanlarında kullanılan donatıların çekme deneyi sonucu elde edilen değerleri Çizelgede 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Donatı özellikleri.

Donatı Çapı (mm)	Donatı Sınıfı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
4	S220	255	381
8	S420	487	592
10	S420	501	615
12	S420	453	555

3.2.3 Sikawrap 230-C/45

Sikawrap 230-C/45 kuru uygulama yöntemiyle uygulama için tek doğrultulu karbon lifli dokumadır. LP uygulaması 1980'lerin ortasında kullanılmaya başlanmış ve son 20 yıl içerisinde yaygın olarak çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Örnek olarak, yığma duvarların sismik performanslarının arttırılması, eksik donatıların

takviyesi, yük taşıma kapasitesinin arttırılması, tasarım veya imalat kusurların giderilmesi, mevcut standartlara uyum için yapısal güçlendirme uygulamaları gibi alanlar sıralanabilir. LP uygulaması, tüm güçlendirme ihtiyaçlarını karşılayabilmek için çok amaçlı kullanım imkanı sağlaması, düşük yoğunluğa sahip olmasından dolayı yapıya ilave yükler vermemesi, yüzey geometrisinden bağımsız uygulama imkanı sağlaması ve ekonomik oluşu gibi avantajlardan dolayı tercih edilmektedir. Yapılan çalışmada kullanılan LP özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. LP şeritlerin malzeme özellikleri.

Dokuma Yapısı	Tek doğrultulu
Birim Ağırlık	230 g/m^2
Dokuma Kalınlığı	0,131 mm
Lif Yoğunluğu	1,76 g/cm^3
Çekme Dayanımı	4300 MPa
Elastisite Modülü	234000 MPa
Kopma Uzaması	%1,8 nominal

3.2.4 Sikadur 330 epoksi

Sikadur 330 epoksi, Sikawrap 330 LP malzemesinin kiriş yüzeylerinde uygulamasında kullanılan iki bileşenli epoksi esaslı yapıştırıcılardır. Sikadur 330 Epoksi malzeme; kullanım kolaylığı, birçok yüzeyde iyi aderans sağlaması, yüksek mekanik özelliklere sahip olması gibi avantajlar sağlamaktadır. Epoksi malzemenin karışımı hazırlanması aşamasında (Beyaz Macun : Gri Macun) 4:1 oranı kullanılmıştır. Epoksi malzemenin özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

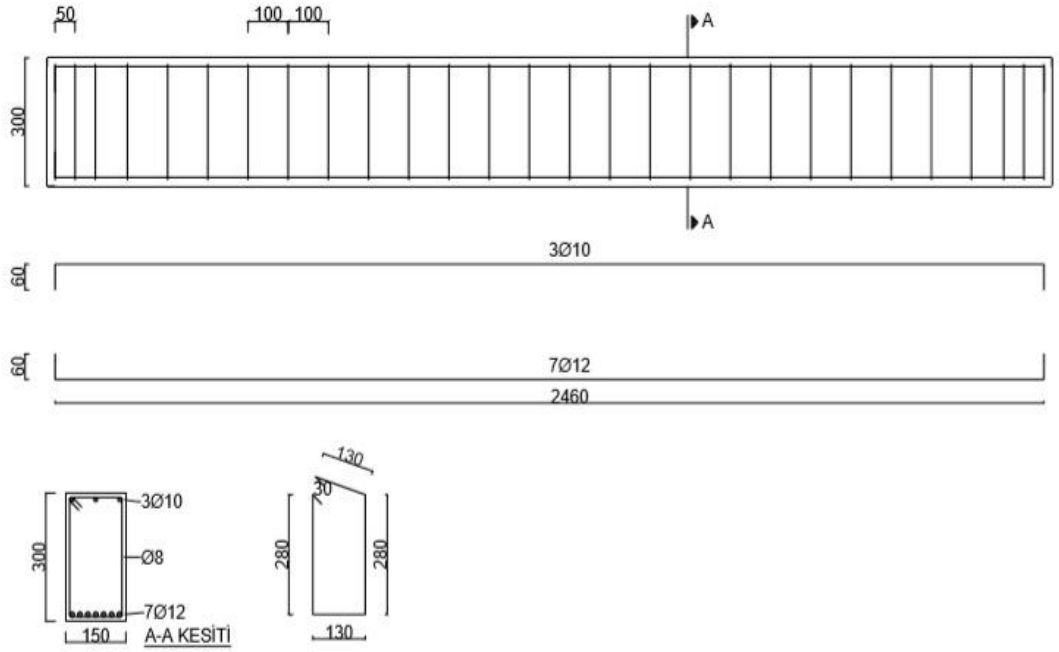
Çizelge 3.5. Epoksi yapıştırıcının malzeme özellikleri.

Yoğunluk	1,3 kg/l (Beyaz Macun + Gri Macun)
Eğilmede E. Modülü	3800 MPa
Çekme Dayanımı	30 MPa
Kopmada Uzama	0,9 %
Uygulama Sıcaklığı	+10 °C min. / +35 °C max.
Karışım Oranı	Beyaz Macun : Gri Macun = 4:1

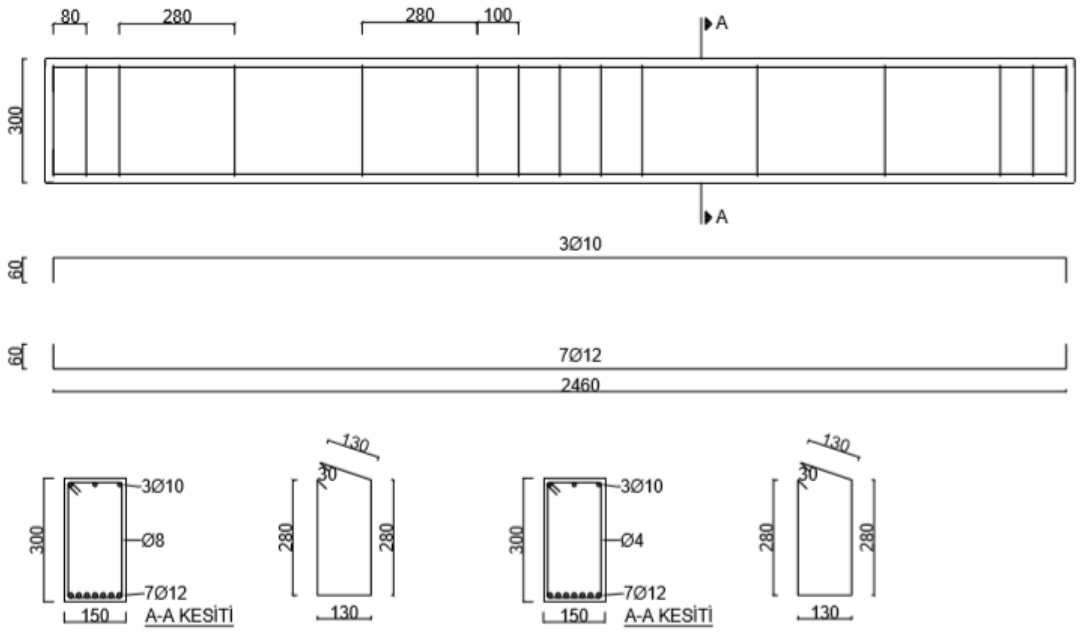
3.3 Deney Elemanlarının Tasarım Detayları

Deney elemanlarının tasarımı laboratuvar koşulları dikkate alınarak yapılmıştır. Kirişler ½ ölçekli olarak tasarlanmış olup kesme hasarı meydana gelecek şekilde donatılandırılması yapılmıştır. Tüm kirişlerde denge altı donatılı (ρ=0,0128<ρ_b=0,020)

olacak şekilde çekme donatısı olarak 7 adet 12 mm çapında ve basınç donatısı olarak 3 adet 10 mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. 2-6 nolu deney elemanlarında enine donatılar, mesnet bölgelerinde lokal kırılmaları engellemek amacıyla 80 mm aralıklarla 3'er adet ve sabit moment bölgesine 100 mm aralıklarla 5 adet 8 mm çapında nervürlü donatı kullanılırken kesme açıklıklarında 280 mm aralıklarla 2 adet 4 mm çapında düz donatı kullanılmıştır. Deney elemanlarında etriye donatısı oranı ρ_w=0,0005 olarak belirlenmiştir. 1 nolu deney elemanında kesme donatısı olarak 100 mm aralıklarla 8 mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Etriye donatısı oranı ρ_w=0,0067'dir. Kirişlerin kesme kapasitesi 20 Mpa beton basınç dayanımına göre 45 kN olarak tasarlanmıştır. Güçlendirme sonrasında ise kapasite 85 kN olarak beklenmektedir. Deney elemanlarının donatı detayı Şekil 3.1 ve 3.2'de verilmiştir.

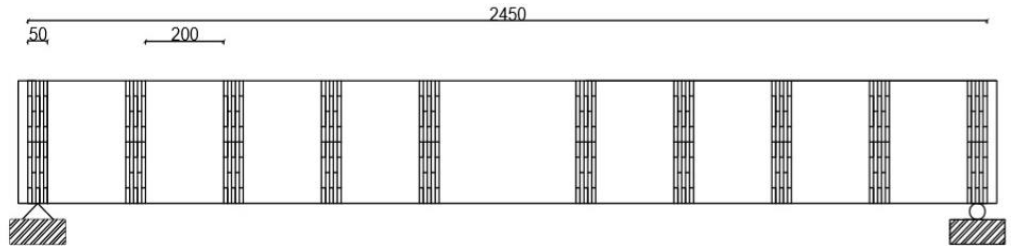


Şekil 3.1. 1 nolu deney elemanı donatı detayı.

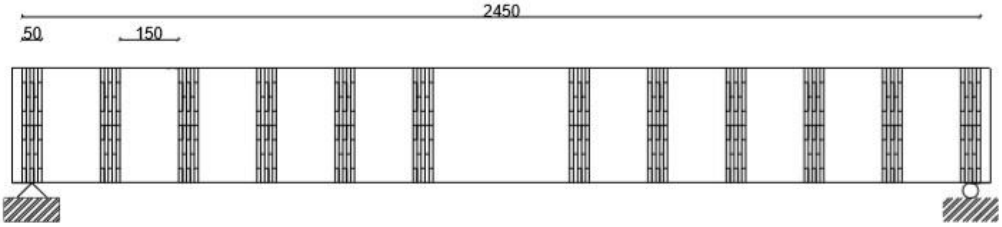


Şekil 3.2. 2-6 nolu deney elemanları donatı detayı.

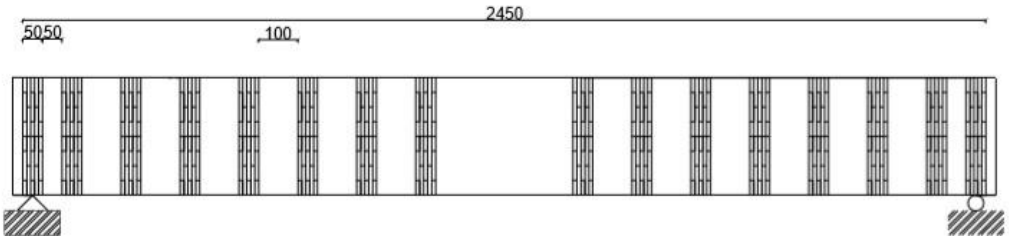
Yapılacak deneysel çalışmada biri sünek eğilme davranışı ve diğeri gevrek kesme kırılması davranışı gösterecek şekilde 2 adet kontrol elemanı ve dört tanesi güçlendirilecek deney elemanı olarak toplam 6 adet betonarme kiriş dikkate alınmıştır. Güçlendirme çalışmasında, kirişlerin dış yüzeylerine 50 mm genişliğinde LP şeritlerin yapıştırılarak kullanılmasına karar verilmiştir. CFRP şeritler arası mesafe 50 mm, 100 mm, 150 mm ve 200 mm olarak belirlenmiştir. Deney elemanlarının güçlendirme detayları Şekil 3.3-3.6'da verilmiştir.



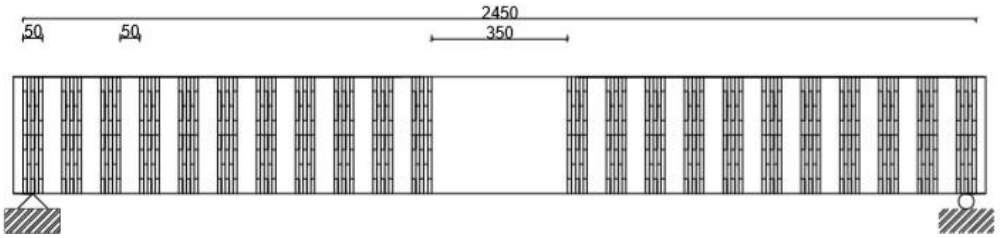
Şekil 3.3. 3 nolu deney elemanı, LP şerit detayı.



Şekil 3.4. 4 nolu deney elemanı, LP şerit detayı.



Şekil 3.5. 5 nolu deney elemanı, LP şerit detayı.



Şekil 3.6. 6 nolu deney elemanı LP şerit detayı.

3.4 Deney Elemanlarının Hazırlanışı

Deney elemanlarının üretimine ilk olarak donatıların hazırlanması ile başlanmıştır. Kirişlerde çekme bölgesine 7 adet 12 mm çapında nervürlü donatı ve basınç bölgesine 3 adet 10 mm çapında nervürlü donatı hazırlanmıştır. Etriyeler ise kirişlerin mesnet uçlarına 80 mm aralıklarla 3'er adet ve kesme açıklıklarına 280 mm aralıklarla 2'şer adet 8 mm çapında nervürlü etriye ve sabit moment bölgesine 100 mm aralıklarla 5 adet 4 mm çapında nervürsüz etriye olacak şekilde donatı kafesi hazırlanmıştır. Hazırlanan donatı kafesi Şekil 3.7'de verilmiştir. Beton dökümünün gerçekleşebilmesi için plywood malzemeden yapılan kalıp kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Hazırlanan donatı kafesi.

Beton dökümünden önce plywood kalıp yağlanarak hazırlanmıştır. Daha sonra hazırlanan donatı kafesi kalıbın içine yerleştirilerek beton dökümü yapılmıştır ve vibrasyon işlemi uygulanmıştır. Kalıp hazırlığı ve beton döküm aşamaları Şekil 3.8-3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.8. Kalıpların yağlanması.



Şekil 3.9. Donatı kafeslerinin kalıplara yerleştirilmesi.



Şekil 3.10. Beton dökümünün gerçekleşmesi.

Beton döküm esnasında alınan standart küp numuneler ve kiriş kalıptan çıkarılarak aynı koşullar altında 28 gün kür uygulanmıştır. Küp numunelerin testi Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Küp numunelerin kırılması.

3.5 LP Şeritler ile Güçlendirme İşlemleri

LP şeritler ile güçlendirme işlemlerinde ilk olarak şeritlerin yerleştirileceği yerler belirlenmiş ve tüm yüzeyleri saracak şekilde 1150 mm uzunluğunda 50 mm genişliğinde LP şeritler hazırlanmıştır. Daha sonra şeritlerin yapıştırılacağı kiriş yüzeyi beton granülmetrisi görülecek şekilde beton şerbetinden temizlenmiştir ve şeritlerin yırtılmasını engellemek için kirişin alt ve üst köşeleri oval ve pürüzsüz olacak şekilde tıraşlanmıştır. Daha sonra bu yüzeyler tıraşlama işleminden kaynaklanan tozlardan arındırılarak yapıştırma işlemine hazır hale getirilmiştir. LP şeritlerin yapıştırılmasında ilk önce epoksi (Sikadur 330) karışımı (A:B) 4:1 oranında hazırlanmıştır. Hazırlanan karışım 1 mm kalınlığında olacak şekilde şeritlerin yerleşeceği kiriş yüzeyine sürülmüştür. 1150 mm uzunluğunda 50 mm genişliğinde hazırlanan LP şeritler gergin bir şekilde kiriş yüzeyine yapıştırılmıştır. Şeritlerin düzgün bir şekilde kiriş yüzeyine yapışmasını sağlamak için epoksiye doyurulmuştur. LP şeritlerin kiriş yüzeyine yapıştırılması Şekil 3.12-3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.12. Hazırlanan yüzeylere epoksi sürülmesi.

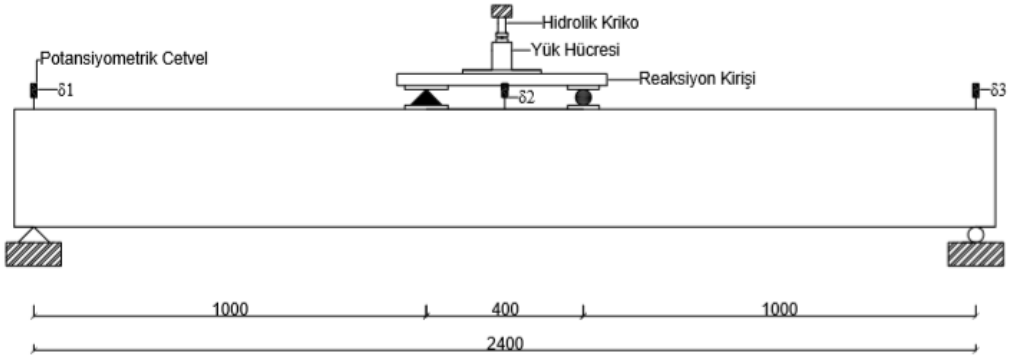


Şekil 3.13. CFRP şeritlerin yapıştırılması.

3.6 Yükleme ve Deney Düzeneği

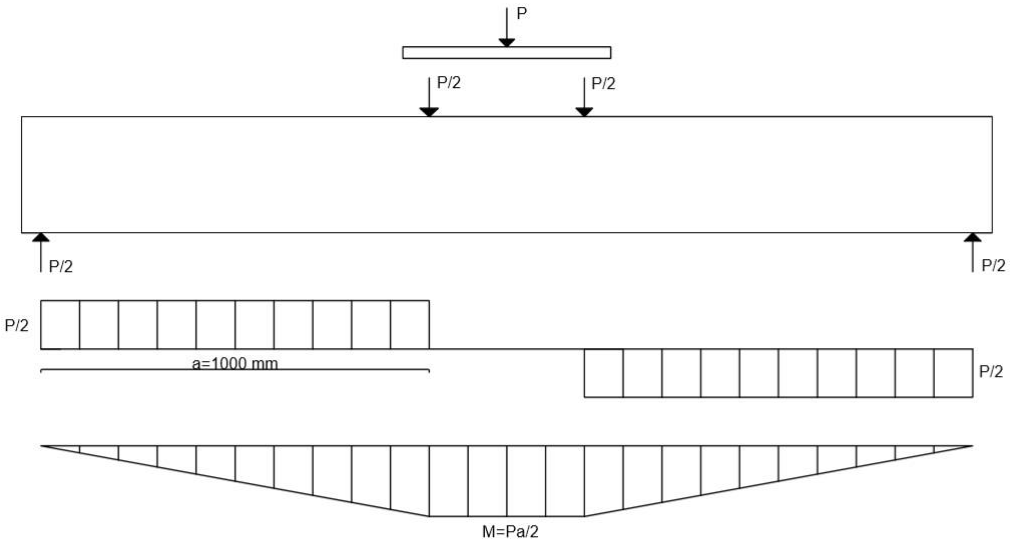
Deneyler Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği ve Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Kirişler deney çerçevesi üzerine basit mesnetli olacak şekilde yerleştirilmiştir. Deneyler esnasında hidrolik krikodan uygulanan yükü kirişlere aktarmak için kirişlerin üzerine açıklığı 400 mm olan kutu kesitli reaksiyon kirişi koyulmuştur ve basit mesnetli olacak şekilde

mesnetlenmiştir. Basit mesnet şartını sağlamak için altıgen ve dairesel çelik çubuklar kullanılmıştır. Deney esnasında hidrolik krikodan aktarılan yükleri ölçülebilmesi için hidrolik krikonun ucuna yerleştirilen 500 kN kapasiteli yük hücresi kullanılmıştır. Söz konusu yükleme ve deney düzeneği Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14. Yükleme ve deney düzeneği.

Deney düzeneğine ait serbest cisim diyagramı ve iç kuvvetlere ait kesme ve moment diyagramları sırasıyla Şekil 3.15'te verilmiştir. Momentin maksimum ve sabit olduğu açıklıkta kiriş eğilmeye zorlanırken, kesme kuvvetinin sabit olduğu kesme açıklığında moment ve kesme kuvvetine maruz kalacaktır.



Şekil 3.15. Deney düzeneğine ait kesme ve moment diyagramı.

3.7 Ölçüm Düzeneği ve Verilerin Toplanması

Yapılan çalışmada iki farklı ölçüm düzeneği kullanılmıştır.

- Yükleme anındaki Yük-Deplasman ölçümü
- Doğal frekans ölçümü

Kirişlerin yükleme anında Yük-Deplasman ölçümünde, orta nokta deplasmanı, sol ve sağ mesnet çökmesi ölçümleri için 3 adet potansiyometrik cetvel kullanılmıştır. Orta nokta deplasmanının ölçülmesinde 100 mm kapasiteli ve mesnet göçmelerini ölçmek için 50 mm kapasiteli potansiyometrik cetveller kullanılmıştır. Potansiyometrik cetveller sayesinde elde edilen veriler 16 kanallı veri toplama ünitesi aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılarak kaydedilmiştir. Kayıtlar saniyede 4 veri alınarak gerçekleştirilmiştir ve istenilen grafikler elde edilmiştir.

Deney esnasında elde edilen veriler ışığında kirişlerin orta nokta net deplasmanını bulmak için;

$$\delta_{net} = \delta_2 - \left(\frac{\delta_1+\delta_3}{2}\right) \tag{3.1}$$

eşitliği kullanılmıştır.

δ_1: Sol mesnet çökmesi (mm)

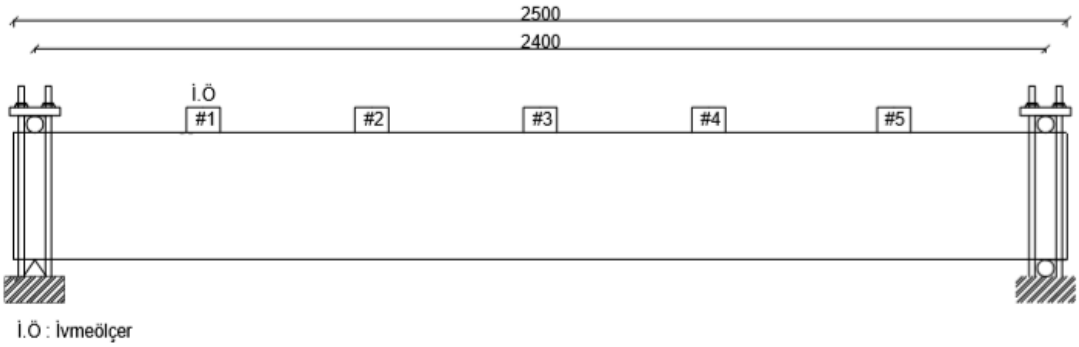
δ_2: Orta nokta düşey deplasman (mm)

δ_3: Sağ mesnet çökmesi (mm)

δ_{net}: Orta nokta net deplasman (mm)

Doğal frekans ölçümünde ise öncelikle kirişler yükleme deney düzeneğinden farklı bir setup üzerine sabit mesnet şartı sağlanacak şekilde yerleştirilmektedir. Deney elemanlarının sallanmasını engellemek için 14 mm çapında sonsuz dişliler kullanılarak sabitlenmiştir. Deney düzeneği Şekil 3.16'da verilmiştir. Daha sonra frekans ölçümlerini gerçekleştirmek için tek eksenli 5 adet ivmeölçerler kirişler üzerine yerleştirilip 0-500 Hz frekans aralığında 15 dakikalık frekans ölçümleri gerçekleştirilmektedir. İvmeölçerler aracılığıyla elde edilen veriler TESTBOX6501 veri toplama ünitesi aracılığıyla bilgisayar ortamında kaydedilmektedir. Kaydedilen veriler Artemis yazılımı aracılığıyla frekans tanım alanında ayrıştırma yöntemi

kullanılarak frekans değerleri elde edilmiştir. Kiriş ölçümlerinde kullanılan tek eksenli ivmeölçer ve veri toplama ünitesi Şekil 3.17'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Frekans ölçüm düzeneği.



Şekil 3.17. Tek eksenli ivmeölçer ve veri toplama ünitesi.

Frekans değişimlerinin yüzde olarak belirlenmesinde;

$$\frac{\Delta f_r}{f_{r,den}^{D0}}(\%) = 100 \times \frac{f_{r,den}^{D0} - f_{r,den}^{Di}}{f_{r,den}^{D0}} \quad (3.2)$$

eşitliği kullanılmıştır.

$f_{r,den}^{D0}$: Hasarsız durumda ölçülen frekans değeri (Hz)

$f_{r,den}^{Di}$: Hasarlı durumda ölçülen frekans değeri (Hz)

Δf_r: Frekans değişimi (Hz)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 Deneyler

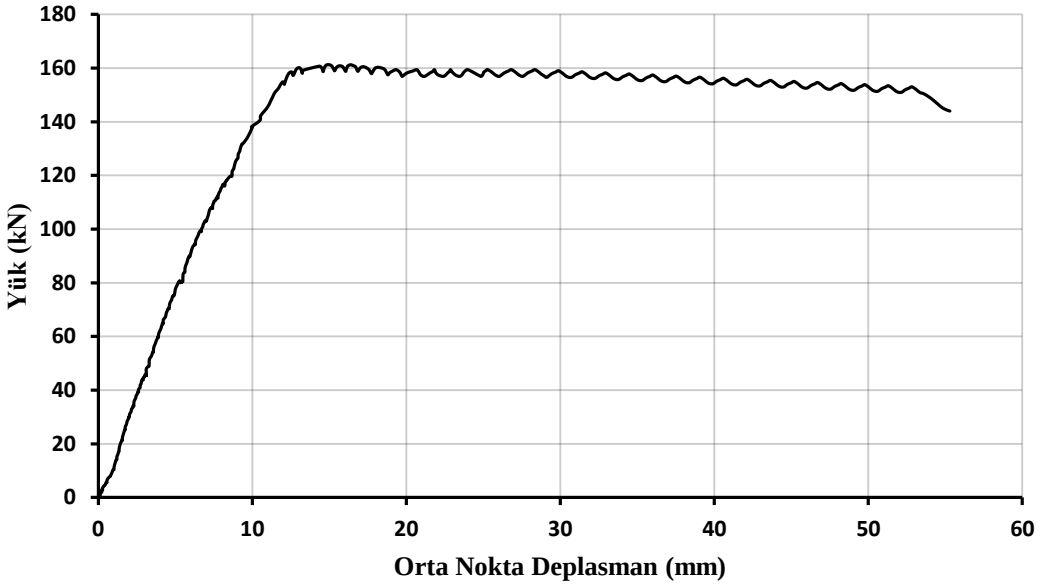
Yapılan deneysel çalışma quasi-statik ve dinamik deneyler olmak üzere iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada; deney elemanlarının davranışı ve dayanımları belirlenmiştir. İkinci aşamada ise, kirişlerin dinamik özellikleri belirlenmiştir. Tüm deney elemanlarında a/d oranı 3,5 olarak dikkate alınmıştır. Çalışma boyunca izlenilen prosedür aşağıdaki gibidir.

- LP ile güçlendirme öncesi kirişlerin frekans ölçülmesi
- LP ile güçlendirme sonrası kirişlerin frekans ölçülmesi
- %80 kapasiteye (120 kN) kadar kirişlerin yüklenmesi
- Verilen hasar sonrası frekans ölçülmesi
- Kirişlerin göçme anına kadar yüklenmesi
- Göçme durumunda frekans ölçülmesi

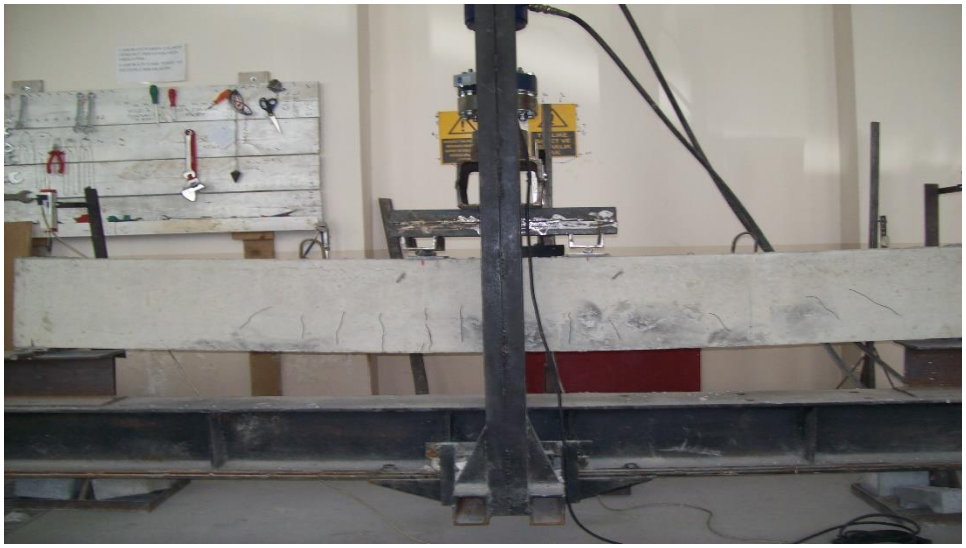
4.1.1 1 nolu deney elemanı

Deneysel programda ilk önce kesme donatısı yeterli kontrol elemanı test edilmiştir. Bu kiriş eğilme momenti etkisi ile göçmesi amaçlandığı için yeterli miktarda enine donatı kullanılarak kesme kapasitesi artırılmıştır. Elemanın Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.1'de verilmiştir.

Eğilme kirişinde ilk eğilme çatlakları 35 kN seviyelerinde gözlemlenmiştir. Yüklemeye devam edildiğinde kılcal düzeyde eğilme çatlaklarının sayısı artmıştır. İlk kesme çatlağı yük 80 kN seviyesindeyken oluşmuş ve kirişin sağ kesme açıklığında gözlemlenmiştir. Tüm çatlaklar kılcal düzeyde kalıp, 160 kN yük düzeyinde rijitlik önemli oranda azalmıştır. Çekme donatısı akmıştır ve akma anında deplasman 14 mm ölçülmüştür. Akma anında kirişin rijitlik değeri 11,43 kN/mm hesaplanmıştır. Daha sonra sabit moment bölgesindeki beton ezilerek kiriş göçmüştür. Daha önce meydana gelen kesme çatlakları kılcal düzeyde kalmıştır. Göçme anı kiriş deplasmanı 53,5 mm ve yük düzeyi 150,5 kN olarak ölçülmüştür. Deney elemanının göçme anında rijitlik değeri 2,81 kN/mm ve süneklik oranı 3,82 hesaplanmıştır. Kirişin göçme sonrası görünüşü Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1. 1 nolu deney elemanı Yük-Deplasman grafiği.



Şekil 4.2. Göçme sonrası 1 nolu deney elemanı.

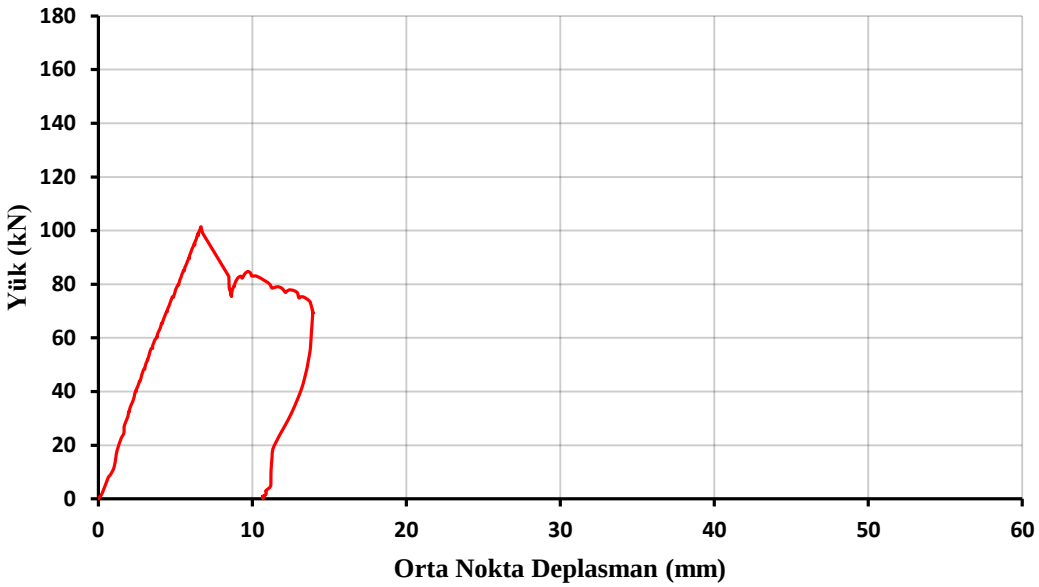
4.1.2 2 nolu deney elemanı

4.1.2.1 Yükleme aşaması

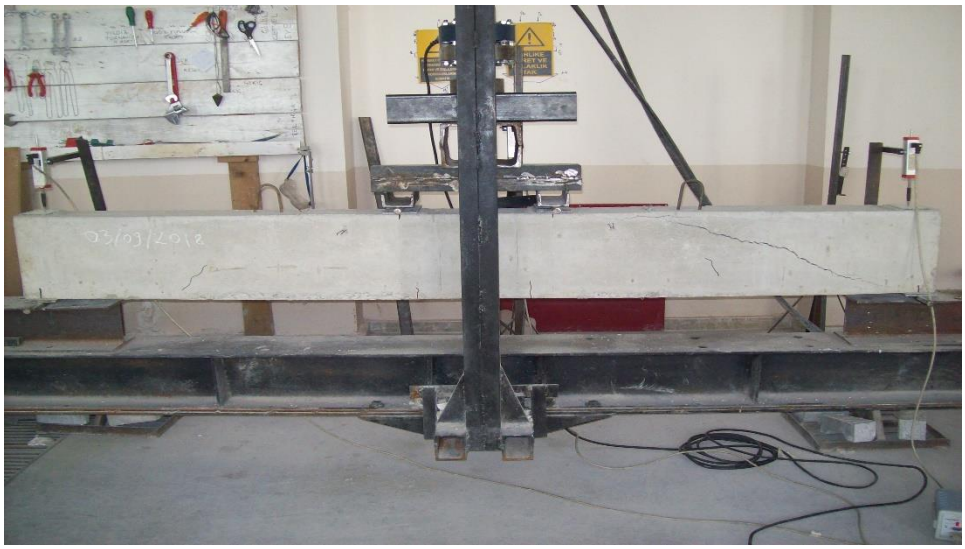
Söz konusu kiriş kesme dayanımı yeterli olmayacak şekilde donatılandırılmış ve ikinci kontrol elemanı olarak test edilmiştir. Elemana ait Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.3'te verilmiştir.

Deney elemanında ilk eğilme çatlağı 57 kN seviyesindeyken gözlemlenmiştir. Yüklemeye devam edildiğinde ise kılcal düzeyde eğilme çatlaklarında artış

gözlemlenmiştir. Yük 90 kN seviyesinde iken sol kesme açıklığında kesme çatlağı gözlemlenmiştir. 101 kN yük seviyesinde kirişin sağ kesme açıklığında oluşan eğik çatlaktan dolayı kesmeden kırılmıştır. Maksimum yük seviyesinde, deplasman değeri 6,7 mm olarak ölçülmüştür. Maksimum yük anındaki rijitlik değeri 15,07 kN/mm olarak belirlenmiştir. Kirişin göçme anındaki görünüşü Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.3. 2 nolu deney elemanı Yük-Deplasman grafiği.



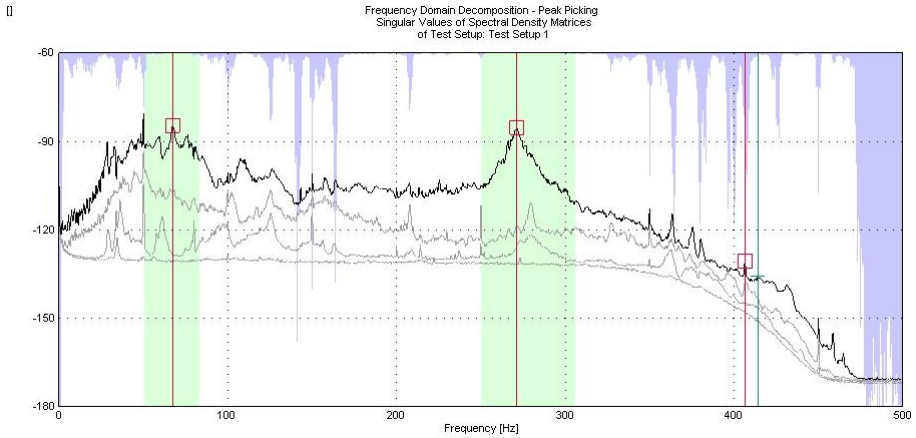
Şekil 4.4. Göçme sonrası 2 nolu deney elemanı.

4.1.2.2 Frekans ölçümü

Deney elemanı ve ivmeölçer yerleşimi Şekil 4.5'te verilmiştir. Bu deney elemanına ait frekans değerleri ilk mod için 67,2 Hz, ikinci mod için 271,2 Hz ve üçüncü mod için 414,1 Hz elde edilmiştir. Yapılan frekans ölçümü sonunda elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri (SYFTD) Şekil 4.6'da verilmiştir.

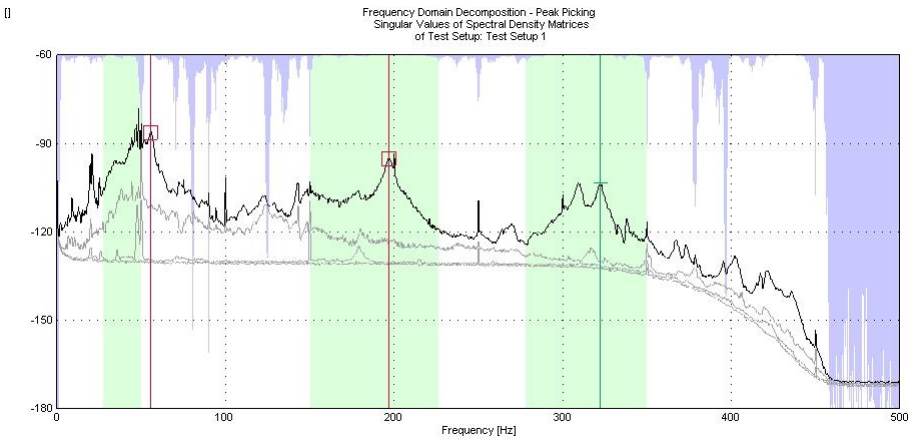


Şekil 4.5. Frekans ölçüm düzeneği ve ivmeölçer yerleşimi.



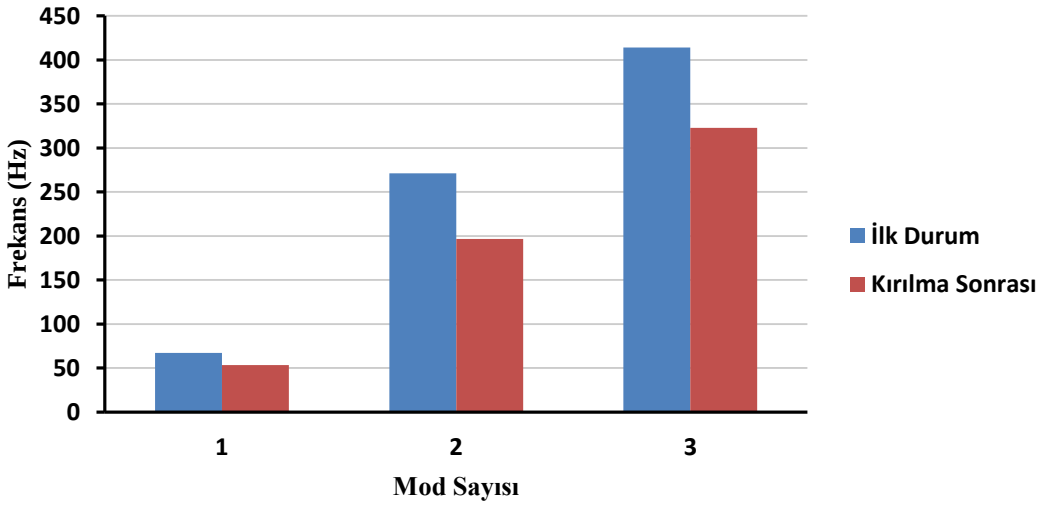
Şekil 4.6. 2 nolu deney elemanı hasarsız durum için SYFTD.

Söz konusu deney elemanı göçme durumuna kadar yüklendikten sonra frekans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Göçme anında elde edilen frekans değerleri birinci mod için 53,4 Hz, ikinci mod için 196,5 Hz ve üçüncü mod için 322,8 Hz olarak elde edilmiştir. Yapılan ölçüm sonunda elde edilen SYFTD Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. 2 nolu deney elemanı göçme sonrası SYFTD.

2 nolu deney elemanının tüm durumlar için frekans değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Frekans değişimi, 2 nolu deney elemanı.

4.1.3 3 nolu Deney Elemanı

200 mm aralıkla LP şeritler ile güçlendirilmiş deney elemanıdır. Kirişe ait Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir.

4.1.3.1 1. aşama yükleme

İlk kesme çatlağı net deplasman değeri 7,3 mm ve 107 kN yük seviyesinde sağ kesme açıklığında gözlemlenmiştir. Oluşan kesme çatlağı LP şeritler arasında meydana gelmiştir. Yüklemeye devam edildiğinde oluşan çatlak LP şeritler altında ilerlememiştir. 116 kN yük seviyesinde ve deplasman değeri 7,9 mm iken sol kesme

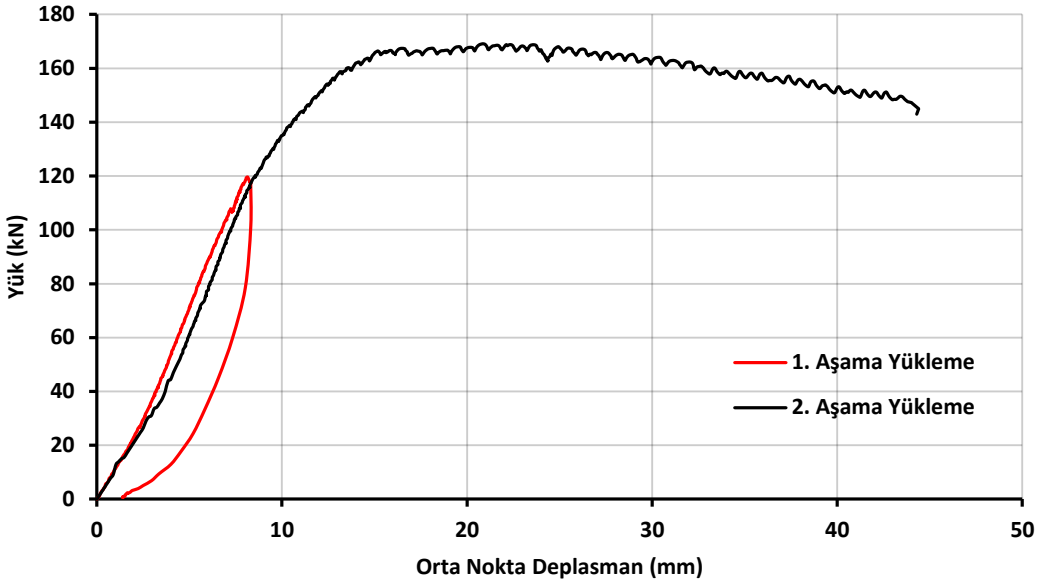
açıklığında LP şeritler arasında alt alta iki adet kesme çatlağı gözlemlenmiştir. Kesme çatlaklarına ek olarak çok sayıda kılcal düzeyde eğilme çatlakları gözlemlenmiştir. Yük 120kN seviyesine çıktığında ise deneye son verilmiştir. Orta nokta kalıcı deplasmanı 1,4 mm olarak ölçülmüştür.. Kirişte oluşan kesme çatlakları Şekil 4.9'da verilmiştir.



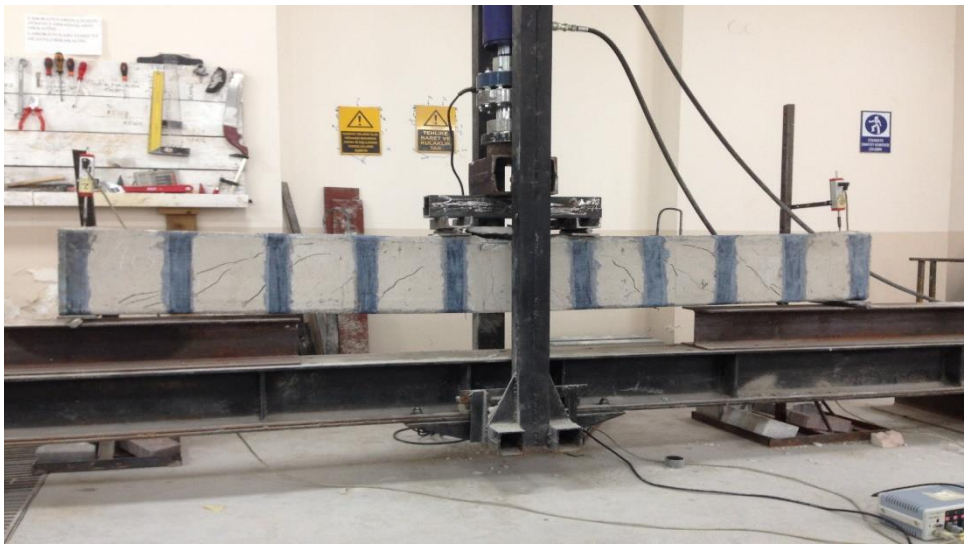
Şekil 4.9. Hasar sonrası 3 nolu deney elemanı.

4.1.3.2 2. aşama yükleme

1. aşama yüklemede oluşan kesme çatlaklarına ek olarak, yük 75 kN ve 95 kN seviyesinde iken sağ ve sol kesme açıklıklarında yeni kesme çatlakları meydana gelmiştir. Yük seviyesi artarken kesme çatlaklarında genişleme gözlemlenmiştir. Öte taraftan sol kesme açıklığında oluşan kesme çatlakları şeritler altından geçmiş olmasına rağmen LP şeritlerde bozulma veya kiriş yüzeyinden soyulma gözlemlenmemiştir. 115 kN yük seviyesinde ise çok sayıda eğilme çatlağı gözlemlenmiştir. Yük düzeyi artarken, yeni eğilme çatlakları oluşmuş ve genişlemiştir. 165 kN yük seviyesinde ve deplasman 15,5 mm iken rijitlik önemli oranda azalmıştır ve bu noktadaki rijitlik 10,64 kN/mm hesaplanmıştır. Bu yük seviyesinden sonra kesme çatlakları kılcal düzeyde kalırken, eğilme çatlaklarının sayısında artış meydana gelmiştir. Daha sonra 148 kN yük seviyesinde sabit moment bölgesinde basınç bölgesindeki beton ezilerek kiriş göçmüştür. Göçme anındaki deplasman 43,8 mm ölçülmüştür. Göçme anında rijitlik 3,38 kN/mm ve deplasman süneklik oranı 2,83 hesaplanmıştır. Kirişin göçme anındaki görünüşü Şekil 4.11'deki gibidir.



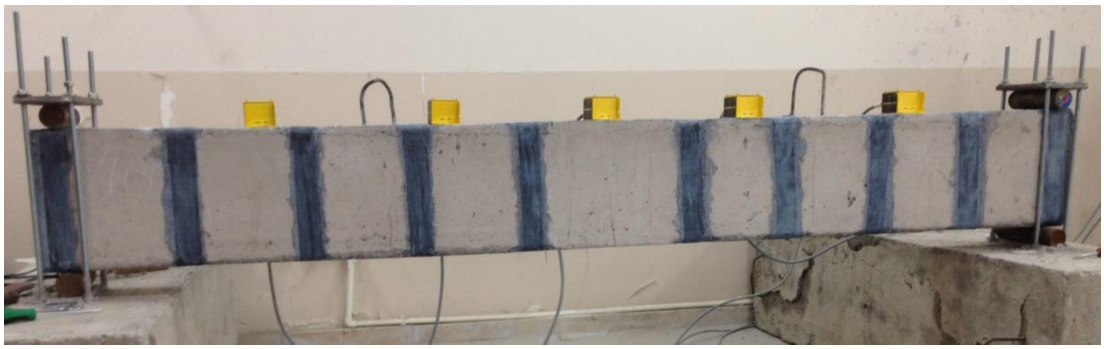
Şekil 4.10. 3 nolu deney elemanı Yük-Deplasman grafiği.



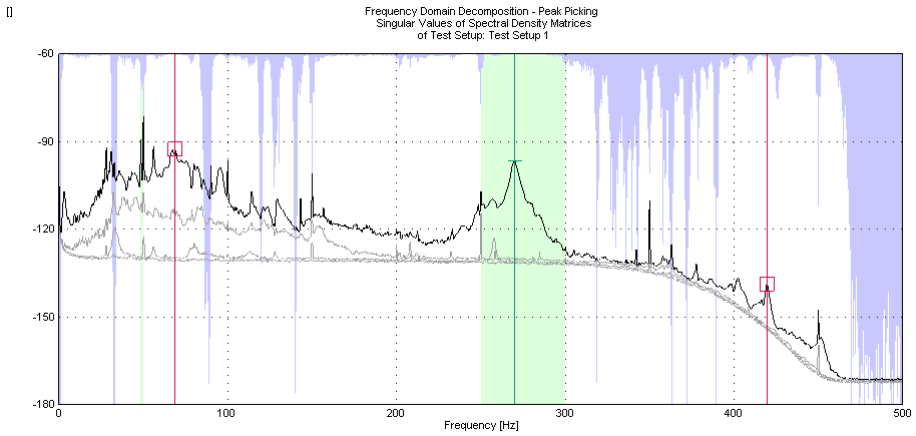
Şekil 4.11. Göçme sonrası 3 nolu deney elemanı.

4.1.3.3 Frekans ölçümü

Frekans ölçümleri sonucunda deney elemanına ait eğilme modlarının frekans değerleri elde edilmiştir. Ölçüm düzeneği ve ivmeölçer yerleşimi Şekil 4.12'de verilmiştir. Birinci eğilme modu 68,9 Hz, ikinci mod 270 Hz ve üçüncü mod 419,4 Hz olarak belirlenmiştir. Bu duruma ait SYFTD Şekil 4.13'te verilmiştir.

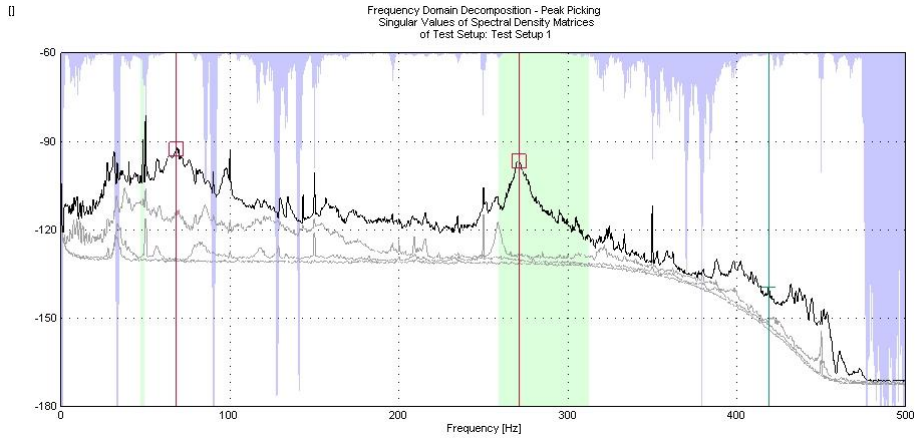


Şekil 4.12. Ölçüm düzeneği ve ivmeölçer yerleşimi.



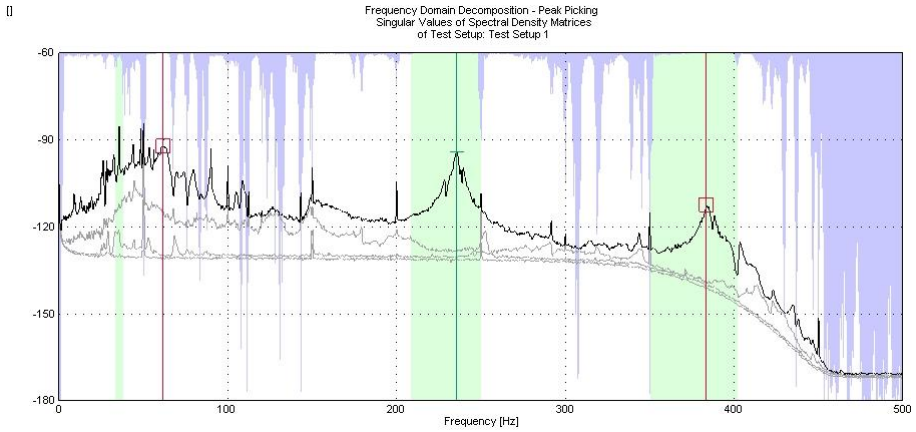
Şekil 4.13. 3 nolu deney elemanı güçlendirme öncesi SYFTD.

Söz konusu kirişe LP şeritler ile güçlendirme uygulaması yapıldıktan sonra frekans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu duruma ait birinci mod için 68,1 Hz, ikici mod için 271 Hz ve üçüncü mod için 418 Hz değerleri elde edilmiştir. LP şeritler ile uygulama sonrası SYFTD Şekil 4.14'te verilmiştir.



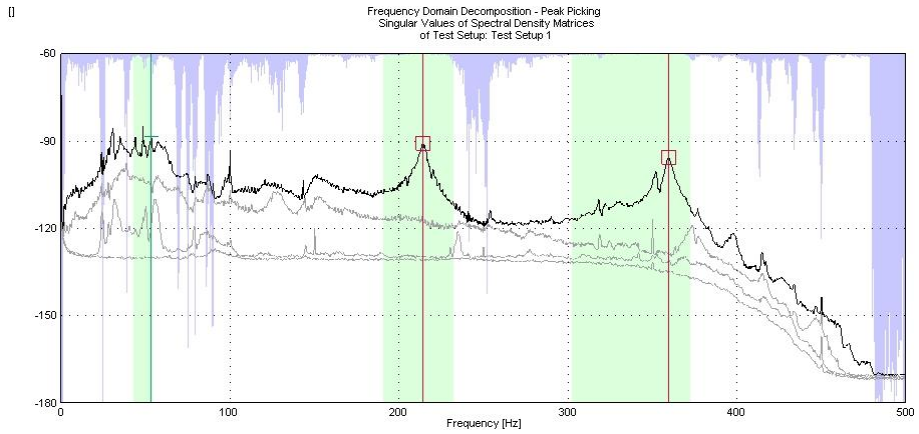
Şekil 4.14. 3 nolu deney elemanı güçlendirme sonrası SYFTD.

Kiriş 120 kN yük düzeyine kadar yüklenip hasar verildikten sonra frekans ölçümü aynı mesnet şartlarında gerçekleştirilmiştir. Hasar sonrası kirişlerin frekans ölçümünde birinci eğilme modu 61,8 Hz, ikici eğilme modu 235,6 Hz ve üçüncü eğilme modu 383,5 Hz olarak belirlenmiştir. Hasar sonrası elde edilen SYFTD Şekil 4.15'te verilmiştir.



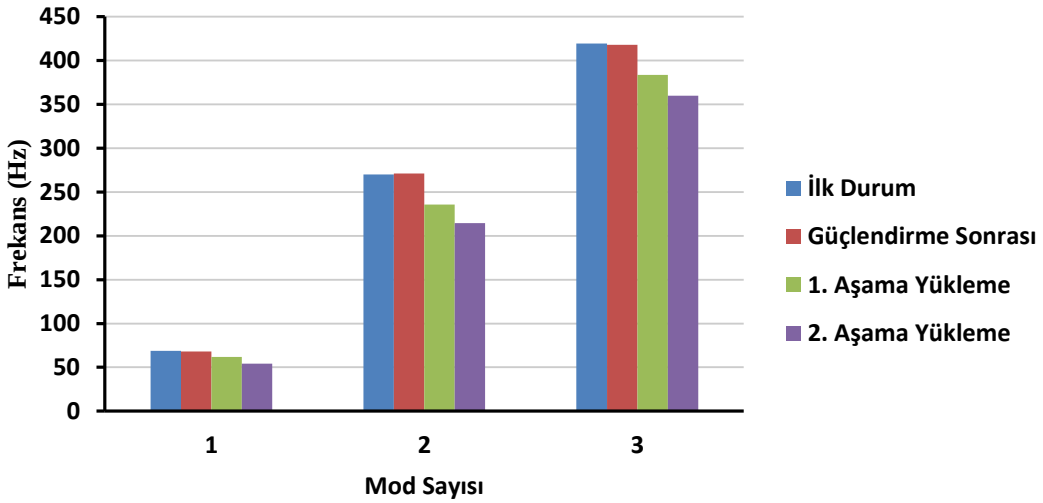
Şekil 4.15. 3 nolu deney elemanı hasarlı durum için SYFTD.

Frekans ölçümünün son aşamasında ise, kirişin yükleme sonrası göçme durumu dikkate alınmıştır. Göçme anında, birinci mod 54,2 Hz, ikinci mod 214,4 Hz ve üçüncü mod ise 360 Hz olarak belirlenmiştir. Göçme anına ait SYFTD Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16. 3 nolu deney elemanı göçme sonrası SYFTD.

Deney elemanının tüm durumlar için frekans değişimi Şekil 4.17'de verilmiştir.



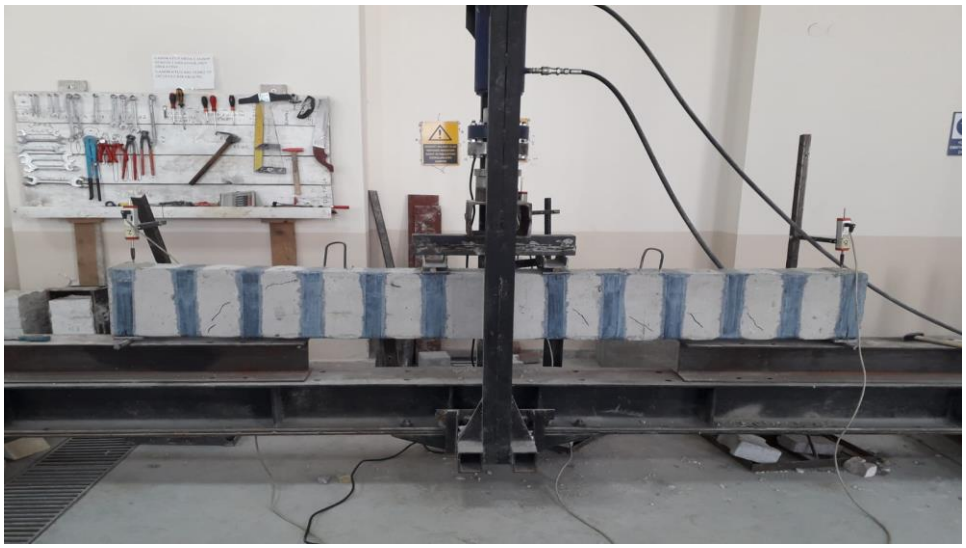
Şekil 4.17. Frekans değişimi, 3 nolu deney elemanı.

4.1.4 4 nolu deney elemanı

150 mm aralıklarla LP şeritler ile güçlendirilmiş deney elemanıdır. Deney elemanına ait Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.19'da verilmiştir.

4.1.4.1 1. aşama yükleme

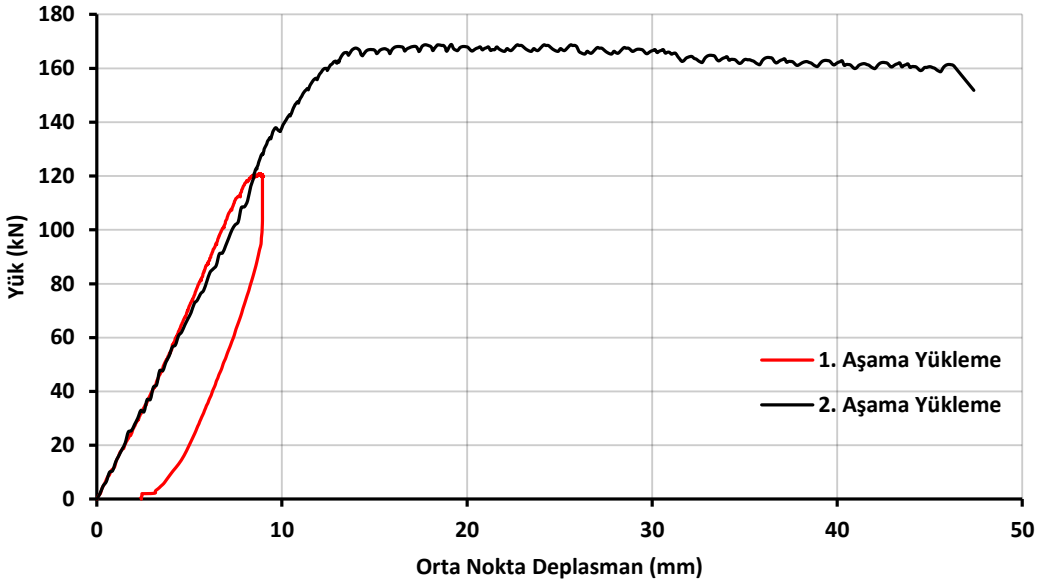
93 kN yük seviyesine kadar birçok kılcal düzeyde eğilme çatlakları gözlemlenmiştir. 107 kN yük seviyesindeyken sol kesme açıklığında kesme çatlağı gözlemlenmiştir. Bu yük düzeyinde deplasman değeri 7,28 mm olarak ölçülmüştür. 120 kN yük seviyesine çıkıldığında ise kirişlerin sol ve sağ kesme açıklıklarında kesme çatlaklarının sayısında artış gözlemlenmiştir. Yüklemeye devam edilmiş, kılcal düzeyde eğilme çatlaklarının sayısında artış gözlemlenmiştir. 120 kN yük seviyesinde iken deplasman 9 mm olarak ölçülmüştür. Meydana gelen çatlaklardan hiçbiri LP şeritlerin altından ilerlememiştir. Kirişte meydana gelen kalıcı deplasman 2 mm olarak ölçülmüştür. Kirişin 1. aşama yükleme sonrası görünüşü Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18. Hasar sonrası 4 nolu deney elemanı.

4.1.4.2 2. aşama yükleme

Deplasman değeri 7,3 mm ve yük 100 kN seviyesinde iken kirişte çok sayıda kılcal düzeyde eğilme çatlağı gözlemlenmiştir. Yüklemeye devam edildiğinde sağ ve sol kesme açıklıklarında eğik çatlakların sayısı artmış ve genişlemiştir. Sol açıklıkta bulunan kesme çatlağı ilerleyerek LP şeritin altından geçmiştir. Ancak LP şerit üzerinde herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Yüklemeye devam edildiğinde, 164 kN yük mertebesinde ve deplasman 14,8 mm iken kirişte rijitlik kaybı yaşanmıştır ve alt bölgesinde bulunan çekme donatısı akma kapasitesine ulaşmıştır. Akma noktasındaki rijitlik değeri 11,08 kN/mm hesaplanmıştır. Devam eden yükleme sonucunda, sabit moment bölgesinde meydana gelen eğilme çatlakları kesit ortasına kadar ilerlemiştir ve deplasman 46,5 mm ve yük düzeyi 159,3 kN iken basınç bölgesi beton ezilerek göçmüştür. Göçme anında kiriş rijitliği 3,43 kN/mm iken süneklik oranı ise 3,14 hesaplanmıştır. Kirişin göçme sonrası görünüşü Şekil 4.20'deki gibidir.



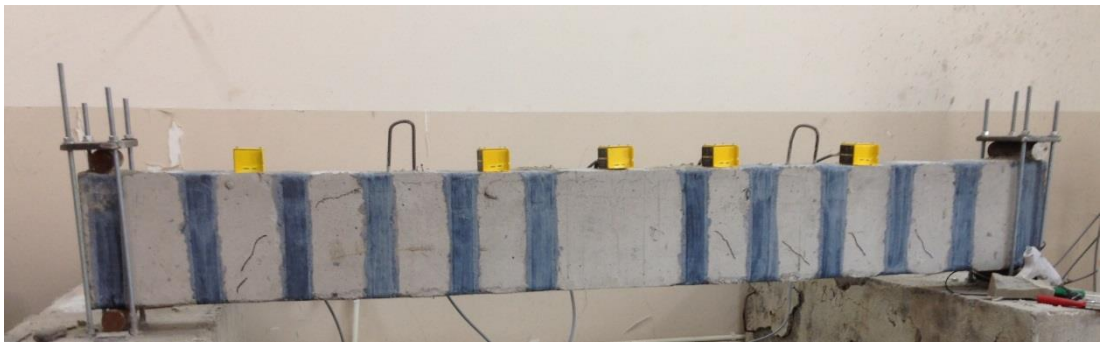
Şekil 4.19. 4 nolu deney elemanı Yük-Deplasman grafiği.



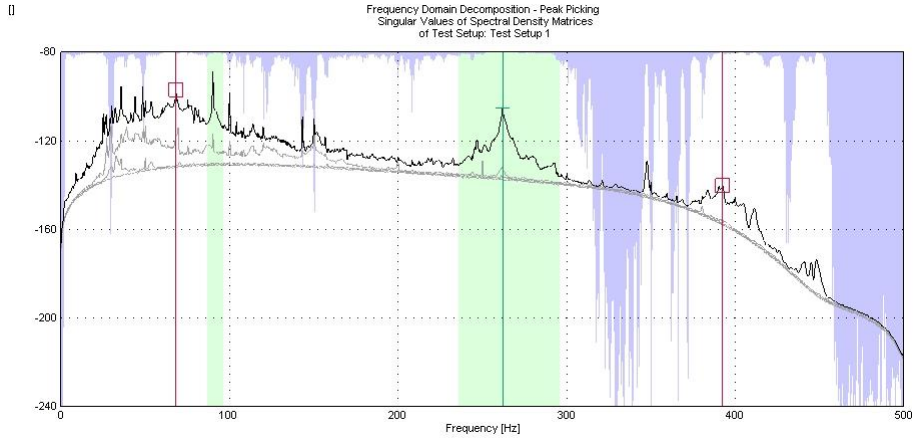
Şekil 4.20. Hasar sonrası 4 nolu deney elemanı.

4.1.4.3 Frekans ölçümü

Deney düzeneği ve ivmeölçer yerleşimi Şekil 4.21'de verilmiştir. Güçlendirme öncesi ilk üç eğilme mod değerleri sırasıyla 68,1 Hz, 262 Hz ve 392,3 Hz olarak belirlenmiştir. Güçlendirme öncesine ait SYFTD Şekil 4.22'de verilmiştir.

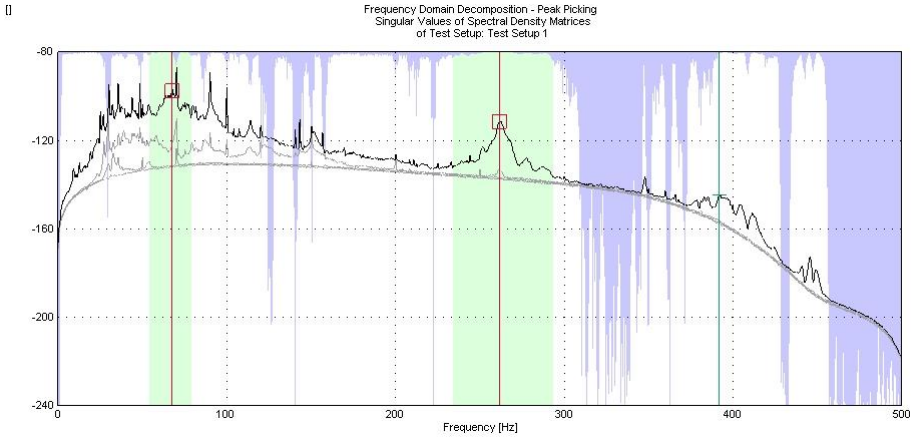


Şekil 4.21. 4 nolu deney elemanı için deney düzeneği ve ivmeölçer yerleşimi.



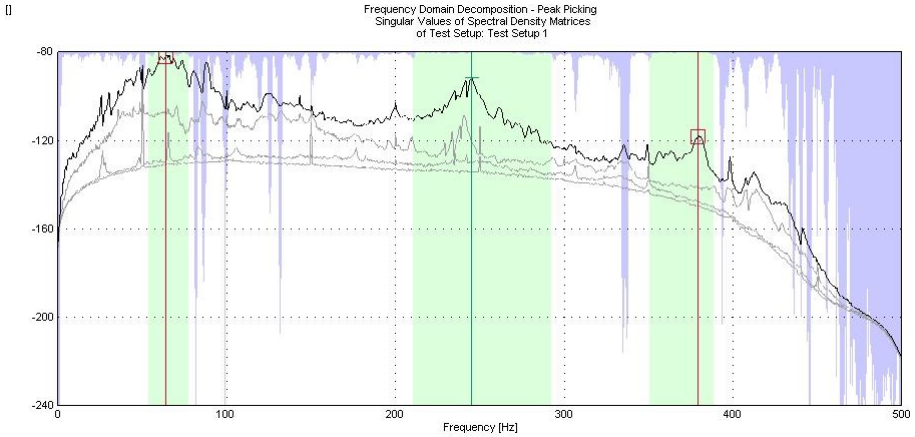
Şekil 4.22. 4 nolu deney elemanı güçlendirme öncesi SYFTD.

150 mm net aralıklarla LP şeritler ile yapılan güçlendirme sonrası frekans değerleri ise birinci mod için 67,6 Hz, ikinci mod için 261,5 Hz ve üçüncü mod için 391,8 Hz olarak elde edilmiştir. Güçlendirme sonrasına ait SYFTD Şekil 4.23'te verilmiştir.



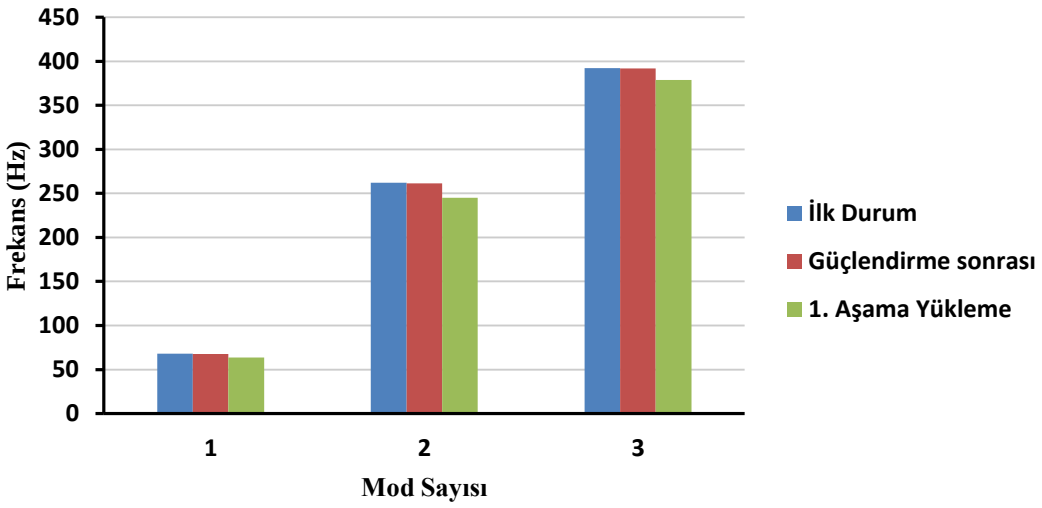
Şekil 4.23. 4 nolu deney elemanı güçlendirme sonrası SYFTD.

120 kN yük düzeyinde kirişe hasar verildikten sonra frekans ölçümü yapılmıştır. Bu duruma ait elde edilen frekans değerleri ilk üç eğilme modu için sırasıyla 63,7 Hz, 245,1 Hz ve 378,9 Hz olarak belirlenmiştir. Kirişin hasarlı duruma ait SYFTD Şekil 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.24. 4 nolu deney elemanı hasar sonrası SYFTD.

Bu deney elemanında göçme sonrası için frekans değerleri belirlenememiştir. Deney elemanının tüm durumlar için frekans değişimi Şekil 4.25'te verilmiştir.



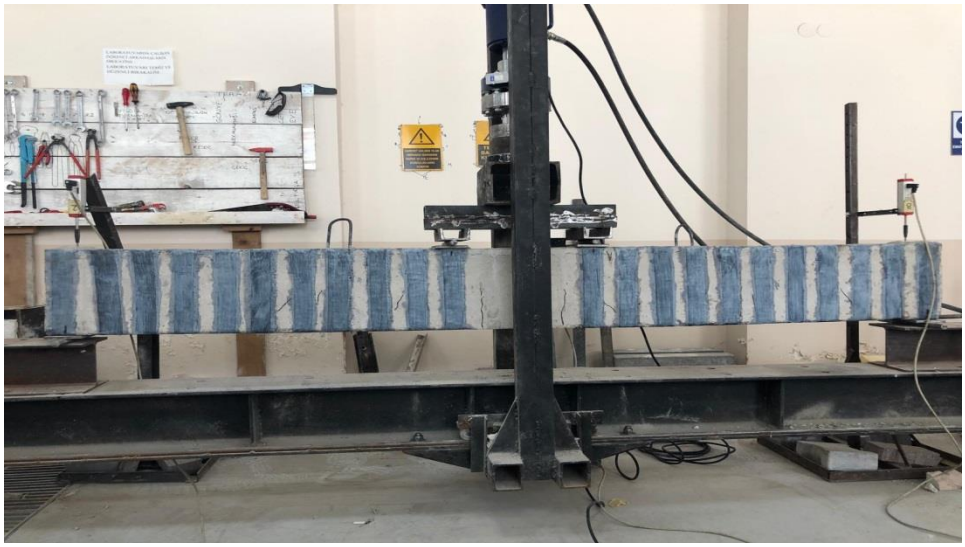
Şekil 4.25. Frekans değişimi, 4 nolu deney elemanı.

4.1.5 5 nolu deney elemanı

100 mm aralıklarla LP şeritler ile güçlendirilmiş deney elemanıdır. Deney elemanına ait Yük-Deplaman grafiği Şekil 4.27'de verilmiştir.

4.1.5.1 1. aşama yükleme

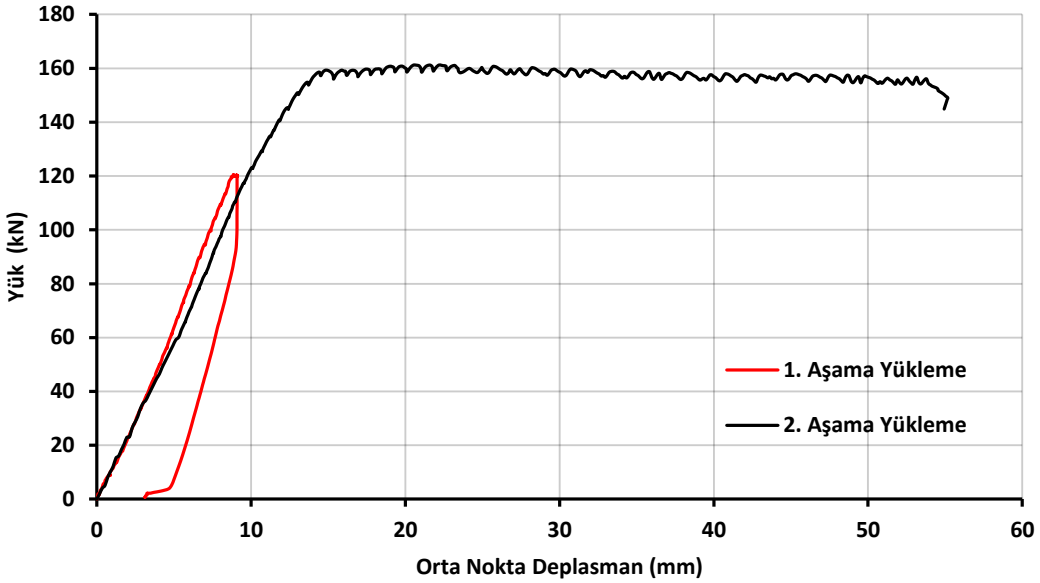
Deney elemanının yüklenmesinde, deplasman değeri 6 mm ve yük 80 kN seviyesinde iken bir çok kılcal düzeyde eğilme çatlağı gözlemlenmiştir. Yük 94 kN seviyesinde ve deplasman 7 mm iken sol kesme açıklığında ilk eğik çatlak gözlemlenmiştir. Yük seviyesi artarken her iki açıklıkta da yeni eğik çatlaklar oluşmuştur. Oluşan çatlakların hiçbiri LP şeritlerin altından ilerlememiş ve kılcal düzeydedir. Bunların yanı sıra sabit moment bölgesinde eğilme çatlaklarının sayısında artış gözlemlenmiştir. 120 kN yük seviyesinde deplasman 9,2 mm olarak ölçülmüştür. Deney elemanının hasar verildikten sonraki görüntüsü Şekil 4.26'daki gibidir.



Şekil 4.26. Hasar sonrası 5 nolu deney elemanı.

4.1.5.2 2. aşama yükleme

90 kN yük seviyesinde eğilme çatlakları kesit ortasına kadar ilerlemiştir. Yük seviyesi 115 kN ve deplasman değeri 9,4 mm iken sol kesme açıklığında çatlaklar ilerlemiş ancak şeritler altına geçmemiştir. Yüklemeye devam edildiğinde ise kirişin sağ açıklığında çok sayıda kesme çatlakları gözlemlenmiştir. 158 kN yük seviyesinde iken deplasman 14,2 mm olarak ölçülmüştür ve kirişte önemli oranda rijitlik kaybı meydana gelmiştir. Bu noktadaki rijitlik değeri 11,13 kN/mm'dir. Bu seviyeye kadar yeni bir çok kesme çatlakları ve eğilme çatlakları gözlemlenmiştir. Yük seviyesi 153,8 kN ve deplasman değeri 54 mm iken sabit moment bölgesinde beton basınç gerilmeleri altında ezilerek göçmüştür. Göçme anında rijitlik değeri 2,85 kN/mm iken süneklik oranı 3,80'dir. Kirişin göçme sonrası görüntüsü Şekil 4.28'deki gibidir.



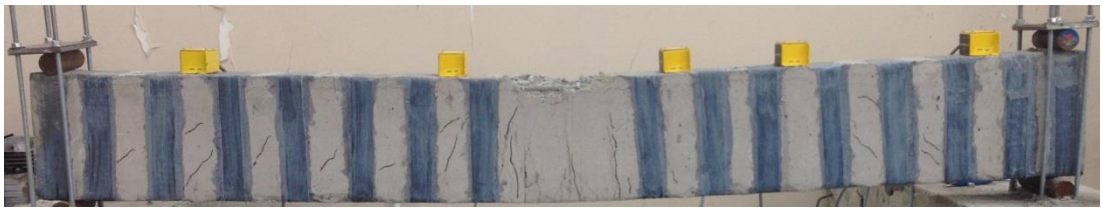
Şekil 4.27. 5 nolu deney elemanı Yük-Deplasman grafiği.



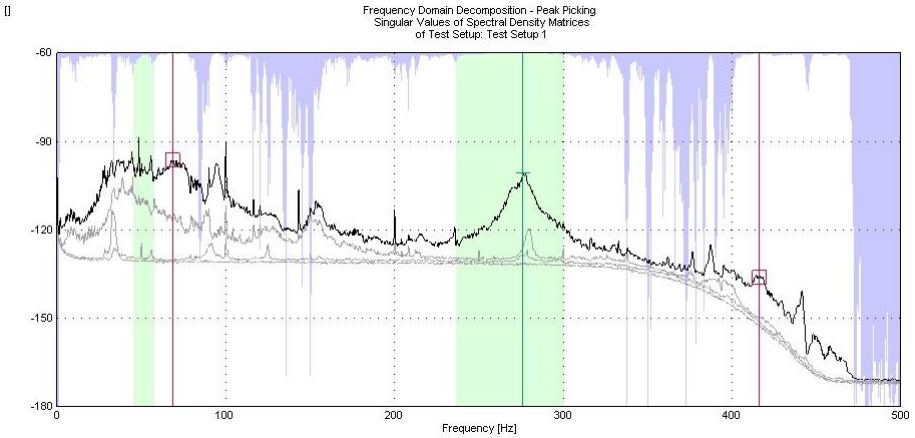
Şekil 4.28. Göçme sonrası 5 nolu deney elemanı.

4.1.5.3 Frekans ölçümü

Deney düzeneği ve ivmeölçer yerleşimi Şekil 4.29'da verilmiştir. İlk aşamada, kirişin güçlendirme uygulaması öncesi durumu için frekans ölçümü yapılmıştır. Bu duruma ait ilk üç eğilme modları sırasıyla 68,3 Hz, 276 Hz ve 416,3 Hz olarak elde edilmiştir. Bu duruma ait SYFTD Şekil 4.30'da verilmiştir.

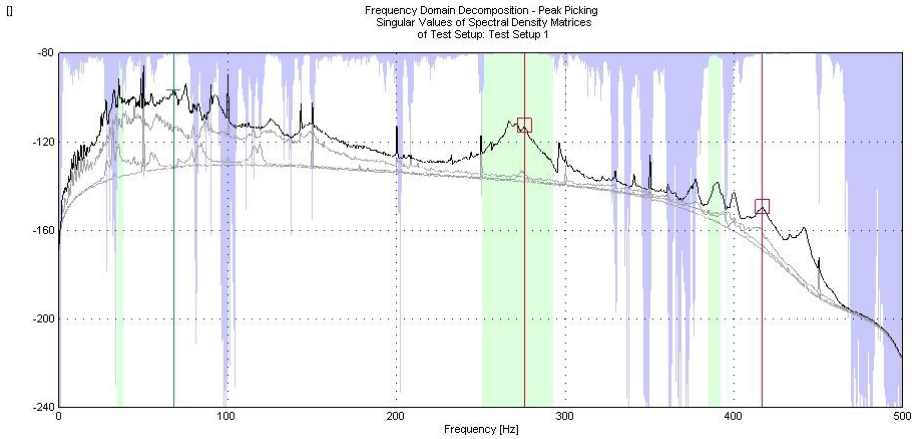


Şekil 4.29. Deney düzeneği ve ivmeölçer yerleşimi.



Şekil 4.30. 5 nolu deney elemanı güçlendirme öncesi SYFTD.

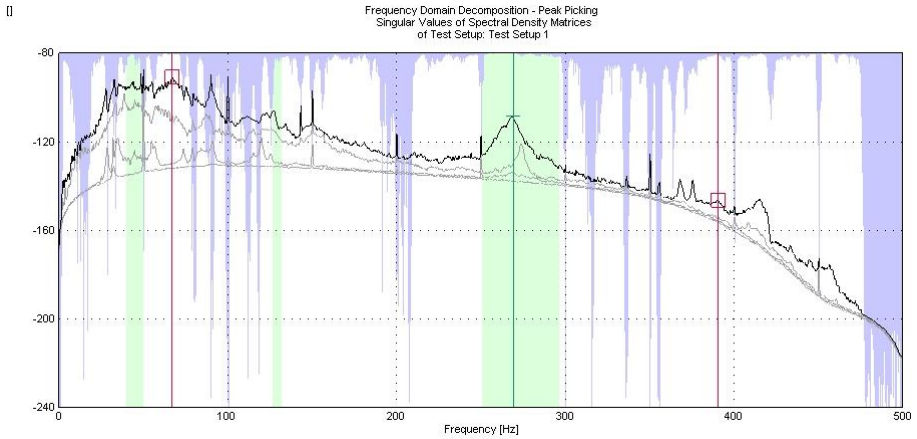
Daha sonra kiriş şeritler arası net mesafe 100 mm olacak şekilde LP şeritler ile güçlendirilmiştir. Güçlendirme sonrası frekans değerleri birinci mod için 67,4 Hz, ikinci mod için 275,1 Hz ve üçüncü mod için 416,7 olarak belirlenmiştir. Bu duruma ait SYFTD Şekil 4.31'de verilmiştir.



Şekil 4.31. 5 nolu deney elemanı güçlendirme sonrası SYFTD.

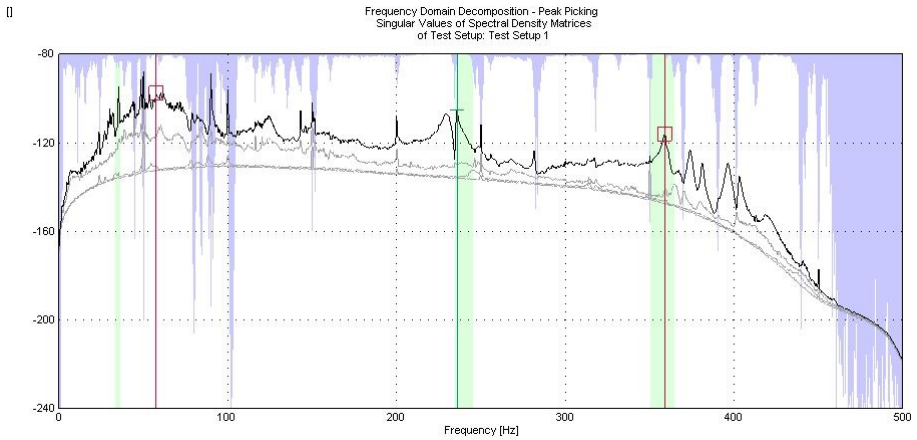
Daha sonra kirişe 120 kN yük seviyesine kadar yükleme yapılmıştır ve bu durum için frekans ölçümü gerçekleştirilmiştir. Hasarlı durum için ilk üç eğilme moduna ait

frekans değerleri sırasıyla 66,8 Hz, 269 Hz ve 390,6 Hz olarak belirlenmiştir. Hasarlı duruma ait SYFTD Şekil 4.32'de verilmiştir.



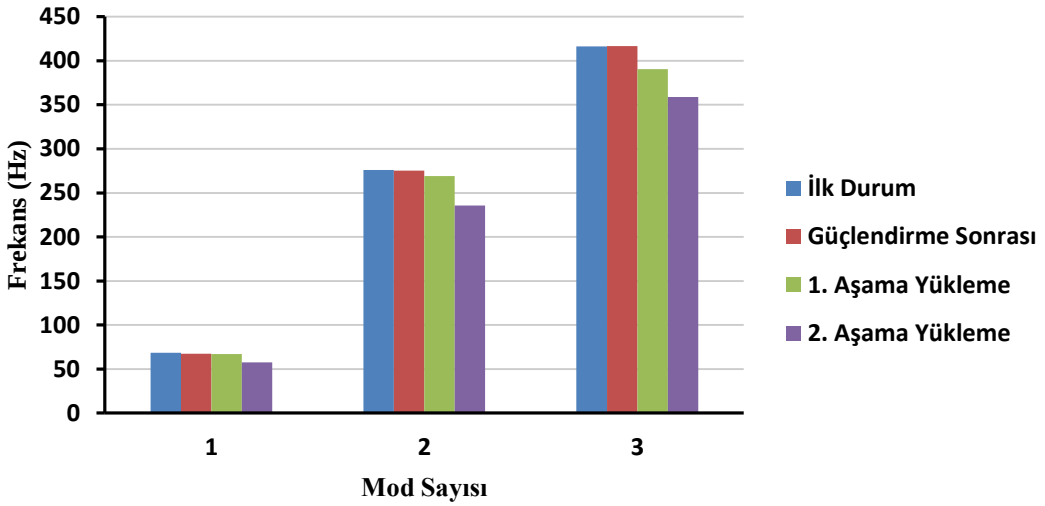
Şekil 4.32. 5 nolu deney elemanı hasarlı durum SYFTD.

Son aşamada ise, deney elemanının göçme sonrası için frekans ölçümü gerçekleştirilmiştir. Göçme sonrası için birinci mod için 57,3 Hz, ikinci mod için 235,8 Hz ve üçüncü mod için 358,9 Hz frekans değerleri elde edilmiştir. Göçme anına ait SYFTD Şekil 4.33'te verilmiştir.



Şekil 4.33. 5 nolu deney elemanı göçme sonrası SYFTD.

Deney elemanının tüm durumlar için frekans değişimi Şekil 4.34'te verilmiştir.



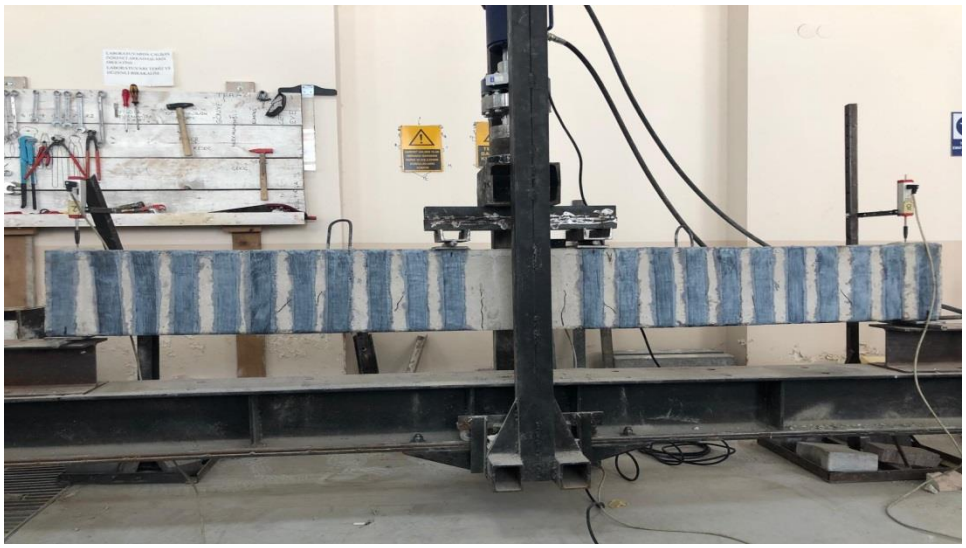
Şekil 4.34. Frekans değişimi, 4 nolu deney elemanı**.**

4.1.6 6 nolu deney elemanı

LP şeritler arası net açıklığı 50 mm olan güçlendirilmiş deney elemanıdır. Deney esnasında kirişin orta noktasından ölçülen Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.36'da verilmiştir.

4.1.6.1 1. aşama yükleme

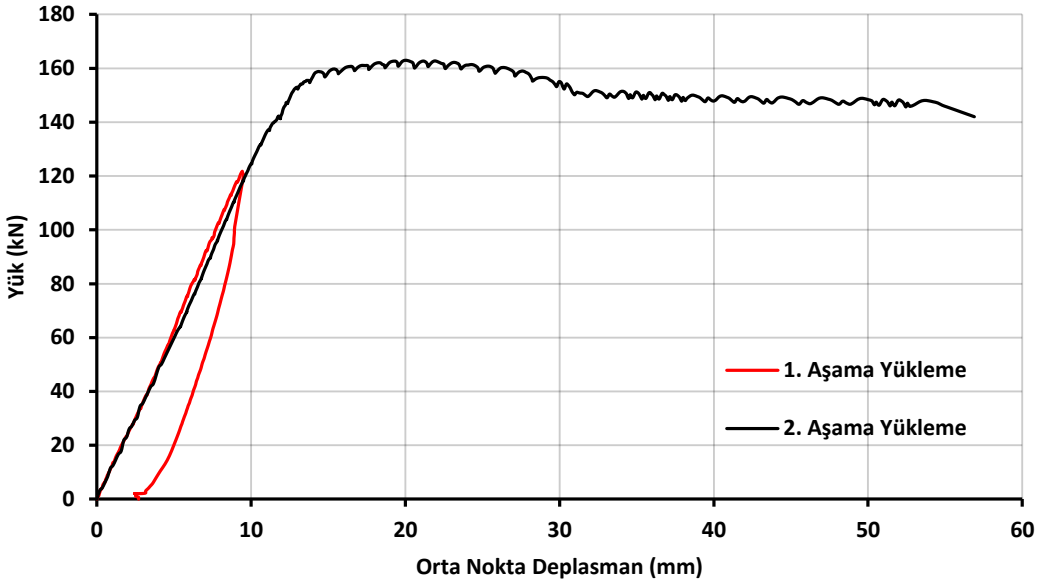
Deplasman değeri 6,1 mm ve yük 80 kN seviyesinde iken kirişin sağ açıklığında ilk eğik çatlak gözlemlenmiştir. Yüklemeye devam edildiğine kirişin sol ve sağ kesme açıklıklarında yeni eğik çatlaklar gözlemlenmiştir. 103 kN yük seviyesinde birçok kılcal düzeyde eğilme çatlağı gözlemlenmiştir ve deplasman değeri 8 mm olarak ölçülmüştür. 120kN seviyelerine çıkarken ise sabit moment bölgesindeki eğilme çatlaklarının sayısında artış gözlemlenmiştir ve bazı çatlaklar kesit ortasına doğru ilerlemiştir. Deney elemanının 1. aşama yükleme sonrası görünüşü Şekil 4.35'te verilmiştir.



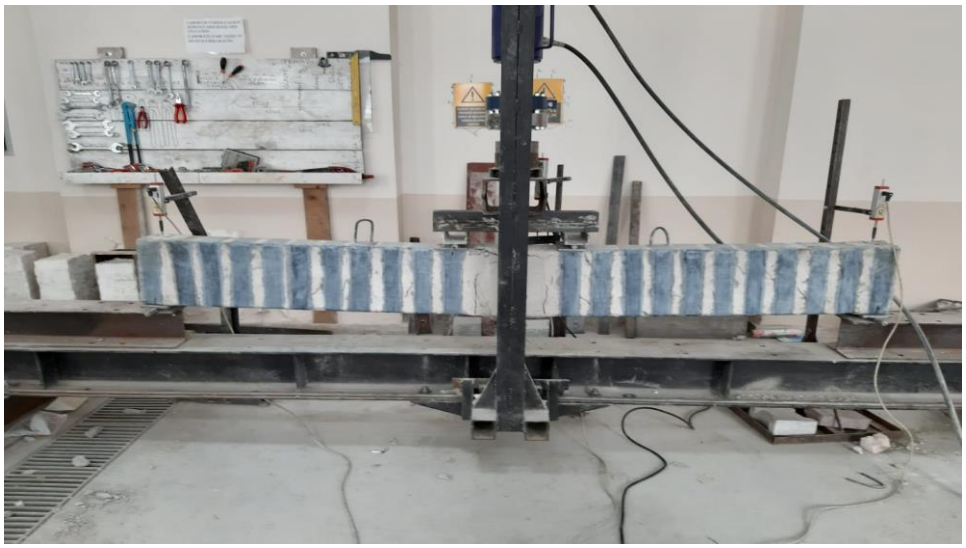
Şekil 4.35. 1. aşama yükleme sonrası 6 nolu deney elemanı.

4.1.6.2 2. aşama yükleme

Kiriş üzerinde, 108 kN yük seviyesinde kılcal düzeyde birçok eğilme çatlakları gözlemlenmiştir. Deplasman 8,5 mm ve yük seviyesi 108 kN iken sağ kesme açıklığındaki eğik çatlak LP şerit altına ilerlemiştir ancak şerit üzerinde herhangi bir bozulma veya kiriş yüzeyinden şeritin ayrılması durumları gözlemlenmemiştir. 140kN yük seviyesinde ise sağ ve sol kesme açıklıklarında ek eğik çatlaklar meydana gelmiştir. Deplasman değeri 14 mm ve yük seviyesi 157 kN iken kirişte önemli oranda rijitlik kaybı olmuştur ve alt bölgesinde bulunan çekme donatıları akma kapasitesine ulaşmışlardır. Bu noktada kiriş rijitliği 11,21 kN/mm'dir. Yüklemeye devam edildiğinde ise ek kesme çatlakları oluşmazken sabit moment bölgesinde meydana gelen eğilme çatlakları kesit ortasına kadar ilerlemiştir. Yük 145,6 kN seviyesinde ve deplasman 55 mm iken kirişin sabit moment bölgesinde beton basınç gerilmeleri altında ezilerek göçmüştür. Göçme anında rijitlik değeri 2,65 kN/mm iken süneklik oranı 3,93'tür. Göçme sonrası deney elemanının görüntüsü Şekil 4.37'de verilmiştir.



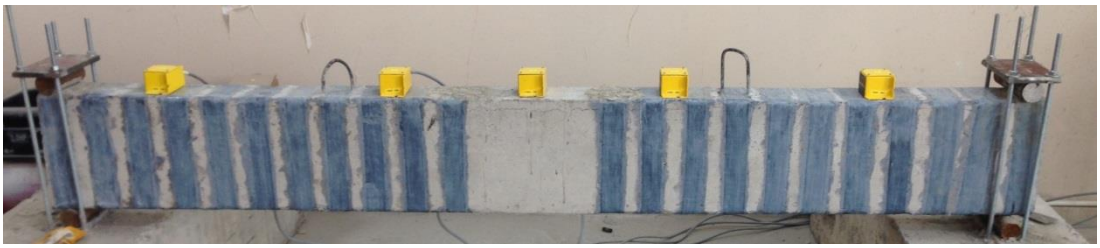
Şekil 4.36. 6 nolu deney elemanı Yük-Deplasman grafiği.



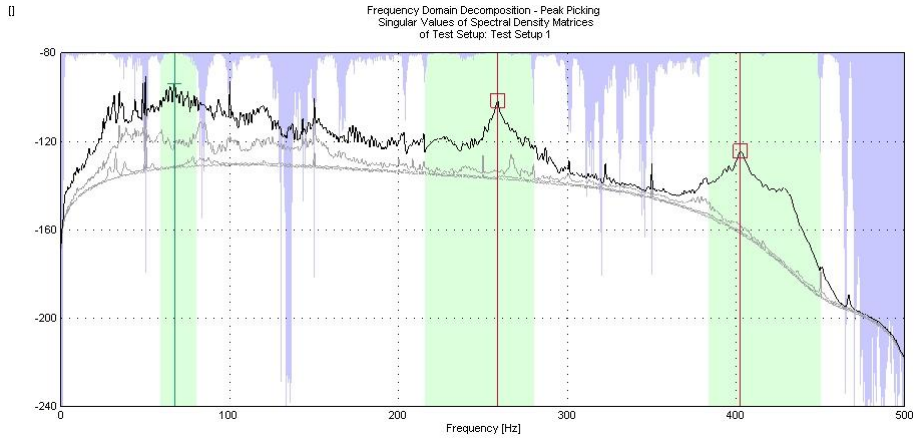
Şekil 4.37. Göçme sonrası 6 nolu deney elemanı.

4.1.6.3 Frekans ölçümü

Deney düzeneği ve ivmeölçer yerleşimi Şekil 4.38'de verilmiştir. Frekans ölçümünün ilk aşamasında, kirişin güçlendirme öncesi durumu dikkate alınmıştır. Bu duruma ait ilk üç eğilme modu için frekans değerleri sırasıyla 67,1 Hz, 259 Hz ve 402,6 Hz olarak elde edilmiştir. Bu duruma ait SYFTD Şekil 4.39'da verilmiştir.

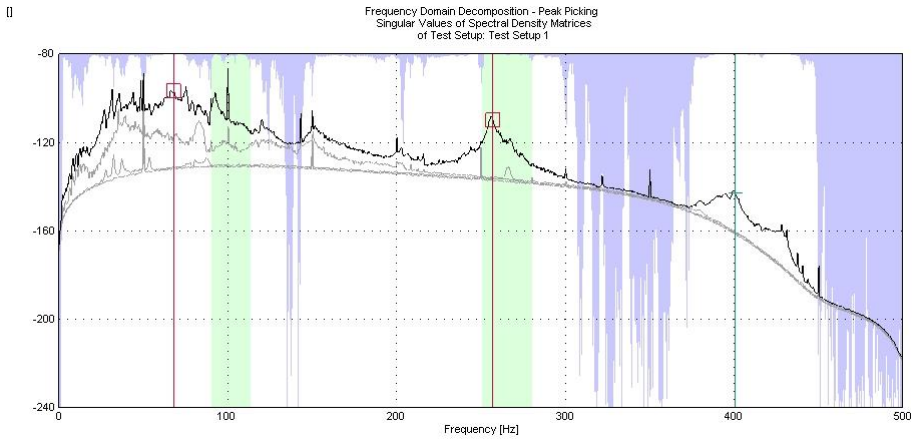


Şekil 4.38. Deney düzeneği ve ivmeölçer yerleşimi.



Şekil 4.39. 6 nolu deney elemanı güçlendirme öncesi SYFTD.

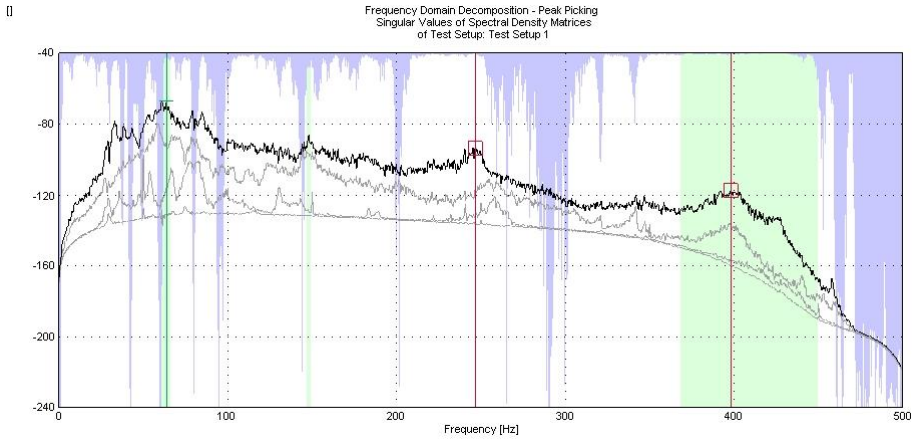
Daha sonra kiriş LP şeritler arası net mesafe 50 mm olacak şekilde güçlendirilmiştir. LP şeritler ile yapılan güçlendirme durumuna ait frekans değerleri; birinci mod için 67,8 Hz, ikinci mod için 257 Hz ve üçüncü mod için 400,6 Hz olarak belirlenmiştir. Güçlendirme sonrası SYFTD Şekil 4.40'ta verilmiştir.



Şekil 4.40. 6 nolu deney elemanı güçlendirme sonrası SYFTD.

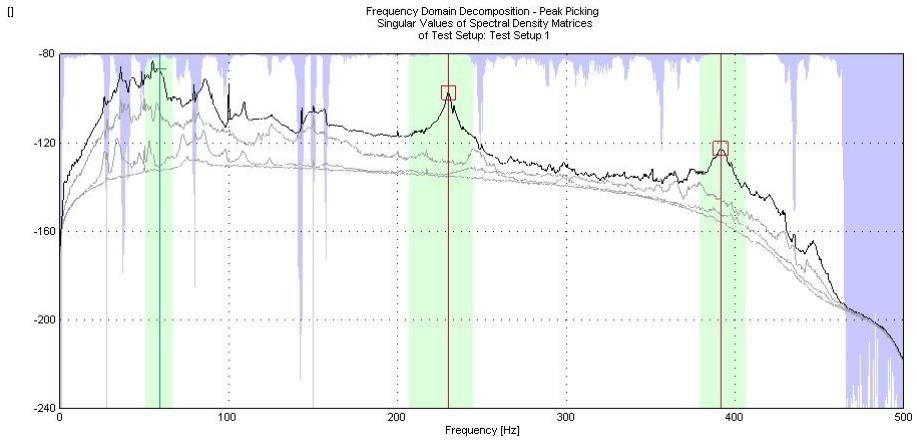
Bir sonraki aşamada, kirişe 120 kN yük seviyesinde hasar verilmiştir. Hasarlı durum için frekans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Hasarlı duruma ait ilk üç mod değerleri

sırasıyla 63,7 Hz, 246,6 Hz ve 397,9 Hz olarak elde edilmiştir. Hasarlı duruma ait SYFTD Şekil 4.41'de verilmiştir.



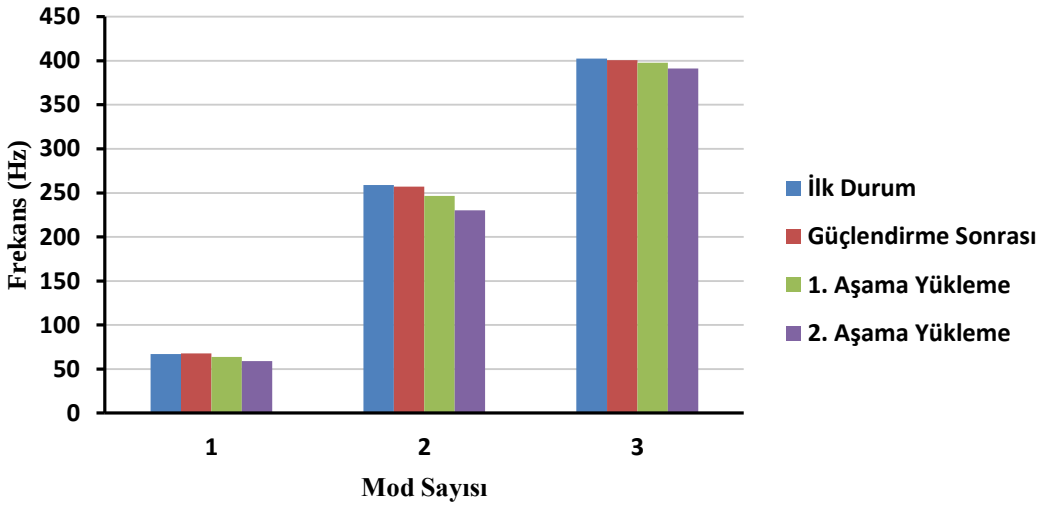
Şekil 4.41. 6 nolu deney elemanı hasar sonrası SYFTD.

Son aşamada ise, kirişin göçme sonrası frekans ölçümü gerçekleştirilmiştir. Göçme sonrasına ait frekans değerleri birinci mod için 58,8 Hz, ikinci mod için 230,2 Hz ve üçüncü mod için 391,4 Hz olarak belirlenmiştir. Göçme sonrasına ait SYTD Şekil 4.42'de verilmiştir.



Şekil 4.42. 6 nolu deney elemanı göçme sonrası SYFTD.

Deney elemanının tüm durumlar için frekans değişimi Şekil 4.43'te verilmiştir.



Şekil 4.43. Frekans değişimi, 6 nolu deney elemanı.

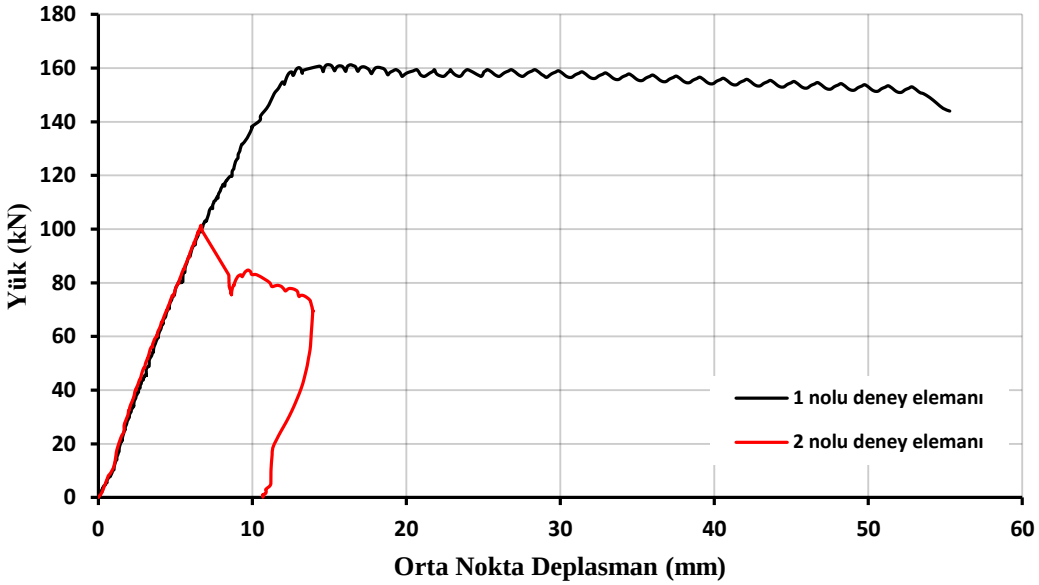
4.2 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, LP şeritler arası mesafenin davranış, kesme dayanımı, rijitlik, deplasman sünekliği ve yükleme aşamalarına göre frekans değişimi üzerine olan etkileri değerlendirilmiştir. Yükleme deneyleri ile elde edilen veriler Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018), Betonarme Binaların Tasarım ve Yapım Kuralları (TS 500), American Concrete Institute (ACI 318, ACI 440) yönetmeliklerinde verilen kesme dayanımı eşitlikleri kullanılarak yapılan hesaplamaların sonucu karşılaştırılmıştır. Frekans ölçümleri ise Bernoulli-Euler ve Timoshenko kiriş teorilerinden elde edilen frekans değerleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, deney elemanları arasında kıyaslanarak tartışılmıştır.

4.2.1 Deney elemanlarının davranışı

Bu bölümde, LP şeritler arası mesafenin davranış üzerine etkisi incelenmiştir. Deney elemanlarına ait Yük-Deplasman grafikleri gruplandırılmıştır ve karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Gruplandırma, 1 ve 2 nolu deney elemanları ile diğer deney elemanları arasında ayrı ayrı yapılmıştır. Grafiklerin karşılaştırmalı olarak incelenmesinde 2. aşama yükleme dikkate alınmıştır.

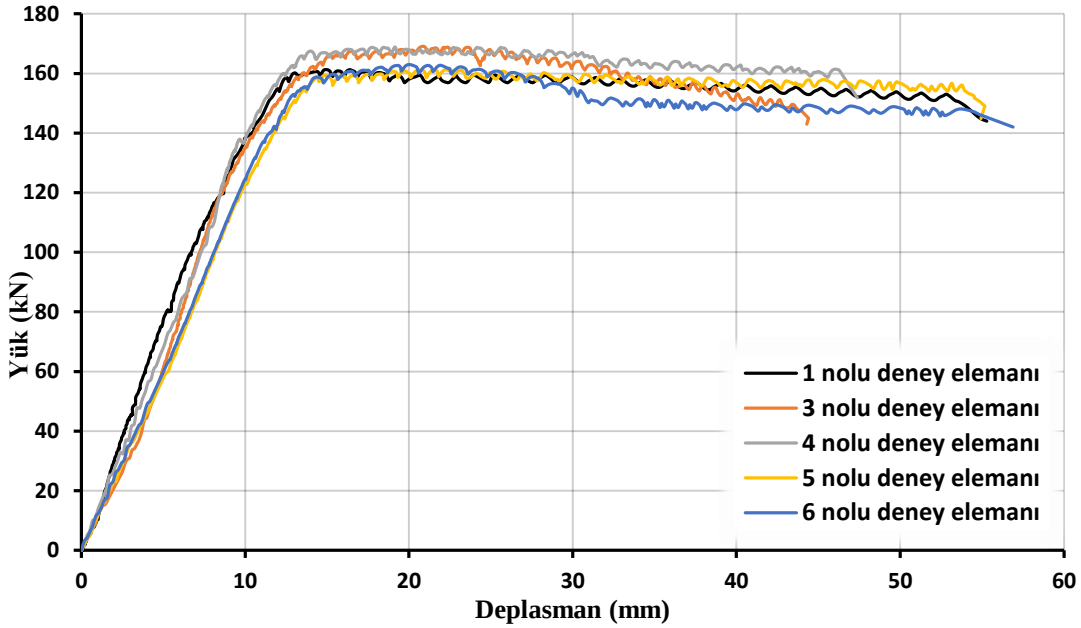
Kontrol elemanlarına ait Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.44'te verilmiştir ve birbirleriyle kıyaslanmıştır.



Şekil 4.44. Yük-Deplasman grafiği, Kontrol elemanları.

2 nolu deney elemanı kapasiteye 101 kN yük seviyesinde ve 6,7 mm deplasman değerinde ulaşırken, 1 nolu deney elemanı 160 kN yük seviyesinde ve 14 mm deplasman değerinde ulaşmıştır ve 2 nolu deney elemanına göre %60 daha fazla yük kapasitesine sahiptir. Bunların yanı sıra, 1 nolu deney elemanı sünek eğilme davranışı gösterirken 2 nolu deney elemanı kesme kırılması sonucu göçmüştür.

1 ile 3-6 deney elemanlarına ait Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.45'te verilmiştir. Deney elemanları birbirleriyle ve kontrol elemanıyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.45. Yük-Deplasman grafiği, 1 ile 3-6 nolu deney elemanları.

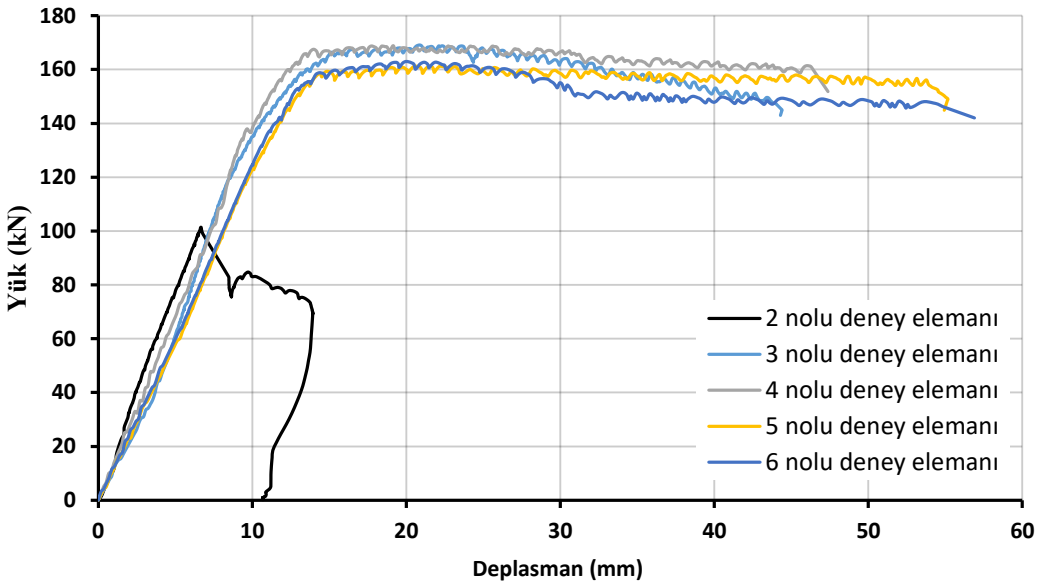
1 nolu deney elemanında çekme donatıları akma kapasitesine ulaşmış ve bu ana kadar önemli oranda rijitlik kaybı yaşamıştır. Akma anında yük 160 kN seviyesinde iken 14 mm deplasman yapmıştır. 150,5 kN yük seviyesinde ve deplasman 53,5 mm iken kiriş basınç bölgesindeki beton ezilerek sünek eğilme davranışı sergilemiştir.

Akma anına kadar, en fazla rijitlik kaybı 3 nolu deney elemanında olmuştur ve LP şeritler arası mesafe azalırken rijitlik kaybı da azalmıştır. 3 ve 4 nolu deney elemanlarında çekme donatısı akma kapasitesi sırasıyla 165 ve 164 kN yük seviyelerinde, 5 ve 6 nolu deney elemanları ise sırasıyla 158 ve 157 kN yük seviyelerinde ulaşmıştır. Akma anında deplasman sırasıyla 15,5, 14,8, 14,21 ve 14,02 mm'dir. LP şeritler arası mesafenin artmasıyla akma anına kadar daha fazla deplasman yapıldığı belirlenmiştir. 3-6 nolu deney elemanları sünek eğilme davranışı sergilemişlerdir. Göçme anındaki yük sırasıyla 148, 159,3, 153,8 ve 145,6 kN seviyelerindedir. Göçme anı deplasman ise sırasıyla 43,8, 46,5, 54,07 ve 55,12 mm'dir. LP şeritler arası mesafenin artmasıyla akma anından göçme anına kadar oluşan deplasman azalmıştır.

1 ile diğer deney elemanları karşılaştırıldığında, akma anına kadar 1 nolu deney elemanındaki rijitlik kaybı 3'ten küçükken diğerlerinden büyüktür. 3 ve 4 nolu deney elemanları akma noktasına daha yüksek yük seviyelerinde ulaşmışken 5 ve 6 nolu deney elemanlarında daha düşük seviyelerde ulaşılmıştır. 1 ile 6 nolu deney elemanları

akma anına kadar aynı deplasman yaparlarken diğer deney elemanları daha fazla deplasman yapmışlardır. Göçme anında ise, kontrol elemanı 3 ve 4 nolu deney elemanlarından daha fazla deplasman yaparken 5 ve 6 nolu deney elemanlarından daha az deplasman yapmıştır. Kontrol elemanının yük seviyesi 3 ile 6'dan büyükken 4 ve 5'ten küçüktür.

2 ile diğer deney elemanlarına ait Yük-Deplasman grafiği Şekil 4.46'da verilmiştir. Deney elemanları kontrol elemanıyla ve birbirleri içerisinde karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.46. Yük-Deplasman grafiği, 2 ile 3-6 nolu deney elemanları.

2 nolu deney elemanında çok büyük bir rijitlik kaybı olmadan 101 kN yük seviyesine kadar ulaşmıştır. Bu seviyeden sonra, kontrol elemanı daha fazla yük taşıyamamış ve taşıma kapasitesini hızla kaybederek kesme kırılması sonucu göçmüştür. Ani ve gevrek bir kırılmadır. Bu yük seviyesinde deplasman 6,7 mm'dir.

LP şeritler ile güçlendirilen 3-6 nolu deney elemanlarının yük taşıma kapasitesi kontrol elemanına göre sırasıyla %46,53, 57,72, 52,28 ve 44,16 oranında artmıştır.

LP ile güçlendirilen kirişlerde, yönetmeliklerin önerdiği sünek eğilme davranışı sağlanmıştır ve kontrol elemanına göre taşıma kapasitesi artmıştır.

Deney elemanlarının davranışı Çizelge 4.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Deney elemanlarının davranışı.

Deney Eleman No	Akma Yükü (kN)	Akma Deplasmanı (mm)	Göçme Yükü (kN)	Göçme Deplasmanı (mm)	Göçme Mekanizması
1	160	14	150,5	53,5	Eğilme
2	-	-	101	6,7	Kesme
3	165	15,5	148	43,8	Eğilme
4	164	14,8	159,3	46,5	Eğilme
5	158	14,21	153,8	54,07	Eğilme
6	157	14,02	145,6	55,12	Eğilme

4.2.2 Kesme dayanımı

LP şeritler arası mesafenin kesme dayanımı üzerine etkisi değerlendirilmiştir. Elemanların akma ve göçmede ölçülen kesme kuvveti kapasiteleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deney elemanlarının akma ve göçme yükü kapasiteleri.

Deney Eleman No	Kesme Yükü	
	Akma Yükü (kN)	Göçme Yükü (kN)
1	80	75,25
2	-	50,5
3	82,5	74
4	82	79,65
5	79	76,9
6	78,5	72,8

1 ve 2 nolu kontrol elemanları kıyaslandığında, 1 nolu deney elemanının çekme donatısı akma kapasitesine ulaşmıştır ve göçme anında kesme kapasitesi %49 oranında daha fazla ölçülmüştür.

1 nolu kontrol elemanı ile güçlendirilmiş 3-6 nolu deney elemanları kıyaslandığında, 4 ve 5 nolu deney elemanlarında kesme kuvveti kapasitesi sırasıyla %6 ve 2 oranında artmıştır. 3 ve 6 nolu deney elemanlarının ise sırasıyla %2 ve 3 daha düşük ölçülmüştür.

2 nolu kontrol elemanı LP şeritler ile güçlendirilmiş 3-6 nolu deney elemanlarıyla kıyaslandığında, göçme anındaki kesme kuvveti kapasiteleri sırasıyla %47, 58, 52 ve

44 oranında artmıştır. Kontrol elemanı gevrek kırılmışken güçlendirilmiş deney elemanlarındaki çekme donatısı akarak sünek eğilme davranışı göstermişlerdir.

4.2.3 Rijitlik

Bu bölümde deney elemanlarının rijitlikleri değerlendirilmiştir. Deney elemanlarının rijitlikleri 1. aşama yükleme ve 2. aşama yükleme olacak şekilde gruplandırılarak değerlendirilmiştir. 1. aşama yükleme için başlangıç rijitliği ve maksimum yük rijitliği, 2. aşama yükleme için ise başlangıç rijitliği, akma rijitliği ve göçme rijitliği hesaplanmıştır. Rijitlikler hesaplanırken, Yük-Deplasman grafiğinde, o ana ait yük ve deplasman değeri ile orijin noktasına çizilen doğrunun eğimi olarak hesaplanmıştır. Deney elemanlarının rijitlikleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Deney elemanlarına ait rijitlikler.

Deney Eleman No	**1. Aşama Yükleme (kN/mm)**		**2. Aşama Yükleme (kN/mm)**		
	Başlangıç Rijitliği	**Maksimum Yük Rijitliği**	**Başlangıç Rijitliği**	**Akma Rijitliği**	**Göçme Rijitliği**
1	15,05	-	-	11,43	2,81
2	15,18	15,07	-	-	-
3	14,71	14,40	13,73	10,64	3,38
4	14,53	13,32	13,25	11,08	3,43
5	13,21	13,12	11,45	11,13	2,85
6	12,78	12,69	12,28	11,21	2,65

Deney elemanlarının 1. aşama başlangıç rijitlikleri kıyaslandığında, kontrol elemanlarının daha yüksek rijitliğe sahip olduğu hesaplanmıştır. Maksimum yük seviyesinde, rijitlik kaybı en çok 4 nolu deney elemanında hesaplanmıştır. 2. aşama yüklemede ise 3 ve 4 nolu deney elemanları benzer rijitliklere sahipken 5 ve 6 nolu deney elemanları daha düşük rijitliklere sahiptir. 1 nolu kontrol elemanının akma anındaki rijitliği diğer deney elemanlarınınkine göre daha yüksektir. Ancak 3-6 elemanlarında akma rijitliğinin, LP şeritler arası mesafenin azalmasıyla arttığı belirlenmiştir. Göçme rijitliği ise, 3, 4 ve 5 elemanlarında kontrol elemanından daha fazla iken 6 nolu elemanda daha azdır.

4.2.4 Deplasman süneklik oranı

Bu bölümde deney elemanlarının deplasman süneklik oranı hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. Deplasman süneklik oranı, göçme anındaki deplasmanın akma anındaki deplasmana oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Deney elemanlarına ait deplasman süneklik oranı Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Deney elemanlarına ait deplasman süneklik oranı.

Deney Eleman No	Akmada Deplasman (mm)	Göçmede Deplasman (mm)	Deplasman Süneklik Oranı
1	14	53,5	3,82
2	-	-	-
3	15,5	43,8	2,83
4	14,8	46,5	3,14
5	14,21	54,07	3,80
6	14,02	55,12	3,93

2 nolu kontrol ani ve gevrek bir kırılma türü olan kesme kırılması sonucu göçmüştür. Bu nedenle deplasman süneklik oranı hesaplanamamıştır. Ancak diğer deney elemanlarında çekme donatısı akmış ve sünek eğilme davranışı göstermişlerdir.

Güçlendirilmiş deney elemanlarına ait deplasman süneklik oranı kıyaslandığında en fazla süneklik oranı LP şeritler arası mesafenin en az olduğu 6 nolu deney elemanında hesaplanmıştır. En düşük süneklik oranı 2,83 iken en yüksek 3,93'tür ve %40 oranında daha fazla olduğu belirlenmiştir.

1 nolu kontrol elemanı güçlendirilmiş deney elemanlarıyla kıyaslandığında, 3 ve 4 nolu deney elemanlarına ait deplasman süneklik oranları sırasıyla %26 ve %18 oranında daha az, 5 nolu deney elemanında hemen hemen aynı ve 6 nolu deney elemanında %3 daha fazla hesaplanmıştır.

LP şeritler arası mesafenin artmasıyla deplasman süneklik oranının azaldığı belirlenmiştir.

4.2.5 Kesme kuvveti hesabı

Deney elemanlarının kesme kuvveti kapasiteleri hesaplanırken TS 500, TBDY 2018, ACI 318 ve ACI 440 yönetmeliklerinin önerdiği eşitliklerden yararlanılmıştır (ACI 318-14, 2014; ACI 440R-07, 2007; TBDY-18, 2018 ve TS 500, 2000).

CFRP ile sargılanmış kirişlerin kesme kuvveti hesabı Eşitlik 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V_r = V_c + V_s + V_{cfrp} \tag{4.1}$$

Eşitlikte kullanılan simgelerin açıklaması aşağıda verilmiştir.

V_r: Toplam kesme kuvveti

V_c: Betonun kesme kuvvetine katkısı

V_s: Enine donatının kesme kuvvetine katkısı

V_{cfrp}: CFRP şeritlerin kesme kuvvetine katkısı

Betonun kesme kuvvetine katkısı Eşitlik 4.2-5'te verilmiştir.

TS 500 standardına göre;

$$V_c = 0{,}65 \times f_{ctd} \times b_w \times d \tag{4.2}$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_{mc}} \tag{4.3}$$

$$f_{ctk} = 0{,}35 \times \sqrt{f_{ck}} \tag{4.4}$$

ACI 318 standardına göre;

$$V_c = 0{,}17 \times \sqrt{f_{ck}} \times b_w \times d \tag{4.5}$$

Eşitliklerde kullanılan simgelerin açıklaması aşağıda verilmiştir.

b_w: Kiriş kesit genişliği

d: Kiriş faydalı yüksekliği

f_{ck}: Beton karakteristik basınç dayanımı

f_{ctk}: Beton karakteristik eksenel çekme dayanımı

f_{ctd}: Beton tasarım eksenel çekme dayanımı

γ_{mc}: Beton için malzeme katsayısı

Enine donatının kesme kuvvetine katkısı Eşitlik 4.6'da verilmiştir.

TS 500 ve ACI 318 standartlarına göre;

$$V_s = \frac{A_{sw}}{s} \times f_{ywd} \times d \tag{4.6}$$

Eşitlikte kullanılan simgelerin açıklaması aşağıda verilmiştir.

A_{sw}: Enine donatı toplam kesit alanı

f_{ywd}: Enine donatı tasarım akma dayanımı

s: Etriye aralığı

CFRP şeritlerin kesme kuvvetine katkısı Eşitlik 4.7-10'da verilmiştir.

TBDY 2018'e göre;

$$V_{cfrp} = \frac{2 \times n_{cfrp} \times t_{cfrp} \times w_{cfrp} \times E_{cfrp} \times \varepsilon_{cfrp} \times d}{s_f} \tag{4.7}$$

ACI 440 yönetmeliğine göre;

$$V_{cfrp} = \frac{A_f \times f_{fv} \times d}{s} \times (sin\theta + cos\theta) \tag{4.8}$$

$$A_f = 2 \times n_{cfrp} \times t_{cfrp} \times w_{cfrp} \tag{4.9}$$

$$f_{fv} = E_{cfrp} \times \varepsilon_{cfrp} \tag{4.10}$$

Eşitliklerde kullanılan simgeler aşağıda açıklanmıştır.

A_f: CFRP şerit enkesit alanı

E_{cfrp}: CFRP elastisite modülü

ε_{cfrp}: CFRP birim uzaması

f_{fv}: CFRP şerit kopma gerilmesi

n_{cfrp}: Tek yüzdeki CFRP sayısı

t_{cfrp}: CFRP etkili kalınlığı

s_f: CFRP şerit aralığı

w_{cfrp}: CFRP şerit genişliği

θ: Kiriş ekseni ile CFRP şerit yapıştırılma açısı

Hesaplamalarda etriye donatısı kesit alanı 25 mm^2 ve akma dayanımları 275 Mpa alınmıştır. CFRP şeritlerin elastisite modülü 230000 Mpa ve birim uzama değeri 0,004 mm/mm olarak alınmıştır. Hesaplamalar yükleme düzeneği dikkate alınarak yapılmıştır. Hesaplanan ve ölçülen değerler Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Deney elemanlarına ait hesaplanan ve ölçülen kesme kuvveti.

Deney Elemanı	**sf (mm)**	**Kesme Kuvveti (kN)**		
		Deney	**Hesaplanan**	
			TS 500 ve TBDY 2018	**ACI 318 ve ACI 440**
2	-	50,5	50,8	39,6
3	250	74,0	64,6	53,4
4	200	79,65	68,0	56,8
5	150	76,9	73,8	62,6
6	100	72,8	85,2	74,0

Yapılan hesaplamalara göre, TS 500'deki kesme dayanımına beton katkısı eşitliği ACI 318 yönetmeliğindekine göre daha yüksek hesaplandığı için TS 500 ve TBDY 2018 yönetmeliklerine göre hesaplanan kesme kuvveti kapasitesi ACI 318 ve ACI 440

yönetmeliklerine göre daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. 2 nolu kontrol elemanının ölçülen kesme kapasitesi dayanımı TS 500 ve TBDY 2018 ile hemen hemen aynı hesaplanmışken ACI 318 ve ACI 440 yönetmeliklerine göre %21,58 daha düşük hesaplanmıştır. Güçlendirilmiş elemanlarının kesme kuvveti kapasitesi hesaplanırken TS 500 ve TBDY 2018 yönetmeliklerine ait eşitlikler ile daha başarılı sonuç elde edilmiştir.

4.2.6 Frekans Değişimi

Bu bölümde LP şeritler arası mesafenin ve yükleme aşamalarının frekans değişimi üzerine etkisi değerlendirilmiştir. Deney elemanlarına ait frekans değişimi Çizelge 4.6-10'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. 2 nolu deney elemanı, frekans değişimi.

Mod Sayısı	İlk Durum	Kırılma Sonrası	Değişim (%)
1	67,2	53,4	20,54
2	271,2	196,5	27,54
3	414,1	322,8	22,05

Deney elemanına ait yükleme sonrası hesaplanan frekans değişimi Çizelge 4.6'da verilmiştir. İlk durum ve kırılma sonrası dinamik ölçümlerine göre en büyük frekans değişimi 2. eğilme modunda gerçekleşmiştir. Mod sayısına göre değişim sırasıyla %20,54, 27,54 ve 22,05 oranında azalma hesaplanmıştır.

Çizelge 4.7 3 nolu deney elemanı, frekans değişimi.

Mod Sayısı	İlk Durum	Güçlendirme Sonrası	Değişim (%)	1. Aşama Yükleme	Değişim (%)	2. Aşama Yükleme	Değişim (%)
1	68,9	68,1	1,16	61,8	10,30	54,2	21,34
2	270	271	-0,37	235,6	12,74	214,4	20,59
3	419,4	418	0,33	383,5	8,56	360	14,16

Deney elemanına ait güçlendirme ve yükleme aşamalarına göre hesaplanan frekans değişimi Çizelge 4.7'de verilmiştir. İlk durum ve güçlendirme sonrası dinamik ölçümlerinde önemli bir farklılık belirlenmemiştir ve frekans değerleri hemen hemen aynıdır. 1. aşama yükleme sonrasında, mod sayılarına karşılık gelen frekanslarda, ilk duruma göre, ortalama %10 oranında azalma hesaplanmıştır. 2. aşama yükleme sonrası dinamik ölçümlerde ise mod sayılarına göre sırasıyla %21,34, 20,59 ve 14,16 azalma

hesaplanmıştır. 2. aşama yükleme sonrasındaki frekans değişiminin daha fazla olması artan hasar durumundan kaynaklanmaktadır. 2 ve 3 nolu elemanlarında, son durumda benzer frekans değişimleri hesaplanmıştır. Dinamik ölçümler açısından bu 200 mm aralıklarla LP şeritler ile güçlendirmenin başarısız olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.8. 4 nolu deney elemanı, frekans değişimi.

Mod Sayısı	İlk Durum	Güçlendirme sonrası	Değişim (%)	1. Aşama Yükleme	Değişim (%)	2. Aşama Yükleme
1	68,1	67,6	0,73	63,7	6,46	-
2	262	261,5	0,19	245,1	6,45	-
3	392,3	391,8	0,13	378,9	3,42	-

Deney elemanına ait güçlendirme ve yükleme aşamalarına göre frekans değişimi Çizelge 4.8'de verilmiştir. Güçlendirme sonrasında ilk duruma göre önemli farklılıklar belirlenmemiştir ve frekans değerleri yaklaşık olarak aynı ölçülmüştür. 1. aşama yükleme sonrası frekans değeri sırasıyla %6,46, 6,45 ve 3,42 oranında azalmıştır. 2. aşama yükleme sonrasında mod sayılarına göre frekans değerleri belirlenemediği için değişim hesaplanamamıştır.

Çizelge 4.9. 5 nolu deney elemanı, frekans değişimi.

Mod Sayısı	İlk Durum	Güçlendirme Sonrası	Değişim (%)	1. Aşama Yükleme	Değişim (%)	2. Aşama Yükleme	Değişim (%)
1	68,3	67,4	1,32	66,8	2,20	57,37	16,00
2	276	275,1	0,33	269	2,54	235,8	14,57
3	416,3	416,7	-0,10	390,6	6,17	358,9	13,79

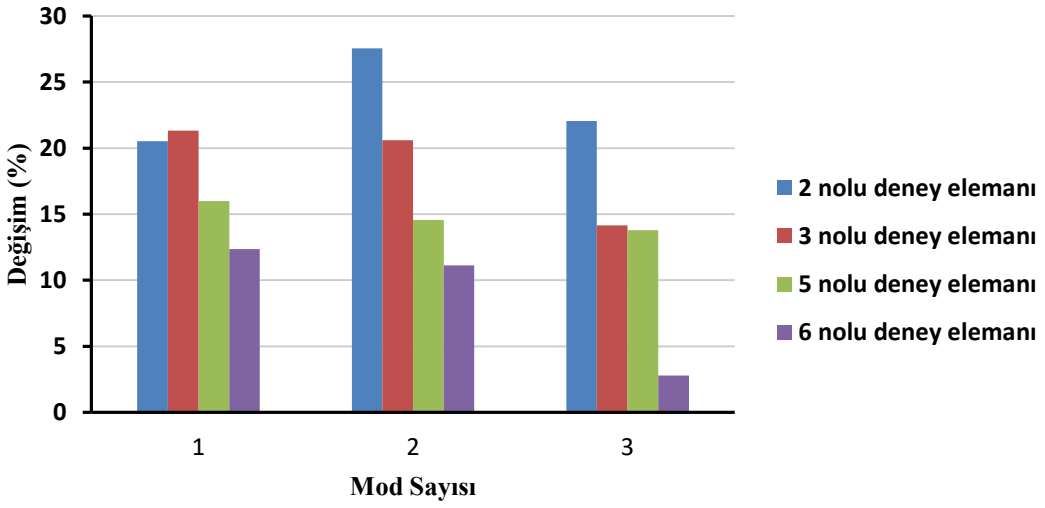
Deney elemanına ait güçlendirme ve yükleme aşamalarına göre hesaplanan frekans değişimi Çizelge 4.9'da verilmiştir. Güçlendirme sonrasında ölçülen frekans değerleri ilk duruma göre farklılık göstermemiştir. 1. aşama yükleme sonrasında mod sayısına karşılık gelen frekans değerlerinde ilk duruma göre sırasıyla %2,20, 2,54 ve 6,17 oranında azalma hesaplanmıştır. Bu durum 3 ve 4 nolu deney elemanlarıyla kıyaslandığında, frekans değişim oranı daha düşük belirlenmiştir. 2. aşama yükleme sonrasında frekans değerleri mod sayısına göre sırasıyla %16,00, 14,57 ve 13,79 oranında azalma gözlemlenmiştir. Bu durum 2 ve 3 nolu deney elemanlarıyla kıyaslandığında frekans değişim oranı daha düşük belirlenmiştir. Buna göre, 100 mm aralıklarla LP şeritler ile güçlendirmenin başarılı olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.10. 6 nolu deney elemanı, frekans değişimi.

Mod Sayısı	İlk Durum	Güçlendirme Sonrası	Değişim (%)	1. Aşama Yükleme	Değişim (%)	2. Aşama Yükleme	Değişim (%)
1	67,1	67,8	-1,04	63,7	5,07	58,8	12,37
2	259	257	0,77	246,6	4,79	230,2	11,12
3	402,6	400,6	0,50	397,9	1,17	391,4	2,78

Deney elemanına ait güçlendirme ve yükleme aşamalarına göre hesaplanan frekans değişimi Çizelge 4.10'da verilmiştir. Güçlendirme sonrası ölçülen frekans değerleri ilk duruma göre değişiklik göstermemiştir. 1 aşama yükleme sonrası frekans değişimi mod sayılarına göre sırasıyla %5,07, 4,79 ve 1,17 oranında azalmıştır. 5 nolu elemana göre frekans değişimi oranı artarken 3 ve 4 nolu deney elemanlarına göre daha az hesaplanmıştır. 2. aşama yükleme sonrası frekans değişimi ilk duruma göre %12,37, 11,12 ve 2,78 oranında azalmıştır. Bu durum 2, 3 ve 5 nolu deney elemanlarıyla kıyaslandığında frekans değişim oranı daha azdır. Buna göre, 50 mm aralıklarla LP şeritler ile yapılan güçlendirmenin başarılı sonuç verdiği söylenebilir.

Deney elemanlarının 2. aşama yükleme sonrasına ait frekans değişim grafiği Şekil 4.47'de verilmiştir.



Şekil 4.47. Deney elemanlarının frekans değişim grafiği.

4.2.7 Eğilme titreşimi hesabı

Kirişlerin eğilme titreşimlerinin hesabında Bernoulli-Euler kiriş teorisi ve Timoshenko kiriş teorisi kullanılmıştır. Bernoulli-Euler kiriş teorisinde kayma gerilmeleri ihmal

edilerek yalnızca eğilme etkisi dikkate alınmıştır. Öte taraftan, Timoshenko kiriş teorisi Bernouilli-Euler kiriş teorisine ek olarak kayma gerilmelerini de dikkate almıştır. Bu yöntemler yardımıyla deney elemanlarının eğilme titreşimleri teorik olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kirişler basit mesnetli olarak dikkate alınmıştır (Yerlici ve Luş, 2014; Chopra, 2007).

Bernoulli-Euler kiriş teorisine göre;

$$\omega_i = \frac{i^2\pi^2}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \tag{4.11}$$

$$f = \frac{w_i}{2\pi} \tag{4.12}$$

Eşitlik 4.11 ve 4.12 kullanılarak hesaplanmıştır. Eşitliklerde kullanılan simgelerin açıklaması aşağıda verilmiştir.

A: Kesit alanı

E: Elastisite modülü

f: Doğal frekans (Hz)

i: Mod sayısı

I: Atalet momenti

L: Kiriş uzunluğu

ω_i: i'nci mod için açısal frekans (rad/s)

ρ: Malzeme özgül ağırlığı

Timoshenko kiriş teorisine göre;

$$\omega_i = \omega_i^{BE}\frac{1}{\sqrt{1+i^2\pi^2\alpha_L^2\frac{E}{K_sG}}} \tag{4.13}$$

$$K_s = \frac{10(1+\nu)}{12+11\nu} \tag{4.14}$$

$$\alpha_L = \frac{1}{L}\sqrt{\frac{I}{A}} \tag{4.15}$$

Eşitlik 4.13-15 kullanılarak hesaplanmıştır. Eşitliklerde kullanılan simgelerin açıklaması aşağıda verilmiştir.

G: Kayma modülü

K_s: Shear faktörü (Dikdörtgen kesit için)

v: Poisson oranı

α_L: Kiriş derinliği katsayısı

ω_i^{BE}: Bernoulli-Euler açısal frekans değeri

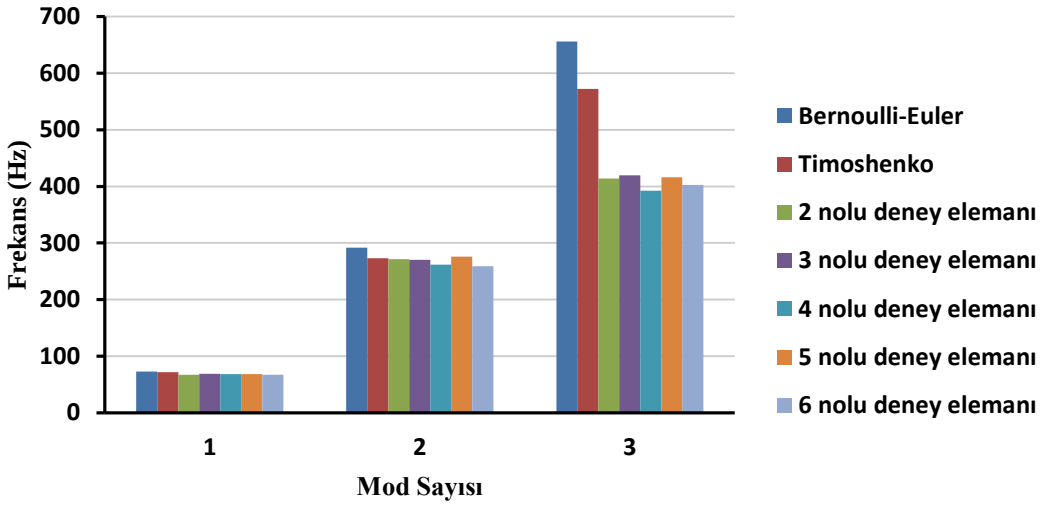
Hesaplamalarda C20 beton sınıfı için, elastisite modülü 28000 Mpa, kayma modülü 11200 Mpa, poisson oranı 0.2 ve dikdörtgen kesit için shear faktör 0,845 olarak alınmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen frekans değerleri ile deney elemanlarının ilk duruma ait frekans değerleri Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Hesaplanan frekans değerleri.

	Frekans Değerleri (Hz)		
	Mod Sayısı (i)		
	1	**2**	**3**
Bernoulli-Euler	72,88	291,54	655,96
Timoshenko	71,64	273,05	572,02
2 nolu deney elemanı	67,20	271,20	414,10
3 nolu deney elemanı	68,90	270,00	419,40
4 nolu deney elemanı	68,10	262,00	392,30
5 nolu deney elemanı	68,30	276,00	416,30
6 nolu deney elemanı	67,10	259,00	402,60

Bernoulli-Euler kiriş teorisine göre yapılan frekans hesaplamaları Timoshenko kiriş teorisine kıyasla mod sayılarına göre sırasıyla %1,73, 6,77 ve 14,67 oranında daha fazla olduğu belirlenmiştir. Timoshenko kiriş teorisine göre yapılan hesaplamalara göre daha düşük frekans değerlerinin elde edilmesi, Bernoulli-Euler kiriş teorisinde kayma gerilmeleri etkisinin dikkate alınmamasından kaynaklanmıştır. Güçlendirilmiş kirişlerin ilk duruma ait eğilme frekanslarının hesaplanmasında Timoshenko kiriş

teorisi eşitliği daha başarılı olmuştur. Teorik hesaplamalar ile deney elemanlarına ait frekans değeri karşılaştırılmalı olarak Şekil 4.48'de sunulmuştur.



Şekil 4.48. Teorik hesaplamalar ile deney elemanlarına ait frekans değerleri.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, 1 adet yeterli kesme donatılı ve 5 adet yetersiz kesme donatılı toplam altı adet kiriş test edilmiştir. Söz konusu deney elemanlarından yeterli kesme donatılı (1 nolu deney elemanı) ve kesme donatısı yetersiz (2 nolu deney elemanı) kontrol elemanı olarak belirlenmiştir ve güçlendirme uygulaması yapılmamıştır. 3, 4, 5 ve 6 nolu deney elemanları LP şeritler ile güçlendirilmiştir. Şeritler arası mesafe sırasıyla 200, 150, 100 ve 50 mm olarak uygulanmıştır. Yapılan testlere göre, deney elemanlarının davranışları, rijitlik, süneklik, kesme dayanımları ve frekans değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

LP şeritler ile güçlendirilen 3-6 nolu deney elemanlarının yük taşıma kapasitesi 2 nolu kontrol elemanına göre sırasıyla %46,53, 57,72, 52,28 ve 44,16 oranında artmıştır. Kontol elemanının aksine, güçlendirilmiş elemanlarda çekme donatısı akma kapasitesine ulaşmış ve basınç bölgesindeki betonun ezilmesiyle kirişler göçmüştür. Böylece sünek eğilme davranışı elde edilmiştir.

Güçlendirilmiş deney elemanları kesme yükü kapasitesi 1 nolu kontrol elemanının akma ve göçme anındaki kesme yükü kapasitesine ulaşmışlardır.

Güçlendirilen deney elemanlarında, LP şeritler arası mesafenin azalmasıyla akma rijitliklerinin arttığı belirlenmiş ve 1 nolu kontrol elemanıyla hemen hemen aynı rijitliklerde oldukları hesaplanmıştır. Göçme rijitliği ise, 3-5 nolu deney elemanlarında, 1 nolu kontrol elemanına göre sırasıyla %20,28, 22,06 ve 1,4 oranında artarken 6 nolu deney elemanında %6,04 oranında azalmıştır.

Güçlendirilen deney elemanlarının deplasman süneklik oranı, LP şeritler arası mesafenin azalmasıyla artmıştır ve yaklaşık %40 oranında hesaplanmıştır. Kontrol elemanına göre, 3 ve 4 nolu deney elemanlarına ait deplasman süneklik oranları sırasıyla %26 ve %18 oranında daha az, 5 nolu deney elemanında hemen hemen aynı ve 6 nolu deney elemanında %3 daha fazla hesaplanmıştır.

TS 500 ve TBDY 2018 yönetmeliklerine göre hesaplanan kesme kuvveti kapasitesi ACI 318 ve ACI 440 yönetmeliklerine göre daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Güçlendirilmiş elemanlarının kesme kuvveti kapasitesi hesaplanırken TS 500 ve

TBDY 2018 yönetmeliklerine ait eşitlikler kullanılarak, deneysel verilerle daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan dinamik ölçümler sonucunda, deney elemanlarının LP şeritler ile güçlendirilmesi sonucunda, ilk duruma göre belirgin frekans değişimi hesaplanmamıştır. Bu durumun, LP şeritlerin oldukça hafif olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

1. aşama yükleme ile 2. aşama yükleme durumları dikkate alındığında, artan hasar durumundan dolayı frekans değişimi 2. aşama yüklemede daha fazla gerçekleşmiştir.

LP şeritler arası mesafenin azalmasıyla frekans değişim oranının azaldığı belirlenmiştir.

Dinamik ölçümler açısından, frekans değişimleri ve frekans değişim oranları incelendiğinde, 200 mm aralıklarla yapılan güçlendirme başarısız sonuç elde ederken, 100 ve 50 mm aralıklarla yapılan güçlendirmeden başarılı sonuç elde edilmiştir.

Bernoulli-Euler kiriş teorisine göre yapılan frekans hesaplamaları Timoshenko kiriş teorisine kıyasla mod sayılarına göre sırasıyla %1,73, 6,77 ve 14,67 oranında daha fazla olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, güçlendirilmiş kirişlerin ilk duruma ait eğilme frekanslarının hesaplanmasında Timoshenko kiriş teorisi eşitliği deneysel sonuçlar ile daha yakın hesaplanmıştır.

5.2 Öneriler

Farklı mesnet koşullarının kirişlerin dinamik özelliklerine etkisi araştırılmalıdır.

Çerçeve sistemlerde, hasarsız ve hasarlı durumlar için güçlendirilmesi üzerine çalışma yapılmalıdır ve dinamik özelliklere etkisi araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

ACI Committee 318, 2014. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14), American Concrete Institute, Detroit, USA.

ACI Committee 440, 2007. Report on fiber reinforced plastic (FRP) reinforcement for concrete structures (ACI 440R-07), American Concrete Institute, Detroit, USA.

Adhikary, B. B. ve Mutsuyoshi, H., 2004. Behavior of concrete beams strengthened in shear with carbon-fiber sheets. Journal of Composites for Construction, 8, 3, 258–264.

Anil, Ö., 2006. Improving shear capacity of RC T-beams using CFRP composites subjected to cyclic load. Cement and Concrete Composites, 28, 7, 638–649.

Baghiee, N., Esfahani, R. M. ve Moslem, K., 2009. Studies on damage and FRP strengthening of reinforced concrete beams by vibration monitoring. Engineering Structures, 31, 4, 875–893.

Barros, J. A. O. ve Dias, S. J. E., 2006. Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams. Cement and Concrete Composites, 28, 3, 276–292.

Bonfiglioli, B., Pascale, G. ve Mingo, S.M.D., 2004. Dynamic testing of reinforced concrete beams damaged and repaired with fiber reinforced polymer sheets, Journal of Materials in Civil Engineering, 16, 5, 400–406.

Capozucca, R., 2009. Static and dynamic response of damaged RC beams strengthened with NSM CFRP rods. Composite Structures, 91, 3, 237–248.

Capozucca, R., 2013. A reflection on the application of vibration tests for the assessment of cracking in PRC/RC beams. Engineering Structures, 48, 508–518.

Capozucca, R., 2013. Assessment of CFRP strengthened RC beams through dynamic tests. Composites Part B: Engineering, 46, 69–80.

Capozucca, R., Domizi, J. ve Magagnini, E., 2016. Damaged RC beams strengthened with NSM CFRP rectangular rods under vibration in different constrain conditions. Composite Structures, 154, 660–683.

Capozucca, R., 2009. Static and dynamic response of damaged RC beams strengthened with NSM CFRP rods. Composite Structures, 91, 3, 237–248.

Capozucca, R. ve Cerri, M. N., 2002. Static and dynamic behaviour of RC beam model strengthened by CFRP-sheets. Construction and Building Materials, 16, 2, 91–99.

Capozucca, R. ve Magagnini, E., 2016. Vibration of RC beams with NSM CFRP with unbonded/notched circular rod damage. Composite Structures, 144, 108–130.

Capozucca, R. ve Magagnini, E., 2018. Experimental vibration response of homogeneous beam models damaged by notches and strengthened by CFRP lamina. Composite Structures, 206, 563–577.

Chaallal, O., Nollet, M. J. ve Perraton, D., 1998. Shear strengthening of RC beams by externally bonded side CFRP strips. Journal of Composites for Construction, 2, 2, 111–113.

Chopra, A. K., 2007. Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering, Third Edition, Pearson/Prentice Hall, New Jersey, United States.

De Lorenzis, L. ve Nanni, A., 2001. Shear strengthening of reinforced concrete beams with near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods. ACI Structural Journal, 98, 1, 60–68.

Ersoy, U., Özcebe, G. ve Tankut, T., 2010. Reinforced concrete, METU Press, Ankara.

Kachlakev, D. ve McCurry, D. D., 2000. Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates. Composites Part B: Engineering, 31, 6–7, 445–452.

Khalifa, A. ve Nanni, A., 2000. Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites. Cement and Concrete Composites, 22, 3, 165–174.

Khalifa, A. ve Nanni, A., 2002. Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites. Constr Build Mater, 16, 3, 135–146.

Lee, H.K., Cheong, S.H., Ha, S.K. ve Lee, C.G., 2011. Behavior and performance of RC T-section deep beams externally strengthened in shear with CFRP sheets. Composite Structures, 93, 2, 911–922.

Mertoğlu, Ç., 2009. Kesmeye karşı cfrp şeritlerle güçlendirilen betonarme kirişlerin davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Norris, T., Saadatmanesh, H. ve Ehsani, M. R., 1997. Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets. Journal of Structural Engineering, 123, 7, 903–911.

Rizzo, A. ve De Lorenzis, L., 2009. Behavior and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement. Construction and Building Materials, 23, 4, 1555–1567.

TBDY-18, 2018. Türkiye bina deprem yönetmeliği deprem etkisi altında binaların tasarımı için esaslar, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

TS 500, 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Toptaş, T., 2009. Kesme hasarlı betonarme kirişlerin cfrp ile rehabilitasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Yerlici, V. ve Luş, H., 2014. Yapı dinamiğine giriş, Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi, İstanbul.

Zhang, Z. ve Hsu, C.T.T., 2005. Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon-fiber-reinforced polymer laminates. Journal of Composites for Construction, 9, 2, 158–169.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı **:** Ramazan Oruç

Adres **:** Aksaray Üni. İnşaat Müh. Böl. MERKEZ/AKSARAY

E-posta adresi **:** ramazanoruc@aksaray.edu.tr

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans **:** Anadolu Üniversitesi, 2011-2016

Yüksek Lisans **:** Aksaray Üniversitesi, 2016-2019

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Müh. Bölümü/Araştırma Görevlisi