
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

CFRP ŞERİTLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BOŞLUKLU ÇİFT DOĞRULTULU BETONARME DÖŞEMELERİN ZIMBALAMA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE DAVRANIŞIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ

Cengizhan DURUCAN

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KASIM 2015

Cengizhan DURUCAN tarafından hazırlanan "CFRP ŞERİTLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BOŞLUKLU ÇİFT DOĞRULTULU BETONARME DÖŞEMELERİN ZIMBALAMA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE DAVRANIŞIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Özgür ANIL

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……..……..

Başkan : Prof. Dr. Barış Binici

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ……..……

Üye : Prof. Dr. Kurtuluş SOYLUK

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...…….……...

Üye : Doç. Dr. Alper BÜYÜKKARAGÖZ

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

Üye : Doç. Dr. Mehmet BARAN

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

Tez Savunma Tarihi: 11/11/2015

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

……..……

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

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

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Cengizhan Durucan

11.11.2015

CFRP ŞERİTLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BOŞLUKLU ÇİFT DOĞRULTULU BETONARME DÖŞEMELERİN ZIMBALAMA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE DAVRANIŞIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ

(Doktora Tezi)

Cengizhan DURUCAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2015

ÖZET

Bu tez çalışmasında kare geometriye sahip olan boşluklar içeren 8 adet betonarme döşeme dıştan yapıştırılan CFRP şeritler kullanılarak güçlendirilmiştir. Döşemelerin alt ve üst yüzlerinde ızgara şeklinde donatılar kullanılmıştır. Döşemelerin güçlendirilmesi için döşeme alt yüzünde ve boşluk köşelerinde dıştan yapıştırılan CFRP şeritler kullanılmıştır. Pratik şekilde uygulanan güçlendirme işleminin yapıları kullanan insanlara rahatsızlık vermeden, yapının görünüşünü bozmadan ve çok zaman almadan uygulanabilir olması bu sistemin CFRP kullanılarak uygulanan diğer güçlendirme yöntemlere göre avantajlarıdır. Yapılan deneyler sonrasında, uygulanan güçlendirme sisteminin başarılı sonuçlar verdiği, boşluksuz deney elemanının zımbalama dayanımının pratik güçlendirme işlemi sayesinde ortalama olarak yakalandığı görülmüştür. Deney çalışmasından elde edilen sonuçlar şartnameler tarafından önerilen denklemler ile karşılaştırılmıştır. Denklemlerin genelde zımbalama kapasitelerini deneysel sonuçlardan daha büyük verdikleri görülmüştür. Deney elemanlarının üç boyutlu sonlu eleman analizleri de bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Kurulan detaylı sonlu eleman modellerinde, deneylerde gözlenen köşe kalkması davranışı ve dıştan yapıştırılan CFRP şeritlerin beton yüzeyinden sıyrılması dikkate alınmıştır. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar deneysel çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılarak sunulmuştur. Karşılaştırmalardan ise sonlu eleman modellerinin CFRP şeritlerle güçlendirilmiş kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımlarını tahmin etmede genel olarak başarılı olduğu görülmüştür. Buna dayanarak, detaylı şekilde oluşturulmuş sonlu eleman modellerinin, CFRP şeritlerle güçlendirilmiş boşluklu döşemelerin zımbalama dayanımlarını tahmin etmede kullanılabileceği düşünülmektedir.

Bilim Kodu : 911.1.144

Anahtar Kelimeler : CFRP şerit, betonarme döşeme, sonlu eleman, zımbalama, boşluklu döşeme

Sayfa Adedi : 160

Danışman : Prof. Dr. Özgür ANIL

EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT ANALYSES PUNCHING SHEAR BEHAVIOR OF TWO WAY REINFORCED CONCRETE SLABS HAVING OPENINGS AND RETROFITTED WITH CFRP SHEETS

(Ph. D. Thesis)

Cengizhan DURUCAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2015

ABSTRACT

In this thesis 8 reinforced concrete slabs with square shaped openings are retrofitted with externally bonded CFRP sheets. The slabs are constructed with two layers of mesh reinforcement located in the top and bottom surfaces of the slabs. The test specimens are retrofitted with CFRP strips located under the slab and U shaped CFRP strips located at the corners of the openings. Main advantages of the proposed retrofitting system with respect to the other retrofitting procedures employed using CFRP materials are the short application time, ease of application due to the absence of anchorage mechanisms and limited or no aesthetic impact on the retrofitted structure. From the experimental results, it is observed that the proposed retrofitting system increased the average punching shear capacity of the test specimens to the punching shear capacity of the reference specimen without any openings. The experimental results are also compared with the available code equations. From the comparisons it is clear that the equations proposed by the codes generally overestimated the experimental punching shear capacities of the test specimens. 3 dimensional finite element analyses of the test specimens are also conducted in scope of this study. In the detailed finite element models, the lift of corners of the test specimens and bond slip behavior of CFRP strips are included. The results of the finite element analyses are comparatively presented together with the experimental results. From the comparisons, it is observed that, in general, the finite element models accurately estimated the punching shear capacities of the test specimens. In relation to this it is believed that detailed finite element models may be used to estimate the punching shear capacities of the reinforced concrete slabs having openings and retrofitted with CFRP sheets.

Science Code : 911.1.144

Key Words : CFRP sheet, reinforced concrete slab, finite element, punching shear, slab with opening

Page Number : 160

Supervisor : Prof. Dr. Özgür ANIL

TEŞEKKÜR

Bütün tez çalışması boyunca değerli katkılarını ve yardımını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Özgür Anıl'a teşekkürü bir borç bilirim. Tezin deney aşamasının gerçekleştirilmesinde yardımcı olan yapı mekaniği laboratuarının sorumlusu Sayın Faruk Ogün'e ve kardeşim Yunus Durucan'a da teşekkür etmek isterim. Tezin sonlu elemanlar analizlerini içeren kısmını tamamlayabilmem içim gereken yazılımı öğrenmemde yardımcı olan arkadaşım Nalân Kaya'ya da teşekkür ederim. Son olarak, onlardan çaldığım vakitlerle yürüttüğüm deney çalışmalarım boyunca sabreden eşim ve oğluma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xviii

SİMGELER VE KISALTMALAR xx

1. GİRİŞ 1

2. KONU İLE İLGİLİ GEÇMİŞTE YAPILAN ÇALIŞMALAR 9

3. DENEY ÇALIŞMASI 19

3.1. Deney Elemanları ve Kullanılan Malzemelerin Özellikleri 19

3.2. Deney Düzeneği 23

3.3. Deney Elemanlarının CFRP Şeritlerlerle Güçlendirilmesi 27

4. DENEY SONUÇLARI 37

4.1. Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar 37

4.1.1. 300-b-p deney elemanının (deney elemanı 2) test sonuçları 38

4.1.2. 300-b-d deney elemanının (deney elemanı 3) test sonuçları 42

4.1.3. 500-b-p deney elemanının (deney elemanı 4) test sonuçları 45

4.1.4. 500-b-d deney elemanının (deney elemanı 5) test sonuçları 49

4.1.5. 300-u-p deney elemanının (deney elemanı 6) test sonuçları 53

4.1.6. 300-u-d deney elemanının (deney elemanı 7) test sonuçları 56

4.1.7. 500-u-p deney elemanının (deney elemanı 8) test sonuçları 60

4.1.8. 500-u-d deney elemanının (deney elemanı 9) test sonuçları 64

Sayfa

4.2. Deneyde İrdelenen Değişkenlerin Deney Sonuçları Üzerindeki Etkisi 68

4.2.1. Deney sonuçlarının boşluğun kolona olan uzaklığına göre değişimi..... 69

4.2.2. Deney sonuçlarının boşluğun kolona olan konumuna göre değişimi..... 70

4.2.3. Deney sonuçlarının boşluğun büyüklüğüne göre değişimi 71

5. DENEY SONUÇLARININ ANALİTİK SONUÇLARLA KARŞILAŞTIRILMASI 73

5.1. Birinci Gruptaki Şartnamelerin Önerdiği Denklemler 74

5.1.1. Deney elemanlarının zımbalama dayanımlarının TS500'e göre hesaplanması 74

5.1.2. Deney elemanlarının zımbalama dayanımlarının ACI318'e göre hesaplanması 75

5.2. İkinci Gruptaki Şartnamelerin Önerdiği Denklemler 76

5.2.1. Deney elemanlarının zımbalama dayanımlarının Eurocode2'ye göre hesaplanması 76

5.2.2. Deney elemanlarının zımbalama dayanımlarının BS8110'a göre hesaplanması 79

5.3. Analitik Sonuçların Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması 79

5.3.1. Deney sonuçlarının 1. grup denklemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması 80

5.3.2. Deney sonuçlarının 2. grup denklemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması 81

6. SONLU ELEMAN ANALİZLERİ 85

6.1. Kullanılan Elemanlar ve Özellikleri 86

6.1.1. Betonarme elemanların modellenmesi için kullanılan eleman tipi 86

6.1.2. CFRP elemanların modellenmesi için kullanılan eleman tipi 87

6.1.3. CFRP şeritler ve beton yüzeyler arasındaki temas bölgeleri için kullanılan eleman tipleri 88

6.2. Malzeme Özellikleri 89

Sayfa

6.2.1. Beton için kullanılan malzeme modelleri 89

6.2.2. Çelik için kullanılan malzeme modeli 94

6.2.3. CFRP şeritler için kullanılan malzeme modeli 95

6.2.4. CFRP şeritler ile beton arasındaki ara yüzeyin göçme mekanizmaları ve modellenmesi için kullanılan malzeme modeli 96

6.3. Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Modellerinin Kurulması 110

6.4. Yakınsama ile İlgili Problemler ve Uygulanan Çözüm Teknikleri 114

7. SONLU ELEMAN ANALİZLERİNİN SONUÇLARI 119

7.1. Giriş 119

7.2. Kuvvet – Deplasman İlişkilerinin Karşılaştırılması 119

7.3. Oluşan Çatlakların Karşılaştırılması 125

7.4. CFRP Şeritlerde Oluşan Sıyrılmaların Karşılaştırılması 134

8. ÖZET VE SONUÇLAR 145

KAYNAKLAR 149

ÖZGEÇMİŞ 159

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Deney elemanlarının beton basınç dayanımları ve boşluk özellikleri 23

Çizelge 3.2. Deney elemanlarında kullanılan donatının mekanik özellikleri 23

Çizelge 3.3. Güçlendirme sistemi tasarımının sonuçları 23

Çizelge 3.4. Kullanılan CFRP ve epoksinin mekanik özellikleri 36

Çizelge 4.1. 300-b-p deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri 39

Çizelge 4.2. 300-b-d deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri 43

Çizelge 4.3. 500-b-p deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri 46

Çizelge 4.4. 500-b-d deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri 50

Çizelge 4.5. 300-u-p deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri 54

Çizelge 4.6. 300-u-d deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri 58

Çizelge 4.7. 500-u-p deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri 62

Çizelge 4.8. 500-u-d deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri 65

Çizelge 4.9. Deney elemanlarının özellikleri ve sonuçlar 69

Çizelge 4.10. Boşluk uzaklığının deney sonuçları üzerine etkisi 70

Çizelge 4.11. Boşluk konumunun deney sonuçları üzerine etkisi 71

Çizelge 4.12. Boşluk boyutunun deney sonuçları üzerine etkisi 71

Çizelge 5.1. Şartnameler tarafından önerilen denklemler kullanılarak hesaplanan sonuçların yüzde olarak hata oranları 81

Çizelge 5.2. Şartnameler tarafından önerilen denklemler kullanılarak hesaplanan sonuçların yüzde olarak hata oranları 83

Çizelge 6.1. FRP kompozitlerin anizotropik özellikleri 96

Çizelge 7.1. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçların, deney sonuçları ile karşılaştırılması 124

Çizelge 7.2. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçların, deney sonuçları ile istatistiksel olarak karşılaştırılması 125

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Döşemelerde kesme göçmesi; a) tek yönde göçme, b) zımbalama göçmesi.. 2

Şekil 2.1. Pilyenin doğru ve yanlış kullanımı 10

Şekil 2.2. Kapalı etriyelerin a) üstten ve b) yandan görünüşü 10

Şekil 2.3. Kesme kamalarının döşeme üzerindeki çeşitli konumları 11

Şekil 2.4. CFRP çubukların yerleştirilmesi..... 12

Şekil 2.5. CFRP çubukların yerleştirilmesi..... 13

Şekil 2.6. CFRP şeritlerin yerleştirilmesi 14

Şekil 2.7. CFRP şeritlerin yerleştirilmesi 17

Şekil 3.1. Deney elemanlarının donatı detayları 20

Şekil 3.2. Erdoğan tarafından elastik olarak modellenen ve döşeme boyutlarının kontrol edilmesi için kullanılan yapı 20

Şekil 3.3. Kirişsiz döşeme sistemi üzerindeki moment dağılımı 21

Şekil 3.4. Deney elemanlarının üstten görünüşü 22

Şekil 3.5. Deney düzeneği ve LVDT'lerin konumu 27

Şekil 3.6. Simetriden faydalanılarak oluşturulan yarım model..... 28

Şekil 3.7. (a)Sonlu eleman analizinden elde edilen kayma gerilmesi dağılımı (b) deney sonucu oluşan çatlaklar..... 29

Şekil 3.8. (a)Sonlu eleman analizinden elde edilen kayma gerilmesi dağılımı (b) deney sonucu oluşan çatlaklar..... 29

Şekil 3.9. U şeklinde yapıştırılan CFRP şeritlerin görüntüsü 33

Şekil 3.10. Döşeme alt yüzlerine yapıştırılan CFRP şeritlerin görüntüsü 34

Şekil 4.1. LVDT'lerin döşeme üzerindeki konumları ve isimleri 38

Şekil 4.2. 300 mm x 300 mm boyutlarında, kolona bitişik ve paralel konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri 39

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.3. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili 40

Şekil 4.4. Deney elemanın döşeme kenarlarına paralel yöndeki deplasman profili 41

Şekil 4.5. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri..... 41

Şekil 4.6. 300 mm x 300 mm boyutlarında, kolona bitişik ve diyagonal konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri 43

Şekil 4.7. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili 44

Şekil 4.8. Deney elemanın döşeme kenarlarına paralel yöndeki deplasman profili 44

Şekil 4.9. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri..... 45

Şekil 4.10. 500 mm x 500 mm boyutlarında, kolona bitişik ve paralel konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri 46

Şekil 4.11. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili 48

Şekil 4.12. Deney elemanın döşeme kenarlarına paralel yöndeki deplasman profili 48

Şekil 4.13. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri..... 49

Şekil 4.14. 500 mm x 500 mm boyutlarında, kolona bitişik ve diyagonal konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri 50

Şekil 4.15. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili 51

Şekil 4.16. Deney elemanın paralel yöndeki deplasman profili 52

Şekil 4.17. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri..... 52

Şekil 4.18. 300 mm x 300 mm boyutlarında, kolondan uzak ve paralel konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri 54

Şekil 4.19. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili 55

Şekil 4.20. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili 56

Şekil 4.21. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri..... 56

Şekil 4.22. 300 mm x 300 mm boyutlarında, kolondan uzak ve diyagonal konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri 58

Şekil 4.23. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili 59

Şekil 4.24. Deney elemanın paralel yöndeki deplasman profili 60

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.25. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri..... 60

Şekil 4.26. 500 mm x 500 mm boyutlarında, kolondan uzak ve paralel konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri 62

Şekil 4.27. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili 63

Şekil 4.28. Deney elemanın paralel yöndeki deplasman profili 63

Şekil 4.29. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri..... 64

Şekil 4.30. 500 mm x 500 mm boyutlarında, kolondan uzak ve diyagonal konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri 65

Şekil 4.31. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili 67

Şekil 4.32. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili 67

Şekil 4.33. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri..... 68

Şekil 5.1. TS500'de kullanılan zımbalama çevresi yaklaşımı 74

Şekil 5.2. TS500'e göre deney elemanlarının zımbalama çevreleri 75

Şekil 5.3. Eurocode2'de kullanılan zımbalama çevresi yaklaşımı 77

Şekil 5.4. Döşemede boşluk bulunması durumunda Eurocode2'de kullanılan zımbalama çevresi yaklaşımı 77

Şekil 5.5. Eurocode2'ye göre deney elemanlarının zımbalama çevreleri..... 78

Şekil 5.6. BS8110'ye göre deney elemanlarının zımbalama çevreleri 79

Şekil 5.7. Deneysel sonuçlarla TS500 ve ACI318 şartnamelerinin denklemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması 81

Şekil 5.8. Deneysel sonuçlarlaEurocode2 ve BS8110 şartnamelerinin denklemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması 82

Şekil 6.1. Solid65 elemanı 86

Şekil 6.2. Betonun (a) tipik, (b) basitleştirilmiş gerilme – birim deformasyon ilişkileri. 91

Şekil 6.3. William ve Warnke modelinin gerilme deneylerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması 91

Şekil 6.4. William ve Warnke modelinin kırılma yüzeyi 93

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.5. Çelik donatı için kullanılan gerilme – deformasyon ilişkisi 95

Şekil 6.6. CFRP için lif doğrultusunda kullanılan gerilme – deformasyon ilişkisi 96

Şekil 6.7. Paspayının ayrılması 98

Şekil 6.8. CFRP'nin sıyrılması 99

Şekil 6.9. CFRP'nin sıyrılması 100

Şekil 6.10. (a) Tipik bir kritik diyagonal çatlak, (b) Gerçek bir kiriş üzerinde görülen kritik diyagonal çatlak 101

Şekil 6.11. Kohezyonlu bir bölgenin şematik gösterimi. 102

Şekil 6.12. (a) Üstel kural, (b) Doğrusal kural 103

Şekil 6.13. Mod 1 Sıyrılma 104

Şekil 6.14. Mod 2 Sıyrılma 105

Şekil 6.15. Delaminasyon davranışını modellemekte kullanılan (a) normal gerilme – ayrılma, (b) kesme gerilmesi – sıyrılma ilişkileri 106

Şekil 6.16. Kombine Mod delaminasyon 107

Şekil 6.17. En büyük agrega boyutunun kırılma enerjisi üzerindeki etkisi 110

Şekil 6.18. Sonlu eleman analizlerinde köşe kalkması davranışı 111

Şekil 6.19. Sonlu eleman analizlerinde gerçekleşen kayma davranışı 112

Şekil 6.20. Hassasiyet analizleri;(a) En büyük kuvvetler, (b) En büyük deplasmanlar. 113

Şekil 6.21. (a) Çeyrek, (b) yarım ve (c) tam modelleme yöntemiyle oluşturulan tipik sonlu eleman modelleri 114

Şekil 6.22. Kontak rijitliği değeri için yapılan hassasiyet analizinin sonuçları 116

Şekil 7.1. 300 mm, kolona bitişik ve paralel boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması 120

Şekil 7.2. 300 mm, kolona bitişik ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması 120

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.3. 500 mm, kolona bitişik ve paralel boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması 121

Şekil 7.4. 500 mm, kolona bitişik ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması 121

Şekil 7.5. 300 mm, kolona uzak ve paralel boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması 122

Şekil 7.6. 300 mm, kolona uzak ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması 122

Şekil 7.7. 500 mm, kolona uzak ve paralel boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması 123

Şekil 7.8. 500 mm, kolona uzak ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması 123

Şekil 7.9. 300 mm, kolona bitişik ve paralel boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması 127

Şekil 7.10. 300 mm, kolona bitişik ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması 128

Şekil 7.11. 500 mm, kolona bitişik ve paralel boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması 129

Şekil 7.12. 500 mm, kolona bitişik ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması 130

Şekil 7.13. 300 mm, kolondan uzak ve paralel boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması 131

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.14. 300 mm, kolondan uzak ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması 132

Şekil 7.15. 500 mm, kolondan uzak ve paralel boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması 133

Şekil 7.16. 500 mm, kolondan uzak ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması 134

Şekil 7.17. 300 - b-p isimli deney elemanının sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması 136

Şekil 7.18. 300 - b- d deney elemanının sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması 137

Şekil 7.19. 500 - b- p deney elemanının sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması 138

Şekil 7.20. 500 - b - d deney elemanının sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması 139

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.21. 300 - u - p deney elemanının sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması 140

Şekil 7.22. 300 - u - d deney elemanının sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması 141

Şekil 7.23. 500 - u- p deney elemanının sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması 142

Şekil 7.24. 500 - u- d deney elemanının sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması 143

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 1.1. Kirişsiz döşeme sistemi 1

Resim 1.2. 1970'lerin sonunda İsviçre'de zımbalama sonucu yıkılan bina 3

Resim 1.3. 1976'da Cenova'da zımbalama sonucu yıkılan yer altı otoparkı 4

Resim 1.4. 1981'de İsviçre'de zımbalama sonucu yıkılan yer altı otoparkı..... 4

Resim 1.5. 2004 yılında İsviçre'de zımbalama göçmesinden dolayı yıkılan binanın kolonlardan biri..... 5

Resim 1.6. Geniş bir boşluk barındıran kirişsiz döşeme..... 6

Resim 2.1. CFRP şeritlerin yerleştirilmesi 14

Resim 2.2. CFRP şeritlerin yerleştirilmesi 15

Resim 2.3. CFRP şeritlerin yerleştirilmesi 16

Resim 3.1. 300 mm x 300 mm boşluklu deney elemanı..... 20

Resim 3.2. Merkezi zımbalama yüklemesi..... 24

Resim 3.3. Yayılı yükleme uygulamak için kullanılan hava yastıkları 25

Resim 3.4. Deney düzeneği 26

Resim 3.5. U şeritlerin yalnızca iki tanesinin etkili olarak çalıştığını gösteren fotoğraflar 32

Resim 3.6. Döşeme alt yüzlerine CFRP yapıştırmadan önce döşeme yüzeylerinin pürüzlü hale getirilmesi..... 35

Resim 3.7. Döşeme yüzeylerinin basınçlı hava ile temizlenmesi..... 35

Resim 3.8. Döşeme yüzeylerine CFRP yapıştırılması..... 36

Resim 4.1. 300 mm x 300 mm boyutlarında, kolona bitişik ve paralel konumda boşluğu olan deney elemanının deneyden önceki görüntüsü..... 39

Resim 4.2. Deney elemanında oluşan çatlaklar (a) güçlendirmeden önce, (b) ve (c) güçlendirmeden sonra 40

Resim 4.3. Deney elemanında oluşan çatlaklar (a) üst yüzde, (b) alt yüzde 43

Resim **Sayfa**

Resim 4.4. Deney elemanında oluşan çatlaklar; (a) döşeme üst yüzü, (b) döşeme alt yüzü 47

Resim 4.5. Deney elemanında oluşan çatlaklar; (a) döşeme üst yüzü, (b) yakınlaştırılmış görüntü 51

Resim 4.6. 300 mm x 300 mm boyutlarında, kolondan uzak ve paralel konumda boşluğu olan deney elemanının deneyden önceki görüntüsü 53

Resim 4.7. Deney elemanında oluşan çatlaklar(a) boşluk kenarı, (b) döşeme alt yüzü 55

Resim 4.8. Deney elemanında oluşan çatlaklar 59

Resim 4.9. Deney elemanında oluşan çatlaklar (a) döşeme üst yüzü, (b) döşeme alt yüzü 62

Resim 4.10. Deney elemanında oluşan çatlaklar; (a) döşeme üst yüzü, (b) döşeme alt yüzü 66

Resim 6.1. Köşe kalkması; (a) genel görüntü, (b) yakınlaştırılmış görüntü 111

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
mv	Milivolt
$\mathbf{A_{cfrp}}$	CFRP'nin kesit alanı
$\mathbf{E_{cfrp}}$	CFRP'nin elastisite modülü
$\boldsymbol{\varepsilon_{cfrp}}$	CFRP'nin kopma birim deformasyonu
$\boldsymbol{\sigma_y}$	Çeliğin akma dayanımı
$\mathbf{A_s}$	Çeliğin kesit alanı
$\mathbf{E_s}$	Çeliğin elastisite modülü
d	Döşeme faydalı yüksekliği
$\mathbf{d_{eq}}$	Eşdeğer döşeme faydalı yüksekliği
h	Döşeme kalınlığı
$\boldsymbol{\rho_{eq}}$	Eşdeğer boyuna donatı oranı
$\boldsymbol{\rho_s}$	Boyuna donatı oranı
$\boldsymbol{\rho_{cfrp}}$	Döşeme alt yüzüne yapıştırılan CFRP oranı
V_{pr}	TS500(2000)'e gore döşemenin zımbalama dayanımı
$\boldsymbol{\gamma}$	Eğilme etkisi katsayısı
$\mathbf{f_{ctd}}$	Betonun çatlama dayanımı
$\mathbf{f_{ck}}$	Betonun karakteristik basınç dayanımı
$\mathbf{U_p}$	TS500(2000)'e göre zımbalama bölgesinin çevresi
$\mathbf{V_c}$	ACI318(2008)'e göre zımbalama dayanımı
$\boldsymbol{\beta}$	Döşemenin kenarlarının uzunluklarının oranı

Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{b_0}$	ACI318(2008)'e göre zımbalama bölgesinin çevresi
$\boldsymbol{\alpha_s}$	Kolonun konumuna göre değişen bir katsayı
$\mathbf{V_{Rd,c}}$	Kontrol çevresinde kayma gerilmesi dayanımı
$\mathbf{u_1}$	Kontrol çevresi

Kısaltmalar	Açıklamalar
CFRP	Karbon lifle takviye edilmiş polimer
FRP	Lifle takviye edilmiş polimer
LVDT	Doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler
RC	Betonarme

1. GİRİŞ

Doğrudan kolonlarla birleşen kirişsiz döşemeler sıklıkla kullanılan yapısal sistemler arasındadır (Resim 1.1). Bu tip döşemelerin bazı önemli avantajlar sağladığı bilinmektedir. Bu avantajlara bağlı olarak otopark alanları, köprüler, geniş ölçekli süpermarketler, alışveriş merkezleri yer altı garajları, sanayi yapıları ve çeşitli kullanım amaçları olan yüksek katlı yapılarda sıklıkla bu tip döşeme sistemleri kullanılmaktadır. Kirişsiz döşeme sistemlerinin kalıp imalatı diğer sistemlere kıyasla daha zahmetsizdir. Bu durum onların imalat süresi ve fiyat açısından diğer sistemlere kıyasla daha uygun olmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu tip döşeme sistemlerinde kirişlerin olmaması sebebiyle ortaya çıkan düz tavanlar, döşemeden döşemeye olan kat yüksekliğini arttırmaya ve buna bağlı olarak toplam yapı yüksekliğini de azaltmaya yardımcı olmaktadırlar. Bu tip sistemlerde kiriş ve kolon başlıklarının olmaması daha fazla alan sağladığı gibi malzeme maliyetlerini de düşürmektedir. Mimari açıdan bakılacak olursa kiriş ve kolon başlıklarının olmaması binayı kullanan insanlara yapı ömrü boyunca değişebilecek kullanım ihtiyaçları dolayısıyla doğabilecek mimari zorunluluklarla baş etmede avantaj sağlar.



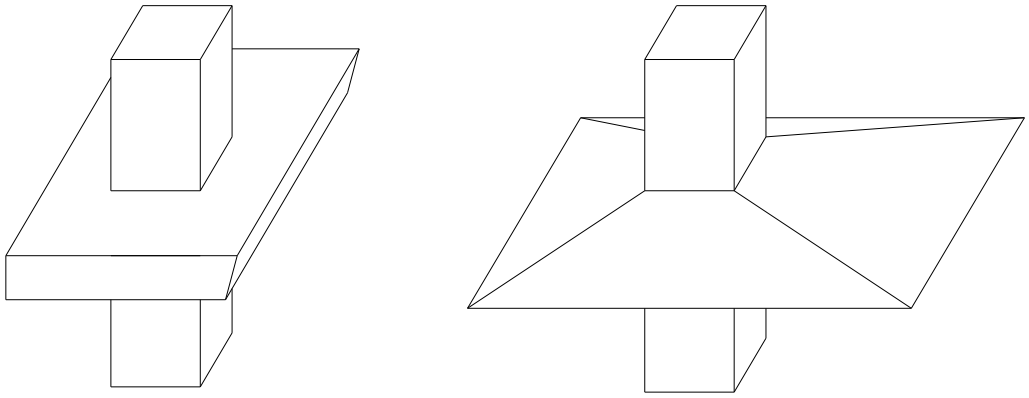
Resim 1.1. Kirişsiz döşeme sistemi

Bu sebeplere bağlı olarak geçtiğimiz on yıllar boyunca kirişsiz döşeme sistemlerinin imalat teknolojileri hakkında araştırmalar yürütülmüş, bu sayede teknik şartnameler, tasarım metotları geliştirilmiştir.

Ancak, doğrudan kolonlarla birleşen kirişsiz döşemeler ani ve gevrek bir göçme mekanizması olan zımbalama göçmesine karşı oldukça savunmasızdırlar. Özellikle deprem bölgelerindeki yapılarda kullanıldıkları zaman bu durum, bu sistemlerin temel zayıf

noktası olarak karşımıza çıkmaktadır. Zımbalama göçmesi, düşey yüklerin kolonlara düşük kalınlıklı kirişsiz döşemeler tarafından doğrudan iletilmesinden kaynaklanmaktadır. Zımbalama göçmesi, hemen hemen hiçbir belirti göstermeden meydana gelmektedir.

Kirişsiz döşemelerde kesme göçmesi iki temel şekilde meydana gelebilir. Bunlardan bir tanesi kiriş tipi yada tek yönde kesme göçmesi diye adlandırılır. Bu tip göçmede döşeme genişliği boyunca ilerleyen eğimli çatlağa bağlı olarak eğimli bir göçme düzlemi oluşur (Şekil 1.1a). Ancak normal bir tasarım durumunda bu tip bir göçme görülmesi pek olası değildir (Varghese, 2006). Diğer göçme tipi ise genelde döşemenin tasarımında belirleyici rol oynar (Varghese, 2006; Cheng, 2009). Bu göçme tipinde iki doğrultuda çatlaklar mevcuttur ve zımbalama göçmesi diye adlandırılır. Bu göçme tipinde, kolon etrafında kesik koni veya piramit şeklinde sistemden ayrılmaya çalışan bir beton blok gözlemlenir (Şekil 1.1b).



(a) (b)

Şekil 1.1. Döşemelerde kesme göçmeleri (a) tek yönde göçme, (b) zımbalama göçmesi (Cheng, 2009)

Tek bir döşeme kolon birleşiminde meydana gelen zımbalama göçmesi, komşu birleşimlerde artan kesme kuvvetlerine sebep olarak onlarında zımbalama göçmesine maruz kalmasını tetikleyip yapının tümden yıkılmasına sebep olabilir.

Kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımının bazı faktörlere bağlı olduğu bilinmektedir. Moe (1961), 1912 yılında ABD'de birleşik komite tarafından, yüklenen alanın çevresi, döşeme kalınlığı ve betonun basınç dayanımına bağlı olan bir denklemin zımbalama kontrolü için önerildiğini söylemiştir. Cheng (2009) ise ACI şartnamesi tarafından

zımbalama dayanımın kontrolü için önerilen denklemleri yıllara göre sıralamıştır. Bu denklemler incelendiği zaman zımbalama kontrolünün yıllara göre gelişimi de izlenebilir. Günümüz modern şartnameleri incelendiğinde ise kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımlarının aşağıdaki faktörlere bağlı olduğu görülebilir. Bunlar: (i) imalatta kullanılan betonun çekme dayanımı, (ii) kirişsiz döşemenin kalınlığı, (iii) döşeme imalatında kullanılan donatı miktarı, (iv) kolonun şekli ve çevre genişliği, (v) döşeme üzerinde bulunan boşluklar gibi faktörlerdir. Kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımları için çeşitli şartnameler tarafından önerilen denklemler incelendiğinde yukarda bahsedilen faktörlerin bazılarının yada tümünün önerilen denklemler tarafından dikkate alındığı görülecektir (TS500, 2000; ACI318, 2008; Eurocode2, 2007).

Ancak yapıların zımbalama göçmesi sebebiyle yıkılması veya ciddi hasar görmesi günümüzde hala bir tehlike olma durumunu sürdürmektedir. Binici ve Bayrak (2005), 1985 Mexico City, 1989 Loma Prieta ve 1994 Northridge depremlerinde kirişsiz döşemeler barındıran birçok binanın yıkıldığını belirtmişlerdir. Ghali ve Megally (2000) ise ayrıntı vererek 1985 Mexico City depreminde kirişsiz döşemelere sahip olan 91 binanın yıkıldığını, 44 binanın ise ciddi biçimde hasar gördüğünü belirtmişlerdir.

Zımbalama göçmesi sebebiyle yıkılan binalardan bazıları aşağıda verilmiştir. 1970'lerin sonunda İsviçre'de inşaat halindeki bir alışveriş merkezinin büyük bir kısmı bir döşemede meydana gelen zımbalama göçmesi sonucu yıkılmıştır (Resim 1.2). Bina, işçilerin mola verdiği sırada yıkıldığı için herhangi bir can kaybı yaşanmamıştır (Mirzaei, 2010).



Resim 1.2. 1970'lerin sonunda İsviçre'de zımbalama sonucu yıkılan bina (Mirzaei, 2010)

1976 yılında Cenova'da bir yer altı otoparkı zımbalama sebebiyle yıkılmıştır (Resim 1.3). Otopark yakınlarında yapılan bir kazı çalışmasının binanın yıkılmasına sebep olduğuna inanılmaktadır (Mirzaei, 2010).



Resim 1.3. 1976'da Cenova'da zımbalama sonucu yıkılan yer altı otoparkı (Mirzaei, 2010)

Yine, İsviçre'de 1981'de bir yer altı otoparkı yıkılmış ve içinde iki çocuk hayatını kaybetmiştir (Resim 1.4). Binanın yıkılmasını ise zımbalamanın tetiklediğine inanılmaktadır (Favre ve diğerleri, 2004). Amerika Birleşik Devletlerinde, 1981 yılında henüz yapım aşamasındayken yıkılan Harbor Cay Condominium binasında zımbalama göçmesine karşı önlem alınmadığı ortaya çıkmıştır (Kaminetzky, 1991). 1981 yılında Türkiye'de, Aselsan için yapılan bina yapım aşamasında zımbalama yüklerine karşı koyamamasından dolayı yıkılmıştır. Bu göçmenin sebebi, inşaatta kullanılan düşük dayanımlı beton ve kalıpların gerekenden erken sökülmüş olmasıdır (Ersoy ve Tankut, 1981). 1989 yılında Amerika'da meydana gelen Loma Prieta depreminde Baybridge Office Plaza isimli bina zımbalama göçmesinden dolayı yıkılmıştır (Mitchell ve diğerleri, 1990).



Resim 1.4. 1981'de İsviçre'de zımbalama sonucu yıkılan yer altı otoparkı (Mirzaei, 2010)

Amerika'da 1994 yılında Bullock Department Store California isimli bina Northridge depreminde zımbalama göçmesinden dolayı yıkılmıştır (Mitchell ve diğerleri, 1995). 1995 yılında Kore'de, yıkılması sonucu 500 kişinin öldüğü bir bina aşırı yükleme sonucu yıkılmıştır (Gardner ve diğerleri, 2002). Çıkan bir yangından dolayı döşeme kolon bağlantıları zayıflayan bir bina 2004 yılında İsviçre'de yıkılmış (Resim 1.5) ve 7 itfaiyecinin ölümüne sebep olmuştur. Yangın çıktıktan sonra döşeme kolon bağlantısında zımbalama meydana gelmiş, daha sonra birbirini takip eden zımbalama mekanizmaları ile bina yıkılmıştır (Ruiz ve diğerleri, 2010).



Resim 1.5. 2004 yılında İsviçre'de zımbalama göçmesinden dolayı yıkılan binanın kolonlardan biri (Ruiz ve diğerleri, 2010)

Ani ve gevrek zımbalama göçmesini sebebiyle oluşan bu yıkımları engellemek için tasarım aşamasında bazı ciddi önlemler alınması gerekmektedir. Binici ve Bayrak (2005) tarafından yapılan çalışmada, 1960 ve 1970'lerde imal edilen kirişsiz döşemelerin kayma donatısı şartlarını sağlamadığı ve zımbalama dayanımının sadece betonun basınç dayanımı tarafından sağlandığı belirtilmiştir. Bunun dışında, binanın kullanım amacındaki değişikliğe bağlı olarak zamanla artabilen düşey yük miktarları, zımbalama dayanımını arttırmak için güçlendirme yapılmasını gerektirebilir. Bir kirişsiz döşeme kolon birleşiminin zımbalama kapasitesi daha geniş bir kolon kullanarak, daha kalın bir döşeme tasarlayarak, daha fazla eğilme donatısı kullanarak, basınç dayanımı daha yüksek olan bir beton kullanarak ya da fazladan kesme donatısı kullanarak arttırılabilir. Ancak bazı durumlarda maddi ve mimari açılardan bu yöntemler ideal çözümler olmayabilir. Bu durumlarda, kirişsiz döşeme ile kolonun kesişim noktasına ek kayma donatısı yerleştirmek iyi bir çözüm sunabilir (Ghali ve diğerleri, 1974; Ebead ve Marzouk, 2002; Adetifa ve Polak, 2005). Özel kayma donatıları, ani ve gevrek bir göçme modu olan zımbalama

göçmesi riskini azaltarak sistemin sünekliğini ve dayanımını arttırabilirler. Öte yandan, uygulamadaki zorluklar ve çelik kamaların korozyona karşı savunmasız olmaları bu tip donatılarla güçlendirme yapmanın bazı dezavantajları olarak sayılabilir. Bunlara alternatif olarak korozyona uğramayan fiber takviyeli polimerler (FRP), eski kirişsiz döşeme kolon bağlantıları gibi zayıf betonarme yapıları güçlendirmek için kullanılabileceği ACI Committee 440 (1996)' tarafından belirtilmiştir. Buna bağlı olarak, karbon FRP'ler kirişsiz döşeme ve kolon bağlantılarının zımbalama dayanımlarını arttırmak için kullanılmaktadırlar (Binici ve Bayrak, 2005; Li ve diğerleri, 2007; Michel ve diğerleri, 2007; Polies ve diğerleri, 2010; Esfahani ve diğerleri, 2009).

Bazı durumlarda, merdiven, asansör, gaz ve elektrik hatlarının geçişi, tesisat ve havalandırma sistemlerinin varlığı gibi mimari sebeplerden dolayı kirişsiz döşemelerde değişen büyüklüklerde boşluklar bulunması zorunlu olabilir (Resim 1.6).



Resim 1.6. Geniş bir boşluk barındıran kirişsiz döşeme

Bu tip boşlukların varlığı zımbalama göçmesine karşı alınacak önlemlerin daha karmaşık hale gelmesini sağlar. Bir çok sistemde bu tip boşluklar kolonlara uzak veya yakın olarak bulunabilirler. Buna bağlı olarak, kirişsiz döşemelerde bulunan bu tip boşlukların ve CFRP ile elde edilen güçlendirme etkisinin bu boşlukların varlığı durumunda, zımbalama yüklerine maruz kalan, kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımlarına ne kadar katkıda bulunacağının araştırılması gerekmektedir. Dolayısıyla, bu tip boşluklu döşemelerde zımbalama göçmesi tehlikesinin varlığı dikkate alınmalı ve tasarım emniyetli tarafta

kalacak şekilde olmalıdır. İstenen güvenliği sağlayabilmek için boşluklu döşemeler dış yüzeylerine CFRP şerit yapıştırılarak güçlendirilebilir. Ancak, CFRP şeritlerle güçlendirilmiş kirişsiz döşemelerdeki boşlukların varlığının detaylı olarak irdelenebilmesi için bu konuda yapılan deneysel çalışma miktarının arttırılması gerektiği düşünülmektedir.

Buna bağlı olarak, bu çalışmada Anıl, Kına ve Salmani (2014) tarafından imal edilen 8 adet çift doğrultuda çalışan boşluklu betonarme kirişsiz döşemenin tamamı yeniden imal edilmiş ve CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Güçlendirilme yapılırken CFRP şeritler ankraj kullanmadan doğrudan döşeme yüzeylerine yapıştırılarak oldukça kolay uygulanabilir bir güçlendirme yöntemi seçilmiştir. Döşeme alt yüzüne yapıştırılan CFRP şeritlerin yanı sıra yazarlar tarafından daha önce literatürde görülmeyen şekilde döşemede bulunan boşlukların köşelerine de CFRP şeritler ankrajsız olarak yapıştırılmıştır. Böylece döşeme üzerinde bulunan boşlukların büyüklüğü ve yerinin CFRP şeritlerle oldukça pratik ve uygulanabilir şekilde yapılan güçlendirme sonuçlarına etkisi irdelenmiş, elde edilen sonuçlar güçlendirilmemiş ve boşluksuz döşemelerin zımbalama yükü taşıma, deplasman ve enerji sönümleme kapasiteleri ile karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak elde edilen deneysel zımbalama kapasitesi sonuçları literatürde bulunan kapasite denklemlerinden elde edilen sonuçlarla da karşılaştırılmıştır. Ayrıca, döşemelerin sonlu elemanlar analizleri de yapılarak kullanılan sonlu elemanlar yazılımının ve yönteminin CFRP ile güçlendirilmiş boşluklu betonarme döşemelerin zımbalama kapasitesini tahmin edebilme seviyesi irdelenmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı CFRP şeritlerin ankraj kullanmadan sadece epoksi yardımıyla pratik bir şekilde dıştan döşeme yüzeylerine ve daha önce literatürde rastlanmayan şekilde boşluk köşelerine yapıştırılması ile yapılan güçlendirme işleminin, boşluklu, kirişsiz, betonarme döşemelerin zımbalama dayanımlarını ne ölçüde arttırdığının irdelenmesidir. Bunun yanı sıra, güncel olarak kullanılmakta olan yapı şartnameleri tarafından önerilen denklemlerin güçlendirme etkisini ne ölçüde sonuçlara yansıtabildiği ve sıklıkla kullanılan sonlu elemanlar yönteminin CFRP şeritler ile güçlendirilmiş kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımının hesaplanmasında ne ölçüde başarılı olduğu da araştırılacaktır.

Tez kapsamında, sadece iki yönde çalışan boşluklu betonarme döşemelerin davranışı üzerinde durulmuştur. İrdelenen döşemeler eğilme donatısı dışında hiçbir ek donatı içermemektedir. İrdelenen döşemelerin mesnet koşulları kirişsiz döşemelerin sıfır moment

çizgileri ile çevrilen bölgelerinin mesnetlenme şartlarını yansıtmaktadır. Tek yönde çalışan, eğilme donatısı haricinde donatı içeren döşemelerin davranışı bu çalışmanın kapsamına dâhil değildir.

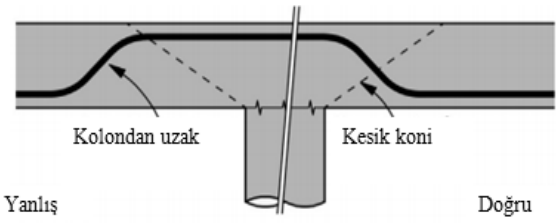
2. KONU İLE İLGİLİ GEÇMİŞTE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Daha önce belirtildiği gibi bu çalışmanın temel amacı, CFRP şeritlerin ankraj kullanmadan sadece epoksi yardımıyla dıştan döşeme yüzeyine yapıştırılması ile yapılan güçlendirme işleminin, boşluklu kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımlarını ne ölçüde arttırdığının irdelenmesidir. Buna bağlı olarak izleyen alt bölümlerde, kirişsiz döşemelerin güçlendirme yöntemleri, her bir yöntemin avantajı ve dezavantajı üzerine yapılan bir literatür taraması ve sonuçları sunulmuştur. 1960 ve 1970'lerde imal edilen kirişsiz döşemelerin güncel kayma donatısı şartlarını sağlamadığı ve zımbalama dayanımının sadece betonun basınç dayanımı tarafından sağlandığı belirtilmişti (Binici ve Bayrak, 2005). Dolayısıyla, kirişsiz döşemeler içeren eski yapıların güçlendirilmesi oldukça önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Avrupa'da, inşaat için yapılan harcamaların yaklaşık üçte birinin eski yapıların güçlendirilmesine harcandığı bilinmektedir (Federal Statistical Office, 2012). Bu güçlendirme işlemi, belli bir hizmet ömrünü tamamlayan yapıların yeniden organize edilmesi ve yapının kullanım amacının değişmesine bağlı olarak daha fazla hareketli yük alabilmesine olanak sağlaması için de yapılmaktadır (Koppitz ve diğerleri, 2013). Eski döşemelerin yetersiz tasarımı ve donatının korozyonu sonucu meydana gelen durabilite problemleri de güçlendirme ihtiyacı doğurmaktadır (Koppitz ve diğerleri, 2013).

Kirişsiz döşemelerin kolon-döşeme birleşim bölgelerinde doğan ek kesme kuvveti ihtiyacını karşılamak için bazı önlemler alınması gerekmektedir. Bu önlemler döşemelerin imalatı aşamasında alınabileceği gibi, mevcut döşemelerin güçlendirilmesi şeklinde de alınabilir. Bu önlemlerden bir tanesi bağlantı noktasına kayma donatısı eklemektir. Burada ise ek kesme kuvveti sağlamak için kullanılan kayma donatılarından yaygın olarak kullanılanlar tanıtılacaktır.

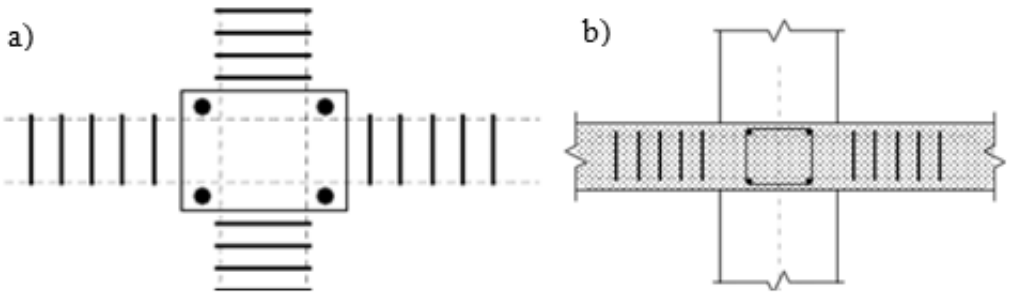
Eskiden imal edilen ince kirişsiz döşemelerde genellikle kolon yakınlarında kayma donatısı kullanılmazdı. Kayma donatısı olan durumlarda ise sıkılıkla pilyeler kullanılırdı (Koppitz ve diğerleri, 2013). Pilyeler, açıklıkta döşeme alt yüzündeki boyuna donatının mesnette bükülerek döşeme üst yüzünde devam ettirilmesiyle yapılır (Şekil 2.1). Pilye kullanımı, tasarım için gereken donatı miktarını en aza indirdiği için avantajlı görülür. Sağladığı bu avantaja ve kolay uygulanabilirliğine bağlı olarak araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Hawkins, 1974). Ancak pilyelerin doğru kullanımı oldukça önemlidir. Eğer

Şekil 2.1'in sol tarafında görüldüğü gibi pilye kolondan uzakta bükülürse etkisiz kalacaktır. Şekil 2.1'in sağ tarafında pilyenin doğru kullanımı gösterilmiştir. Cheng (2009) pilye kullanımı ile ilgili yaptığı literatür taraması sonucunda kolon-döşeme birleşimlerinin zımbalama kapasitesinin pilye kullanarak arttırılabileceğini (Hawkins, 1974; Ghali ve Hammill, 1992; Polak ve diğerleri, 2005) ancak pilyelerin deformasyon kapasitesini arttırmada etkisiz olduğunu göstermiştir.



Şekil 2.1. Pilyenin doğru ve yanlış kullanımı (Koppitz ve diğerleri, 2013)

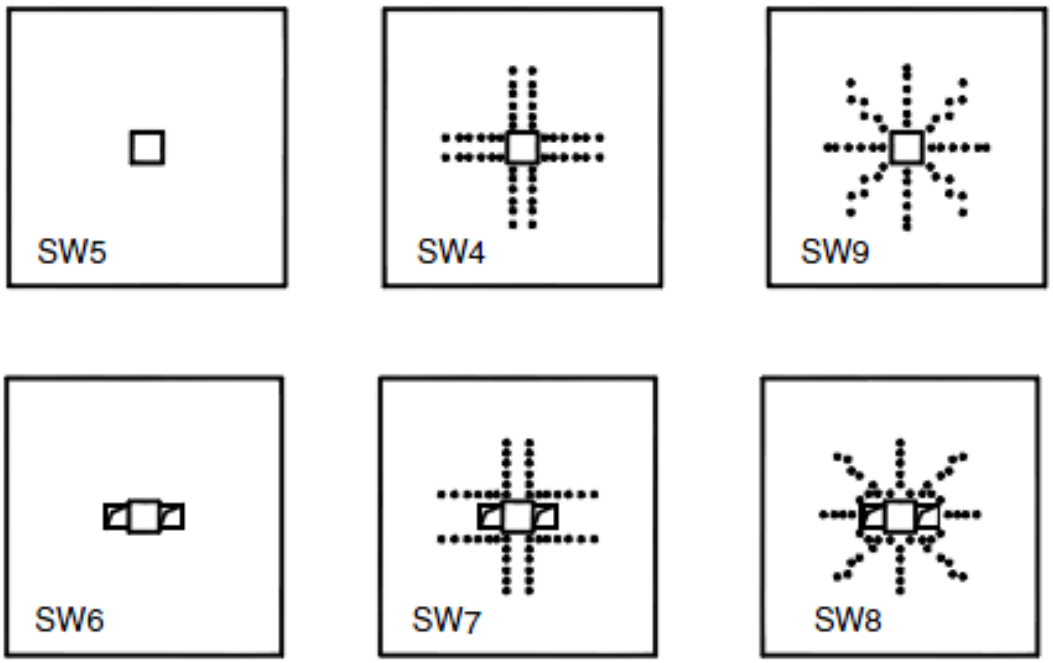
Döşemelerin zımbalama kapasitesini arttırmak için kullanılan bir diğer yöntem ise kapalı etriyelerdir (Şekil 2.2). Kapalı etriyeler kirişlerde kullanıldıkları gibi iki yönde çalışan kirişsiz döşemelerin zımbalama kapasitesini arttırmak içinde kullanılabilirler (Hassan ve diğerleri, 2014). Düzgün şekilde sabitlenmiş kapalı etriyelerin zımbalama dayanımını %60'a kadar arttırabildiği bilinmektedir (Pralong ve diğerleri, 1979). Bunun yanında kapalı etriye kullanımının döşeme-kolon birleşim bölgesinin deformasyon kapasitesini de arttırabileceği Islam ve Park (1976) tarafından gösterilmiştir. Ancak, MacGregor ve Wight (2005) tarafından bu tip etriyelerin ince döşemelerde yerleştirilmesinin zor olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.2. Kapalı etriyelerin a) üstten ve b) yandan görünüşü (Cheng, 2009)

Langohr ve diğerleri (1976) yaptığı çalışmada, iki ucundan mekanik ankrajlara sahip olan düşey çelik çubukların kayma donatısı olarak davranışını incelemiştir. Çalışma sonucunda,

kirişsiz döşeme sistemlerinin zımbalama dayanımlarının bu tip kesme kamaları kullanılarak arttırılabileceği gösterilmiştir. Benzer şekilde, Lips ve Muttoni (2010) yaptıkları deneysel çalışmada düşey yerleştirilmiş kesme kamalarının döşemenin davranışını geliştirdiğini göstermişlerdir. Kesme kamalarının döşemelerin zımbalama davranışı üzerindeki etkisini inceleyen birçok çalışma mevcuttur (Seible ve diğerleri, 1980; Dilger ve Ghali, 1981; Elgabry ve Gahli, 1987; Megally ve Ghali, 2000; Robertson ve diğerleri, 2002; Kang ve Wallace, 2005; Tan ve Teng, 2005; Broms, 2007a; Broms, 2007b; Ferreira ve diğerleri, 2014). Bu ve Polak (2011) boşluk içeren ve içermeyen kirişsiz döşemeler üzerinde kesme kamaları kullanarak (Şekil 2.3) deneysel bir güçlendirme çalışması yapmış ve sonuçlarını sunmuşlardır. Çelik kesme kamaları kullanılarak yapılan güçlendirme çalışmalarından başarılı sonuçlar alınabilmesine rağmen, bu tip güçlendirme işlemlerinin çoğu kez döşeme üzerinde delik açılmasını gerektirmesi, yapılan ankrajların başlıklarının hoş olmayan görünümü, onları gizlemenin zorluğu veya yapının işlevselliğini azaltması (Inacio ve diğerleri, 2012) ve korozyona uğrayabilmeleri onların dezavantajları olarak sıralanabilir.



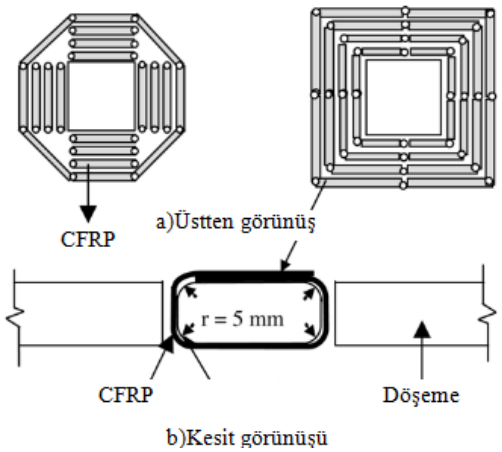
Şekil 2.3. Kesme kamalarının döşeme üzerindeki çeşitli konumları (Bu ve Polak, 2011)

FRP'lerin yüksek dayanım/ağırlık oranları, uygulamadaki kolaylık ve korozyona karşı direnç gibi özellikleri onları çeşitli yapı sistemlerinin güçlendirmesinde çekici hale

getirmektedir (Fargaly ve Ueda, 2011). Buna bağlı olarak, kirişsiz döşemelerin CFRP ile güçlendirilmesini konu alan çalışmalardan bazıları burada tanıtılmıştır.

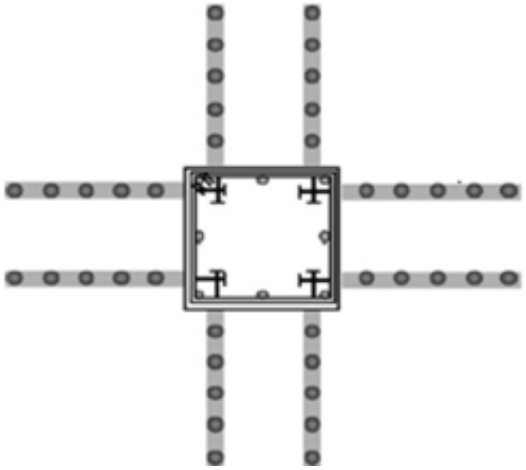
Boşluk içermeyen kirişsiz döşeme ve kolon birleşimlerinin FRP çubuklar ile güçlendirilmesini konu alan kısa bir literatür çalışması bu bölümde sunulmuştur.

Binici ve Bayrak (2005) CFRP çubukları iki farklı şekilde kayma donatısı olarak kullanarak (Şekil 2.4), kesme yükleri ve dengelenmemiş momentlere maruz kalan kirişsiz döşeme kolon birleşimlerinin zımbalama dayanımlarını güçlendirmek üzere bir teknik önermişlerdir. Çalışmada, önerilen tekniğin zımbalama kapasitesini arttırmakta etkili olduğu gösterilmiştir.



Şekil 2.4. CFRP çubukların yerleştirilmesi (Binici ve Bayrak, 2005)

Benzer olarak Li ve diğerleri (2007) sabit düşey yük ve tersinir döngüsel yatay yük altında kirişsiz döşeme ve kolon birleşimlerinin zımbalama kapasitesini CFRP çubuklar (Şekil 2.5) kullanarak arttırmışlardır. Çalışmada, güçlendirilmiş numunelerin kapasitelerinin güçlendirilmemiş olanlara kıyasla daha yüksek olduğu gösterilmiştir.

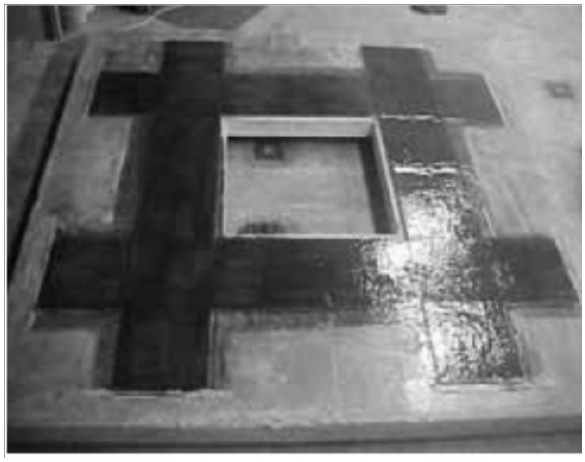


Şekil 2.5. CFRP çubukların yerleştirilmesi (Li ve diğerleri, 2007)

Khalel ve diğerleri (2013) kirişsiz döşemelerin zımbalamaya karşı güçlendirilmesinde dıştan yerleştirilen çelik çubukların kapalı etriye şeklindeki FRP' lerin etkinliğini araştırmıştır. Çalışmada FRP çubuklar kolonun etrafına döşeme kalınlığı boyunca yerleştirilmiştir.

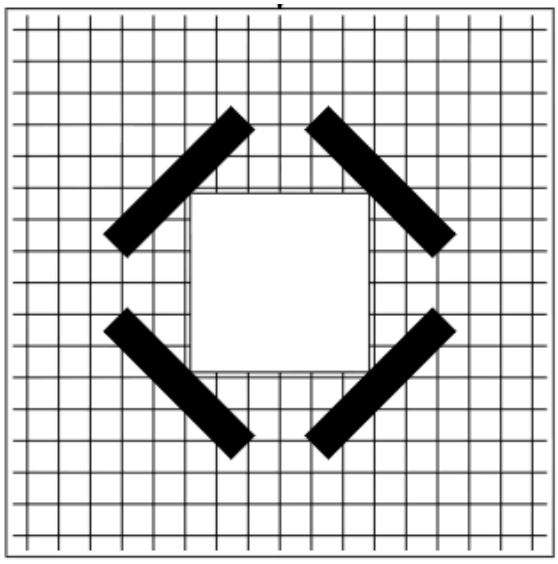
Kirişsiz döşemelerin FRP plakalar veya şeritlerle güçlendirilmesini konu alan çalışmalardan bazıları burada sunulmuştur. Çalışmalarda FRP şeritlerin hangi düzende yerleştirildiğinin de izlenebilmesi için döşeme yüzlerine yapıştırılan FRP şeritlerin resimleri de sunulmuştur.

Casadei ve diğerleri (2003) merkezi bir açıklık barındıran kare şeklindeki kirişsiz döşemelerin CFRP plakalarla güçlendirilerek davranışının incelenmesini konu alan bir çalışma yapmıştır. Casadei ve diğerleri (2003), CFRP şeritlerin (Resim 2.1) güçlendirmede oldukça başarılı olduğunu ve ankraj kullanılması halinde başarı oranının daha da arttığını belirtmiştir.



Resim 2.1. CFRP şeritlerin yerleştirilmesi (Casadei ve diğerleri, 2003)

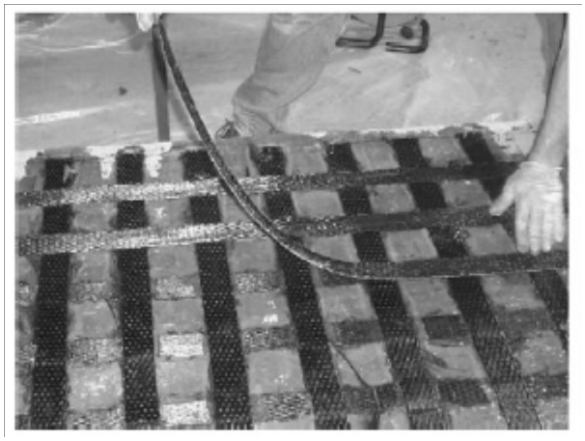
Rusinowski (2005) CFRP ile güçlendirilmiş çift doğrultuda çalışan boşluklu betonarme kirişsiz döşemelerin zımbalama davranışını inceleyen deneysel ve analitik bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada, boşluklar döşemelerin orta noktasında bırakılmış, düşey yükler ise hava yastıkları kullanılarak yayılı olarak döşeme yüzeyine uygulanmıştır. Rusinowski (2005) çalışmasında fazladan donatı yerine CFRP şeritlerle güçlendirme yapmanın daha iyi sonuçlar verdiği sonucuna ulaşmıştır. Rusinowski (2005) tarafından yapılan çalışmada kullanılan CFRP şeritlerin döşeme yüzündeki yerleşimi aşağıdaki gibidir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. CFRP şeritlerin yerleştirilmesi (Rusinowski, 2005)

Michel ve diğerleri (2007) kompozit malzemelerle güçlendirilmiş kirişsiz döşeme kolon birleşimlerinin zımbalama kapasitelerini deneysel olarak irdelemişlerdir. Çalışmada

kullanılan CFRP şeritlerin yerleşimi Resim 2.2'de verilmiştir. Çalışma sonucunda analitik bir model önermişlerdir.



Resim 2.2. CFRP şeritlerin yerleştirilmesi (Michel ve diğerleri, 2007)

Meleka ve diğerleri (2009) betonarme kirişsiz döşemelerin güçlendirilmesini konu alan deneysel ve analitik bir çalışma yapmıştır. Çalışma için 13 adet 1/2 ölçekli betonarme kirişsiz döşeme imal edilmiştir. Çalışma kapsamında deneyi yapılan döşemelerde iki farklı ebatta boşluk bırakılmıştır ve bu döşemeler zımbalama yükleri altında göçmek üzere tasarlanmıştır. Çalışmada, döşemelerin güçlendirilmesi için iki farklı güçlendirme tekniği kullanılmıştır. İlk güçlendirme tekniği çelik plakalar veya cam FRP kullanılarak, ikinci güçlendirme tekniği ise yüzey yakınına takılan çelik çubuklar veya birleştirilerek çubuk haline getirilen GFRP veya CFRP şeritler kullanılarak uygulanmıştır. Her iki güçlendirme tekniği de başarılı sonuçlar vermiştir.

Esfahani (2008) ve Esfahani ve diğerleri (2009) CFRP plakalar ile güçlendirilmiş kirişsiz döşemelerin zımbalama kapasitelerini sırasıyla, monotonik ve döngüsel yükler altında incelemiştir. Çalışmalarda kullanılan CFRP şeritlerin döşemelere hangi düzende yapıştırıldığı Resim 2.3'de verilmiştir. Çalışmaların sonuçları, döngüsel yüklemelerin CFRP plakaların sağladığı güçlendirme etkisini azalttığını göstermiştir.

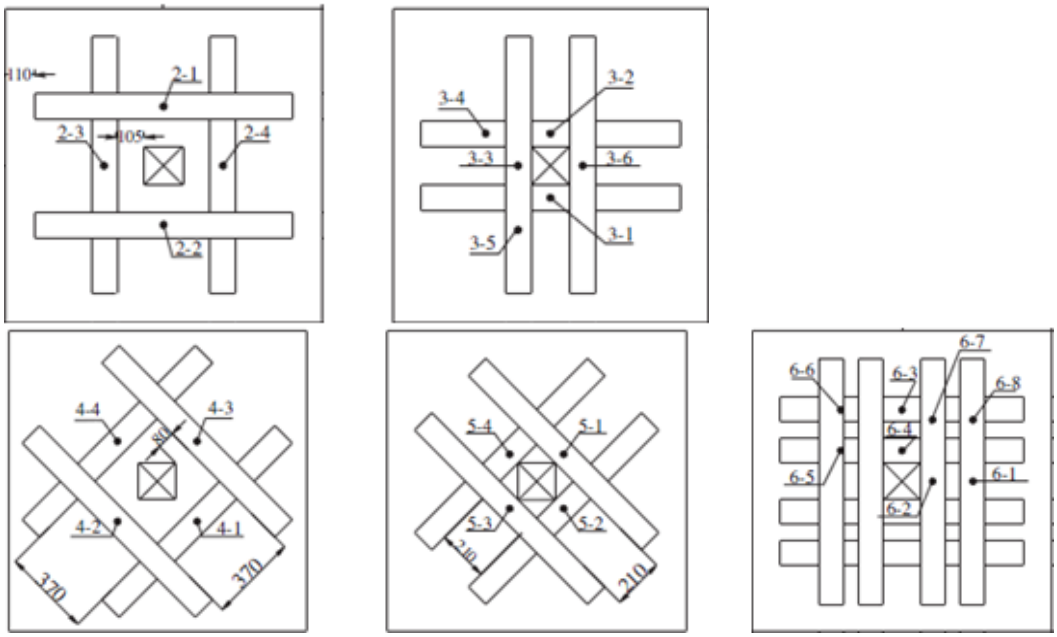


Resim 2.3. CFRP şeritlerin yerleştirilmesi (Esfahani, 2008)

Polies ve diğerleri (2010) ise eksantrik yükleme altında CFRP ile güçlendirilmiş kirişsiz döşeme kolon birleşimi davranışını incelemiştir. Sonuç olarak ise yük eksantrikliği arttıkça güçlendirme etkisinin azaldığını göstermişlerdir.

Farghaly ve Ueda (2011) yaptıkları çalışmada FRP ile güçlendirilmiş çift doğrultuda çalışan betonarme döşemelerin zımbalama dayanımını deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Çalışmadan elde edilen sonuçlardan, çift doğrultuda çalışan döşemelerin zımbalama kapasitesinin referans test numunesine kıyasla %40 arttırıldığı görülmüştür. Ayrıca, dışarıdan FRP plakalarla güçlendirilmiş çift doğrultuda çalışan betonarme döşemelerin zımbalama dayanımını tahmin edebilmek için nümerik analiz sonuçlarını da kullanarak bir analitik model geliştirmişlerdir.

Soudki ve diğerleri (2012) de benzer bir çalışma yaparak CFRP ile güçlendirilmiş kirişsiz döşeme kolon birleşimlerinin zımbalama dayanımını %29'a kadar arttırmışlardır. Çalışmada CFRP şeritler döşemelerin çekme gerilmeleri altındaki bölgelerine 5 ayrı konfigürasyonda yapıştırılmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. CFRP şeritlerin yerleştirilmesi (Soudki, 2012)

Kirişsiz döşeme ve kolon birleşimlerinin güçlendirilmesine ilişkin yapılan çalışmalar incelendiğinde, güçlendirme işlemlerinin genellikle çelik kayma donatıları, etriyeler veya FRP çubuklar ve şeritler kullanılarak yapıldığı görülmüştür. Çelik elemanlar kullanılarak yapılan güçlendirme çalışmalarından başarılı sonuçlar alınabilmesine rağmen, bu tip güçlendirme işlemlerinin çoğu kez döşeme üzerinde delik açılmasını gerektirmesi, yapılan ankrajların başlıklarının hoş olmayan görünümü, onları gizlemenin zorluğu veya yapının işlevselliğini azaltması (İnacio ve diğerleri, 2012) gibi sebeplerin yanında çeliğin korozyona uğrayabilen bir malzeme olması, güçlendirme işleminde alternatif malzemelerin kullanılabilirliğinin araştırılmasına yol açmıştır. Buna bağlı olarak, korozyona uğramayan, yüksek dayanım/ağırlık oranları sunan, kolayca uygulanabilen FRP malzemeler ilgi çekmeye başlamıştır (Fargaly ve Ueda, 2011). FRP malzemenin uygulanması çeliğe kıyasla daha kolay olmasına rağmen, ankraj yapılması durumunda yine uygulama bir miktar zorlaşacaktır.

İşte bu sebeple, bu çalışmada hiçbir ankraj uygulaması yapılmadan, doğrudan döşeme yüzeylerine kolayca yapıştırılan CFRP şeritlerin, döşemelerin zımbalama dayanımları üzerindeki etkinliği deneysel, analitik ve sonlu elemanlar yöntemleri ile incelenmiştir. Ayrıca daha önce yazar tarafından literatürde görülmeyen şekilde, döşeme üzerinde bulunan boşlukların köşelerine dıştan CFRP şeritler yine ankrajsız şekilde yapıştırılmıştır.

Böylece ankraj kullanılarak uygulanan güçlendirme yöntemlerinin etkinliği ankraj içermeyen pratik bir güçlendirme yöntemi ile elde edilmeye çalışılmıştır.

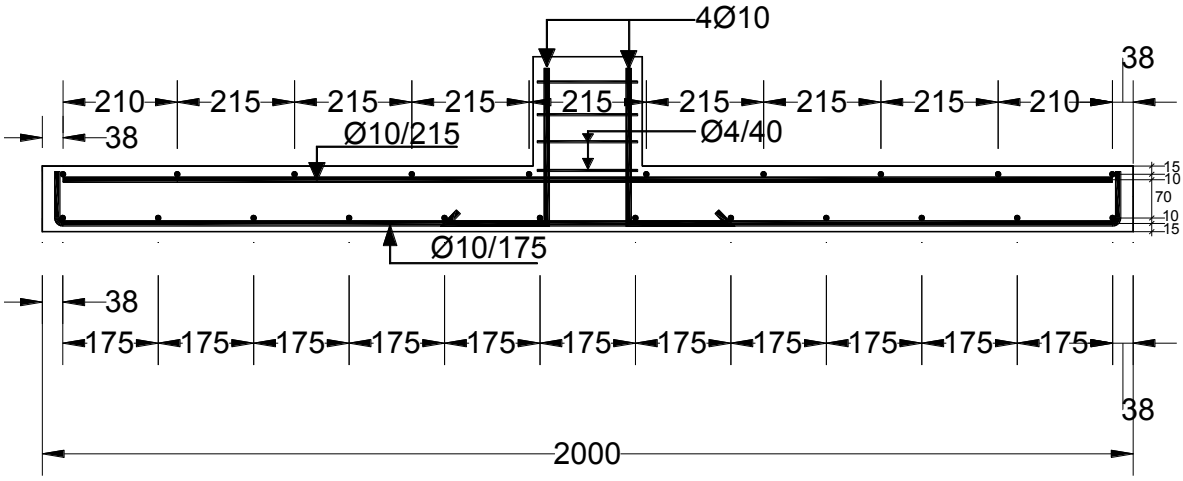
3. DENEY ÇALIŞMASI

Bu bölümde deneyi yapılan, kirişsiz boşluklu betonarme döşemeler tanıtılmıştır. Bu döşemelerin zımbalama dayanımlarını arttırmak için kullanılan güçlendirme yönteminin ve elemanlarının tanıtımı ve tasarımı da yine bu bölümde verilmiştir. Ayrıca deney elemanlarında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri ve deney elemanlarının nasıl imal edildiklerine dair her türlü detaylı bilgide bu bölümde verilmiştir. Bunlara ek olarak deneyde kullanılan cihazlar ve deney düzeneği de bu bölümde tanıtılmıştır.

3.1. Deney Elemanları ve Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Daha önce belirtildiği gibi bu çalışma kapsamında, Anıl ve diğerleri (2014) tarafından imal edilen 9 adet boşluklu betonarme kirişsiz döşemenin 8 tanesi yeniden imal edilmiş ve zımbalama göçmesine karşı CFRP şeritler kullanılarak güçlendirilmiştir. Betonarme döşemeler (2000 mm x 2000 mm x 120 mm) orta noktalarında bulunan betonarme kare kolonlarla (200 mm x 200 mm) birlikte dökülmüştür. Döşemeler üzerine düşey zımbalama yükleri bu kolonlar üzerinden uygulanmıştır. Deney elemanlarının donatı detayları ve boyutları Şekil 3.1'de verilmiştir. Deney elemanlarından bir tanesinin kalıba yeni dökülmüş hali Resim 3.1' de gösterilmiştir. Deney elemanları imal edilirken, döşeme alt ve üst yüzünde 10 mm çapında donatılar her iki yönde kullanılmıştır. Döşeme üst yüzündeki donatı aralıkları kenarlarda 210 mm diğer bölgelerde 215 mm' dir. Döşeme alt yüzünde ki donatıların aralıkları ise 175 mm' dir. Döşeme ile birlikte dökülen kolonun boyuna donatısı 10 mm çapında ve kolon köşelerinde olmak üzere 4 adettir. Kolondaki etriyeler ise 4 mm çapında tel kullanılarak imal edilmiş olup 40 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Verilenlerden başka herhangi bir donatı kullanılmamıştır.

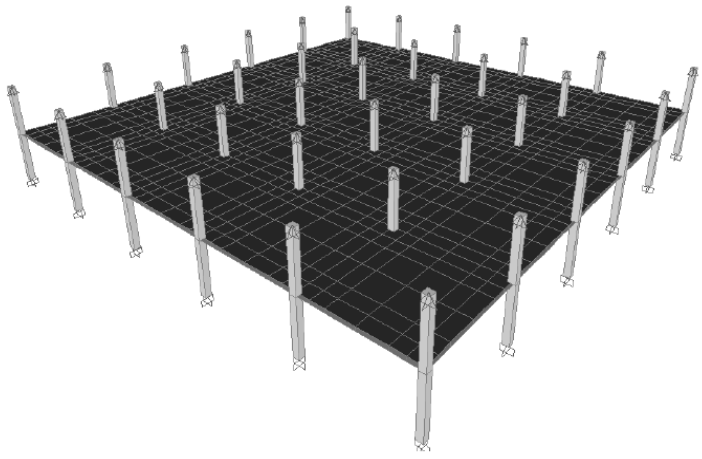
Deneyler için seçilen döşeme boyutları, Erdoğan (2010) tarafından yapılan çalışma dikkate alınarak kontrol edilmiştir. Erdoğan (2010), CFRP ile güçlendirilmiş kirişsiz döşemelerin zımbalama davranışı üzerine yaptığı çalışmada, deney elemanlarının boyutlarını seçmek için her açıklığı 6m uzunluğunda olan 5 açıklıklı tipik bir betonarme bina tasarlamıştır ve düşey yükler altında doğrusal elastik analiz yapmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.1. Deney elemanlarının donatı detayları (ölçüler mm cinsindendir)

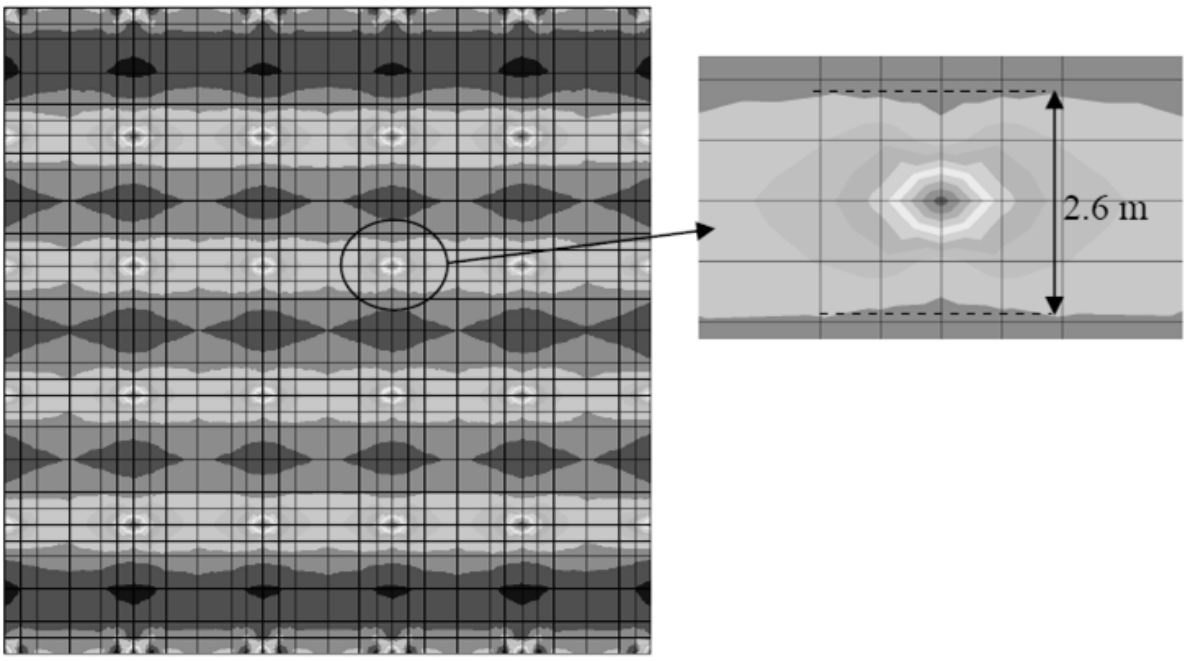


Resim 3.1. 300 mm x 300 mm boşluklu deney elemanı



Şekil 3.2. Erdoğan (2010) tarafından elastik olarak modellenen ve döşeme boyutlarının kontrol edilmesi için kullanılan yapı

Bu analizler sonucunda, 2000 mm x 2000 mm x 150 mm boyutlarında döşeme parçalarının, döşemenin dört kenarı etrafında basit mesnet modellemesine izin veren sıfır moment çizgileri ile çevrildiğini belirtmiştir (3/4 ölçek ile) (Şekil 3.3). Ayrıca, Erdoğan (2010) çalışmasında benzer deney elemanı boyutlarının literatürde ki birçok çalışmada kullanıldığı belirtilmiştir (Elstner ve Hognestad, 1956; Dilger ve Ghali, 1981; Mokhtar ve diğerleri, 1985; Elgabry ve Ghali, 1987; Broms, 1990; Sissakis, 2002; Binici, 2003). Erdoğan (2010)'un çalışmasında sunduğu verilere göre 2000 mm x 2000 mm x 120 mm boyutlarında deney elemanlarının zımbalama deneyleri için kullanımı uygun görünmektedir.

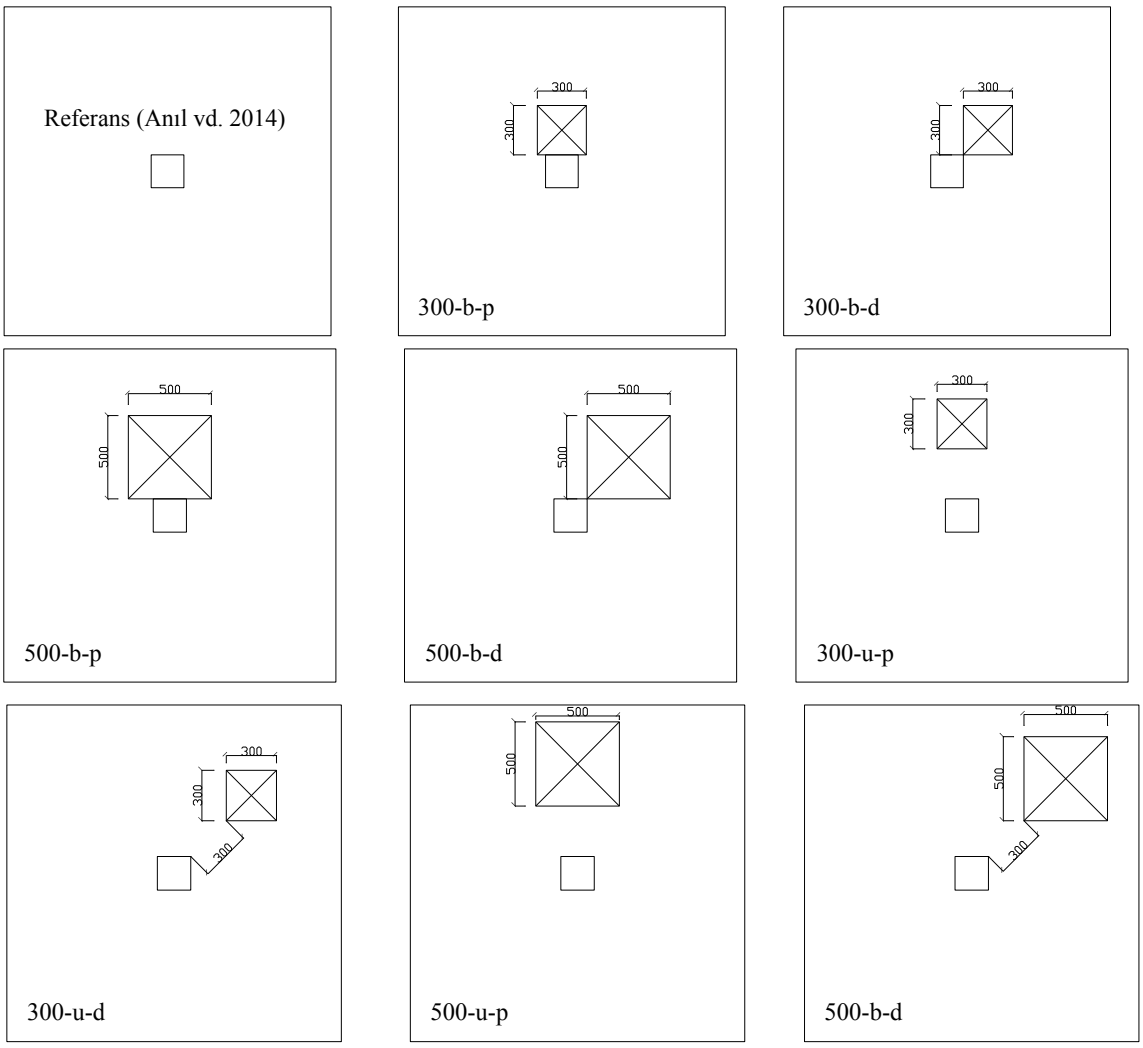


Şekil 3.3. Kirişsiz döşeme sistemi üzerindeki moment dağılımı (Erdoğan, 2010)

Binici ve Bayrak (2005) tarafından yapılan çalışmada kirişsiz döşeme içeren bir çok yapıda donatı oranının %0,5 ile %1,2 arasında olduğu belirtilmiştir. Buna bağlı olarak bu çalışmada döşeme alt yüzünde kullanılan %0,5 donatı oranının uygun olduğuna karar verilmiştir.

Çalışma kapsamında üretilen döşemelerde boşlukların merkezi kolona göre konumları ve boyutları değişken tutulmuştur. Her bir döşemede, 300 mm x 300 mm boyutlarında veya 500 mm x 500 mm boyutlarında bir adet boşluk bırakılmıştır. Bu boşluklar, kolona bitişik veya kolona 300 mm dik veya 300 mm diyagonal mesafe bırakılarak yerleştirilmiştir. Şekil 3.4'de deney elemanlarındaki boşlukların yerini gösteren çizimler verilmiştir. Şekil

3.4’deki çizimlerde, döşemelerin sağ alt köşelerinde ki isimlendirmelerde sayı boşluğun kenar uzunluğunu, ilk harf boşluğun kolona bitiş (b) ya da uzak (u) olduğunu, ikinci harf ise kolona paralel (p) ya da diyagonal (d) konumda olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.4. Deney elemanlarının üstten görünüşü

Çizelge 3.1’de deney elemanlarının beton basınç dayanımları ve boşlukların yerleri tablo halinde sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Deney elemanlarının beton basınç dayanımları ve boşluk özellikleri

#	Beton basınç dayanımı f_c (MPa)	Boşluk	
		Ebat (mm)	Konum
1	20,83	Referans	
2-300-b-p	20,56	300x300	Paralel (kolona bitişik)
3-300-b-d	19,96	300x300	Diyagonal (kolona bitişik)
4-500-b-p	21,23	500x500	Paralel (kolona bitişik)
5-500-b-d	19,78	500x500	Diyagonal (kolona bitişik)
6-300-u-p	20,12	300x300	Paralel (kolondan 300 mm uzak)
7-300-u-d	21,45	300x300	Diyagonal (kolondan 300 mm uzak)
8-500-u-p	20,03	500x500	Paralel (kolondan 300 mm uzak)
9-500-u-d	21,09	500x500	Diyagonal (kolondan 300 mm uzak)

Deney elemanlarının basınç dayanımları, 150 mm x 300 mm ebatlarında standart silindir numune kullanılarak her deney elemanından alınan 5 adet silindir beton örneğinin deney günü kırılmasıyla elde edilen basınç dayanımlarının en büyük ve en küçük değerler hariç ortalaması hesaplanarak bulunmuştur. Çizelge 3.1'den de görüleceği gibi deney elemanlarının beton basınç dayanımlar 19,78 MPa ile 21,45 MPa arasında değişmektedir. Ortalama değer ise 20,52 MPa olarak hesaplanmıştır. Deney elemanlarında kullanılan donatıların mekanik özellikleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Deney elemanlarında kullanılan donatının mekanik özellikleri

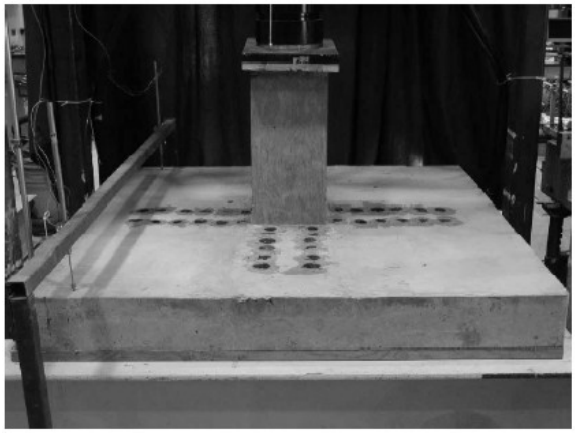
Donatı Çapı (mm)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Tipi
4	280	427	Düz
10	480	627	Nervürlü

3.2. Deney Düzeneği

Kirişsiz döşeme ve kolon birleşimlerinin zımbalama dayanımlarının hesaplanması için önerilen denklemlerin birçoğu deney çalışmalarından elde edilen sonuçlardan faydalanılarak türetilmiştir. Bu yüzden, deney çalışması için seçilecek deney düzeneği oldukça önemlidir. Deneylerde tümden bir döşeme sisteminin test edilmesinin zorluğu dikkate alınırsa, deneyin ancak sistem üzerinden seçilen kritik bir parça üzerinde

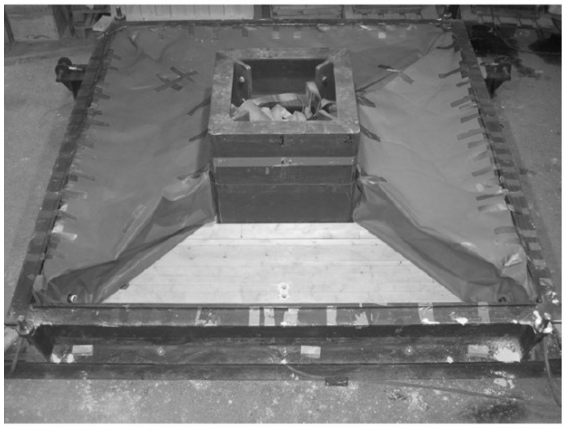
gerçekleştirilebileceği görülür. Bu yüzden seçilecek düzenek uygulanan yüklerin ve oluşan deformasyonların etkilerini isabetli şekilde yansıtabilmelidir (Cheng, 2009).

Monotonik olarak artan düşey yükler uygulanarak yapılan zımbalama deneylerinde yükün döşemenin ağırlık merkezinden (Florut ve diğerleri, 2010; Johnson ve Robertson, 2004; Hassan ve diğerleri, 2013) veya düzgün yayılı olarak uygulandığı görülmüştür (Rusinowski, 2005). Her iki yükleme durumunu gösteren deney düzeneklerine ait fotoğraflar Resim 3.2 ve Resim 3.3'te sunulmuştur.



Resim 3.2. Merkezi zımbalama yüklemesi (Rusinowski, 2005)

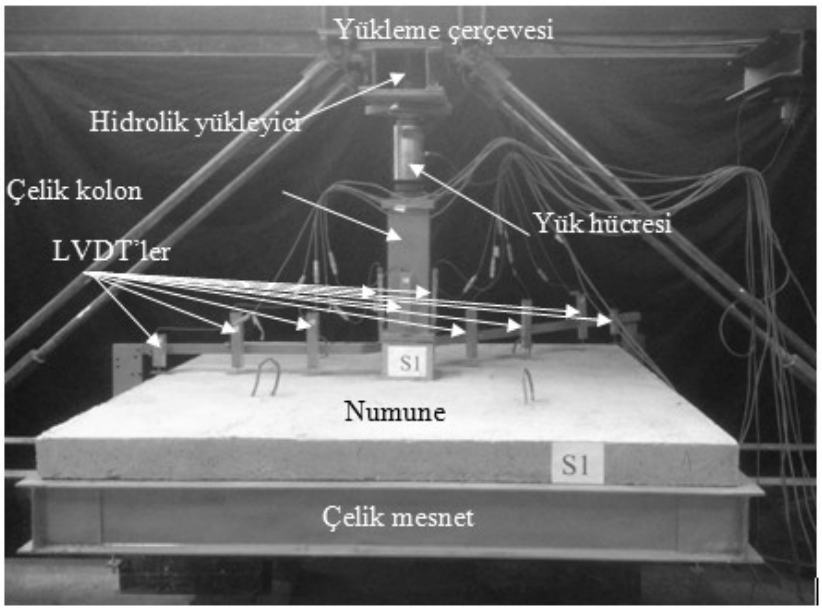
Mesnet şartları ise birçok çalışmada döşeme etrafında basit mesnetler kullanarak sağlanmıştır (Johnson ve Robertson, 2004; Binici ve Bayrak, 2005; Florut ve diğerleri, 2010; Hassan ve diğerleri, 2013). Bu basit mesnetler döşeme üzerinde ki sıfır moment çizgilerini temsil etmektedir. Binici ve Bayrak (2005) tarafından yapılan çalışmada ise dört tarafından basit mesnetli döşeme parçalarının mesnet şartlarının gerçeğe uygun olduğu belirtilmiştir.



Resim 3.3. Yayılı yükleme uygulamak için kullanılan hava yastıkları (Rusinowski, 2005)

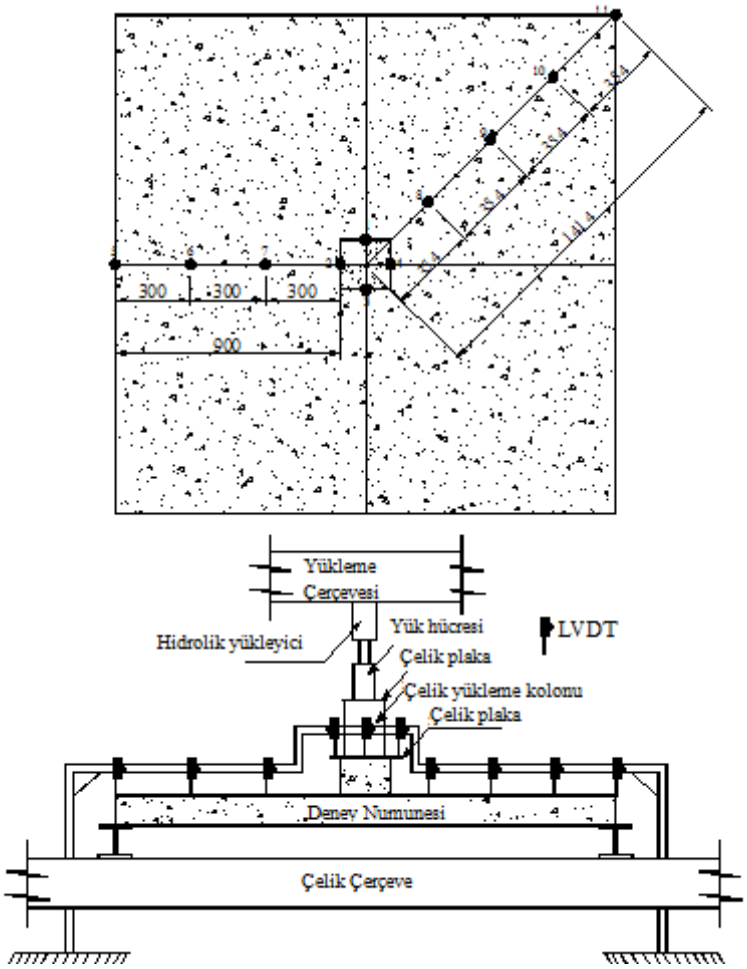
Bu çalışmada ise deney elemanları, basit mesnet görevi görecek olan I profillerden imal edilmiş geniş bir çelik çerçeve üzerine oturtulmuştur. Çelik çerçeve, döşemenin 4 kenarı boyunca basit mesnetler üzerine oturmasını sağlamıştır. Deney elemanlarının boyutları ise sıfır moment çizgilerini temsil edecek şekilde seçildiğinden mesnet bölgelerindeki dönme davranışı engellenmemiştir. Zımbalamaya neden olacak yükleme ise döşeme merkezinden uygulanmıştır.

Daha önce belirtildiği gibi, döşemeler orta noktalarında bulunan bir kolonla birlikte imal edilmişlerdi. Döşemeler üzerine eksenel yükleme uygulayabilmek için bu betonarme kolon üzerine çelik bir blok yerleştirilmiş ve eksenel yük bu çelik parça yardımıyla betonarme kolona ve döşemeye aktarılmıştır. Deney düzeneğine ait detaylar Resim 3.4'te sunulmuştur.



Resim 3.4. Deney düzeneği

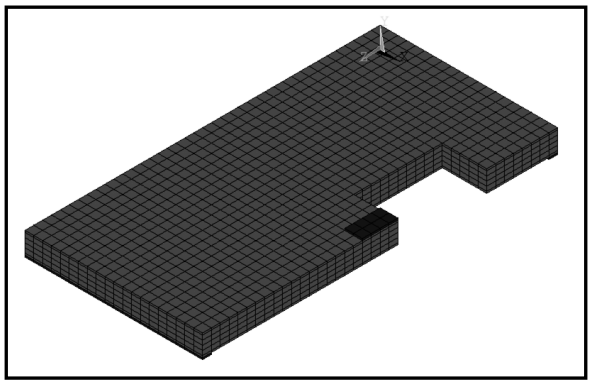
Eksenel yük, 400 kN kapasiteli hidrolik bir yükleyici kullanılarak uygulanmış ve aynı kapasitede bir yük hücresi yardımıyla ölçülmüştür. Yükü uygulamak için yükleme hızı ayarlanabilen bir hidrolik pompa kullanılmıştır. Bütün deneylerde yükleme hızının sabit tutulmasına dikkat edilmiştir. Döşemenin merkezindeki düşey kolonun ortalama deplasmanını ve döşemenin deplasman profilini hesaplayabilmek için toplam 11 adet düşey deplasman ölçümü alınmıştır. Deplasman ölçümlerinin alındığı noktalar Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Deplasmanlar elektronik doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler (LVDT) kullanarak ölçülmüştür. Bu sayede deney elemanlarının kuvvet deplasman ilişkileri ve rijitlikleri ölçülmüş, enerji tüketme kapasiteleri hesaplanabilmiştir.



Şekil 3.5. Deney düzeneği ve LVDT'lerin konumu

3.3. Deney Elemanlarının CFRP Şeritlerlerle Güçlendirilmesi

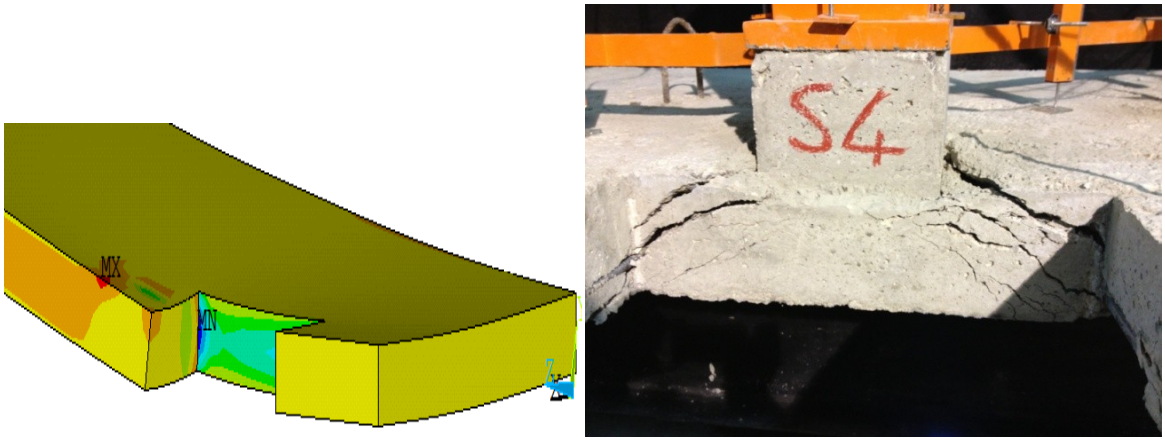
Deney elemanlarını CFRP şeritler ile güçlendirmeden önce, CFRP şeritlerin deney elemanları üzerinde yapıştırılması gereken yerler belirlenmiştir. Bunun için Anıl ve diğerleri (2014) tarafından testi yapılan deney elemanlarından en az zımbalama yükü taşıma kapasitesine sahip olanı seçilmiş ve doğrusal elastik bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur (Şekil 3.6). Oluşturulan bu modelde kolon üzerine deney elemanının zımbalama yükü taşıma kapasitesi kadar yük verilmiş ve oluşan gerilmeler incelenmiştir. Kurulan sonlu eleman modeli hakkında bu bölümde detaylı bilgi verilmeyecektir. Sonlu eleman modellerinin detaylı anlatımı CFRP ile güçlendirilmiş deney elemanlarının sonlu eleman analizlerinin sonuçlarının sunulduğu bölümde yapılacaktır. Burada sadece oluşturulan modelin statik analizi sonucunda elde edilen gerilme dağılımları ve deney sonuçları ile uyumu hakkında bilgi verilecektir.



Şekil 3.6. Simetriden faydalanılarak oluşturulan yarım model

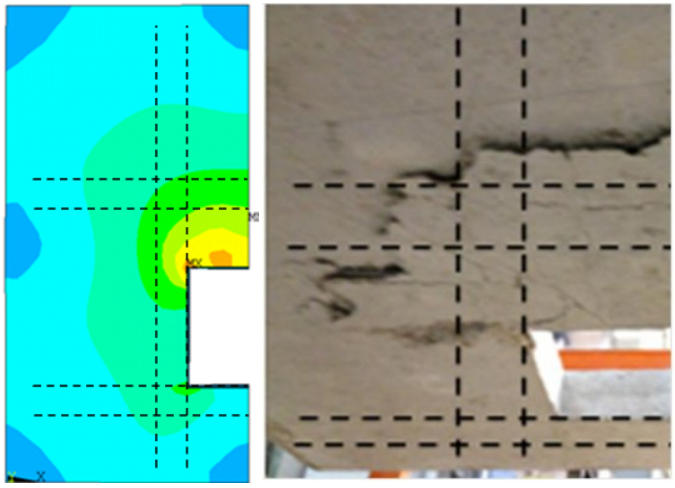
Şekil 3.6'da verilen modelin elastik analizi sonucu aşağıdaki gerilme dağılımları elde edilmiştir. Şekil 3.7a ve Şekil 3.7b'de gerilme yığılması ve buna bağlı olarak oluşan çatlaklar gösterilmektedir. Şekil 3.7b'de görülen büyük çatlakların oluşumunu geciktirebilmek ve döşemelerin zımbalama dayanımlarını arttırabilmek için, döşeme üzerinde bulunan boşlukların 4 köşesine U şeklinde CFRP şeritler yapıştırılmıştır.

Döşemenin alt yüzündeki gerilme dağılımı ise Şekil 3.8a' da verilmiştir. Şekil 3.8a' da aynı zamanda yerleştirilmesi planlanan CFRP şeritler de kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Şekil 3.8b' de ise sonlu eleman analizi yapılan deney elemanının deney sonrası döşeme alt yüzünün görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.8a ve Şekil 3.8b karşılaştırıldığında gerilmelerin yoğun olduğu bölgelerde zımbalama çatlaklarının olduğu görülmektedir. Hem bu zımbalama çatlaklarının oluşumunu önlemek hem de açılan boşluklar için kesilen döşeme donatıları sebebiyle eğilme dayanımı azalan döşemelerin eğilme dayanımı arttırmak için kesikli çizgilerle gösterilen bölgelere CFRP şeritler yerleştirilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.7. (a)Sonlu eleman analizinden elde edilen kayma gerilmesi dağılımı (b) deney sonucu oluşan çatlaklar



(a) (b)

Şekil 3.8. (a)Sonlu eleman analizinden elde edilen kayma gerilmesi dağılımı (b) deney sonucu oluşan çatlaklar

Kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımının etkileyen faktörlerden birinin boyuna donatı oranı olduğu bilinmektedir (Ebead ve Marzouk, 2002). Döşeme içindeki boyuna donatı oranını arttırmak oluşacak çatlakların daha az geniş ve daha az derin olmasını sağlamaktadır (Soudki ve diğerleri, 2012). Buna bağlı olarak artan agrega kenetlenmesi ve çatlamamış beton kesit derinliğinin artması zımbalama dayanımını olumlu yönde etkilemektedir. Döşeme alt yüzüne yerleştirilen CFRP şeritlerin döşemenin eğilme kapasitesini arttırdığı gibi zımbalama kapasitesine de bir miktar katkı sağlayacağı bilinmektedir. Döşeme alt yüzüne yerleştirilen CFRP şeritlerin zımbalama dayanımına

yapacağı katkı, CFRP şeritleri eşdeğer çelik donatıya çevirerek, BS8110(1997) tarafından kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımının hesaplanması için önerilen denklemin kullanılmasıyla hesaplanmıştır. Bu denkleme ait detaylar, deney sonuçlarının analitik sonuçlarla karşılaştırıldığı bölümde verilmiştir.

Döşeme alt yüzüne CFRP şerit yapıştırılarak güçlendirme yapılan deneysel çalışmalar mevcuttur (Anıl ve diğerleri 2013; Michel ve diğerleri, 2007; Radnic ve diğerleri, 2015). Gereken CFRP kesit alanı ise Florut ve diğerleri (2010) tarafından verilen yöntemle hesaplanmıştır. Florut ve diğerleri (2010) tarafından önerilen yönteme göre boşluk açılması için kesilen donatı tarafından alınan eksenel kuvvet yapıştırılacak CFRP şeritler tarafından karşılanabilmelidir. Buna göre CFRP genişliği aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$A_{cfrp}E_{cfrp}\varepsilon_{cfrp} = \sigma_y A_s \tag{3.1}$$

A_{cfrp} ve A_s, sırasıyla, tek bir yönde kullanılacak olan CFRP şeritlerin ve boşluk açmak için kesilen donatının kesit alanını, E_{cfrp} ve ε_{cfrp}, sırasıyla CFRP şeritlerin elastisite modülünü ve kopma anındaki birim deformasyonunu, σ_y ise kesilen donatının akma gerilmesini göstermektedir. Bu hesaplama yönteminde dikkat edilmesi gereken nokta ise, eğilme momentleri etkisi altında olan yapılar için ε_{cfrp} değerinin %0,8 ile sınırlandırılmış olmasıdır (Florut ve diğerleri, 2010). Gerçek ε_{cfrp} değeri bu değerden çok daha büyük olmasına rağmen, kompozit davranışın bu birim deformasyon değerinde kaybolduğu kabul edilmektedir.

Deney elemanlarının CFRP ile güçlendirilebilmesi için tek yönde çalışan CFRP şeritler kullanılmıştır. İlk grup CFRP'ler 150 mm genişliğindedir ve döşeme alt yüzlerine delik çevresinde döşeme uzunluğu boyunca iki bileşenli epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. Boşluğun büyük ve döşeme kenarına yakın olduğu durumlarda, CFRP şeritlerin mesnetle döşeme arasına sıkışmasını önlemek için 50 mm genişliğinde CFRP şeritler kullanılmıştır. Buna ek olarak, boşluk kenarına denk gelecek şekilde döşeme alt yüzüne yapıştırılan CFRP şeritlerin kolon hizasına denk gelmesi durumunda, CFRP şeritler kolon hizasından uzaklaştırılarak yapıştırılmıştır.

Döşeme alt yüzüne yapıştırılan CFRP şeritlerden başka, güçlendirme için kullanılan CFRP elemanlar ise döşemede bırakılan boşlukların köşe noktalarına döşeme alt ve üst yüzleri ve döşeme kalınlığı boyunca U şeklinde yapıştırılmışlardır. U şeklinde boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritlerin detayları Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Şekil 3.10'da ise döşeme alt yüzüne yapıştırılan CFRP şeritlerin detayları gösterilmiştir.

Güçlendirme için kullanılacak U şeklindeki CFRP şeritlerin alanı belirlenirken, CFRP şeritlerin döşemelerin zımbalama dayanımına katkısının, kesmeye karşı CFRP şeritler ile güçlendirilen kirişlerdeki gibi olacağı kabul edilmiştir. Chen ve Teng (2001) ise yaptıkları çalışmada kesmeye karşı FRP şeritlerle güçlendirilmiş kirişlerdeki sıyrılma davranışının basit kesme deneylerindeki sıyrılma davranışına çok benzer olduğunu söylemiştir. Buna dayanarak boşluk köşelerine U şeklinde yapıştırılan CFRP şeritlerin döşemelerin zımbalama dayanımına olan katkısı basit kesme deneylerinde olduğu gibi CFRP ile beton arasındaki yüzeyin kesme dayanımı ile CFRP genişliği ve uzunluğunun çarpılmasıyla elde edilmiştir. Bu noktada, beton ile CFRP arasındaki sıyrılma davranışını göz önüne alarak, ara yüzeyin taşıyabileceği en büyük kayma gerilmesinin doğru olarak hesaplanması oldukça önemlidir. Bu konu üzerine oldukça fazla çalışma yapılmıştır. U şeklindeki şeritlerin tasarımı yapılırken, beton ile CFRP arasında oluşabilecek en büyük kayma gerilmesini hesaplamak için kullanılan modellerden Lu ve diğerleri (2005) tarafından önerilen modelin denklemi kullanılmıştır. Denklemden elde edilen en büyük kayma gerilmesi değeri, CFRP şerit genişliği ve yapışma boyu ile çarpılarak (döşeme faydalı yüksekliği) CFRP şeritler tarafından taşınan kesme kuvvetleri hesaplanmıştır. Seçilen kayma gerilmesi denklemi hakkında detaylı bilgi, sonlu elemanlar analizleri bölümünde verilecektir. U şeritlerin tasarımı yapılırken, önceden döşeme alt yüzüne yapıştırılan CFRP şeritlerin döşemelerin zımbalama dayanımına %10 katkı yapacağı hesaplanmıştır. Bunun için döşeme alt yüzüne yapıştırılan CFRP şeritler eşdeğer çelik donatıya dönüştürülmüştür. Daha sonra, boyuna donatı oranının zımbalama kapasitesi hesabında kullanan şartnamelerin denklemleri kullanılarak döşeme alt yüzündeki CFRP şeritlerin zımbalama dayanımına olan katkısı %10 olarak hesaplanmıştır. Bu katkı miktarı U şeritler tarafından sağlanması beklenen ek kesme kuvveti miktarından düşülmüştür. Boşluk köşelerine yerleştirilen U şeklindeki CFRP şeritlerin hangilerinin etkin şekilde çatlak oluşumunu önleyerek kesme dayanımına katkı yapacağını belirleyebilmek için Anıl ve diğerleri (2014) tarafından yapılan çalışmanın sonuçları incelenmiştir (Resim 3.5).

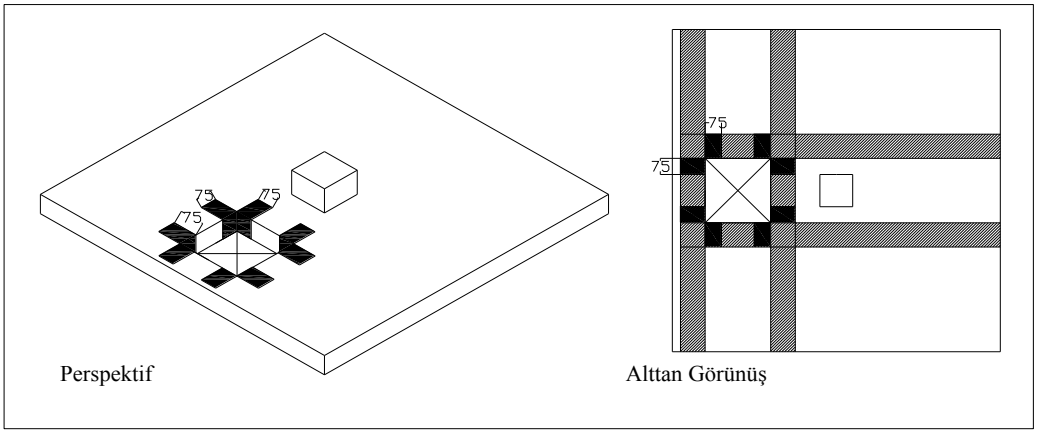


Resim 3.5. U şeritlerin yalnızca iki tanesinin etkili olarak çalıştığını gösteren fotoğraflar (Anıl ve diğerleri (2014)

İncelenen fotoğraflardan boşlukların 4 köşesine yerleştirilen 8 kanatlı 4 adet U şeritten toplam iki kanadın zımbalama dayanımına katkı yapacağı görülmüştür. Diğer kanatların zımbalama dayanımına olan katkısı ise emniyetli tarafta kalınarak ihmal edilmiştir. Zımbalama dayanımına katkısı ihmal edilen U şeklindeki şeritlerden mesnet bölgesine yakın olanların ise döşeme üzerinde bulunan boşlukların mesnet bölgelerine yakınlaştığı durumlarda oluşabilecek prematüre göçme ihtimaline karşı sistemi güçlendirmesi amaçlanmıştır. Yapılan güçlendirme tasarımı ile güçlendirilmiş haldeki deney elemanlarının ortalama zımbalama dayanımlarının, referans numunesinin zımbalama dayanımı olan 193 kN değerinden daha fazla olması sağlanmıştır. Ayrıca en az zımbalama yükü taşıyabilen döşemenin zımbalama dayanımını boşluksuz referans döşemenin zımbalama dayanımına %85 oranında yaklaştırılmıştır. Çizelge 3.3'te güçlendirme sisteminin tasarımını sonucunda elde edilen zımbalama yükü taşıma kapasiteleri görülmektedir.

Çizelge 3.3. Güçlendirme sistemi tasarımının sonuçları

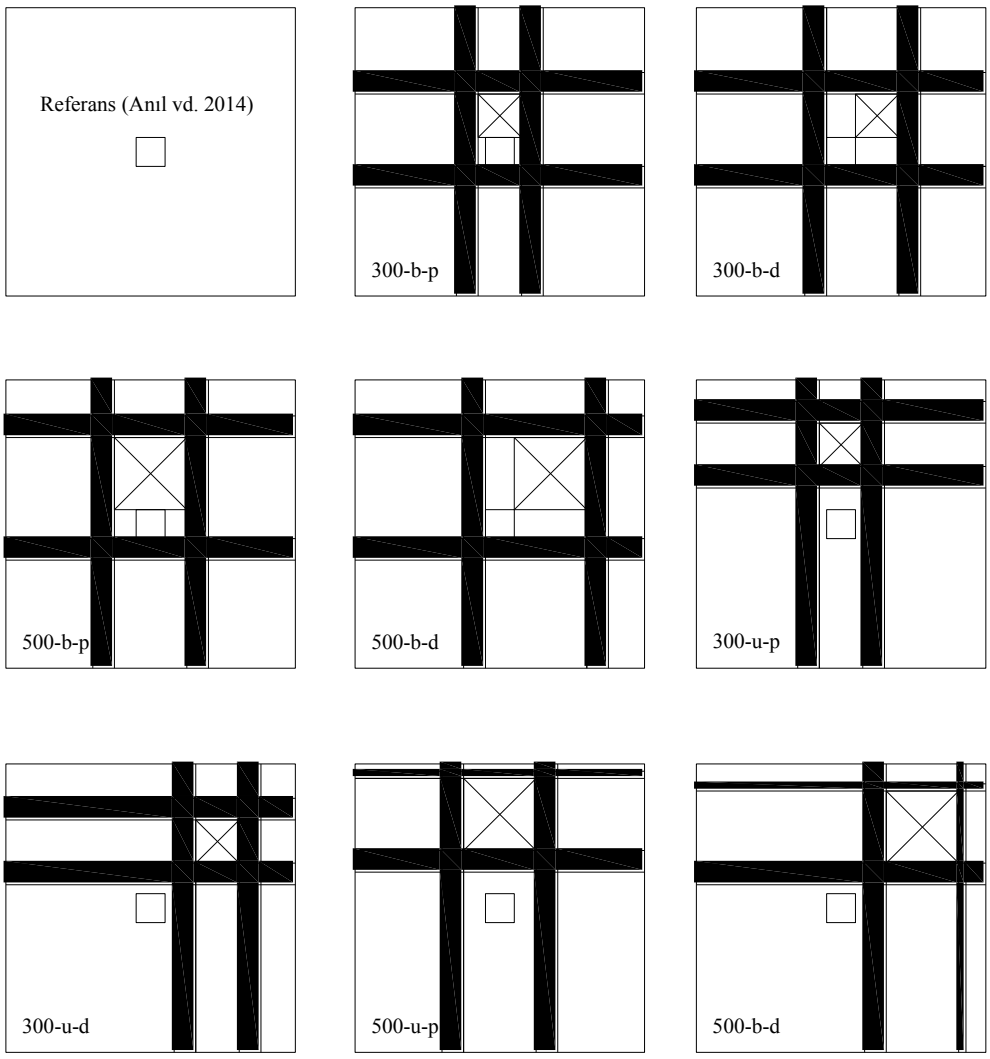
Deney Elemanı	Zımbalama Kapasitesi (kN)	Gereken Ek Kapasite (kN)	Sağlanan (kN)			Toplam Kapasite (kN)
			U Şeritler	Diğer Şeritler	Toplam Güçlendirme	
Ref.	193	-	-	-	-	-
2	99	94	77	10	87	186
3	126	67	77	13	100	226
4	77	116	77	8	85	162
5	95	98	77	9	86	181
6	135	58	77	13	90	225
7	172	21	77	17	94	266
8	116	78	77	12	89	205
9	139	54	77	14	91	230
Ortalama Kapasite (kN)						210



Şekil 3.9. U şeklinde yapıştırılan CFRP şeritlerin görüntüsü

CFRP şeritler döşeme yüzeyine yapıştırılmadan önce, döşeme üzerinde CFRP şeritlerin yapışacağı kısımlar ucuna taşlama aparatı takılmış bir matkap kullanılarak pürüzlü hale getirilmiştir (Resim 3.6). Bu işlem CFRP ile beton arasındaki aderans miktarını arttırmak için yapılmıştır. Ardından, kalan toz ve küçük parçacıkları uzaklaştırmak için nemli bir sünger ile pürüzlü yüzeyler temizlenmiş ve basınçlı hava ile kurutulmuştur (Resim 3.7). Daha sonra, epoksi karışımı hazırlanarak yapışma yüzeylerine sürülmüştür. Epoksi sürüldükten sonra, CFRP şeritler döşeme yüzeyine yapıştırılmış ve arada kalmış olabilecek hava kabarcıkları CFRP şeritleri el ile daha gergin hale getirerek uzaklaştırılmıştır (Resim 3.8). Son olarak, CFRP şeritlerin üzerine tekrar epoksi sürülerek kalmış olabilecek bütün boşluklar doldurulmuştur. Bütün güçlendirme aşaması boyunca hava sıcaklığı yaklaşık olarak 20^{o}C olarak ölçülmüştür. Deney elemanları test edilmeden önce laboratuar

ortamında en az 7 gün bekletilmişlerdir. Kullanılan CFRP şeritlerin ve epoksi karışımının mekanik özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.



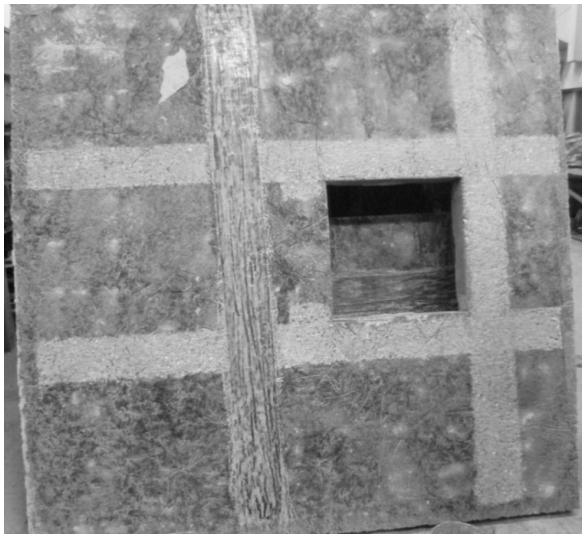
Şekil 3.10. Döşeme alt yüzlerine yapıştırılan CFRP şeritlerin görüntüsü



Resim 3.6. Döşeme alt yüzlerine CFRP yapıştırmadan önce döşeme yüzeylerinin pürüzlü hale getirilmesi



Resim 3.7. Döşeme yüzeylerinin basınçlı hava ile temizlenmesi



Resim 3.8. Döşeme yüzeylerine CFRP yapıştırılması

Çizelge 3.4. Kullanılan CFRP ve epoksinin mekanik özellikleri

CFRP'nin özellikleri	Açıklamalar
Yapısı	Lifler: Karbon Fiber Örgü: Termo-plastik fiber
Alan ağırlığı (g/m^2)	220 ± 10
Yoğunluğu (g/m^3)	$1{,}78 \times 10^{-6}$
Kalınlığı (mm)	0,12
Çekme dayanımı (MPa)	4100
Elastisite modülü(MPa)	231000
Kopma uzaması (%)	%1,7
Epoksinin özellikleri	**Açıklamalar**
Çekme dayanımı (MPa)	30
Elastisite modülü(MPa)	3800

4. DENEY SONUÇLARI

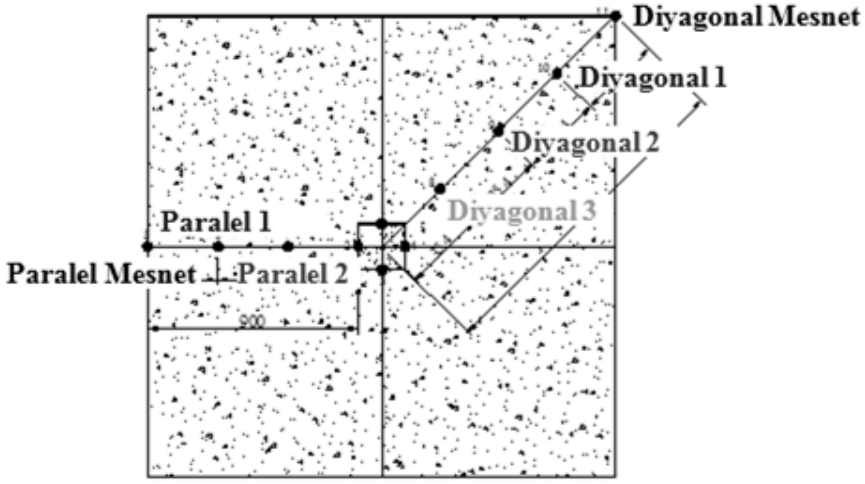
Bu bölümde elde edilen deney sonuçları daha önce güçlendirilmemiş deney elemanlarının deneylerini yapan Anıl ve diğerleri (2014) tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak sunulmuştur. Bu karşılaştırma, uygulanan güçlendirme yönteminin etkisinin deney elemanları üzerindeki etkisinin sayısal olarak irdelenebilmesine olanak sağlamıştır. Deney elemanlarının göçme mekanizmaları, deplasman profilleri, zımbalama kapasiteleri, enerji tüketme kapasiteleri, en büyük deplasmanları ve CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri detayları ile birlikte sunulmuştur.

4.1. Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümde deney elemanlarından elde edilen veriler incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Anıl ve diğerleri (2014) tarafından test edilen güçlendirilmemiş deney elemanları ve yine aynı çalışmada test edilmiş boşluksuz referans deney elemanı ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Döşemelerin deplasman profilleri ise döşeme üzerine yerleştirilen LVDT' lerden alınan sonuçların deney süresi boyunca (zımbalama anına kadar) çizdirilmesiyle verilmiştir. LVDT'lerin isimlendirilmesi ve döşeme üzerindeki konumları Şekil 4.1'de verilmiştir. Deney elemanlarına ait merkezi düşey deplasman ve düşey kuvvet ilişkileri çizilirken, her bir yük adımı için kolon yüzlerine yerleştirilmiş 4 adet LVDT' den alınan değerlerin ortalaması alınmış ve bulunan değerden, Şekil 4.1'de paralel mesnet olarak isimlendirilen LVDT'den okunan deplasman değeri çıkarılmıştır. Bu işlem döşemelerin altında mesnet olarak kullanılan ve çelik I profillerin kaynaklanması ile imal edilmiş olan çerçevenin yükleme altında deformasyona uğraması sebebiyle oluşan ek deplasmanların ayıklanmasına ve döşeme deformasyonlarının net olarak elde edilebilmesine yardımcı olmuştur.

LVDT'lerden alınan okumaların yanı sıra, döşeme alt yüzüne yapıştırılan CFRP şeritlerin orta noktalarına yerleştirilmiş birim deformasyon ölçerlerden okunan deformasyon değerleri ile eksenel yükleme arasındaki ilişki de CFRP şeritlerin yüklemenin hangi aşamasına kadar etkin olarak çalıştığını görebilmek için kullanılmıştır.

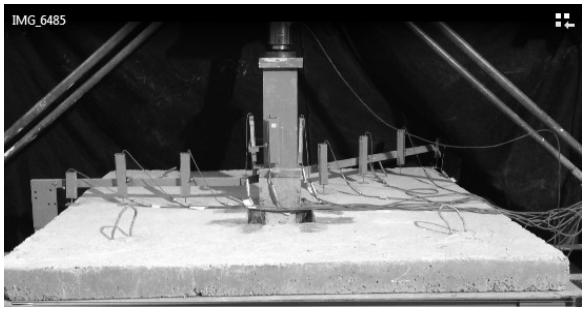
Sonraki bölümlerde 8 adet deney elemanı için elde edilen sonuçlar ayrı ayrı karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.1. LVDT'lerin döşeme üzerindeki konumları ve isimleri

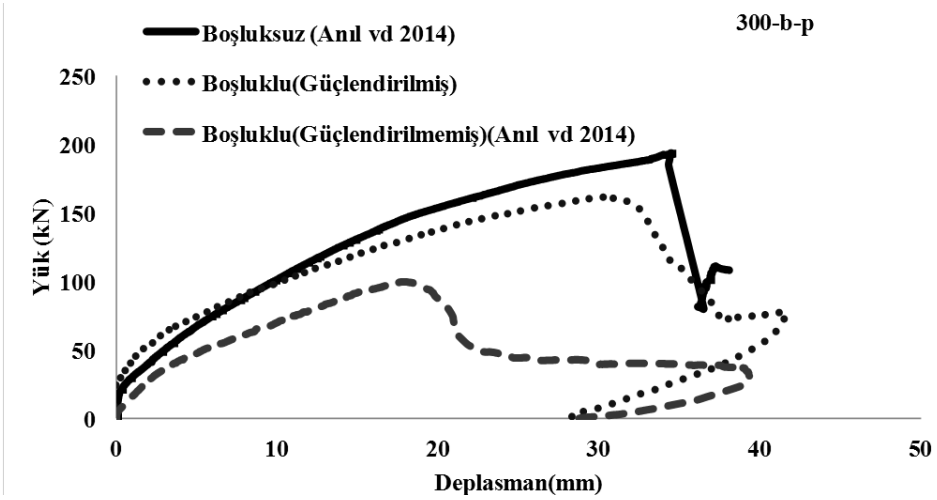
4.1.1. 300-b-p deney elemanının (deney elemanı 2) test sonuçları

300-b-p deney elemanı, 300 mm x 300 mm boyutlarında kolona bitişik ve paralel konumda boşluğu olan deney elemanıdır. Deney elemanının test başlamadan hemen önceki görüntüsü Resim 4.1'de verilmiştir. Deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrisi ise boşluksuz deney elemanı ve güçlendirilmemiş deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrileri ile birlikte Şekil 4.2' de gösterilmiştir. Şekil 4.2'den görülebileceği gibi deney elemanı 35 mm düşey deplasman değerine ulaştıktan sonra taşıma gücünü kaybetmiştir. Deney elemanının zımbalama yükünü taşıma gücü kapasitesi ise 160 kN olarak ölçülmüştür. Anıl ve diğerleri (2014) tarafından aynı elemanın güçlendirilmeden önceki deplasman kapasitesi 18 mm, taşıma gücü kapasitesi ise 100 kN olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında, CFRP ile güçlendirmenin taşıma gücünü %60 arttırdığı, deplasman kapasitesini ise %94 oranında arttırdığı görülmüştür. Boşluksuz referans deney elemanı ise Anıl ve diğerleri (2014) tarafından test edilmiş ve taşıma gücü kapasitesi 193 kN, deplasman kapasitesi ise 37 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında güçlendirilmiş deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin referans deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin %83'ü civarında olduğu, deplasman kapasitesinin ise referans deney elemanının deplasman kapasitesinin %98' i civarında olduğu görülmüştür.



Resim 4.1. 300 mm x 300 mm boyutlarında, kolona bitişik ve paralel konumda boşluğu olan deney elemanının deneyden önceki görüntüsü

Deney elemanlarının enerji tüketme kapasiteleri ise referans elemanının enerji tüketme kapasitesine göre normalize edilerek sunulmuştur (Çizelge 4.1). Enerji tüketme kapasiteleri hesaplanırken deney elemanlarının zımbalama yükü kapasitesine ulaştıktan sonra enerji tüketmedikleri kabul edilmiştir. Çizelge 4.1 incelendiğinde güçlendirme sonrasında, enerji tüketme kapasitesinin ciddi oranda arttığı görülebilir.



Şekil 4.2. 300 mm x 300 mm boyutlarında, kolona bitişik ve paralel konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri

Çizelge 4.1. 300-b-p deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri

Karşılaştırılan Değer	Referans	Güçlendirilmemiş	Güçlendirilmiş
Normalize edilmiş enerji tüketme kapasitesi	1,00	0,24	0,81

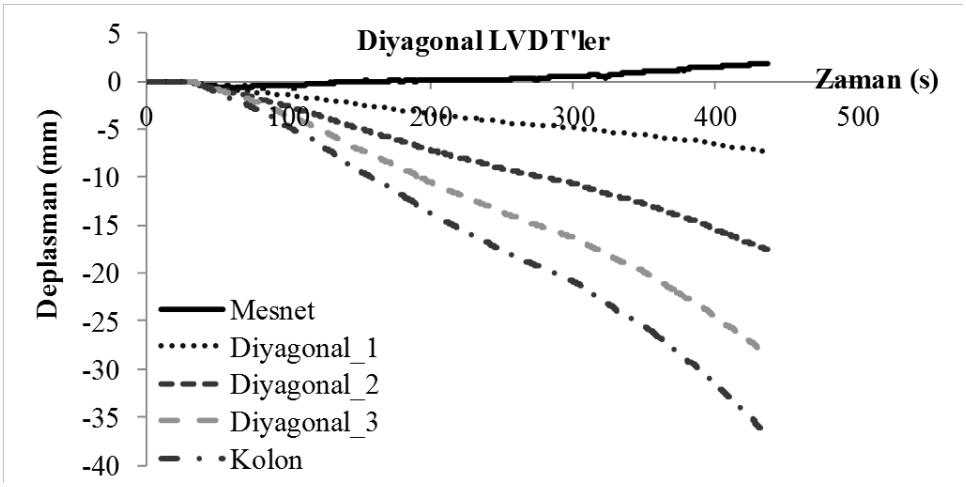
Deney elemanının güçlendirme öncesi (Resim 4.2a) ve sonraki (Resim 4.2b, c) durumu incelendiğinde ise döşeme alt yüzüne ve boşluk köşelerine yerleştirilen CFRP şeritlerin beton yüzeyinden sıyrıldığı görülmüştür.



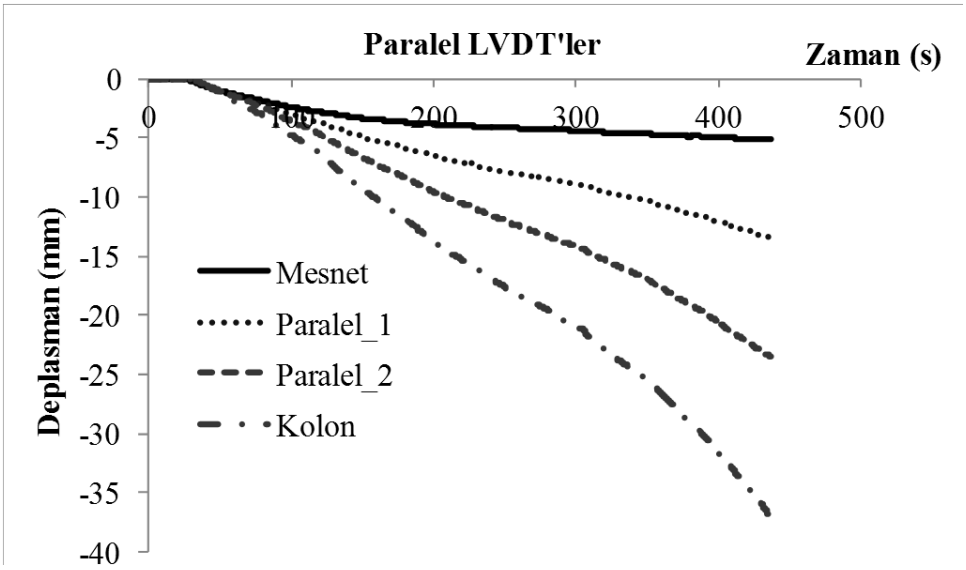
(a) (b) (c)

Resim 4.2. Deney elemanında oluşan çatlaklar (a) güçlendirmeden önce (Anıl ve diğerleri, 2014), (b) ve (c) güçlendirmeden sonra

Şekil 4.3'te deney elemanının yüzeyine diyagonal olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.3'te verilen deplasman profilleri incelendiğinde, mesnet olarak isimlendirilen LVDT'den alınan ölçümlerin köşe kalkmasını gösterdiği açıktır. Diğer LVDT'lerden alınan sonuçlar ise LVDT'nin döşeme merkezine yaklaşmasıyla deplasman değerinin arttığını göstermektedir. Şekil 4.4'te deney elemanının yüzeyinde döşeme kenarına paralel olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.4'te verilen deplasman değerleri incelendiğinde ise mesnet olarak isimlendirilen LVDT'ten okunan değerlerin 5 mm' ye kadar ulaştığı görülmüştür. Bu LVDT'den okunan değerler mesnet elastikiyetine bağlı olarak oluşan mesnet çökmesini temsil etmektedir.

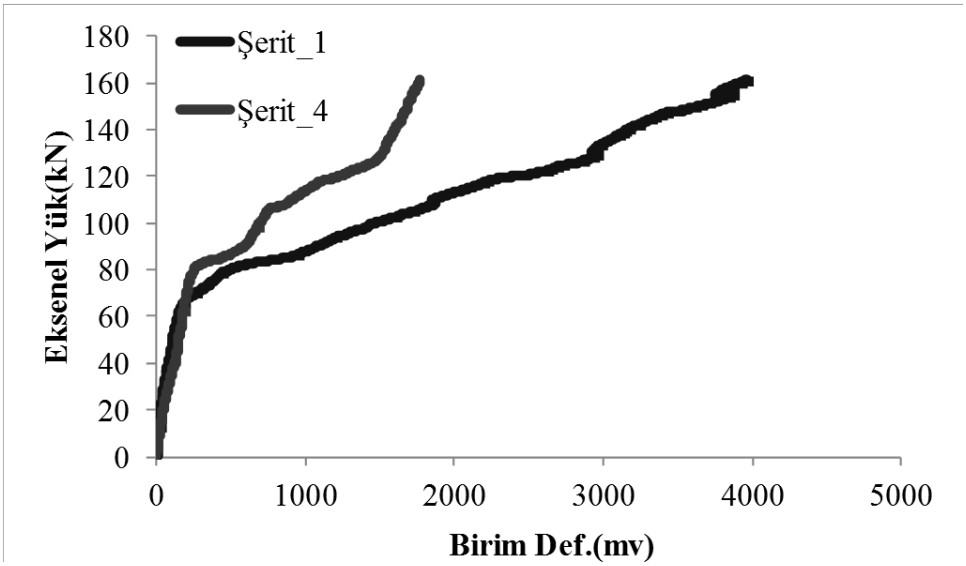


Şekil 4.3. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili



Şekil 4.4. Deney elemanın döşeme kenarlarına paralel yöndeki deplasman profili

Döşeme alt yüzüne yerleştirilen CFRP şeritlerde oluşan birim deformasyon değerlerinin eksenel yükle değişimi Şekil 4.5'de verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde ise birim deformasyon değerleri okunabilen CFRP şeritlerin zımbalama anına kadar yük almaya devam ettikleri görülmüştür. 2 ve 3 numaralı birim deformasyon ölçerlerden ise okumama alınamamıştır.



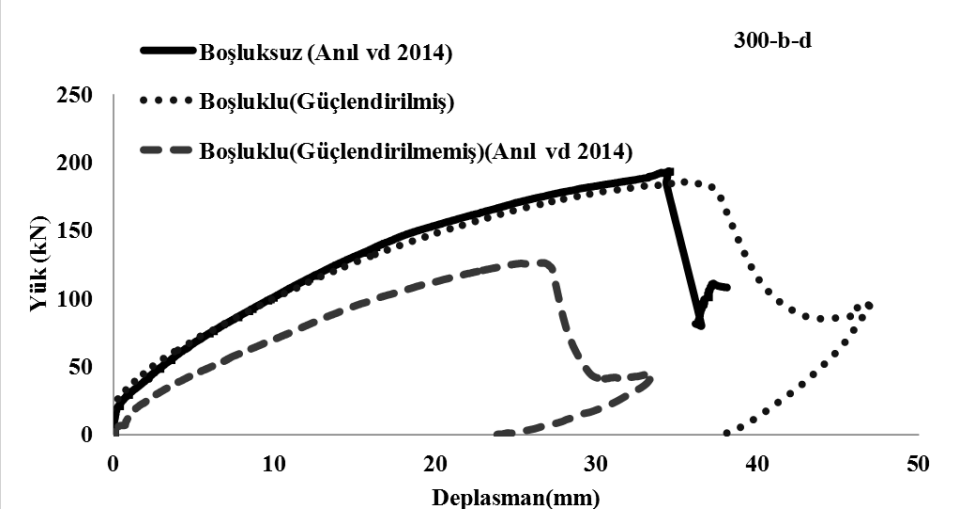
Şekil 4.5. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri

4.1.2. 300-b-d deney elemanının (deney elemanı 3) test sonuçları

300-b-d deney elemanı, 300 mm x 300 mm boyutlarında kolona bitişik ve diyagonal konumda boşluğu olan deney elemanıdır. Deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrisi ise boşluksuz deney elemanı ve güçlendirilmemiş deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrileri ile birlikte Şekil 4.6' da gösterilmiştir. Şekil 4.6'dan görülebileceği gibi deney elemanı 40 mm düşey deplasman değerine ulaştıktan sonra taşıma gücünü kaybetmiştir. Deney elemanının zımbalama yükünü taşıma gücü kapasitesi ise 186 kN olarak ölçülmüştür. Anıl ve diğerleri (2014) tarafından aynı elemanın güçlendirilmeden önceki deplasman kapasitesi 27 mm, taşıma gücü kapasitesi ise 126 kN olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında, CFRP ile güçlendirmenin taşıma gücü ve deplasman kapasitesini %48 arttırdığı görülmüştür. Bu sonuçlar referans deney elemanının sonuçları ile karşılaştırıldığında güçlendirilmiş deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin referans deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin %96'sı, deplasman kapasitesinin ise %108'i olduğu görülmüştür.

Deney elemanlarının enerji tüketme kapasitesi karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.2' de verilmiştir. Çizelge 4.2' den görülebileceği gibi, güçlendirilmiş numunenin enerji tüketme kapasitesi güçlendirilmemiş numuneninkinin 2 katından fazladır. Bununla beraber güçlendirilmiş numunenin enerji tüketme kapasitesi referans elemanının enerji tüketme kapasitesinden büyüktür.

Deney elemanı yüzeyindeki çatlaklar incelendiğinde boşluk yan yüzeylerinde eğik çatlakların oluştuğu görülmüştür (Resim 4.3a). Boşluk köşelerine yerleştirilen U şeklinde CFRP şeritlerin kolona yakın konumda olanlarının döşemenin üst ve alt yüzeylerinden büyük beton parçalarını kopartarak ayrıldığı görülmüştür (Resim 4.3a, Resim 4.3b) Bu durum kullanılan epoksinin beton ile CFRP arasında yeterli derecede aderans sağlayabildiğini göstermiştir.



Şekil 4.6. 300 mm x 300 mm boyutlarında, kolona bitişik ve diyagonal konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri

Çizelge 3.2. 300-b-d deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri

Karşılaştırılan Değer	Referans	Güçlendirilmemiş	Güçlendirilmiş
Normalize edilmiş enerji tüketme kapasitesi	1,00	0,46	1,08

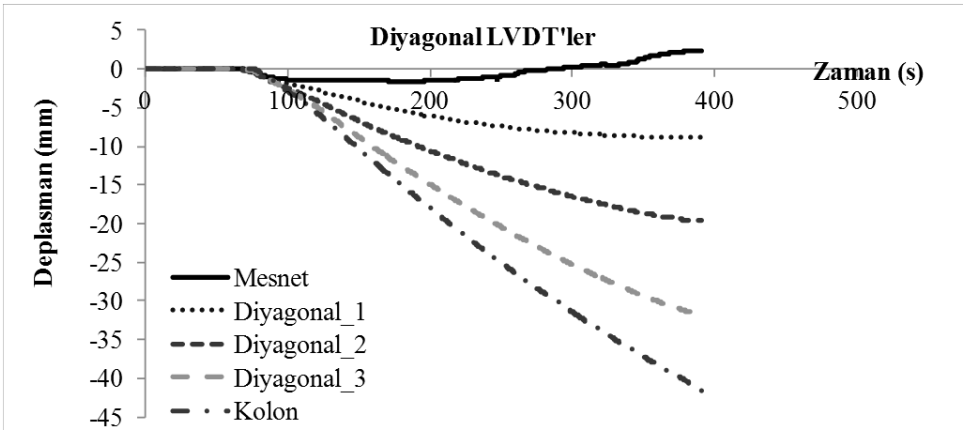


(a) (b)

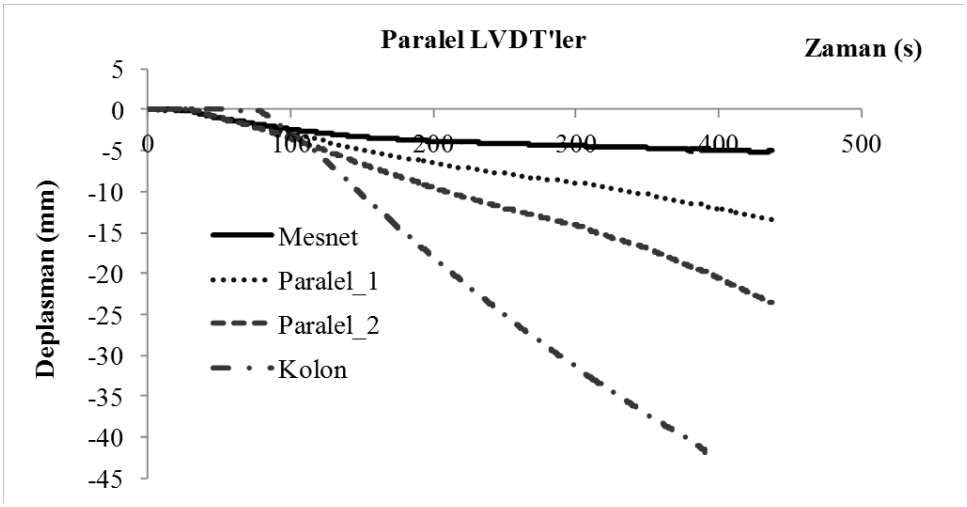
Resim 4.3. Deney elemanında oluşan çatlaklar (a) üst yüzde, (b) alt yüzde

Şekil 4.7'de deney elemanının yüzeyinde diyagonal olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.7'de verilen deplasman profilleri incelendiğinde, mesnet olarak isimlendirilen LVDT'den alınan ölçümlerin köşe kalkmasını gösterdiği görülecektir. Çelik mesnet çerçevesinin köşesinde bulunan LVDT, bir süre boyunca mesnet elastikiyetine bağlı olarak eksi deplasman değerleri okumuştur. Ancak merkezi eksenel yüklemenin etkisiyle kalkan köşelerin etkisi ise deneyin sonlarına doğru meydana

çıkmıştır. Diğer LVDT' lerden alınan sonuçlar ise LVDT' nin döşeme merkezine yaklaşmasıyla deplasman değerinin arttığını göstermektedir. Şekil 4.8'de deney elemanının kenarına paralel olarak yerleştirilen LVDT' lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.8' de verilen deplasman değerleri incelendiğinde ise mesnet olarak isimlendirilen LVDT'ten okunan değerlerin 5 mm' ye kadar ulaştığı görülmüştür. Bu LVDT'den okunan değerler mesnet elastikiyetine bağlı olarak oluşan mesnet çökmesini temsil etmektedir.



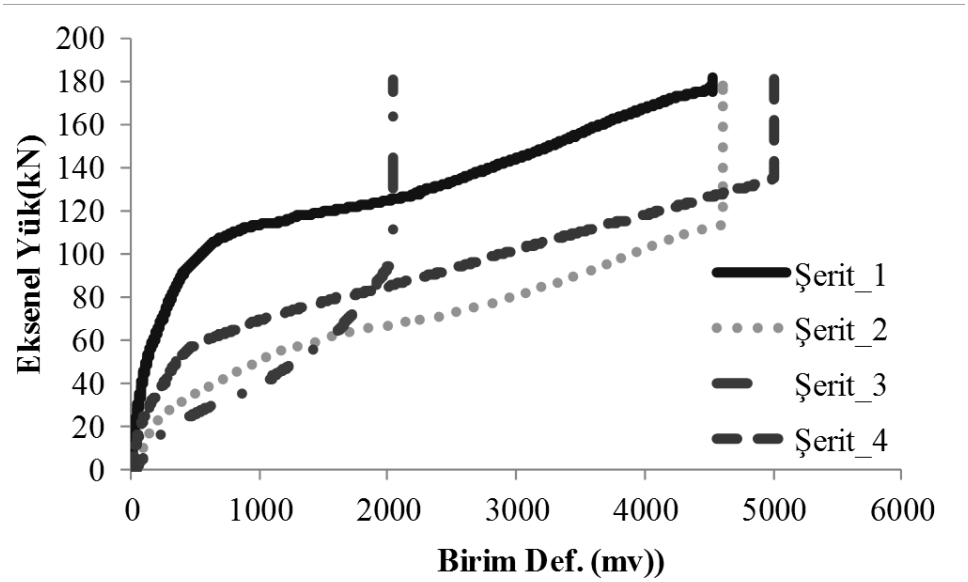
Şekil 4.7. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili



Şekil 4.8. Deney elemanın döşeme kenarlarına paralel yöndeki deplasman profili

Döşeme alt yüzüne yerleştirilen CFRP şeritlerde oluşan birim deformasyon değerlerinin eksenel yükle değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde ise CFRP şeritlerden bir tanesinin zımbalama anına kadar yük almaya devam ettiği görülmüştür. Diğer CFRP şeritler ise zımbalama yükünün yarısı ve 3/4'ü aralığındaki eksenel yük seviyelerinde deformasyon yapamaz hale gelmişlerdir. Bu durum CFRP şeritlerin

zımbalama anından önce sıyrılmaya başladığını göstermektedir. Kullanılan CFRP şeritlere ankraj uygulanması durumunda CFRP şeritlerin tümünün daha uzun süre yük almaya devam edeceği düşünülmektedir.



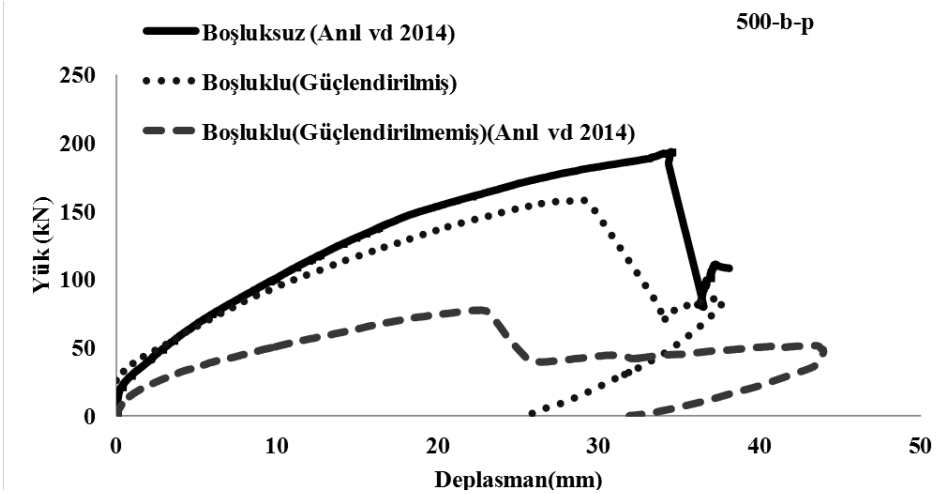
Şekil 4.9. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri

4.1.3. 500-b-p deney elemanının (deney elemanı 4) test sonuçları

500-b-p deney elemanı, 500 mm x 500 mm boyutlarında kolona bitişik ve paralel konumda boşluğu olan deney elemandır. Deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrisi ise boşluksuz deney elemanı ve güçlendirilmemiş deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrileri ile birlikte Şekil 4.10' da gösterilmiştir. Şekil 4.10 incelendiğinde deney elemanının 32 mm düşey deplasman değerine ulaştıktan sonra taşıma gücünü kaybettiği görülebilir. Deney elemanının zımbalama yükünü taşıma gücü kapasitesi ise 158 kN olarak ölçülmüştür. Anıl ve diğerleri (2014) tarafından aynı elemanın güçlendirilmeden önceki deplasman kapasitesi 23 mm, taşıma gücü kapasitesi ise 77 kN olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında, CFRP ile güçlendirmenin taşıma gücü kapasitesini %105, deplasman kapasitesini ise %39 arttırdığı görülmüştür. Bu sonuçlar referans deney elemanının sonuçları ile karşılaştırıldığında güçlendirilmiş deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin referans deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin %82'si, deplasman kapasitesinin ise %87'si olduğu görülmüştür.

Deney elemanlarının enerji tüketme kapasitesi karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.3'te verilmiştir. Çizelge 4.3'te güçlendirilmemiş deney elemanının enerji tüketme kapasitesinin, güçlendirilmiş elemanın kapasitesinin çok altında olduğu görülebilir. Aynı zamanda, güçlendirilmiş deney elemanının kapasitesi referans deney elemanının kapasitesinin %71'i kadardır. Güçlendirme etkisi oldukça yüksek olsa da, elemanın enerji tüketme kapasitesi referans elemanınınkinin altında kalmıştır.

Deney elemanı yüzeyindeki çatlaklar incelendiğinde, önceki deney elemanlarının aksine boşluk kenarlarında derin eğik çatlaklar oluşmadığı görülmektedir (Resim 4.4a). Önceki numunelere benzer şekilde boşluk köşelerine yerleştirilen U şeklinde CFRP şeritlerin kolona yakın konumda olanlarının döşemenin üst yüzeylerinden büyük beton parçalarını kopartarak ayrıldığı görülmüştür (Resim 4.4a). Döşeme alt yüzünde ise, kolona yakın bölgelerde, CFRP şeritlerin hemen yanından başlayan ve CFRP şeritlere paralel ilerleyen çatlaklar oluştuğu görülmüştür (Resim 4.4b).



Şekil 4.10. 500 mm x 500 mm boyutlarında, kolona bitişik ve paralel konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri

Çizelge 4.3. 500-b-p deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri

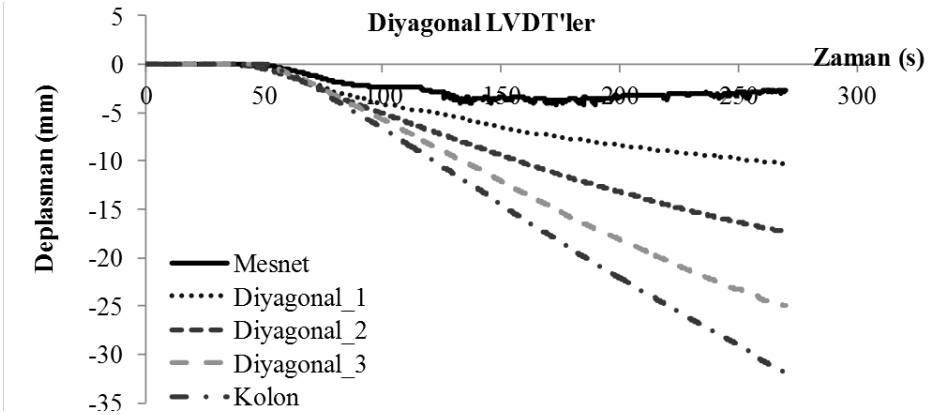
Karşılaştırılan Değer	Referans	Güçlendirilmemiş	Güçlendirilmiş
Normalize edilmiş enerji tüketme kapasitesi	1,00	0,25	0,71



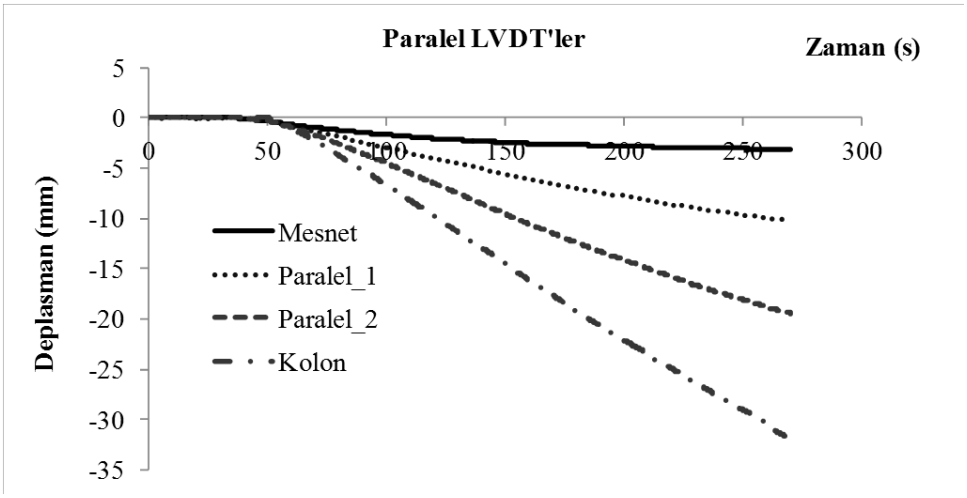
(a) (b)

Resim 4.4. Deney elemanında oluşan çatlaklar; (a) döşeme üst yüzü, (b) döşeme alt yüzü

Şekil 4.11'de deney elemanının yüzeyinde diyagonal olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.11'de verilen deplasman profilleri incelendiğinde, mesnet olarak isimlendirilen LVDT'den alınan ölçümlerden köşe kalkması açıkça görülememektedir. Mesnet isimli LVDT'den alınan ölçümlere ait çizim incelendiğinde yaklaşık 150s değerinden sonra eğrinin eğiminin işaret değiştirdiği görülecektir. Bu durumun sebebi mesnet bölgesindeki mesnet elastikiyetidir. Merkezi yükleme altında esneyerek çöken mesnet aşağı yönde deplasman yaparken, köşe kalkmasından dolayı ise mesnet çökmesinin etkisi azalmaktadır. Diğer LVDT' lerden alınan sonuçlar ise LVDT' nin döşeme merkezine yaklaşmasıyla deplasman değerinin arttığını göstermektedir. Şekil 4.12'de deney elemanının yüzeyinde kenarlara paralel olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.12' de verilen deplasman değerleri incelendiğinde ise mesnet olarak isimlendirilen LVDT' ten okunan değerlerin 3 mm' ye kadar ulaştığı görülmüştür. Bu LVDT' den okunan değerler mesnet elastikiyetine bağlı olarak oluşan mesnet çökmesini temsil etmektedir.

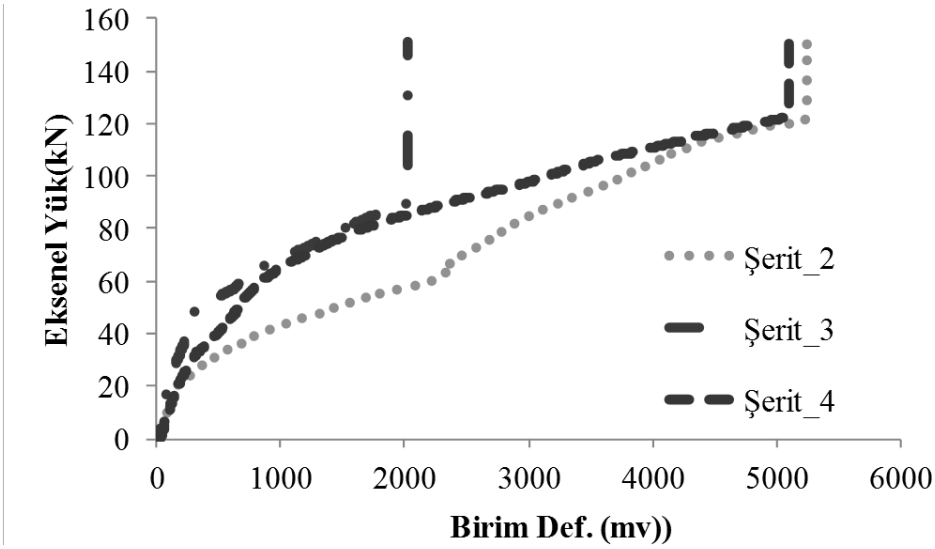


Şekil 4.11. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili



Şekil 4.12. Deney elemanın döşeme kenarlarına paralel yöndeki deplasman profili

Döşeme alt yüzüne yerleştirilen CFRP şeritlerde oluşan birim deformasyon değerlerinin eksenel yükle değişimi Şekil 4.13'de verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde ise birim deformasyon değerleri okunabilen CFRP şeritlerden iki tanesinin uzunca bir süre yük almaya devam ettiği görülmüştür. Diğer CFRP şerit ise zımbalama yükünün yarısı kadar olan eksenel yük seviyesinde deformasyon yapmaz hale gelmiştir.



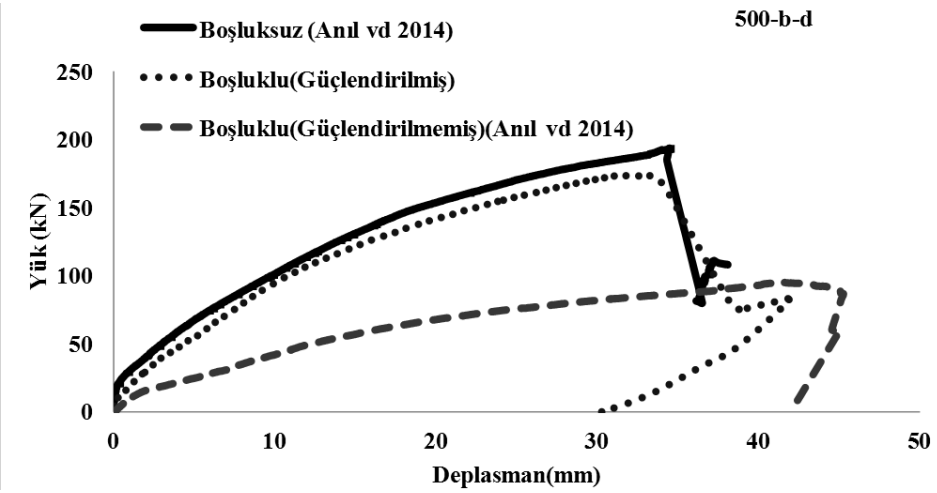
Şekil 4.13. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri

4.1.4. 500-b-d deney elemanının (deney elemanı 5) test sonuçları

500-b-d deney elemanı, 500 mm x 500 mm boyutlarında kolona bitişik ve diyagonal konumda boşluğu olan deney elemanıdır. Deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrisi ise boşluksuz deney elemanı ve güçlendirilmemiş deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrileri ile birlikte Şekil 4.14' te gösterilmiştir. Şekil 4.14 incelendiğinde deney elemanının 37 mm düşey deplasman değerine ulaştıktan sonra taşıma gücünü kaybettiği görülebilir. Deney elemanının zımbalama yükünü taşıma gücü kapasitesi ise 173 kN olarak ölçülmüştür. Anıl ve diğerleri (2014) tarafından aynı elemanın güçlendirilmeden önceki deplasman kapasitesi 42 mm, taşıma gücü kapasitesi ise 95 kN olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında, CFRP ile güçlendirme işleminin taşıma gücü kapasitesini %82 arttırdığı, deplasman kapasitesini ise %12 azalttığı görülmüştür. Bu sonuçlar referans deney elemanının sonuçları ile karşılaştırıldığında güçlendirilmiş deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin referans deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin %90'ı, deplasman kapasitesinin ise %100'ü olduğu görülmüştür.

Deney elemanlarının enerji tüketme kapasitesi karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.4'te verilmiştir. Çizelge 4.4'ten güçlendirilmemiş deney elemanının enerji tüketme kapasitesinin, güçlendirilmiş elemanın kapasitesinin yarısından biraz fazla olduğu görülecektir. Bunun yanında, güçlendirilmiş deney elemanının kapasitesinin referans deney elemanının kapasitesinin %90'nına ulaştığı da görülebilir.

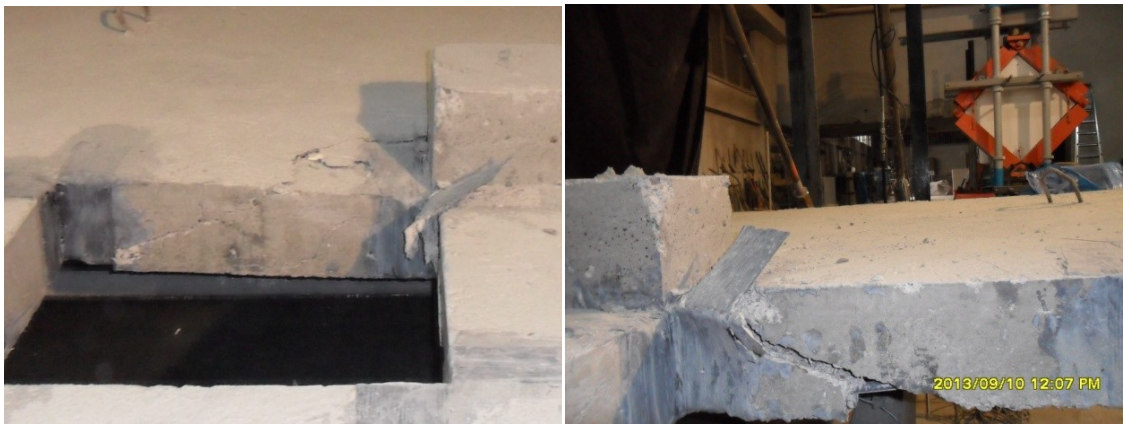
Deney elemanı yüzeyindeki çatlaklar incelendiğinde, boşluk kenarlarında eğik çatlaklar oluştuğu görülmektedir (Resim 4.5a). Bununla birlikte döşeme üst yüzünde kolon kenarından başlayıp boşluk kenarının orta noktasına doğru ilerleyen çatlaklarda görülmektedir (Resim 4.5a). Boşluk köşelerine yerleştirilen U şeklinde CFRP şeritlerin kolona yakın konumda olanının döşemenin üst yüzeyinden sıyrıldığı görülmüştür (Resim 4.5b).



Şekil 4.14. 500 mm x 500 mm boyutlarında, kolona bitişik ve diyagonal konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri

Çizelge 4.4. 500-b-d deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri

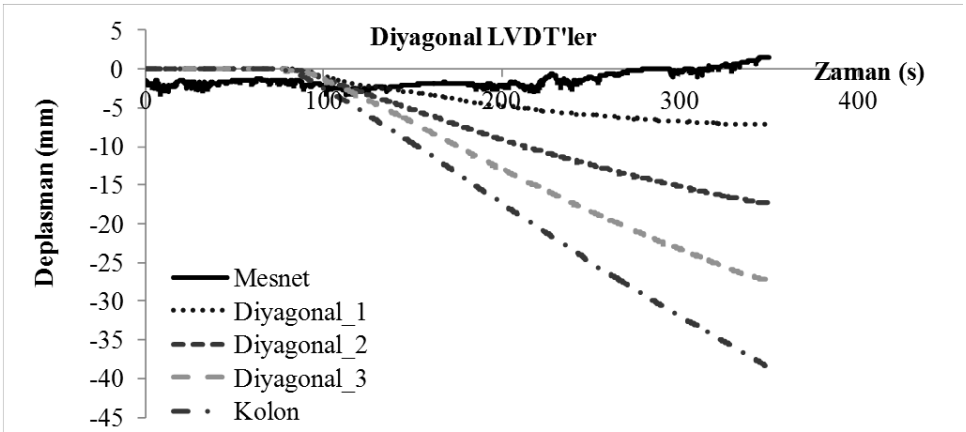
Karşılaştırılan Değer	Referans	Güçlendirilmemiş	Güçlendirilmiş
Normalize edilmiş enerji tüketme kapasitesi	1,00	0,55	0,90



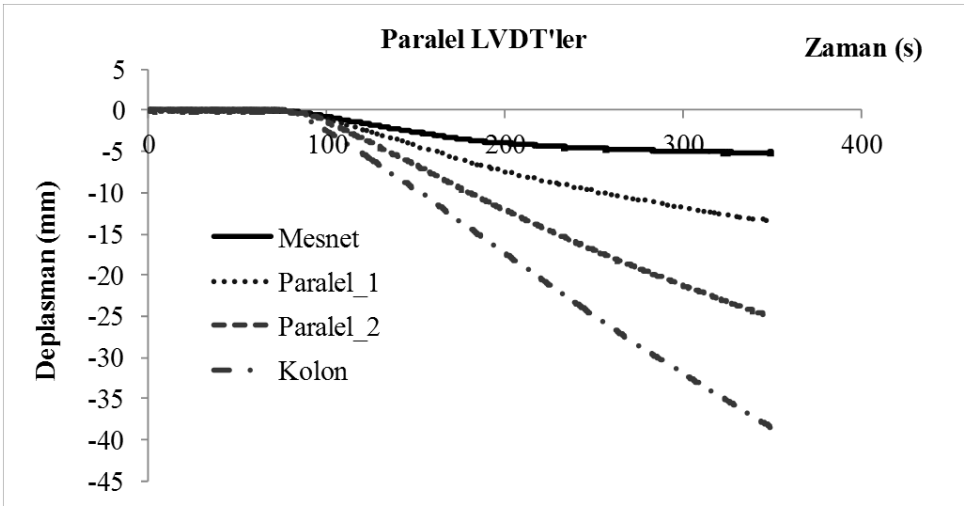
(a) (b)

Resim 4.5. Deney elemanında oluşan çatlaklar; (a) döşeme üst yüzü, (b) yakınlaştırılmış görüntü

Şekil 4.15'de deney elemanının yüzeyinde diyagonal olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.15'de verilen deplasman profilleri incelendiğinde, mesnet olarak isimlendirilen LVDT'den alınan ölçümlerden köşe kalkması açıkça görülmektedir. Diğer LVDT'lerden alınan sonuçlar ise LVDT'nin döşeme merkezine yaklaşmasıyla deplasman değerinin arttığını göstermektedir. Şekil 4.16'da deney elemanının yüzeyinde kenarlara paralel olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.16' da verilen deplasman değerleri incelendiğinde ise mesnet olarak isimlendirilen LVDT'ten okunan değerlerin 5 mm' ye kadar ulaştığı görülmüştür. Bu LVDT'den okunan değerler mesnet elastikiyetine bağlı olarak oluşan mesnet çökmesini temsil etmektedir.

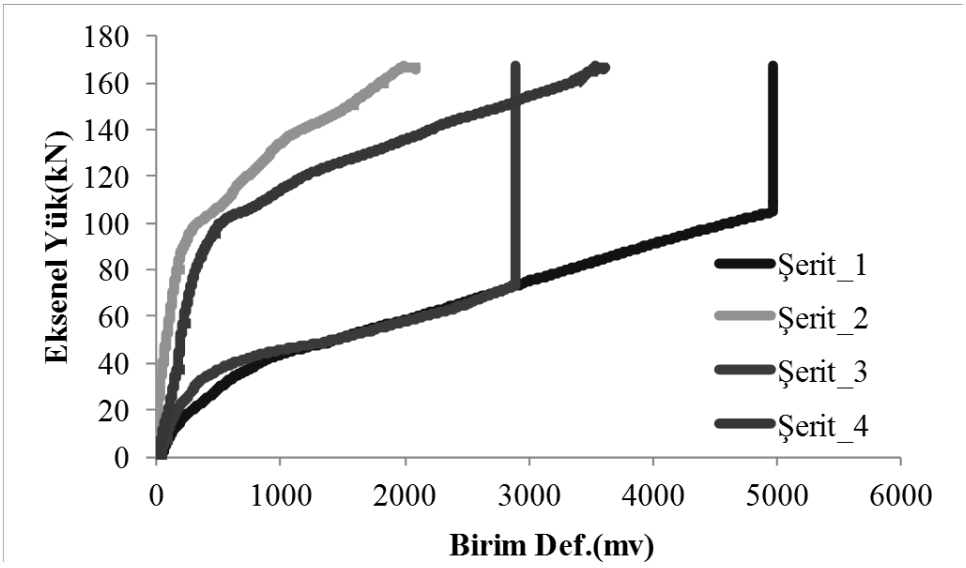


Şekil 4.15. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili



Şekil 4.16. Deney elemanın paralel yöndeki deplasman profili

Döşeme alt yüzüne yerleştirilen CFRP şeritlerde oluşan birim deformasyon değerlerinin eksenel yükle değişimi Şekil 4.17'de verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde CFRP şeritlerden iki tanesinin zımbalama anına kadar yük almaya devam ettiği görülmüştür. Diğer CFRP şeritler ise zımbalama yükünün yarısında deformasyon yapmaz hale gelmişlerdir. Bu durum CFRP şeritlerden iki tanesinin zımbalama anından önce sıyrılmaya başladığını göstermektedir.

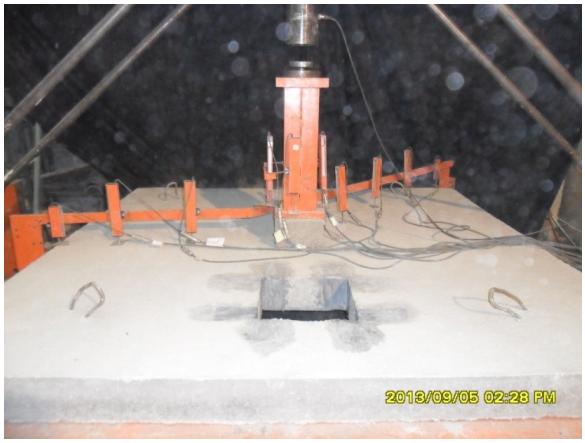


Şekil 4.17. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri

4.1.5. 300-u-p deney elemanının (deney elemanı 6) test sonuçları

300-u-p deney elemanı, 300 mm x 300 mm boyutlarında kolondan uzak ve paralel konumda boşluğu olan deney elemandır. Deney elemanının test başlamadan hemen önceki görüntüsü Resim 4.6'da verilmiştir.

Deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrisi ise boşluksuz deney elemanı ve güçlendirilmemiş deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrileri ile birlikte Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Şekil 4.18'den deney elemanının 42 mm düşey deplasman değerine ulaştıktan sonra taşıma gücünü kaybettiği görülebilir. Deney elemanının zımbalama yükü taşıma gücü kapasitesi ise 197 kN olarak ölçülmüştür. Anıl ve diğerleri (2014) tarafından aynı elemanın güçlendirilmeden önceki deplasman kapasitesi 35 mm, taşıma gücü kapasitesi ise 135 kN olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında, CFRP ile güçlendirmenin taşıma gücü kapasitesini %46, deplasman kapasitesini ise %20 arttırdığı görülmüştür. Bu sonuçlar referans deney elemanının sonuçları ile karşılaştırıldığında güçlendirilmiş deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin referans deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin %102'si, deplasman kapasitesinin ise %114'ü olduğu görülmüştür.

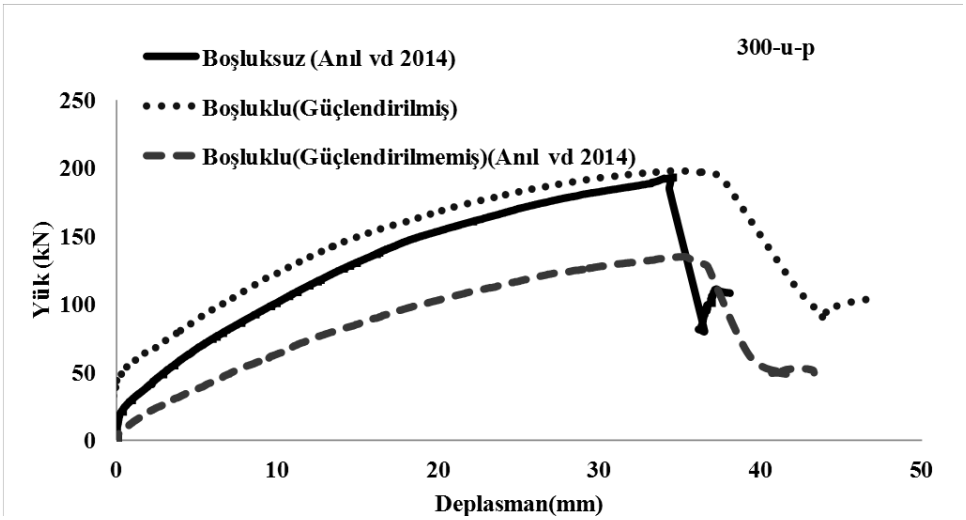


Resim 4.6. 300 mm x 300 mm boyutlarında, kolondan uzak ve paralel konumda boşluğu olan deney elemanının deneyden önceki görüntüsü

Deney elemanlarının enerji tüketme kapasitesi karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.5'te verilmiştir. Çizelge 4.5'ten güçlendirilmemiş deney elemanının enerji tüketme kapasitesinin, güçlendirilmiş elemanın kapasitesinin yarısından biraz fazla olduğu görülecektir. Ayrıca, güçlendirilmiş deney elemanının kapasitesinin referans deney

elemanının kapasitesinin %122' sine ulaştığı da görülebilir. Bu, güçlendirmenin oldukça etkili olduğunu göstermektedir.

Deney elemanı yüzeyindeki çatlaklar incelendiğinde, boşluk kenarlarından birinde çatlaklar gözlenirken (Resim 4.7a), diğer boşluk kenarlarında herhangi bir çatlak görülmemiştir. Bununlar birlikte döşeme üst yüzünde de herhangi bir çatlak oluşmadığı görülmüştür. Kolon doğrudan kendi çevresi boyunca zımbalama davranışını gerçekleştirmiştir. Bu durum döşeme alt yüzünden daha net görülmektedir (Resim 4.7b).



Şekil 4.18. 300 mm x 300 mm boyutlarında, kolondan uzak ve paralel konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri

Çizelge 4.5. 300-u-p deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri

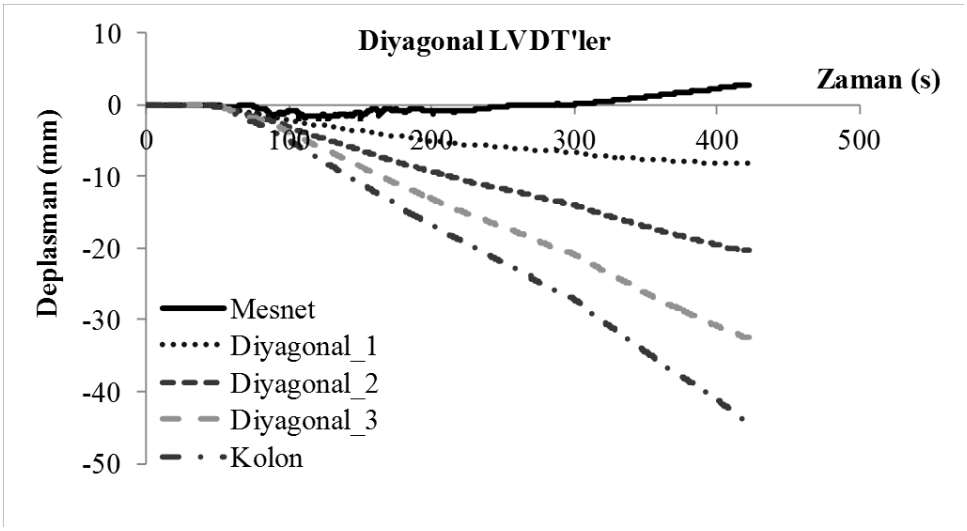
Karşılaştırılan Değer	Referans	Güçlendirilmemiş	Güçlendirilmiş
Normalize edilmiş enerji tüketme kapasitesi	1,00	0,66	1,22



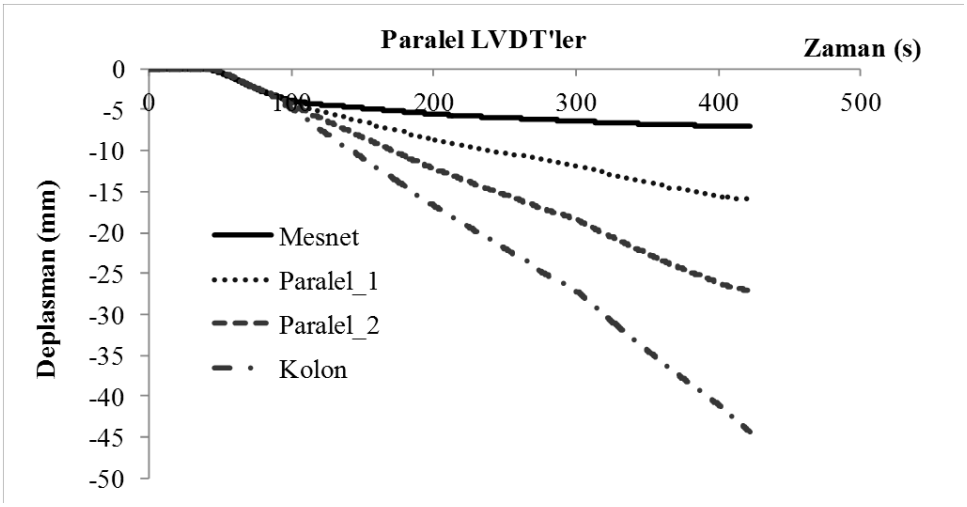
(a) (b)

Resim 4.7. Deney elemanında oluşan çatlaklar(a) boşluk kenarı, (b) döşeme alt yüzü

Şekil 4.19'da deney elemanının yüzeyinde diyagonal olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.19'da verilen deplasman profilleri incelendiğinde, mesnet olarak isimlendirilen LVDT'den alınan ölçümlerden köşe kalkması görülmektedir. Diğer LVDT'lerden alınan sonuçlar ise LVDT'nin döşeme merkezine yaklaşmasıyla deplasman değerinin arttığını göstermektedir. Şekil 4.20'de deney elemanının yüzeyinde kenarlara paralel olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.20'de verilen deplasman değerleri incelendiğinde ise mesnet olarak isimlendirilen LVDT'ten okunan değerlerin 6 mm' ye kadar ulaştığı görülmüştür. Bu LVDT'den okunan değerler mesnet elastikiyetine bağlı olarak oluşan mesnet çökmesini temsil etmektedir.

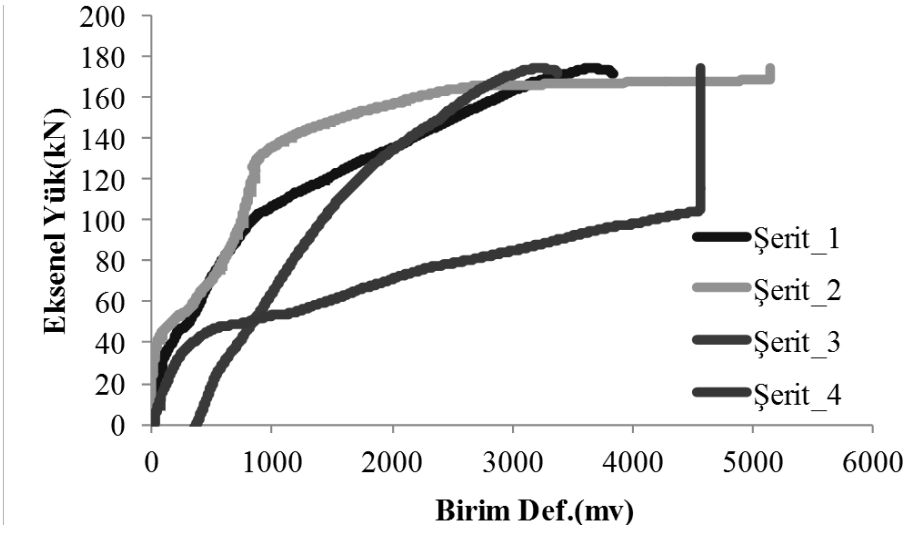


Şekil 4.19. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili



Şekil 4.20. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili

Döşeme alt yüzüne yerleştirilen CFRP şeritlerde oluşan birim deformasyon değerlerinin eksenel yükle değişimi Şekil 4.21'de verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde ise CFRP şeritlerden üç tanesinin zımbalama anına kadar yük almaya devam ettiği görülmüştür. Diğer CFRP şerit ise zımbalama yükünün yaklaşık yarısı kadar bir eksenel yük seviyesinde deformasyon yapmaz hale gelmişlerdir. Bu durum CFRP şeritlerden bir tanesinin zımbalama anından önce sıyrılmaya başladığını göstermektedir.



Şekil 4.21. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri

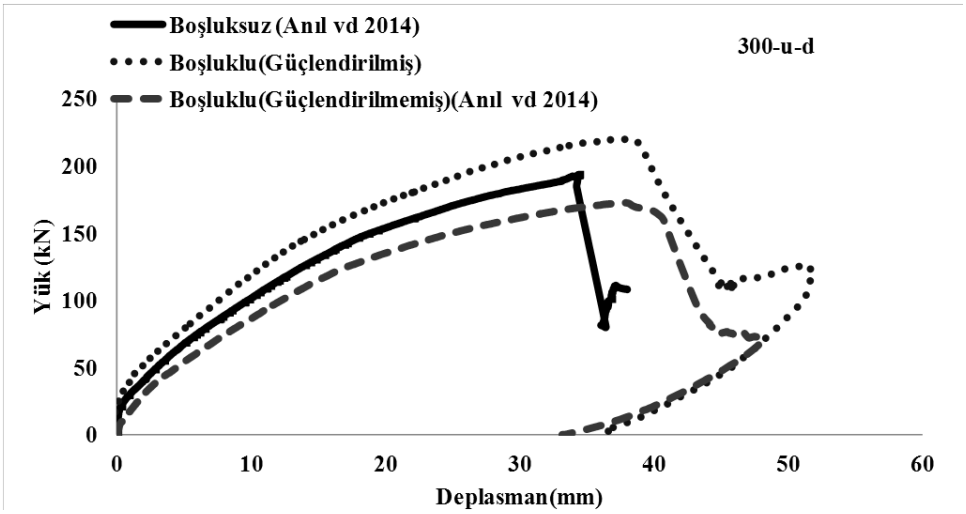
4.1.6. 300-u-d deney elemanının (deney elemanı 7) test sonuçları

300-u-p deney elemanı, 300 mm x 300 mm boyutlarında kolondan uzak ve diyagonal konumda boşluğu olan deney elemandır. Deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrisi ise

boşluksuz deney elemanı ve güçlendirilmemiş deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrileri ile birlikte Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Şekil 4.22' den deney elemanının 44 mm düşey deplasman değerine ulaştıktan sonra taşıma gücünü kaybettiği görülebilir. Deney elemanının zımbalama yükü taşıma gücü kapasitesi ise 219 kN olarak ölçülmüştür. Anıl ve diğerleri (2014) tarafından aynı elemanın güçlendirilmeden önceki deplasman kapasitesi 38 mm, taşıma gücü kapasitesi ise 172 kN olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında, CFRP ile güçlendirmenin taşıma gücü kapasitesini %27, deplasman kapasitesini ise %16 arttırdığı görülmüştür. Bu sonuçlar referans deney elemanının sonuçları ile karşılaştırıldığında güçlendirilmiş deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin referans deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin %113'ü, deplasman kapasitesinin ise %119'u olduğu görülmüştür.

Deney elemanlarının enerji tüketme kapasitesi karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.6'da verilmiştir. Çizelge 4.6'dan güçlendirilmemiş deney elemanının enerji tüketme kapasitesinin, güçlendirilmiş elemanın kapasitesinin yarısından biraz fazla olduğu görülecektir. Ayrıca, güçlendirilmiş deney elemanının kapasitesinin referans deney elemanının kapasitesinin %122' sine ulaştığı da görülebilir. Bu, güçlendirmenin oldukça etkili olduğunu göstermektedir.

Deney elemanı yüzeyindeki çatlaklar incelendiğinde, boşluk kenarlarından hiçbirinde çatlak oluşmadığı görülmüştür. Ancak zımbalama yükünden dolayı oluşan çatlakların kolon çevresinden çıkarak delik kenarlarına doğru ilerlediği (Resim 4.8) görülmüştür. Boşluk kenarlarına yerleştirilen U şeklindeki CFRP şeritlerde herhangi bir sıyrılma veya deformasyon görülmemiştir.



Şekil 4.22. 300 mm x 300 mm boyutlarında, kolondan uzak ve diyagonal konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri

Çizelge 4.6. 300-u-d deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri

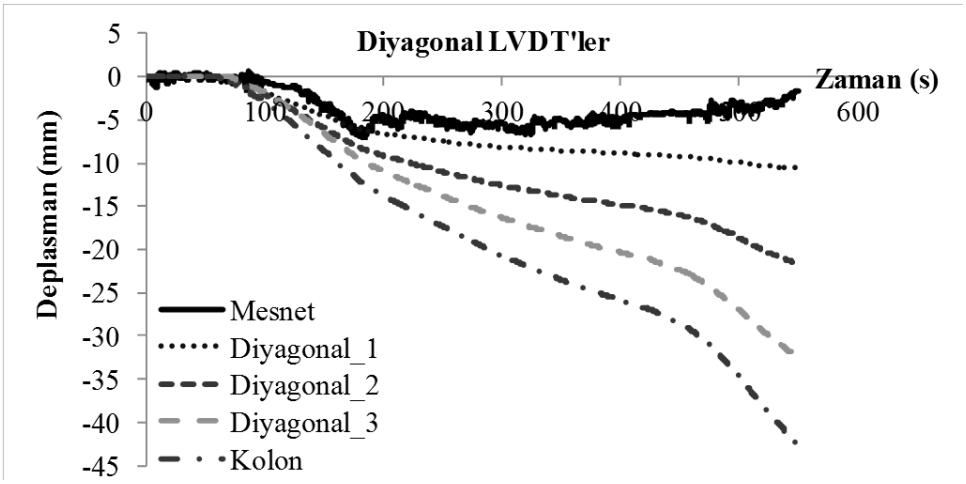
Karşılaştırılan Değer	Referans	Güçlendirilmemiş	Güçlendirilmiş
Normalize edilmiş enerji tüketme kapasitesi	1.00	0.95	1.38

Şekil 4.23'de deney elemanının yüzeyinde diyagonal olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.23'de verilen deplasman profilleri incelendiğinde, köşe kalkması net olarak görülememektedir. Mesnet isimli LVDT'den alınan ölçümlere ait çizim incelendiğinde yaklaşık 300 s değerinden sonra eğrinin eğiminin işaret değiştirdiği görülecektir. Bu durumun sebebi mesnet bölgesindeki mesnet elastikiyetidir. Merkezi yükleme altında esneyerek çöken mesnet aşağı yönde deplasman yaparken, köşe kalkmasından dolayı ise mesnet çökmesinin etkisi azalmaktadır. Diğer LVDT'lerden alınan sonuçlar ise LVDT'nin döşeme merkezine yaklaşmasıyla deplasman değerinin arttığını göstermektedir. Şekil 4.24'te deney elemanının yüzeyinde kenarlara paralel olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.24'te verilen deplasman değerleri incelendiğinde ise mesnet olarak isimlendirilen LVDT'ten okunan değerlerin 5 mm' ye kadar ulaştığı görülmüştür. Bu LVDT'den okunan değerler mesnet elastikiyetine bağlı olarak oluşan mesnet çökmesini temsil etmektedir.



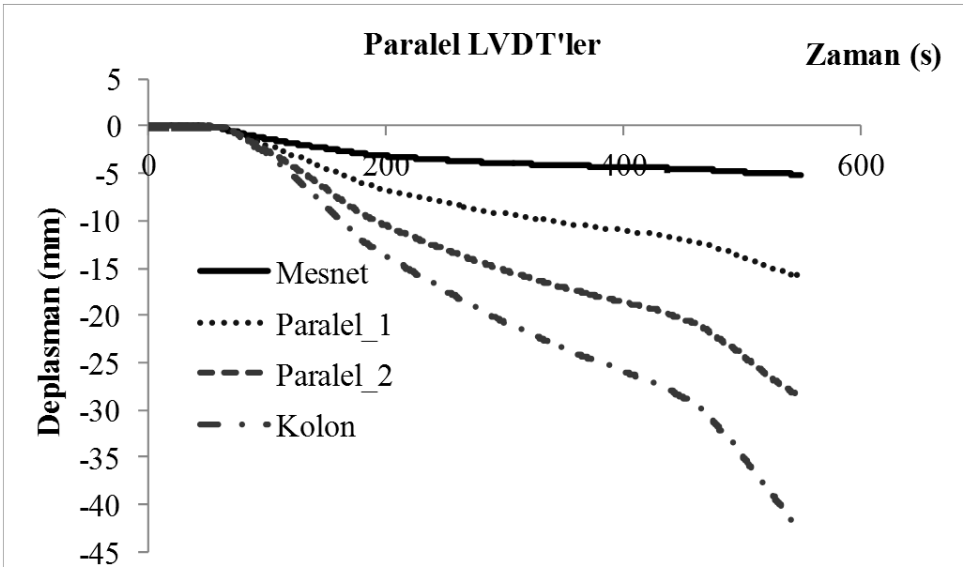
(a) (b)

Resim 4.8. Deney elemanında oluşan çatlaklar

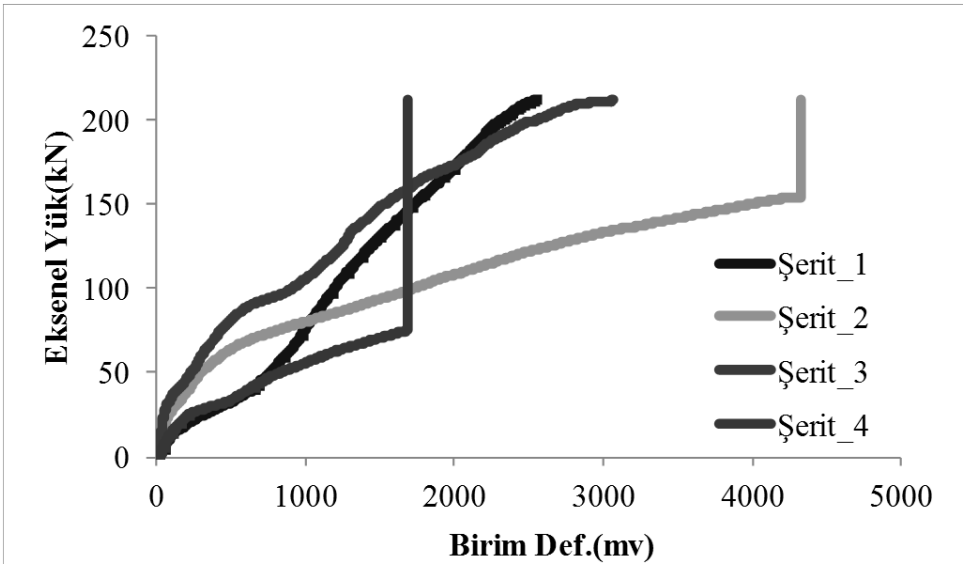


Şekil 4.23. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili

Döşeme alt yüzüne yerleştirilen CFRP şeritlerde oluşan birim deformasyon değerlerinin eksenel yükle değişimi Şekil 4.25'te verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde ise CFRP şeritlerden iki tanesinin zımbalama anına kadar yük benzer şekilde yük almaya devam ettiği görülmüştür. Diğer CFRP şeritler ise zımbalama yükünden önce deformasyon yapmaz hale gelmişlerdir. Bu durum CFRP şeritlerden iki tanesinin zımbalama anından önce sıyrılmaya başladığını göstermektedir.



Şekil 4.24. Deney elemanın paralel yöndeki deplasman profili



Şekil 4.25. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri

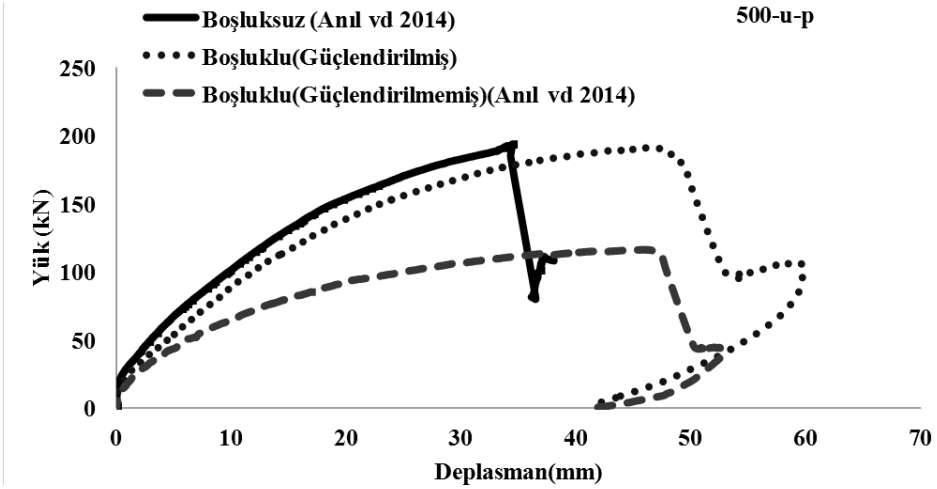
4.1.7. 500-u-p deney elemanının (deney elemanı 8) test sonuçları

500-u-p deney elemanı, 500 mm x 500 mm boyutlarında kolondan uzak ve paralel konumda boşluğu olan deney elemandır. Deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrisi ise boşluksuz deney elemanı ve güçlendirilmemiş deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrileri ile birlikte Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Şekil 4.26'dan deney elemanının 51 mm düşey deplasman değerine ulaştıktan sonra taşıma gücünü kaybettiği görülebilir. Deney elemanının zımbalama yükünü taşıma gücü kapasitesi ise 191 kN olarak ölçülmüştür. Anıl ve diğerleri (2014) tarafından aynı elemanın güçlendirilmeden önceki deplasman kapasitesi

46 mm, taşıma gücü kapasitesi ise 116 kN olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında, CFRP ile güçlendirmenin taşıma gücü kapasitesini %65, deplasman kapasitesini ise %11 arttırdığı görülmüştür. Bu sonuçlar referans deney elemanının sonuçları ile karşılaştırıldığında güçlendirilmiş deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin referans deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin %99'u, deplasman kapasitesinin ise %138'i olduğu görülmüştür.

Deney elemanlarının enerji tüketme kapasitesi ise karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.7'de verilmiştir. Çizelge 4.7'den güçlendirilmemiş deney elemanının enerji tüketme kapasitesinin, referans numuneye göre çok düşük olmadığı görülebilir. Bu ise kolondan uzaklaşan boşluğun etkisinin boşluk boyu büyük olsa bile sınırlı olduğunu gösterir. Bunun yanı sıra, güçlendirme etkisi sisteme ciddi bir enerji tüketme kapasitesi eklemiştir. Güçlendirilmiş deney elemanının enerji tüketme kapasitesi referans elemanın kapasitesinin 1,42 katına ulaşmıştır.

Deney elemanı yüzeyindeki çatlaklar incelendiğinde, boşluk kenarlarında ancak kılcal eğik çatlaklar oluştuğu görülmektedir. Bununla birlikte döşeme üst yüzünde kolon kenarından başlayıp boşluk kenarının orta noktasına doğru ilerleyen çatlaklarda görülmektedir (Resim 4.9a). Ayrıca Resim 4.9a' dan kolon etrafında oluşan zımbalama bölgesi de çok net olarak görülmektedir. Boşluk köşelerine yerleştirilen U şeklinde CFRP şeritlerden mesnete yakın olan bir tanesinin döşeme üst yüzünden sıyrıldığı görülmüştür. Resim 4.9b incelendiğinde ise döşeme alt yüzüne yerleştirilen CFRP şeritlerde herhangi bir kopma olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.26. 500 mm x 500 mm boyutlarında, kolondan uzak ve paralel konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri

Çizelge 4.7. 500-u-p deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri

Karşılaştırılan Değer	Referans	Güçlendirilmemiş	Güçlendirilmiş
Normalize edilmiş enerji tüketme kapasitesi	1.00	0.87	1.42

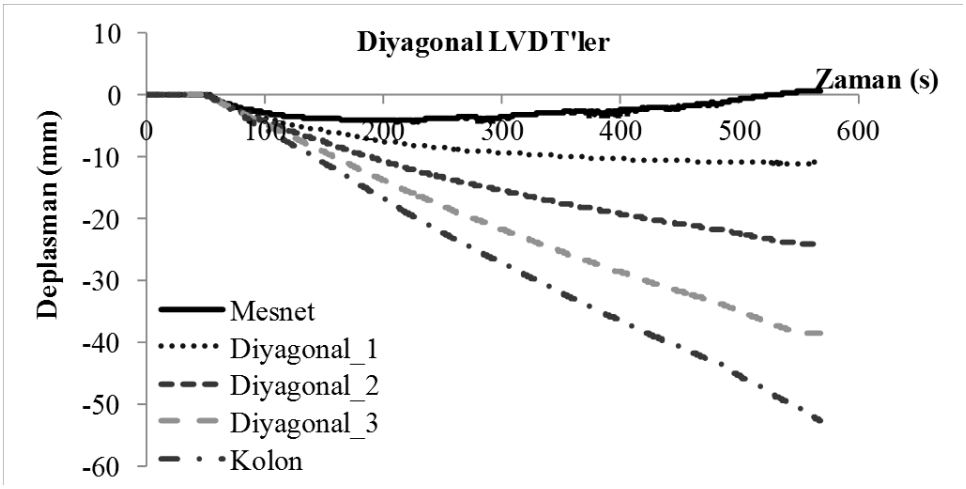


(a) (b)

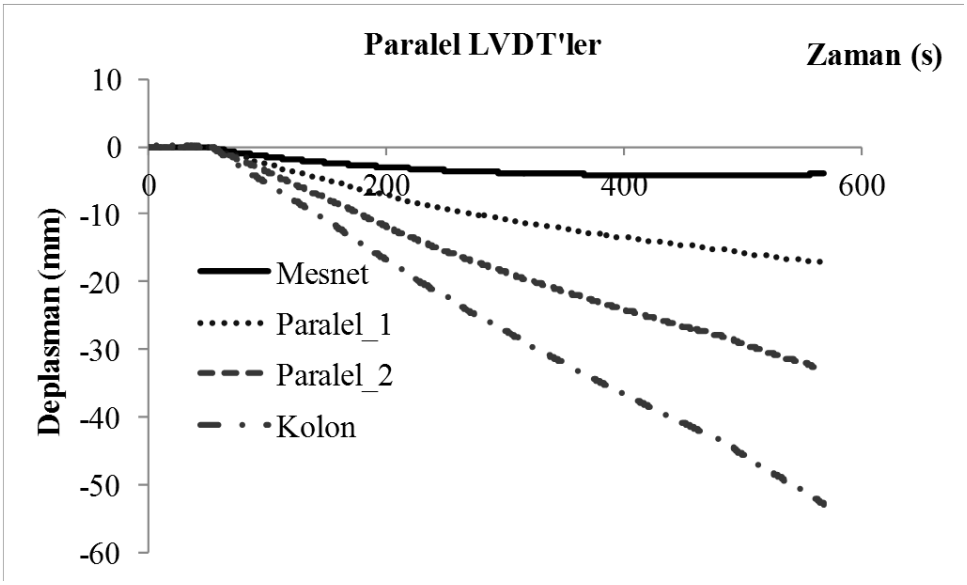
Resim 4.9. Deney elemanında oluşan çatlaklar (a) döşeme üst yüzü, (b) döşeme alt yüzü

Şekil 4.27'de deney elemanının yüzeyinde diyagonal olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.27'de verilen deplasman profilleri incelendiğinde, köşe kalkması diğer bazı deney elemanlarında olduğu gibi net olarak görülememektedir. Daha öncede açıklandığı gibi bu durumun temel sebebi mesnet elastikiyetidir. Diğer LVDT'lerden alınan sonuçlar ise LVDT'nin döşeme merkezine yaklaşmasıyla deplasman değerinin arttığını göstermektedir. Şekil 4.28'de deney elemanının yüzeyinde kenarlara paralel olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.28'de verilen deplasman değerleri incelendiğinde ise mesnet olarak isimlendirilen LVDT'ten

okunan değerlerin 4 mm' ye kadar ulaştığı görülmüştür. Bu LVDT'den okunan değerler mesnet elastikiyetine bağlı olarak oluşan mesnet çökmesini temsil etmektedir.

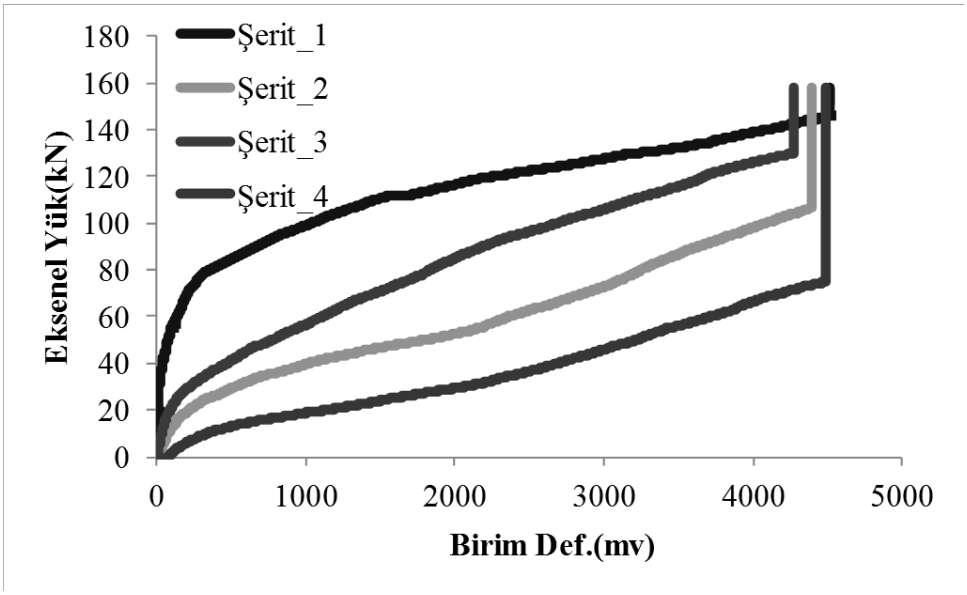


Şekil 4.27. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili



Şekil 4.28. Deney elemanın paralel yöndeki deplasman profili

Döşeme alt yüzüne yerleştirilen CFRP şeritlerde oluşan birim deformasyon değerlerinin eksenel yükle değişimi Şekil 4.29'da verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde ise CFRP şeritlerden iki tanesinin zımbalama anına kadar yük almaya devam ettiği görülmüştür. Diğer CFRP şeritler ise zımbalama yükünden önce deformasyon yapmaz hale gelmişlerdir. Bu durum CFRP şeritlerden iki tanesinin zımbalama anından önce sıyrılmaya başladığını göstermektedir.



Şekil 4.29. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri

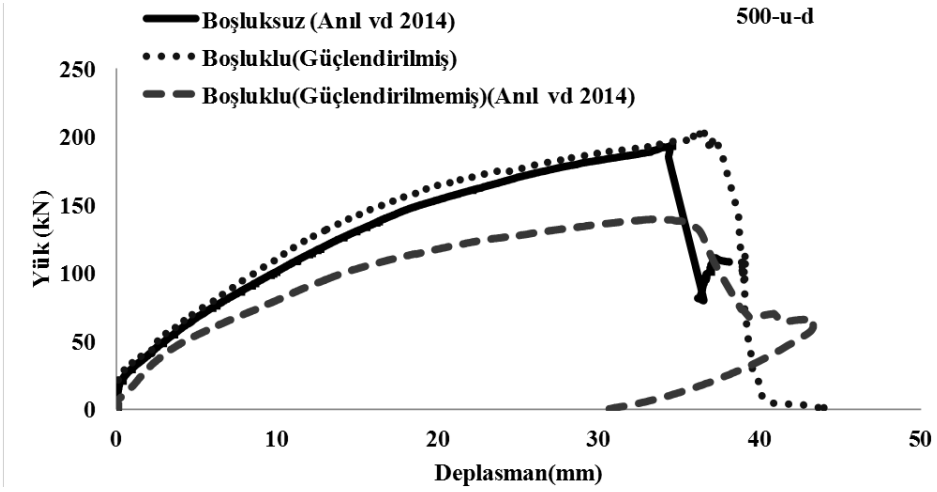
4.1.8. 500-u-d deney elemanının (deney elemanı 9) test sonuçları

500-u-p deney elemanı, 500 mm x 500 mm boyutlarında kolondan uzak ve diyagonal konumda boşluğu olan deney elemanıdır. Deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrisi ise boşluksuz deney elemanı ve güçlendirilmemiş deney elemanına ait kuvvet deplasman eğrileri ile birlikte Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Şekil 4.30'dan deney elemanının 40 mm düşey deplasman değerine ulaştıktan sonra taşıma gücünü kaybettiği görülebilir. Deney elemanının zımbalama yükünü taşıma gücü kapasitesi ise 202 kN olarak ölçülmüştür. Anıl ve diğerleri (2014) tarafından aynı elemanın güçlendirilmeden önceki deplasman kapasitesi 34 mm, taşıma gücü kapasitesi ise 139 kN olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında, CFRP ile güçlendirmenin taşıma gücü kapasitesini %45, deplasman kapasitesini ise %18 arttırdığı görülmüştür. Bu sonuçlar referans deney elemanının sonuçları ile karşılaştırıldığında güçlendirilmiş deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin referans deney elemanının taşıma gücü kapasitesinin %105'i, deplasman kapasitesinin ise %108'i olduğu görülmüştür.

Deney elemanlarının enerji tüketme kapasitesi ise karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.8'de verilmiştir. Çizelge 4.8'den güçlendirilmemiş deney elemanının enerji tüketme kapasitesinin, referans numuneye göre çok düşük olmadığı görülebilir. Bu ise, bir önceki deney elemanından elde edilen sonuçla benzer şekilde kolondan uzaklaşan boşluğun

etkisinin boşluk boyu büyük olsa bile sınırlı olduğunu gösterir. CFRP ile güçlendirmenin etkisinin ise sisteme bir miktar enerji tüketme kapasitesi ekleyerek, deney elemanının enerji tüketme kapasitesini referans numunenin kapasitesinin biraz üzerine çıkardığı görülmüştür.

Deney elemanı yüzeyindeki çatlaklar incelendiğinde, boşluk kenarlarında eğik çatlaklar oluştuğu görülmektedir. Bununla birlikte döşeme üst yüzünde kolon kenarından başlayıp boşluğa doğru ilerleyen geniş çatlaklar mevcuttur. Ayrıca, mesnet ile boşluk arasında kalan bölgede döşeme üst yüzünde geniş bir çatlak oluştuğu görülmüştür (Resim 4.10a). Boşluk köşelerine yerleştirilen U şeklinde CFRP şeritlerden kolona yakın olan bir tanesinin döşeme üst yüzünden sıyrıldığı görülmüştür (Resim 4.10a). Bunlara ek olarak, ilk kez döşeme alt yüzüne yerleştirilen CFRP şeritlerden bir tanesinin döşemenin merkezinden mesnet çizgisine kadar tamamen sıyrıldığı görülmüştür (Resim 4.10b). Ancak şeritte herhangi bir kopma gözlenmemiştir.



Şekil 4.30. 500 mm x 500 mm boyutlarında, kolondan uzak ve diyagonal konumda boşluğu olan deney elemanının kuvvet deplasman eğrileri

Çizelge 4.8. 500-u-d deney elemanının enerji tüketme kapasitesi değerleri

Karşılaştırılan Değer	Referans	Güçlendirilmemiş	Güçlendirilmiş
Normalize edilmiş enerji tüketme kapasitesi	1,00	0,70	1,12

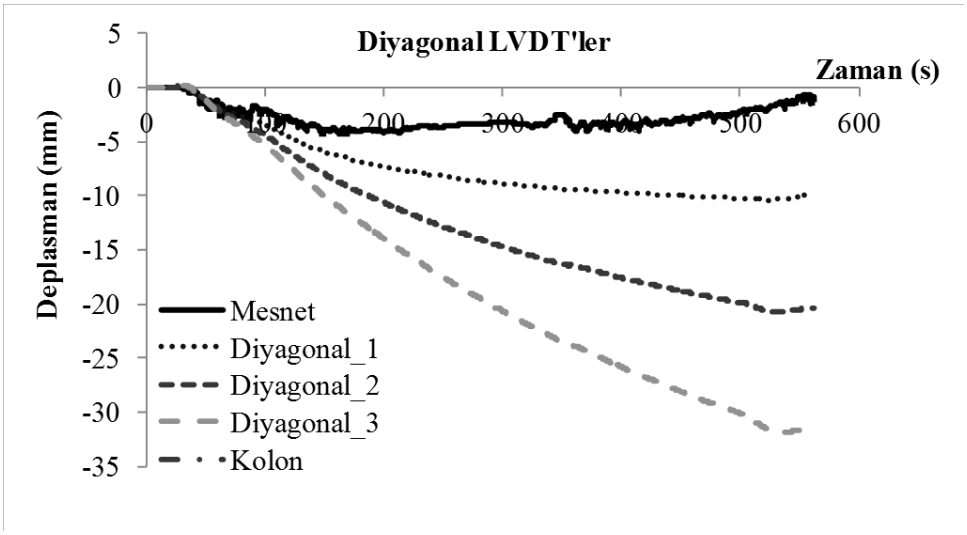


(a) (b)

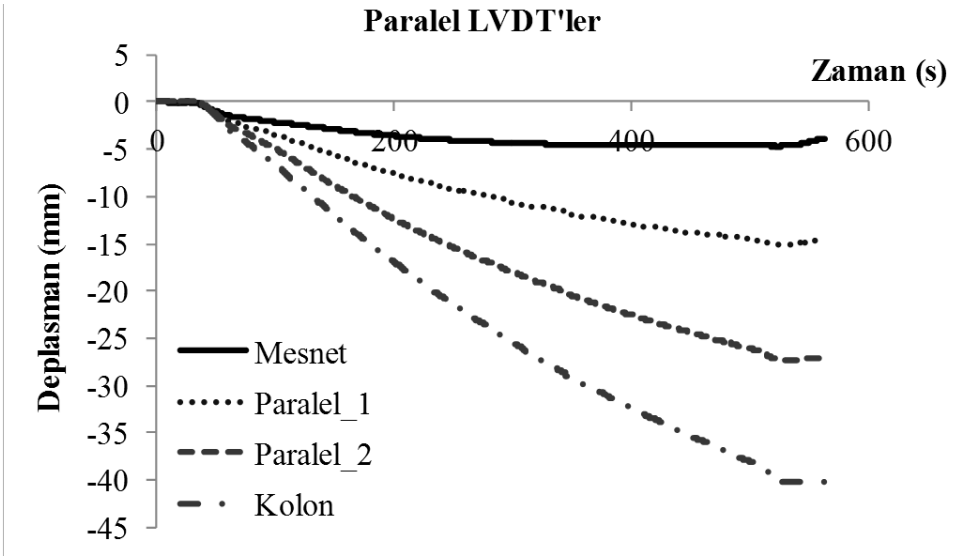
Resim 4.10. Deney elemanında oluşan çatlaklar; (a) döşeme üst yüzü, (b) döşeme alt yüzü

Şekil 4.31'de deney elemanının yüzeyinde diyagonal olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.31'de verilen deplasman profilleri incelendiğinde, köşe kalkması diğer deney elemanlarının bazılarında da olduğu gibi net olarak görülememektedir. Daha öncede açıklandığı gibi bu durumun temel sebebi mesnet elastikiyetidir. Diğer LVDT'lerden alınan sonuçlar ise LVDT'nin döşeme merkezine yaklaşmasıyla deplasman değerinin arttığını göstermektedir. Şekil 4.32'de deney elemanının yüzeyinde kenarlara paralel olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan ölçümler sunulmuştur. Şekil 4.32' de verilen deplasman değerleri incelendiğinde ise mesnet olarak isimlendirilen LVDT'ten okunan değerlerin 4 mm' ye kadar ulaştığı görülmüştür. Bu LVDT'den okunan değerler mesnet elastikiyetine bağlı olarak oluşan mesnet çökmesini temsil etmektedir.

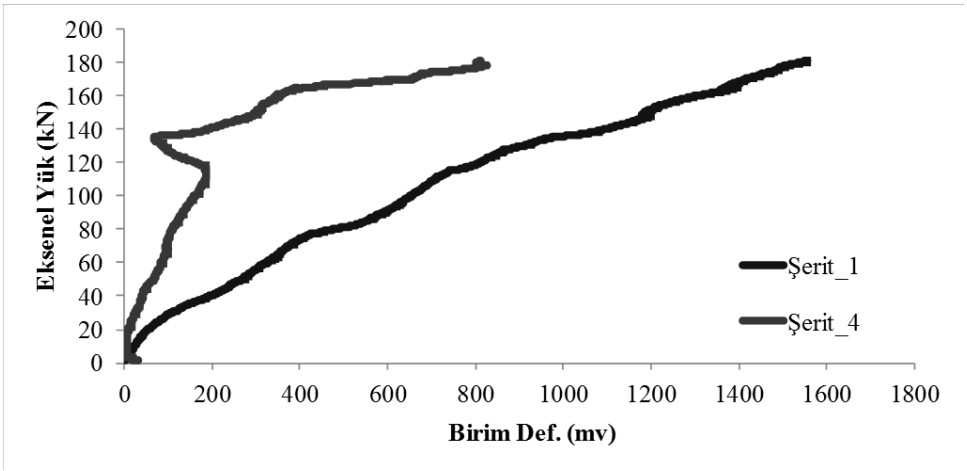
Döşeme alt yüzüne yerleştirilen CFRP şeritlerde oluşan birim deformasyon değerlerinin eksenel yükle değişimi Şekil 4.33'te verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde ise CFRP şeritlerden en az iki tanesinin zımbalama anına kadar yük almaya devam ettiği görülmüştür. Diğer iki CFRP şeritten ise ölçüm alınamamıştır.



Şekil 4.31. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili



Şekil 4.32. Deney elemanın diyagonal yöndeki deplasman profili



Şekil 4.33. CFRP şeritlerin birim deformasyon değerleri

4.2. Deneyde İrdelenen Değişkenlerin Deney Sonuçları Üzerindeki Etkisi

CFRP kullanılarak yapılan güçlendirme sonrasında deney elemanlarının zımbalama yüklerini taşıma kapasitesinin ortalama %55 oranında, deplasman kapasitesinin ise %20 oranında, enerji sönümleme kapasitesinin ise %85 oranında arttığı görülmüştür. Güçlendirme sonrasında deney elemanlarının ortalama zımbalama yüklerini taşıma kapasitesinin referans elemanın zımbalama yüklerini taşıma kapasitesinin %96'sı seviyesinde olduğu görülmüştür. Benzer şekilde deney elemanlarının ortalama deplasman ve enerji tüketme kapasitelerinin referans elemanın kapasitesinin %108'i kadar olduğu görülmüştür. Ayrıntılı sonuçlar Çizelge 4.9'da görülebilir. Bu sonuçlara bakıldığında betonarme boşluklu döşemelerin dıştan yapıştırılan CFRP şeritlerle güçlendirme işleminin etkili olduğu söylenebilir. Bu bölümde ise güçlendirme etkilerinin deney kapsamında incelenen değişkenlere (boşluk büyüklü, boşluk mesafesi, boşluk konumu) göre dağılımı irdelenecektir.

Çizelge 4.9. Deney elemanlarının özellikleri ve sonuçlar

Numune Adı	Boşluğun			En Büyük Yük (kN)		En Büyük Dep. (mm)		*Enerji Sönümü	
	Alan(mm^2)	Uzaklık	Konum	CFRP yok	CFRP var	CFRP yok	CFRP var	CFRP yok	CFRP var
Referans	-	-	-	193	-	37	-	1	-
300-b-p	300 x 300	0	paralel	99	161	18	32	0,24	0,81
300-b-d	300 x 300	0	diyagonal	126	186	27	37	0,46	1,08
500-b-p	500 x 500	0	paralel	77	158	23	28	0,25	0,71
500-b-d	500 x 500	0	diyagonal	95	173	42	33	0,55	0,90
300-u-p	300 x 300	300mm	paralel	135	197	35	37	0,66	1,22
300-u-d	300 x 300	300mm	diyagonal	172	219	38	38	0,95	1,38
500-u-p	500 x 500	300mm	paralel	116	191	46	48	0,87	1,42
500-u-d	500 x 500	300mm	diyagonal	139	202	34	37	0,70	1,12
Ortalama	-	-	-	120	186	32	36	0,59	1,08
* Enerji sönümleme kapasiteleri referans elemana göre normalize edilerek verilmiştir									

4.2.1. Deney sonuçlarının boşluğun kolona olan uzaklığına göre değişimi

Bu bölümde deneylerden elde edilen sonuçlar, deney elemanlarının üzerinde bulunan boşluğun döşeme merkezinde bulunan betonarme kolona göre uzaklığına bağlı olarak incelenecektir. Bu sonuçları inceleyebilmek için önce deney elemanları bulundurdukları boşluğun kolona göre uzaklığına bağlı olarak gruplanmıştır. Daha sonra her bir gruptaki deney elemanlarının test sonuçlarının ortalaması alınmıştır. Hesaplanan bu ortalama değerler, Anıl ve diğerleri (2014) tarafından test edilen boşluksuz referans elemanının deney sonuçlarına göre normalize edilmiş ve Çizelge 4.10'da sunulmuştur. Çizelge 4.10'dan görüleceği gibi kolona bitişik boşluğa sahip olan deney elemanlarının bütün değerleri kolondan uzak boşluğu olan deney elemanlarının değerlerinden düşük kalmıştır. Kolona yakın boşluk içeren deney elemanlarının kuvvet, deplasman ve enerji sönümleme kapasiteleri sırasıyla: %72, %32 ve %131 artış göstermiştir. Buna karşın kolondan 300 mm uzakta bulunan boşluğa sahip deney elemanlarının kuvvet, deplasman ve enerji sönümleme kapasiteleri sırasıyla: %44, %12 ve %60 artış göstermiştir. Bu değerler CFRP ile güçlendirmenin etkisinin daha zayıf olan numunelerde daha güçlü şekilde ortaya çıktığını göstermiştir. Tablodan yapılacak bir diğer gözlem ise, kolona bitişik boşluk bulunduran deney elemanlarının kapasite değerlerinin güçlendirmeden sonra referans elemanının kapasite değerlerinin altında kalmış olmasıdır. Buna karşın kolondan uzak boşluk içeren deney elemanları güçlendirme işleminden sonra referans elemanından büyük kuvvet, deplasman ve enerji sönümleme kapasitesine ulaşmışlardır. Bu sonuçlar, bir zorunluluktan

dolayı döşeme üzerinden boşluk bırakılması gerektiğinde boşluğun kolona bitişik değil, kolondan uzak olarak bırakılması gerekliliğini pekiştirmiştir.

Çizelge 4.10. Boşluk uzaklığının deney sonuçları üzerine etkisi

Boşluğun uzaklığı	En Büyük Yük (kN)		En Büyük Dep. (mm)		Enerji Sönümü	
	CFRP yok	CFRP var	CFRP yok	CFRP var	CFRP yok	CFRP var
0	0,51	0,88	0,74	0,98	0,38	0,88
300	0,73	1,05	1,06	1,19	0,80	1,28
Tablodaki bütün değerler referans elemanın değerlerine göre normalize edilmiştir						

4.2.2. Deney sonuçlarının boşluğun kolona olan konumuna göre değişimi

Bu bölümde ise deney sonuçları, deney elemanlarının üzerinde bulunan boşluğun döşeme merkezinde bulunan betonarme kolona göre paralel veya diyagonal konumda olmasına bağlı olarak irdelenecektir. Bu irdelemeyi yapabilmek için deney elemanlarının test sonuçları Çizelge 4.10'daki verileri elde etmek için kullanılan yöntem kullanarak gruplandırılmış ve normalize edilmiştir. Ancak bu kez gruplandırma işlemi deney elemanları üzerindeki boşlukların kolona uzaklığına göre değil, kolona paralel yada diyagonal konumda bulunmalarına göre yapılmıştır.

Çizelge 4.11'deki veriler incelendiği zaman kolona paralel konumda boşluk içeren deney elemanlarının değerleri kolona diyagonal konumda boşluk içeren deney elemanlarının değerlerinden düşük kalmıştır. Sadece CFRP ile güçlendirilmiş durumda en büyük deplasman değerleri ortalaması kolona paralel ve diyagonal boşluk içeren deney numuneleri için hemen hemen eşit çıkmıştır.

Kolona paralel konumda boşluk içeren deney elemanlarının kuvvet, deplasman ve enerji sönümleme kapasiteleri sırasıyla: %67, %40 ve %51 artış göstermiştir. Buna karşın kolona diyagonal konumda boşluğa sahip deney elemanlarının kuvvet, deplasman ve enerji sönümleme kapasiteleri sırasıyla: %46, %14 ve %71 artış göstermiştir. Güçlendirme sonrasında ise boşluğun konumundan bağımsız olmak üzere güçlendirilen her bir döşeme grubunun ortalama kapasite değerlerinin yaklaşık olarak eşit olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.11. Boşluk konumunun deney sonuçları üzerine etkisi

	En Büyük Yük (kN)		En Büyük Dep. (mm)		Enerji Sönümü	
Boşluğun konumu	CFRP yok	CFRP var	CFRP yok	CFRP var	CFRP yok	CFRP var
paralel	0,55	0,92	0,78	1,09	0,83	1,25
diyagonal	0,69	1,01	0,95	1,08	0,73	1,25
Tablodaki bütün değerler referans elemanın değerlerine göre normalize edilmiştir						

4.2.3. Deney sonuçlarının boşluğun büyüklüğüne göre değişimi

Bu bölümde deney sonuçları, deney elemanlarının üzerinde bulunan boşluğun büyüklüğüne bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmayı yapabilmek için deney elemanlarının test sonuçları Çizelge 4.10 ve 4.11'deki verileri elde etmek için kullanılan yöntem kullanarak gruplandırılmış ve normalize edilmiştir. Gruplandırma işlemi deney elemanları üzerindeki boşlukların boyutuna göre yapılmıştır. Deney sonuçları, boşluk büyüklüklerine göre gruplandırılmış deney elemanlarının ortalama kapasitelerini göstermektedir ve Çizelge 4.12'de sunulmuştur.

Çizelge 4.12'deki veriler incelendiği zaman boşluk alanı küçük olan güçlendirilmemiş deney elemanlarının kuvvet kapasitesi değerlerinin boşluk alanı büyük olan güçlendirilmemiş deney elemanlarının kuvvet kapasitesi değerlerinden büyük olduğu görülmektedir. Buna karşın büyük boşluklu güçlendirilmemiş deney elemanlarının deplasman kapasitesi küçük boşluklu güçlendirilmemiş deney elemanlarının deplasman kapasitesinden büyüktür. Boşluk alanındaki artışa bağlı olarak döşeme rijitliğinin azalması bu durumun sebebi olarak gösterilebilir. Güçlendirilmemiş deney elemanı gruplarının enerji tüketme kapasitesi ise yaklaşık olarak eşittir. CFRP ile güçlendirilmiş durumda ise her iki grupta bulunan deney elemanlarının bütün ortalama kapasite değerlerinin yaklaşık olarak eşit olduğu görülmektedir. Bu durum güçlendirme için kullanılan CFRP şeritlerin boşluk büyüklüğünden bağımsız olarak etkin biçimde çalıştığını göstermektedir.

Çizelge 4.12. Boşluk boyutunun deney sonuçları üzerine etkisi

	En Büyük Yük (kN)		En Büyük Dep. (mm)		Enerji Sönümü	
Boşluk Büyüklüğü	CFRP yok	CFRP var	CFRP yok	CFRP var	CFRP yok	CFRP var
300x300	0,69	0,99	0,75	1,09	0,58	1,12
500x500	0,55	0,94	0,97	1,08	0,59	1,04
Tablodaki bütün değerler referans elemanın değerlerine göre normalize edilmiştir						

5. DENEY SONUÇLARININ ANALİTİK SONUÇLARLA KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde, deney çalışmasından elde edilen sonuçlar çeşitli şartnameler tarafından döşemelerin zımbalama kapasitelerinin hesaplanması için önerilen denklemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma için seçilen şartnameler tarafından önerilen denklemler iki gruba ayrılmıştır. İlk grupta kirişsiz döşemelerin zımbalama yüklerinin hesabında döşemenin eğilme donatısı oranını göz önüne almayan şartnameler (TS500, 2000; ACI318, 2008) bulunmaktadır. İkinci grupta ise zımbalama kapasitesini hesaplarken döşeme içindeki eğilme donatısı oranını da dikkate alan şartnameler (Eurocode2, 2002; BS8110, 1997) bulunmaktadır. İkinci gruptaki denklemler kullanılırken döşeme içindeki eğilme donatısı oranı dışarıdan yapıştırılan CFRP şeritlerin eşdeğer donatıya çevrilmesinden dolayı artmaktadır. Döşeme alt yüzüne yapıştırılan CFRP şeritlerin eşdeğer döşeme donatısına çevrilmesi Fargaly ve Ueda (2011) tarafından önerilen yönteme göre yapılmıştır. Fargaly ve Ueda (2011) dıştan yapıştırılan CFRP şeritleri dikkate alarak döşeme faydalı yüksekliğinin (Eşitlik 5.1) ve döşeme eğilme donatısının (Eşitlik 5.2) yeniden hesaplamasına olanak sağlayan eşitlikleri aşağıda sunmuştur.

$$d_{eq} = \frac{A_{cfrp}E_{cfrp}h + A_sE_sd}{A_{cfrp}E_{cfrp} + A_sE_s} \tag{5.1}$$

Bu eşitlikte, A_{cfrp} ve A_s, sırasıyla, döşeme alt yüzüne bir yönde yapıştırılan CFRP'nin kesit alanını ve döşeme alt yüzünde bir yöndeki eğilme donatısı alanını temsil etmektedir. E_{cfrp} ve E_s ise, yine sırasıyla döşeme alt yüzüne bir yönde yapıştırılan CFRP şeritlerin ve eğilme donatısının elastisite modülünü temsil etmektedir. Eşitlikte, d, döşeme faydalı yüksekliğini, h ise toplam döşeme yüksekliğini temsil etmektedir.

$$\rho_{eq} = \rho_s + \rho_{cfrp}\frac{E_{cfrp}}{E_s} \tag{5.2}$$

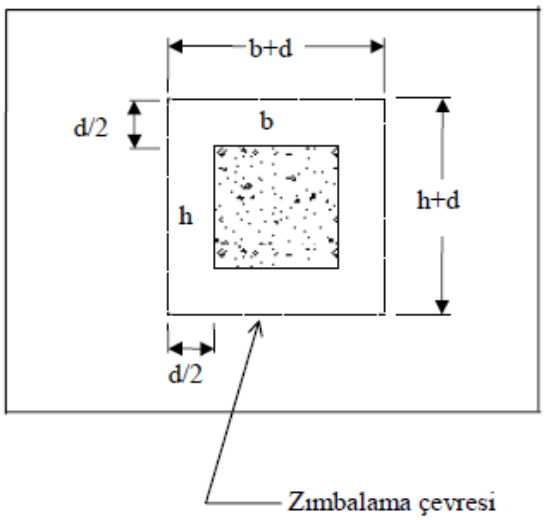
Eşitlikte, ρ_s döşemenin boyuna donatı oranını, ρ_{cfrp} ise döşeme alt yüzüne yapıştırılan CFRP oranını temsil etmektedir.

5.1. Birinci Gruptaki Şartnamelerin Önerdiği Denklemler

Bu bölümde, zımbalama dayanımı hesabında döşeme içindeki donatı oranını dikkate almayan şartnamelerden TS500 (2000) ve ACI318 (2008) tarafından önerilen denklemler ve hesap yöntemleri tanıtılmıştır.

5.1.1. Deney elemanlarının zımbalama dayanımlarının TS500 (2000)'e göre hesaplanması

TS500(2000) tarafından zımbalama yükünün hesaplanması için önerilen denklemde yüklenen alana döşeme faydalı yüksekliğinin yarısı kadar uzaklık kullanılarak belirlenen kesit alanı göz önüne alınır. Bu kesit alanı Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Şekilde 5.1'de, b ve h kolon boyutlarını d ise döşeme faydalı yüksekliğini temsil etmektedir.



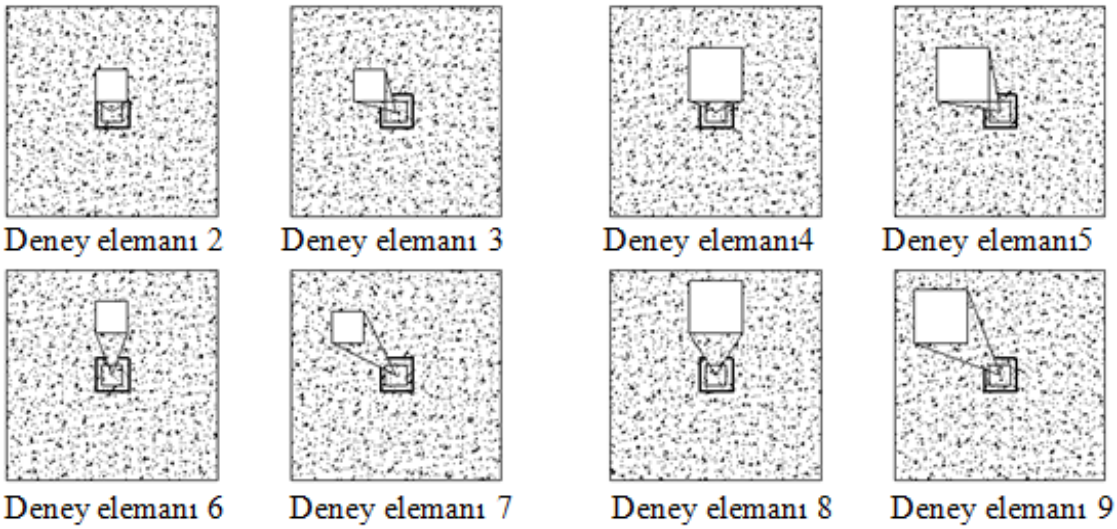
Şekil 5.1. TS500(2000)'de kullanılan zımbalama çevresi yaklaşımı

TS500(2000)'e göre kirişsiz döşemenin zımbalama dayanımı aşağıda ki bağıntılar kullanılarak hesaplanır.

$$V_{pr} = \gamma f_{ctd} U_p d \tag{5.3}$$

$$f_{ctd} = 0.35\sqrt{f_{ck}} \tag{5.4}$$

TS500(2000)'de verilen Eşitlik 5.3 ve Eşitlik 5.4' de V_{pr} döşemenin zımbalama dayanımı, γ eğilme etkisini yansıtan bir katsayı, f_{ctd}, betonun tasarım eksenel çekme dayanımı, U_p, Şekil 5.1'de gösterilen h+d ve b+d kenar uzunluklarına sahip olan zımbalama bölgesinin çevresi, d döşeme üst yüzü ile döşeme alt donatısının merkezi arasında kalan bölgenin yüksekliği f_{ck} ise betonun karakteristik basınç dayanımı olarak verilmiştir. Zımbalama yüklemesinde dışmerkezlilik bulunmadığı durumlarda ise γ'nın bir alınarak hesabın yapılması gerektiği belirtilmiştir. Döşemede boşluk bulunması durumunda ise boşluklar nedeni ile zımbalama çevresinde yapılacak azaltma yüklenen alan ağırlık merkezinden döşeme boşluğu kenarlarına çizilen teğetler arasında kalan çevrenin, zımbalama çevresinden çıkartılarak yeni zımbalama çevresinin hesapta kullanılmasıyla yapılacaktır. TS500(2000)'in önerdiği yöntemle hesaplanan zımbalama bölgeleri Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. TS500(2000)'e göre deney elemanlarının zımbalama çevreleri

5.1.2. Deney elemanlarının zımbalama dayanımlarının ACI318(2008)'e göre hesaplanması

ACI318(2008) iki yönde çalışan kirişsiz bir döşemenin zımbalama dayanımının beton tarafından ve kesme donatısı tarafından sağlanan dayanımın toplamı olarak hesaplanması gerektiğini belirtir. Zımbalama dayanımı hesaplanacak olan döşemede kesme donatısı bulunmaması durumunda ise döşemenin zımbalama dayanımı sadece beton tarafından sağlanmış olacaktır. ACI318(2008) tarafından önerilen denklemlerde zımbalama çevresi

olarak Şekil 5.2'de TS500(2000) için verilen zımbalama çevresi kullanılır. Döşemede boşluk olması durumunda ise ACI318(2008) ve TS500(2000) aynı yaklaşımları önermektedir. ACI318(2008)'e göre boşluklar nedeni ile zımbalama çevresinde yapılacak azaltma yüklenen alan ağırlık merkezinden döşeme boşluğu kenarlarına çizilen teğetler arasında kalan çevrenin, zımbalama çevresinden çıkartılarak yeni zımbalama çevresinin hesapta kullanılmasıyla yapılacaktır. Kirişsiz döşemelerde beton tarafından sağlanan zımbalama dayanımı hesaplamak için ACI318(2008) aşağıdaki üç denklemi önermiştir. Döşemenin zımbalama dayanımı ise bu üç eşitlikten alınan sonuçlardan en küçüğü olarak kabul edilmektedir.

$$V_c = 0.17\left(1+\frac{2}{\beta}\right)\sqrt{f_c}b_0 d \tag{5.5}$$

$$V_c = 0.083\left(\frac{\propto_s d}{b_0}+2\right)\sqrt{f_c}b_0 d \tag{5.6}$$

$$V_c = 0.33\sqrt{f_c}b_0 d \tag{5.7}$$

Eşitlikler 5.5, 5.6 ve 5.7'de V_c beton tarafından sağlanan zımbalama dayanımını, β döşemenin uzun kenarının kısa kenarına oranını, f_c beton basınç dayanımını, b_0, kritik kesitin çevresini, d, döşeme üst yüzünün eğilme donatısının merkezine uzaklığını, α_s, ise iç, kenar ve köşe kolon bulunması durumuna göre değişen bir katsayıyı temsil etmektedir.

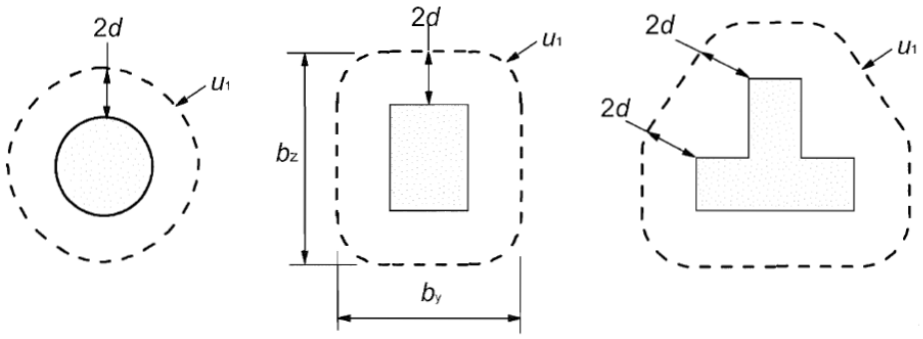
5.2. İkinci Gruptaki Şartnamelerin Önerdiği Denklemler

Bu bölümde, zımbalama dayanımı hesabında döşeme içindeki eğilme donatısı oranını dikkate alan şartnamelerden Eurocode2(2002) ve BS8110 (1997) tarafından önerilen denklemler ve hesap yöntemleri tanıtılacaktır.

5.2.1. Deney elemanlarının zımbalama dayanımlarının Eurocode2(2002)'ye göre hesaplanması

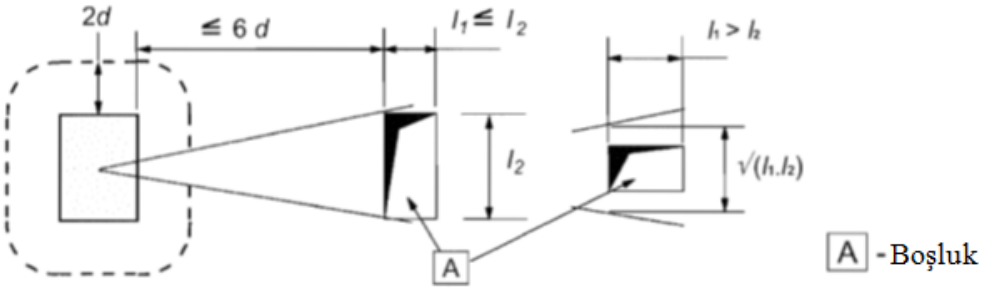
Bu bölümde Eurocode2 (2002) tarafından kirişsiz döşemelerin zımbalama kapasitelerinin hesaplanması için önerilen denklem tanıtılmıştır. Eurocode2 (2002)'te zımbalama için kontrol çevresinin (u_1) yüklü alanının kenarından itibaren döşeme faydalı yüksekliğinin (d)

iki katı kadar uzak bir kesit (Şekil 5.3) üzerinden hesaplanması ve kontrol çevresi uzunluğunu en aza indirecek şekilde köşelerin yuvarlatılması tavsiye edilmektedir.

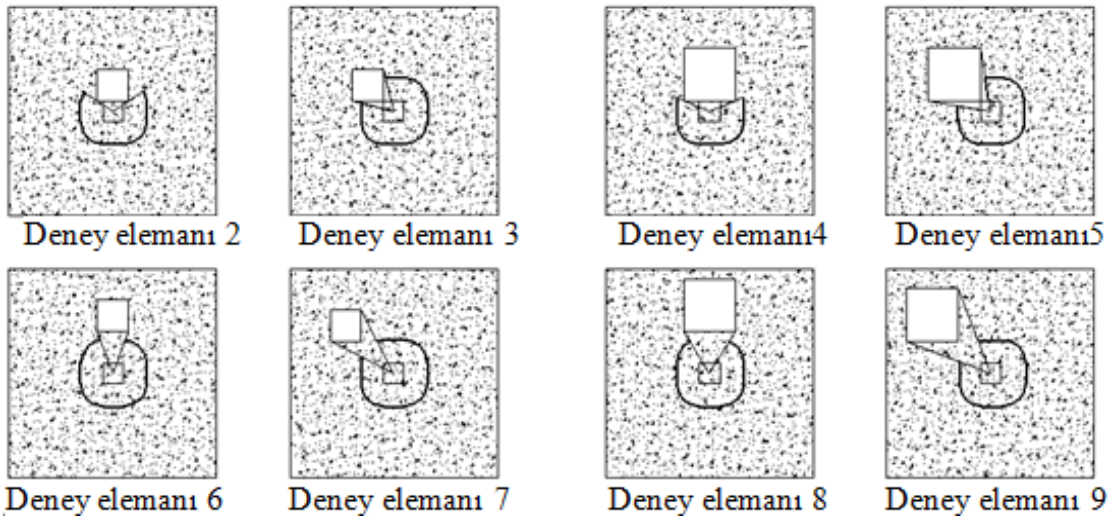


Şekil 5.3. Eurocode2(2002)'de kullanılan zımbalama çevresi yaklaşımı

Döşemede boşluk bulunması durumunda ise, yüklü bölgenin çevresi ve boşluk arasındaki en kısa mesafe 6d'den küçükse, yüklü alanını merkezinden boşluğun iki köşesine çizilen teğetler tarafından kesilen kontrol çevresi uzunluğunun (Şekil 5.4) etkisiz olduğunun kabul edilmesi önerilmektedir. Eurocode2(2002)'nin önerdiği yöntemle hesaplanan zımbalama bölgeleri Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Döşemede boşluk bulunması durumunda Eurocode2(2002)'de kullanılan zımbalama çevresi yaklaşımı



Şekil 5.5. Eurocode2(2002)'e göre deney elemanlarının zımbalama çevreleri

Zımbalama dayanımının hesaplanması için Eurocode2(2002) aşağıdaki eşitlikleri önermiştir.

$$V_{Rd,c} = C_{Rd,c}k(100\rho_l f_{ck})^{1/3} \tag{5.8}$$

$$C_{Rd,c} = 0.18/\gamma_c \tag{5.9}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \tag{5.10}$$

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly}\rho_{lz}} \tag{5.11}$$

Eşitlik 5.8'den hesaplanan gerilme değeri kontrol çevresi ve döşeme faydalı yüksekliği ile çarpılırsa kirişsiz ve kayma donatısız döşemenin zımbalama dayanımı (Eşitlik 5.12) elde edilebilir.

$$V_{kapasite} = V_{Rd,c}d\ u_1 \tag{5.12}$$

$V_{Rd,c}$, kontrol çevresinde oluşan kayma gerilmesi dayanımı, *d,* döşeme faydalı yüksekliği, u_1, kontrol çevresi, f_{ck}, beton karakteristik basınç dayanımı, ρ_{ly} ve ρ_{lz} her iki yöndeki döşeme çekme donatısı oranı ve, $\gamma_c = 1{,}5$, beton için kısmi faktör olarak tanımlanmıştır.

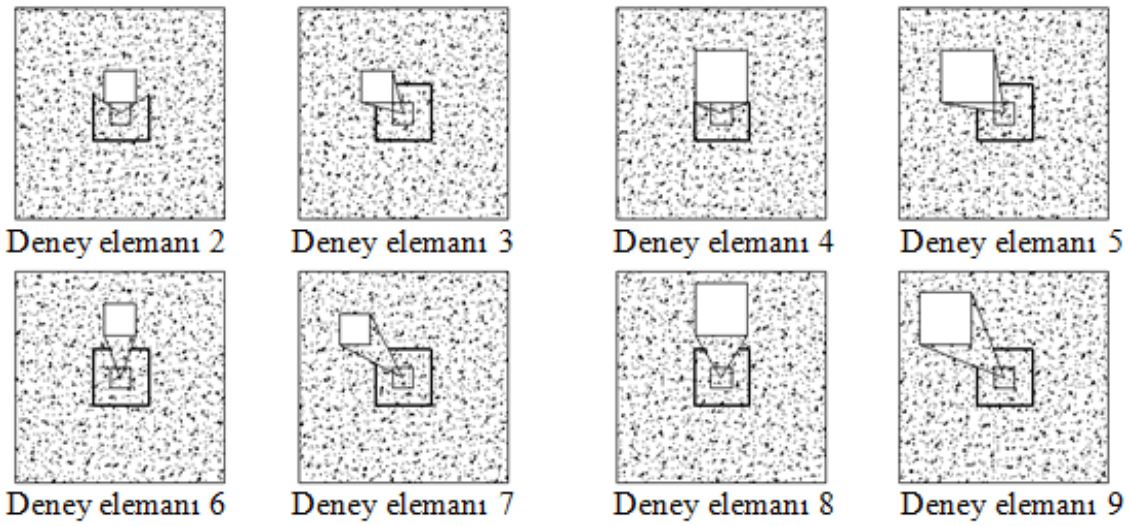
5.2.2. Deney elemanlarının zımbalama dayanımlarının BS8110(1997)'a göre hesaplanması

Bu bölümde ise İngiliz şartnamesi BS8110(1997) tarafından kirişsiz döşemelerin zımbalama kapasitesini hesaplamak için önerilen denklem tanıtılmıştır (Eşitlik 5.13).

$$V_c = 0{,}79\sqrt[3]{100\rho}\,\sqrt[4]{\frac{400}{d}}\,Ud \qquad (5.13)$$

Eşitlik 5.13'de verilen V_c, kirişsiz döşemenin zımbalama dayanımını, ρ döşemede her iki yöndeki boyuna donatı oranlarının ortalamasını, U, zımbalama kontrolü yapılacak kesitin çevresini, d ise döşeme faydalı yüksekliğini temsil etmektedir.

BS8110(1997)'a göre zımbalama kontrolü yapılacak kesitin çevresi yüklü olandan 3/2d uzaklıkta hesaplanmalıdır. Deney elemanları için BS8110(1997) yaklaşımına göre hesaplanan kontrol çevreleri Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6. BS8110(1997)'ye göre deney elemanlarının zımbalama çevreleri

5.3. Analitik Sonuçların Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması

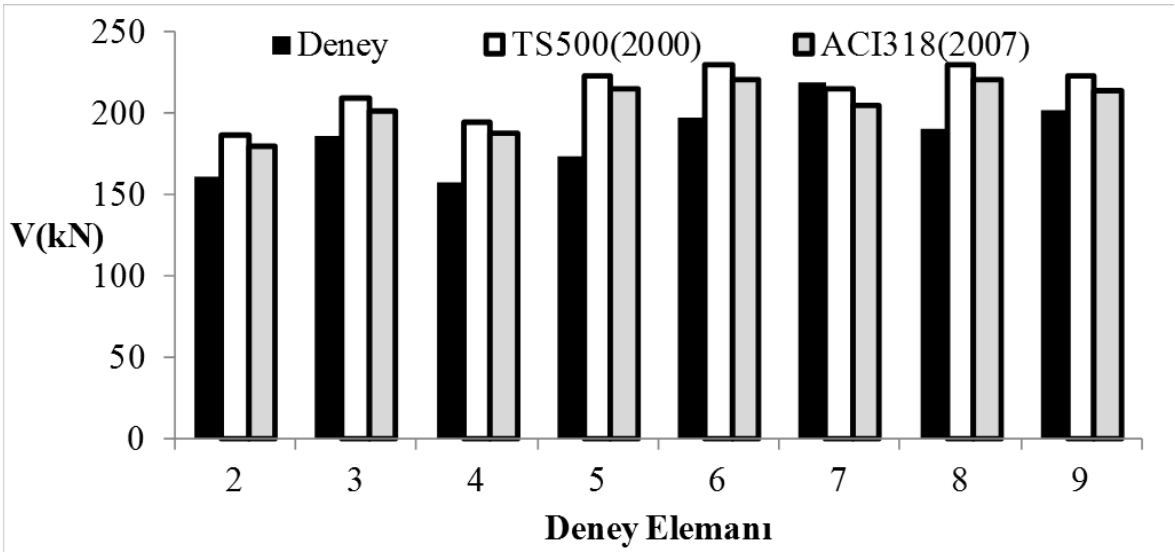
Bu bölümde, bölüm 5.1 ve 5.2'de gruplara ayrılan ve her biri ayrı ayrı tanıtılan denklemler kullanılarak hesaplanan zımbalama dayanımları, deney çalışmasından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak sunulmuştur. Zımbalama dayanımları, Bölüm 5.1 ve Bölüm

5.2'de tanıtılan denklemlerden elde edilen sonuçların ayrı grafikler ve tablolar halinde deney sonuçları ile karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir. Bu karşılaştırmayı yapabilmek için ise CFRP ile yapılan güçlendirme sonucunda elde edilen ek zımbalama dayanımları (Çizelge 4.9) her deney elemanı için şartnameler tarafından önerilen denklemlerden elde edilen sonuçlara eklenmiştir.

5.3.1. Deney sonuçlarının 1. grup denklemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması

Bu bölümde, deney elemanlarının zımbalama kapasitesini hesaplarken, döşemede bulunan eğilme donatısı oranını dikkate almayan şartname denklemleri kullanılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Sonuçlar, deneysel çalışmadan bulunan zımbalama kapasitelerinin, TS500(2000) ve ACI318(2008) tarafından zımbalama kapasitesi hesapları için önerilen denklemler kullanılarak bulunan zımbalama kapasiteleri ile karşılaştırılmasıyla sunulmuştur. Şekil 5.7'de yapılan karşılaştırmanın sonuçları görülebilir. Şekil 5.7'nin yatay ekseninde verilen deney elemanı numaralarının hangi deney elemanına ait sonuçları gösterdiği Çizelge 3.1' de verilen bilgiler kullanılarak takip edilebilir.

Şekil 5.7'de sunulan grafik incelendiği zaman, TS500(2000) ve ACI318(2007) tarafından önerilen denklemler kullanılarak elde edilen sonuçların genellikle deney sonuçlarından bir miktar daha büyük olduğu görülmektedir. Şartnameler tarafından önerilen denklemlerden elde edilen sonuçların, deneylerden elden edilen sonuçlarla arasındaki farkın deney sonuçlarına bölünmesiyle (yüzde cinsinden) denklemlerden elde edilen sonuçların hata oranı hesaplanmıştır. Daha sonra bu hata oranlarının ortalaması alınarak, ortalama hata oranı hesaplanmıştır. Tablo 5.1'den görüleceği gibi şartnameler tarafından önerilen denklemler CFRP ile güçlendirilmiş döşemelerin zımbalama dayanımlarını ortalama olarak %15 daha yüksek tahmin edebilmişlerdir. Aradaki bu fark kabul edilebilir seviyelerde görünmektedir.



Şekil 5.7. Deneysel sonuçlarla TS500(2000) ve ACI318(2007) şartnamelerinin denklemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Çizelge 5.1. Şartnameler tarafından önerilen denklemler kullanılarak hesaplanan sonuçların yüzde olarak hata oranları

Eleman	TS500 (2000)	ACI318 (2008)
2	16	15
3	13	10
4	23	27
5	29	29
6	17	14
7	-2	-8
8	20	19
9	10	8
Ortalama	**16**	**14**

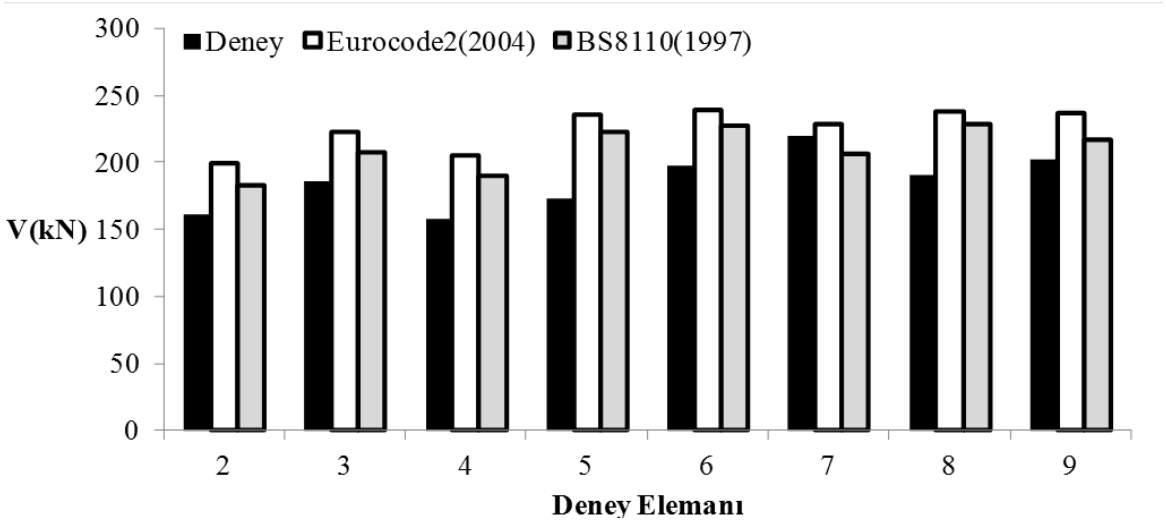
5.3.2. Deney sonuçlarının 2. grup denklemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması

Bu bölümde, deney elemanlarının zımbalama kapasitesini hesaplarken, döşemede bulunan eğilme donatısı oranını dikkate almaya elverişli şartname denklemlerinin kullanılmasıyla hesaplanan sonuçlar sunulmuştur. Sonuçlar, deneysel çalışmadan bulunan zımbalama kapasitelerinin Avrupa ve İngiliz şartnameleri olan Eurocode2(2002) ve BS8110(1997) tarafından zımbalama kapasitesi hesapları için önerilen denklemler kullanılarak bulunan zımbalama kapasiteleri ile karşılaştırılmasıyla sunulmuştur. Şekil 5.8'de yapılan

karşılaştırmanın sonuçları görülebilir. Şekil 5.8'in yatay ekseninde verilen deney elemanı numaralarının hangi deney elemanına ait sonuçları gösterdiği Çizelge 3.1'de verilen bilgiler kullanılarak takip edilebilir.

Eurocode2(2004) ve BS8110(1997) tarafından önerilen denklemlerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde her iki denklemden elde edilen sonuçlarında gerçek kapasite değerlerinin bir miktar üstünde kaldığı görülmektedir.

Şartnameler tarafından önerilen denklemlerden elde edilen sonuçların, deneylerden elden edilen sonuçlarla arasındaki farkın deney sonuçlarına bölünmesiyle (yüzde cinsinden) denklemlerden elde edilen sonuçların hata oranı hesaplanmıştır. Daha sonra bu hata oranlarının ortalaması alınarak, ortalama hata oranı hesaplanmıştır. Çizelge 5.2 incelendiğinde, en düşük hata oranını BS8110(1997) denkleminin verdiği görülmüştür. Diğer denklem ise daha büyük hata oranları vermiştir.



Şekil 5.8. Deneysel sonuçlarlaEurocode2(2004) ve BS8110(1997) şartnamelerinin denklemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Çizelge 5.2. Şartnameler tarafından önerilen denklemler kullanılarak hesaplanan sonuçların yüzde olarak hata oranları

Eleman	Eurocode2(2004)	BS8110(1997)
2	17	8
3	13	5
4	25	15
5	31	23
6	15	9
7	-3	-13
8	19	13
9	10	0
Ortalama	**16**	**7**

Sonuçlar incelendiğinde genel olarak deney sonuçlarının denklemlerden elde edilen sonuçlardan daha düşük olduğu görülmektedir. Bu farkın sebebi ise, ölçekli olarak imal edilen deney elemanlarında boşlukla mesnet arasındaki bölgenin ince kalması ve bu durumun döşemenin daha erken göçmesine sebep olmasıdır.

6. SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinin temel amacı CFRP ile güçlendirilmiş betonarme boşluklu döşemelerin bilgisayar yardımı ile isabetli şekilde modellenmesine katkıda bulunmak için bir yöntem geliştirmektir. Ayrıca, deneylerden elde edilen sonuçların doğrulanması, döşeme davranışının detaylı olarak incelenebilmesi ve kullanılan sonlu eleman yazılımının CFRP ile güçlendirilmiş döşeme davranışını tahmin etmedeki yeterliliğinin irdelenebilmesi de analizlerden elde edilebilecek sonuçlar arasında yer almaktadır.

Çalışmanın bu bölümünde, gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri hakkında detaylı bilgi verilecektir. Tez çalışması kapsamında yapılan sonlu eleman analizlerinin tamamı ANSYS(2014) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyleri bu çalışma kapsamında yapılan sekiz adet çift doğrultuda çalışan betonarme boşluklu döşemenin CFRP ile güçlendirilmiş durumdaki analizleri ve deneyi daha önce Anıl ve diğerleri (2014) tarafından yapılan boşluksuz ve güçlendirilmemiş referans elemanının sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Sonlu eleman analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle modellerde kullanılacak sonlu eleman ağının detayları belirlenmelidir. Bu amaçla deneyi Anıl ve diğerleri(2014) tarafından yapılan boşluksuz referans elemanı modellenerek sonuçların sonlu eleman ağının değişimine olan hassasiyeti belirlenmiş ve uygun sonlu eleman boyutları seçilmiştir. Daha sonra CFRP ile güçlendirilmiş deney elemanları, seçilen sonlu eleman ağı kullanılarak modellenmiştir. Deneyi yapılan döşemelerin modellenmesi, analizleri ve elde edilen sonuçlar bütün detayları ile ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

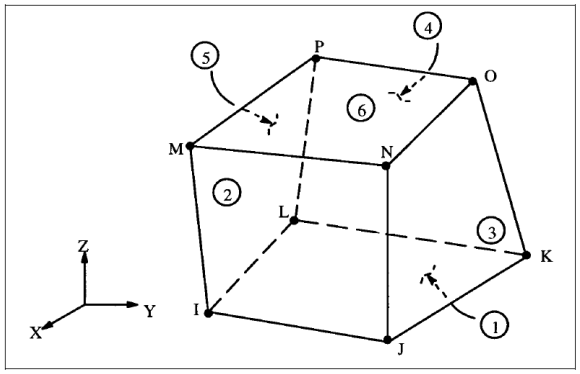
ANSYS(2014) sonlu elemanlar yazılımı ile elastik ötesi statik analiz yapabilmek için önce kullanılacak eleman tipleri belirlenmelidir. Daha sonra kullanılacak malzeme özellikleri belirlenmeli ve her bir malzemenin doğrusal ve doğrusal olmayan özelliği ayrı ayrı tanımlanmalıdır. Elemanlara ait özellikleri belirleyen sabit setleri tanımlanmalı ve geometri oluşturulmalıdır. Daha sonra sonlu eleman ağı oluşturulmalıdır. Bu aşamalardan sonra yük istenilen noktaya uygulanabilir. Tez çalışmasının bu bölümünde, yukarıda kısaca anlatılan modelleme prosedürü hakkında bilgi verilecektir.

6.1. Kullanılan Elemanlar ve Özellikleri

Sonlu eleman analizleri için kullanılan yazılım, farklı malzemelerden üretilmiş ve farklı davranış özellikleri olan elemanlar için farklı eleman tipleri kullanılmasını gerektirmektedir. Bu sebeple, CFRP ile güçlendirilmiş boşluklu betonarme döşemelerde kullanılan: (i)beton, (ii) çelik donatı, (iii) CFRP şeritler ve (iv) farklı malzemeler arasındaki temas bölgelerinde davranışın nasıl olacağını belirleyen temas elemanları için farklı eleman tipleri kullanılmıştır. Seçilen her eleman kendine özgü benzersiz bazı özelliklere sahiptir. Bu özellikler aşağıda verilmiştir.

6.1.1. Betonarme elemanların modellenmesi için kullanılan eleman tipi

Kapsadığı hacmin 8 köşesinde düğüm noktası barındıran SOLID65 elemanı (Şekil 6.1) betonun modellenmesi için kullanılmıştır.



Şekil 6.1. Solid65 elemanı (ANSYS, 2014)

Ansys(2014) yazılımın kullanıcı kılavuzunda detaylı olarak anlatıldığı gibi bu eleman beton veya betonarme davranışının isabetli olarak modellenebilmesine olanak sağlamak için bazı özelliklerle donatılmıştır. SOLID65 elemanı donatı içeren veya içermeyen katıların üç boyutlu olarak modellenmesine olanak sağlamaktadır. Çekme gerilmeleri altında çatlama, basınç gerilmeleri altında ezilme özelliklerine sahiptir. Betonarme davranışı modellenirken, beton içinde bulunan donatıların ayrı bir eleman kullanılmadan kendi içinde modellenmesine olanak tanır. Bir eleman içinde, farklı yönlerde, farklı hacimsel oranda ve farklı malzemeden oluşmuş üç ayrı donatı katmanının tanımlanmasına izin verir. Elemanın en önemli özellikleri ise üç ortogonal yönde çatlayabilme, ezilme,

plastik deformasyon ve sünme gibi doğrusal olmayan malzeme özellikleri olarak belirtilmiştir. Ayrıca beton içinde tanımlanabilen donatılar çekme ve basınç gerilmelerine karşı koyabilmekte ancak kesme gerilmelerine karşı çalışmamaktadır. Buna ek olarak, verilen malzeme özelliklerine bağlı olarak donatılar plastik deformasyon yapabilmektedir.

Bu çalışmada SOLID65 elemanın donatıları dağınık katman olarak modelleyebilme özelliği kullanılarak döşeme alt ve üst yüzlerinde bulunan ızgara şeklindeki donatılar dağınık olarak modellenmiştir. Bu tip modelleme yapılmasının temel sebebi döşeme alt ve üst yüzünde simetrik olmayan donatı düzenidir. Modelleme aşamasında beton elemanlar ile donatıların aynı düğüm noktalarına bağlanması gerekmektedir. Aynı zamanda kullanılan beton elemanların döşeme düzlemine paralel doğrultudaki boyutları döşeme kalınlığı boyunca birbiri ile eşit olmalıdır. Bu iki zorunluluk bir araya geldiğinde oldukça fazla beton eleman sayısı ortaya çıkmaktadır. İşte bu sebeple diğer seçenek olan donatıların ayrık olarak modellenmesi yapılmamıştır. Donatıların dağınık olarak modellemesi ise modellerin oluşturulmasında kullanılan eleman sayısını azaltarak daha hızlı işlem yapılabilmesine olanak vermektedir. Ancak donatıların ayrık olarak modellenmemesi aynı zamanda beton ile donatı arasında tam aderans olduğu kabulünü yapmayı gerektirmektedir. Öte yandan Kazaz (2012) tarafından yapılan çalışmada, ayrık modellenmiş donatıların uç bölgelerinde kullanılan ve beton ile donatı arasındaki aderansa bağlı olarak kuvvet deplasman eğrileri belirlenen yayların, elde edilen kuvvet deplasman eğrilerinin şeklini bir miktar değiştirebileceği gösterilmiştir. Ancak, döşemelerde kullanılan donatıların nervürlü olması ve döşemelerin deneysel kuvvet deplasman eğrilerinden zımbalama anına kadar çok fazla plastikleşme gözlenmemesi bu sıyrılma etkisinin bu çalışmadaki modeller için düşük seviyede kalacağını düşündürmektedir.

6.1.2. CFRP elemanların modellenmesi için kullanılan eleman tipi

Dıştan yapıştırılmış CFRP şeritlerle güçlendirilmiş betonarme elemanların sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesini konu alan çalışmalar incelendiğinde. CFRP şeritlerin 3 farklı şekilde modellendiği görüşmüştür: (i) sadece çekmeye çalışan donatı elemanları kullanılarak (Kim ve diğerleri, 2009; Rezaiefar, 2013) (ii) kalınlıksız kabuk elemanlar kullanılarak (Sasmal ve diğerleri, 2013), (iii) belirli bir kalınlığı olan katı elemanlar kullanılarak (Kachlakev, 2001; Altun ve Birdal, 2012; İbrahim ve Mahmood, 2009; Mahmoud 2012). Çizelde 2.4'te gösterildiği gibi bu çalışmada kullanılan CFRP şeritlerin

kalınlığı 0,12 mm'dir. Ancak CFRP şeritler alt ve üst yüzlerinden epoksi ile birleştirildiğinde kalınlık yaklaşık olarak on katına çıkarak 1-1,5 mm civarına yaklaşmaktadır (Kachlakev, 2001). Bu sebeple kalınlıksız kabuk elemanları kullanmak yerine, Kachlakev (2001)'de yapıldığı gibi belirli bir kalınlığı olan katı elemanlar kullanılmış ve elemanların kalınlığı arttırıldığı oranda elastisite modülleri azaltılmıştır. CFRP şeritlerin katı elemanlar kullanılarak modellenmesi için ANSYS kütüphanesinde bulunan SOLID185 elemanı kullanılmıştır. Bu eleman katıların üç boyutlu modellenmesinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. CONCRETE65 elemanına benzer şekilde 8 köşesinde düğüm noktası barındırmaktadır.

6.1.3. CFRP şeritler ve beton yüzeyler arasındaki temas bölgeleri için kullanılan eleman tipleri

Beton yüzeyler ve CFRP şeritler arasındaki temas bölgelerindeki davranışı gerçeğe yakın olarak modelleyebilmek için bu bölgelerdeki davranışı tanımlayan özel elemanlar kullanmak gerekmektedir. Konuyla ilgili çalışmalar incelendiğinde, bir çok çalışmada bahsedilen temas bölgelerinde CFRP ile beton arasında tam aderans olduğu kabul edilerek çözümler yapıldığı görülmüştür (Al-Rousan ve diğerleri, 2012; Santhakumar ve diğerleri, 2004; Abbas, 2012; Mahmoud 2012). Ancak özellikle CFRP ile beton arasında kalan yüzeyin gerilme altında nasıl davrandığını inceleyen çalışmalara bakıldığında (Lu ve diğerleri, 2005), gerçek davranışın yukarda bahsedilen ön kabulden farklı olduğu görülecektir. Buna bağlı olarak bu çalışmada CFRP şeritler ile beton arasındaki davranışı gerçeğe yakın olarak modelleyebilmek için ANSYS(2014) kütüphanesi içinden seçilen temas elemanı çiftleri kullanılmıştır. CONTA174 ve TARGE170 isimli bu elemanlar, yüzeyler arasındaki temas davranışını modellemek için kullanılan elemanlardır. CONTA174 elemanı üç boyutlu modellenmiş elemanların yüzeyleri arasındaki temas halini modellemek için kullanılır (ANSYS,2014). Bağlandığı her düğüm noktasında x, y ve z eksenleri üzerinde ötelenme serbestlik derecesine sahiptir. CONTA174 elemanı ile ilgili hedef elemanı arasındaki temas, CONTA174 elemanı hedef elemanını delmeye başladığı zaman gerçekleşir. Temas durumunun başlaması için gereken delme mekanizması gerçek bir durum olmayıp çözüm algoritmasının işlemesi için kullanılan sanal bir yaklaşımdır. Temas elemanlarının parametreleri ile ilgili bilgi verilirken bu konuya daha detaylı olarak değinilecektir. TARGE170 elemanı, ilgili kontak elemanı ile birlikte çalışarak üç boyutlu

temas durumunu modellemek için gereken hedef yüzeyi temsil eder. Hedef yüzey üzerine herhangi bir ötelenme veya dönme hareketi uygulanabilir.

6.2. Malzeme Özellikleri

Modelleme çalışmasında, beton ve donatı için doğrusal olmayan izotropik malzeme modelleri kullanılmıştır. İçinde barındırdığı lifler doğrultusunda dayanıma sahip olan CFRP için ise doğrusal elastik ve ortogonal malzeme özellikleri kullanılmıştır. Mesnet ve yükleme plakaları için ise doğrusal elastik çelik modeli kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin özellikleri ile ilgili detaylar aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

6.2.1. Beton için kullanılan malzeme modelleri

Betonarme bir elemanın yükleme altındaki gerilme ve deformasyon durumunu isabetli olarak tahmin edebilmek için betonun çok eksenli yükleme altındaki doğrusal olmayan kuvvet - deplasman özelliklerini ve artan yüklemeler altındaki çatlama davranışını isabetli olarak hesaplayabilmek gerekir (Büyüköztürk, 1977). Beton bileşenleri olan heterojen bir malzemedir. Buna bağlı olarak mekanik özellikleri kolayca tanımlanamayacak şekilde dağınıklık gösterir. Betonun gerilme deformasyon davranışı doğrusal olmamasının yanında çekme ve basınç durumları içinde farklıdır. Ayrıca, yüklendiği zamanki yaşı ile birlikte ısı ve nem gibi çevre koşulları da betonun gerilme deformasyon davranışı üzerinde etkilidir. Ancak, beton analiz ve tasarım içeren çalışmalarda modelleme kolaylığı sağlamak için makroskobik ölçekte homojen olarak kabul edilir (Kwak ve Flippou, 1990). Bu yaklaşım çerçevesinde basınç yükleri altında beton davranışının, beton basınç dayanımının %30'una kadar doğrusal ve elastik olduğu kabul edilebilir (Kwak ve Flippou, 1990; Kachlakev ve diğerleri, 2001). Bu noktadan sonra betonun gerilme - deformasyon davranışı, beton basınç dayanımına erişilene kadar yumuşayarak ilerler. Basınç dayanımına ulaşıldığında ise malzememin gerilme - deformasyon eğrisinin eğimi sıfıra düşer. Daha sonra ise, ezilme meydana gelinceye kadar gerilme - deformasyon ilişkisi negatif eğimle ilerler. Beton, çekme yükleri altında ise çekme dayanımına ulaşana kadar yaklaşık olarak doğrusal ve elastik davranır (Bangash, 1989). Çekme dayanımına ulaştıktan sonra ise çatlayarak dayanımını kaybeder. Günümüzde, bu gerilme – deformasyon davranışı modelleyen birçok matematik model kullanılmaktadır.

Bu çalışmada ise Kachlakev ve diğerleri. (2001)'in çalışmasında kullandığı şekilde Desayi ve Krishnan (1964) tarafından önerilen model kullanılmıştır. Desayi ve Krishnan (1964) modelinde herhangi bir deformasyon anında oluşacak gerilme aşağıdaki ifadeler ile verilmiştir (Eşitlik 6.1, Eşitlik 6.2).

$$\sigma = \frac{E_c \varepsilon}{1+\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} \tag{6.1}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2f_c}{E_c} \tag{6.2}$$

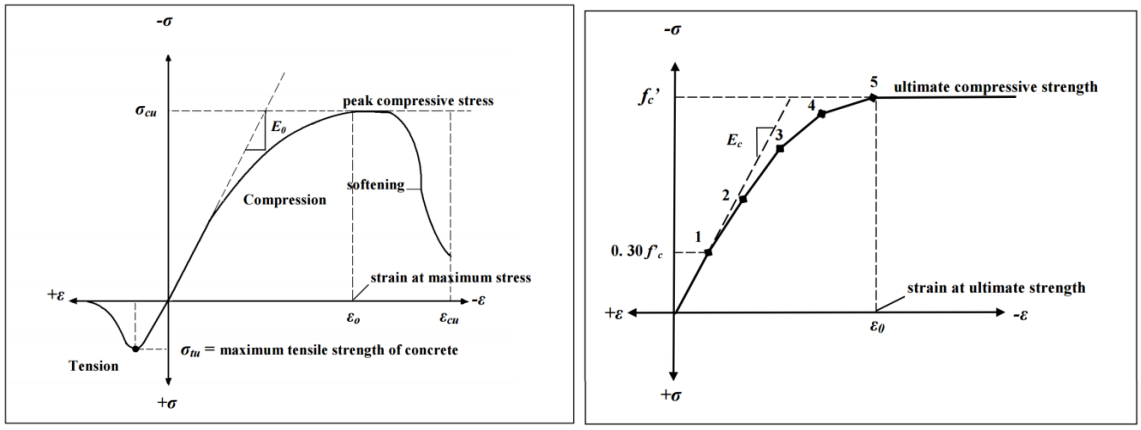
E_c betonun elastik modülünü, f_c beton basınç dayanımını, ϵ_0 gerilme beton basınç dayanımına ulaştığı andaki birim deformasyon değerini, ε ise herhangi bir gerilme altında o gerilmeye karşılık gelen birim deformasyon değerini ifade etmektedir. Şekil 6.2'de, tek eksenli yükleme altında betonun tipik ve basitleştirilmiş gerilme – birim deformasyon eğrileri verilmiştir.

Daha önce belirtildiği gibi deney elemanları dökülürken alınan numunelerin test edilmesiyle beton basınç dayanımı belirlenmişti. Bu basınç dayanımı ACI318(2005) tarafından normal ağırlıklı betonun elastik modülünü hesaplamak için verilen denklem (Eşitlik 6.3) içine yerleştirilerek betonun elastik modülü hesaplanmıştır.

$$\mathrm{E_c} = 4700\sqrt{\mathrm{f_c}} \tag{6.3}$$

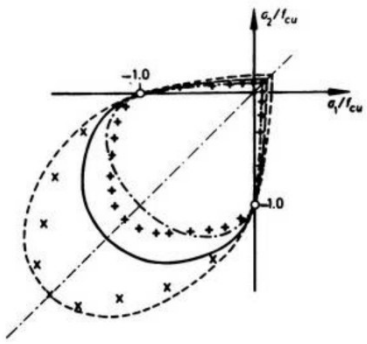
Daha sonra ANSYS(2014) kullanılarak gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinde kullanılmak üzere betonun çekme dayanımı ise yine ACI318(2005) tarafından önerildiği şekilde (Eşitlik 6.4) beton basınç dayanımına bağlı olarak hesaplanmıştır.

$$\mathrm{f_r} = 0.62\sqrt{\mathrm{f_c}} \tag{6.4}$$



Şekil 6.2. Betonun (a) tipik (Bangash, 1989), (b) basitleştirilmiş gerilme – birim deformasyon ilişkileri (Kachlakev, 2001).

Betonun çok eksenli yükleme altındaki dayanımını modellemek için ANSYS(2014) yazılımı tarafından William ve Warnke (1975) göçme kriteri hazır olarak sunulmaktadır. Van Mier (1997) ve Dahl (1990) yaptıkları çalışmalarda William ve Warnke (1975) göçme kriterinin mevcut deney sonuçlarına uyum gösterdiği ve betonun çok eksenli gerilme altındaki davranışını oldukça isabetli olarak hesaplayabildiğini belirtmişlerdir. Deney sonuçları ile yapılan karşılaştırmalarda modelin isabetli sonuçlar verdiğini göstermiştir (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. William ve Warnke (1975) modelinin gerilme deneylerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması

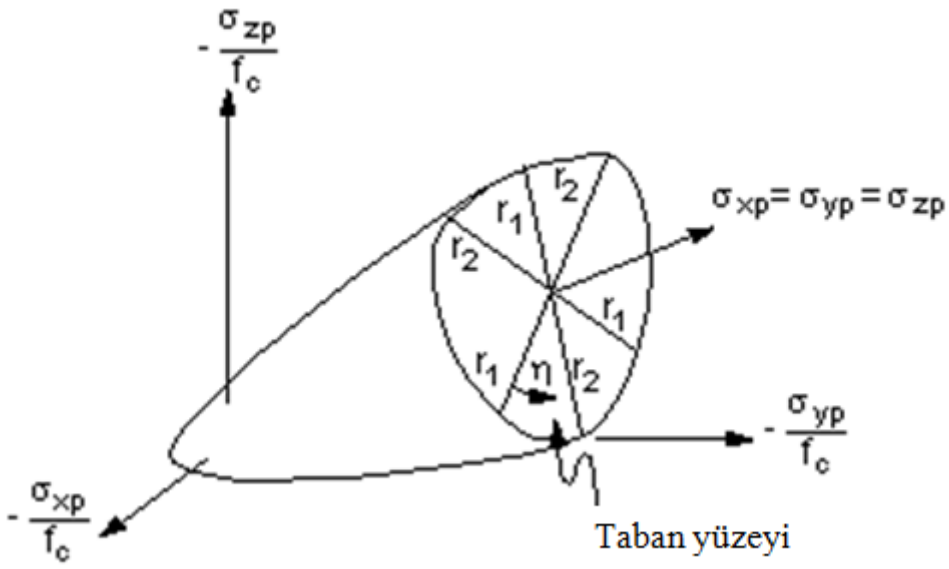
William ve Warnke (1975) modeli betonun 3 eksenli yükleme altındaki göçmesini, asal gerilmeler uzayında, koni şeklinde bir kırılma yüzeyi ile tanımlar. William ve Warnke (1975) modelinde betonun kırılması için kriter aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Eşitlik 6.5).

$$\frac{F}{f_c} \geq S \qquad (6.5)$$

F, asal gerilmelerin büyüklüğüne göre gerilmeyi veren bir fonksiyon, f_c betonun tek eksenli basınç dayanımı ve S' de asal gerilmeler ve girilen parametreler ile tanımlanan kırılma yüzeyidir. Eşitlik 6.5'te gösterilen *F;* σ_1, σ_2 ve σ_3 ile gösterilen asal gerilmelerin bir fonksiyonudur. *S* ise asal gerilmeler ile birlikte William ve Warnke (1975) kırılma yüzeyini tanımlamak için girilen parametrelerin bir fonksiyonudur. Asal gerilmelerden, σ_1 her üç yöndeki asal gerilmelerin en büyüğünü temsil ederken, σ_3 en küçüğünü temsil eder. Asal gerilmelerin işaret ve büyüklüğüne göre değişen *F* ve *S* değerleri sürekli hesaplanarak Eşitlik 6.5'te verilen kriterle karşılaştırılır ve sonuca göre elemanın kırılıp kırılmadığı belirlenir. William ve Warnke (1975) kırılma modelinde betonun göçmesi 4 temel şekilde tanımlanır.

1. Kombinasyon: $0 \geq \sigma1 \geq \sigma2 \geq \sigma3$ (basınç - basınç - basınç). Her üç asal gerilmede basınç halindedir.
2. Kombinasyon: $\sigma1 \geq 0 \geq \sigma2 \geq \sigma3$ (çekme - basınç - basınç). İlk asal gerilme çekme, diğer ikisi basınç halindedir.
3. Kombinasyon: $\sigma1 \geq \sigma2 \geq 0 \geq \sigma3$ (çekme - çekme - basınç). İlk iki asal gerilme çekme, son asal gerilme basınç halindedir.
4. Kombinasyon: $\sigma1 \geq \sigma2 \geq \sigma3 \geq 0$ (çekme - çekme - çekme). Her üç asal gerilmede çekme halindedir.

Daha öncede belirtildiği gibi her bir gerilme kombinasyonu için hesaplanan *F* ve *S* değerleri Eşitlik 6.5'te yerine koyularak elemandaki gerilme durumunun kırılma yüzeyinin içinde kalıp kalmadığına karar verilir. Herhangi bir asal gerilme değeri betonun çatlama gerilmesi değerini geçtiğinde eleman ilgili yönde çatlamış kabul edilir. Ezilme ise betonun bütün asal gerilmeler basınç halinde ve kırılma yüzeyinin dışında ise gerçekleşmiş olur ve ezilen elemanın elastik modülü bütün yönlerde sıfıra eşitlenerek eleman yok edilmiş olur (ANSYS, 2014). Sunulan 4 adet kombinasyonda *F* ve *S* değerlerinin nasıl hesaplandığına bu çalışmada yer verilmemiştir. Hesaba ilişkin ayrıntılar William ve Warnke (1975)' de ve ANSYS(2014) kullanım kılavuzunda bulunabilir.



Şekil 6.4. William ve Warnke (1975) modelinin kırılma yüzeyi

Beton elemanların davranışlarının William ve Warnke (1975) kırılma kriteri ile modellenebilmesi için ANSYS(2014) yazılımına bazı parametrelerin girilmesi gerekir. Bu parametreler:

- Açık ve kapalı çatlak için transfer katsayıları: Bu katsayılar teorik olarak, açık çatlak için "0" kapalı çatlak için "1" olarak kullanılabilirler. Açık çatlak için kullanılabilecek olan "0" değeri kayma gerilmelerini aktarma gücünü tamamen kaybetmiş ve hiç agrega kenetlenmesi olmayan bir çatlağı temsil ederken, kapalı çatlak için kullanılabilecek "1" değeri ise kayma gerilmelerini aktarma gücünü tümüyle muhafaza eden ve çok güçlü agrega kenetlenmesi olan bir çatlağı temsil etmektedir. ANSYS(2014) yazılımı kullanılarak yapılan çalışmalarda bu çatlak katsayılarının uygun olmayan şekilde seçilmesinin analizlerde aşılması güç yakınsama problemlerine sebep olduğu söylenmiştir (Bangash, 1989; Hemmaty ,1998; Huyse ve diğerleri, 1994; Kachlakev ve diğerleri, 2001; Stehle, 2002). Bu sebeple yukarda teorik şekliyle "0" ve "1" olarak önerilen katsayılar, bu değerlerden biraz daha değişik şekilde kullanılmıştır. Bunlara bağlı olarak, bu çalışmada açık çatlaklar için transfer katsayısı 0,25 olarak kullanılmıştır. Kapalı çatlaklar için ise 0,8 olarak kullanılmıştır.

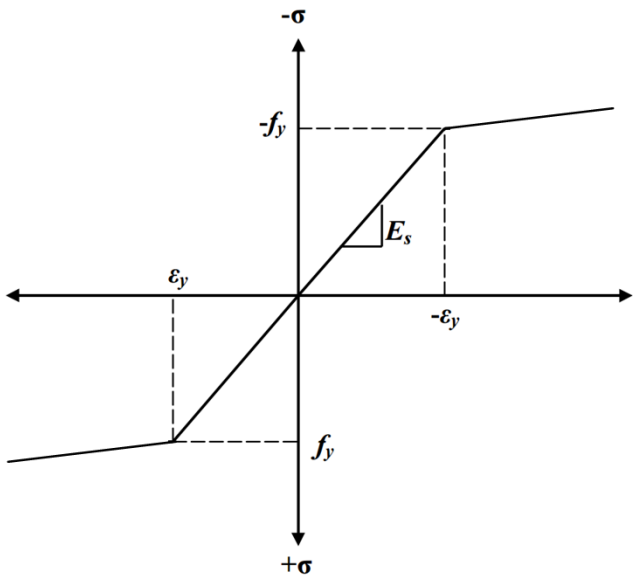
- Betonun tek eksenli yükleme altındaki çatlama dayanımı daha önce belirtildiği gibi ACI318(2005) tarafından önerilen denklem (Eşitlik 5.4) kullanılarak betonun basınç dayanımına bağlı şekilde 2,7 MPa olarak hesaplanmıştır.
- Betonun tek eksenli yükleme altındaki ezilme dayanımı William ve Warnke (1975) modelinde kullanılmak üzere girildiği zaman sonlu eleman analizlerinin oldukça küçük yükleme seviyeleri altında yakınsama problemleri ile karşı karşıya kaldığı görülmüştür. Bu durumun sebebini Kachlakev ve diğerleri (2001) şöyle açıklamıştır: " Doğrudan yüklerin uygulandığı noktaların altında bulunan elemanlar prematüre göçmeye sebep olacak şekilde düşük yük seviyeleri altında ezilmeye başlarlar." Öte yandan Mindess ve Young (1981) ve Shah ve diğerleri (1995) çekme gerilmelerine karşı göreceli olarak daha zayıf olan betonun, ezilmeye yol açan basınç gerilmeleri ile birlikte Poisson etkisi ile oluşan ikincil çekme gerilmelerine maruz kalacağını ve çatlayacağını, göçmenin ise bu çekme çatlakları sebebiyle oluşacağını belirtmişlerdir. Buna bağlı olarak bu çalışmada da betonun ezilme özelliği kapatılarak çekme çatlakları altında göçmenin gerçekleşeceği kabul edilmiştir.
- William ve Warnke (1975) kırılma modelinin tanımlanmasında standart değerler atanabilen diğer parametreler (Betonun iki eksenli yükleme altındaki ezilme dayanımı, hidrostatik basınç vb.) ise program tarafından otomatik olarak hesaplanabilmektedir.

6.2.2. Çelik için kullanılan malzeme modeli

Daha önce belirtilen sebeplere bağlı olarak bu çalışmada donatı ayrık olarak modellenmeyip beton elemanların içinde yayılı olduğu kabul edilmiştir. Donatı, beton içinde yayılı olarak modellenirken, bir beton eleman içinde bulunan donatı miktarı hacimce hesaplanarak beton elemanın hacmine oranlanır ve çıkan sonuç beton elemanın içindeki donatı miktarını belirlemek için kullanılır. Beton eleman içinde yayılı olarak kullanılan donatının hangi yönde çalışacağı ise kullanıcı tarafından değerleri girilen iki ayrı açı ile tanımlanır. Yayılı donatının hacimce oranı ve yönü tanımlandıktan sonra, donatı yönü yine ANSYS(2014) ara yüzü üzerinden görsel olarak kontrol edilebilir.

Beton içinde yayılı olarak tanımlanan donatının gerilme – deformasyon davranışı ise iki doğrudan oluşan bir ilişki ile çekme ve basınç için simetrik olarak tanımlanmıştır (Şekil 6.5). Şekilde görüldüğü gibi gerilme –deformasyon ilişkisinin akma sonrasındaki davranışı için küçük bir eğim tanımlanarak ortaya çıkması muhtemel yakınsama problemlerinin

önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Donatıya ait Gerilme–deformasyon ilişkisini oluşturmak için çelik donatının akma gerilmesi, f_y, 480 MPa, elastiklik modülü, E_s, 200000 MPa ve akma sonrası modülü ise 1500 MPa olarak girilmiştir.



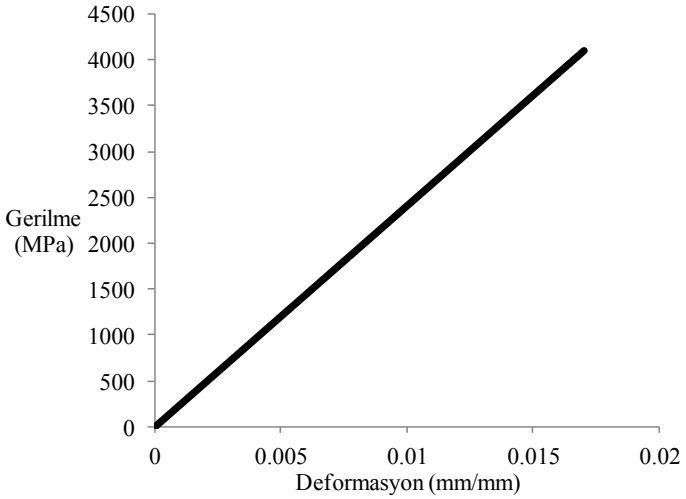
Şekil 6.5. Çelik donatı için kullanılan gerilme – deformasyon ilişkisi

Öte yandan, yüklemenin yapıldığı bölgede ve mesnet bölgelerinde ise elastik gerilme – deformasyon ilişkisine sahip çelik plakalar kullanılmıştır.

6.2.3. CFRP şeritler için kullanılan malzeme modeli

Bilindiği gibi CFRP malzemeler, tek yönlü ince şeritler halinde veya tek yada iki yönde çalışan liflerden imal edilmiş esnek tabakalar halinde bulunabilirler (FIB, 2001). Bu malzemelerin daha önce belirtilen avantajları ile birlikte bazı dezavantajlı yönleri de vardır. Bunlardan bir tanesi de bu malzemelerin kopma anına kadar elastik davranarak yeterince süneklik göstermemesidir (FIB, 2001). İşte bu elastik ve sadece lif yönünde etkili olan gerilme – deformasyon davranışı, bu çalışmada elastik malzeme özelliklerinin ortotropik olarak girilmesiyle modellenmiştir. CFRP için lifler yönünde doğrusal elastik olarak tanımlanan gerilme-deformasyon ilişkisi Şekil 6.6'da verilmiştir. Daha önce belirtildiği gibi bu çalışmada kullanılan CFRP malzeme tek eksenli olarak sadece lifler yönünde gerilme taşmaktadır. Lif eksenine dik olan iki doğrultuda ise ihmal edilebilecek kadar küçük gerilmeler alabilmektedir. Lif eksenine dik doğrultudaki malzeme özelliklerini belirlemek için Daniel ve İshai (1994) tarafından FRP kompozitlerin

anizotropik özellikleri ile ilgili bilgi veren tablodan (Çizelge 6.1) faydalanılmıştır. Çizelgede "1" alt indisi ile sunulan değişkenler FRP malzemenin lif doğrultusundaki mekanik özelliklerini temsil ederken, "2" alt indisi ile sunulan değişkenler ise lif yönlerine dik doğrultudaki mekanik özellikleri temsil etmektedir. Deney elemanlarının incelenmesinden görülebileceği gibi bu çalışmada kullanılan CFRP malzemelerin lifleri farklı eksenlerle çakışmaktadır. Bu yüzden, her birinin lif doğrultusu farklı olan üç farklı ortotropik malzeme tanımlanarak, yönleri değişen CFRP malzemeler için kullanılmıştır.



Şekil 6.6. CFRP için lif doğrultusunda kullanılan gerilme – deformasyon ilişkisi

Çizelge 6.1. FRP kompozitlerin anizotropik özellikleri (Daniel ve İshai, 1994)

FRP Composite	E_1/E_2	E_1/G_{12}	F_1/F_{2t}
Steel	1.00	2.58	1.00
Vinyl Ester Epoxy	1.00	0.94	1.00
S-glass/Epoxy	2.44	5.06	28
E-glass/Epoxy	4.42	8.76	17.7
Carbon/Epoxy	13.64	19.1	41.4
UHM/Epoxy	40	70	90
Kevlar/Epoxy	15.3	27.8	260

6.2.4. CFRP şeritler ile beton arasındaki ara yüzeyin göçme mekanizmaları ve modellenmesi için kullanılan malzeme modeli

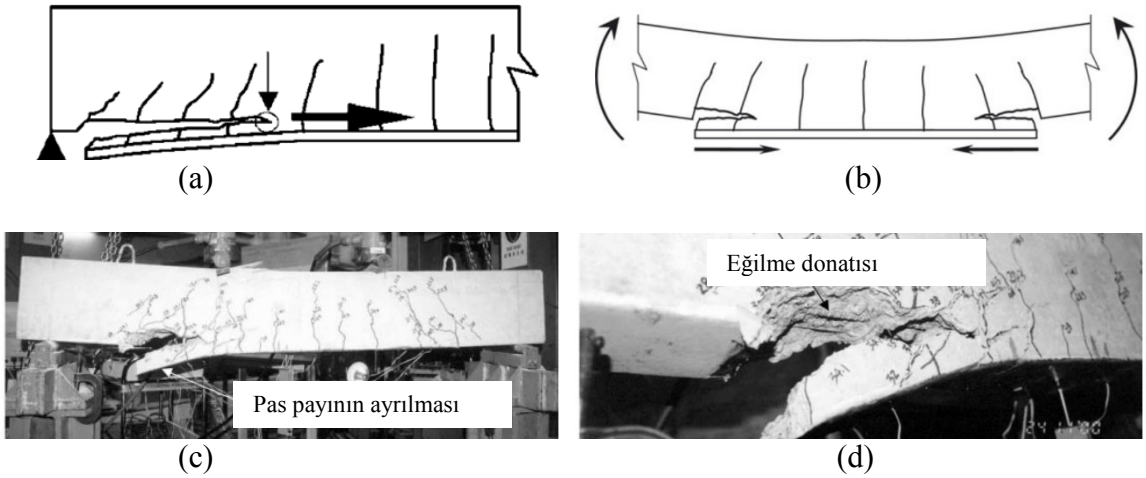
Daha önce söylendiği gibi betonarme elemanların dıştan yapıştırılmış CFRP şeritlerle güçlendirilmesi üzerine yapılan sonlu elemanlar çalışmaları incelendiğinde, bir çok çalışmada beton ile CFRP şeritler arasındaki ara yüzeyin gerilme – sıyrılma davranışının

dikkate alınmadığı görülmüştür. Bu çalışmalarda, CFRP malzemeleri beton yüzeyine yapıştırmak için kullanılan yapıştırıcıların çok güçlü olduğu belirtilerek beton ile CFRP şeritlerin davranışları arasında tam bir uyum olduğu kabul edilmiştir. Oysa beton ile CFRP arasındaki gerilme – sıyrılma ilişkisini inceleyen çalışmalar gerçek davranışın beton ile CFRP arasındaki ara yüzeyin gerilme sıyrılma ilişkisinden etkilenebileceğini göstermiştir. Buna bağlı olarak, bu çalışmada beton ile CFRP arasındaki ara yüzeyin gerilme sıyrılma davranışının, deney elemanlarının genel kuvvet – deplasman ilişkileri üzerindeki etkisini modelleyebilmek amacıyla çaba gösterilmiştir.

Yukarda belirtildiği gibi, betonarme yapıların CFRP ile güçlendirilmesinde CFRP ile beton arasındaki yüzeyin çeşitli sıyrılma/göçme şekillerini dikkate alacak şekilde tasarım yapılması gerekmektedir (Lu ve diğerleri, 2005). Bu sıyrılma şekilleri temel kategorilere ayrılarak aşağıda incelenmiştir.

Paspayının ayrılması

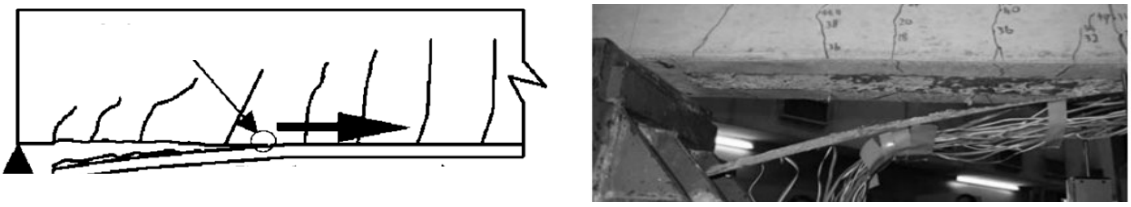
CFRP malzemenin paspayı ile birlikte betonarme elemandan ayrılmasını genelde, CFRP tabakasının ucunun yakınında meydana gelen bir çatlağın başlattığı düşünülmektedir(Smith ve Teng, 2001; Ritchie ve diğerleri, 1991; Sharif ve diğerleri, 1994; Garden ve diğerleri, 1997; Tumialan ve diğerleri, 1999; Nguyen ve diğerleri, 2001). Bu çatlağın ise, CFRP plakanın aniden sonlanması neticesinde ara yüzeyde oluşan yoğun kesme ve normal gerilmelerin sonucunda oluştuğu bilinmektedir (Smith ve Teng, 2001; Saadatmanesh ve Malek, 1998; Mukhopadhyaya ve Swamy, 2001; Varastehpour ve Hamelin, 1997; Tumialan ve diğerleri, 1999). CFRP plakanın uç kısmına yakın bir yerde oluşan bu çatlak çekme donatısına doğru ilerledikten sonra çekme donatısı boyunca yatay yönde büyür. Bu büyüme ise betonarme elemandaki paspayının ayrılmasına sebep olur (Şekil 6.7). Bu tip bir sıyrılma mekanizması değişik kaynaklarda farklı isimlerle anılmıştır. Ancak bu çalışma kapsamında mekanizmanın nasıl adlandırıldığı çok önemli değildir. Bu sebeple, sıyrılmanın CFRP ile betonarme elemanın yüzeyi arasında değilde, paspayı derinliğinde gerçekleşmiş olması bu çalışma “paspayı ayrılması” isminin seçilmesine sebep olmuştur .



Şekil 6.7. Paspayının ayrılması (a) (Smith ve Teng 2001) (b) (Yao and Teng 2007) (c) (Smith ve Teng 2001) (d) (Yao and Teng 2007)

FRP malzemenin uç noktalarından başlayan sıyrılma

Bu göçme mekanizmasının ise birleşimi oluşturan en zayıf eleman olan betonun çekme dayanımının, güçlendirme için kullanılan FRP malzemenin kesilmesi sonucu oluşan gerilme yığılmaları sebebiyle aşılması sonucu oluştuğu bilinmektedir (Smith and Teng, 2001; Varastehpour ve Hamelin, 1997; Taljsten, 1999). Bu sıyrılma esnasında güçlendirme için kullanılan malzeme beton yüzeyinden ayrılırken ince bir beton tabakayı da beraberinde ayırmaktadır (Taljsten, 1999) ancak bu tabakanın kalınlığı betonarme elemanın paspayı derinliği kadar yüksek değildir (Şekil 6.8). Bu sıyrılmanın kritik göçme modu haline gelmesindeki sebep güçlendirilen yüzeyin genişliğinin, kullanılan FRP güçlendirme malzmesinin genişliğinden çok daha fazla olmasıdır (Yao and Teng, 2007). Çünkü bu büyük genişlik farkı, beton ile FRP arasındaki yüzeyin, paspayı ile eğilme donatısı arasındaki yüzeyden daha kritik hale gelmesini sağlar.

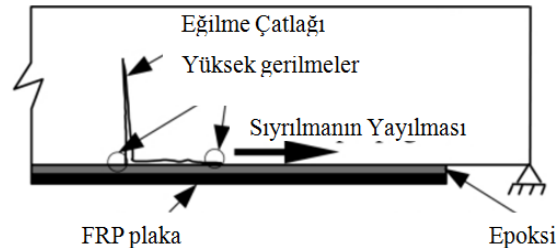


(a) (b)

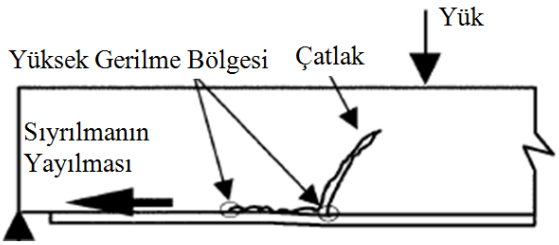
Şekil 6.8. CFRP'nin sıyrılması (a) (Smith ve Teng 2001) (b) (Teng and Chen 2007)

Ara yüzeyde eğilme veya eğilme / kesme çatlakları tarafından tetiklenen sıyrılma

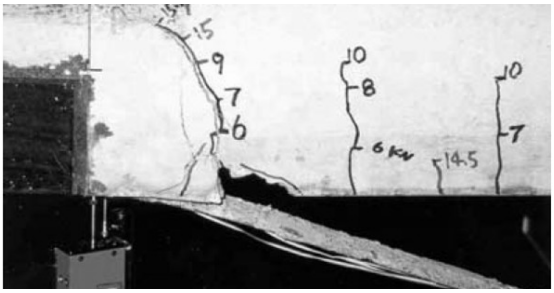
Bu sıyrılma mekanizması betonarme eleman üzerinde oluşan bir veya birden çok eğilme ya da eğilme ve kesme çatlaklarının beton ile FRP malzeme arasındaki bağ kuvvetlerini zorlayan gerilme yığılmaları meydana getirmesi sebebiyle oluşur. Betonarme eleman üzerinde bir eğilme çatlağı oluştuğunda, bu çatlağın oluştuğu kesit tarafından karşılanması gereken çekme gerilmeleri, güçlendirme için kullanılan FRP malzemeye aktarılmış olur (Teng ve diğerleri, 2003). Bu sebeple, çatlağa yakın ara yüzey bölgelerinde yüksek bölgesel gerilmeler meydana gelir. Artan yükleme sebebiyle genişleyen çatlak, genişledikçe sıyrılmayı başlatacak yüksekliğe ulaşan çekme gerilmelerinin oluşmasına sebep olur (Teng ve diğerleri, 2003). Bu gerilmeler sebebiyle başlayan sıyrılma genellikle eğilmenin yakın olduğu uç bölgesine doğru ilerler (Teng ve diğerleri, 2003). Eğilme çatlakları sebebiyle başlayan sıyrılma mekanizması Şekil 6.9a'da verilmiştir. Eğer betonarme elemanda eğilme / kesme çatlakları kombine halde bulunursa(Şekil 6.9b**,** Şekil 6.9c) bu çatlayan yüzeylerden birinin az miktarda rölatif olarak düşey deplasman yapacağını gösterir. Ancak bu düşey deplasmandan doğan gerilmelerin, beton ile FRP arasındaki ara yüzeyin davranışını sadece eğilme çatlağı ile başlayan sıyrılma durumundakinden çok farklı hale getirmeyeceği bilinmektedir (Teng ve diğerleri, 2003).



(a)



(b)

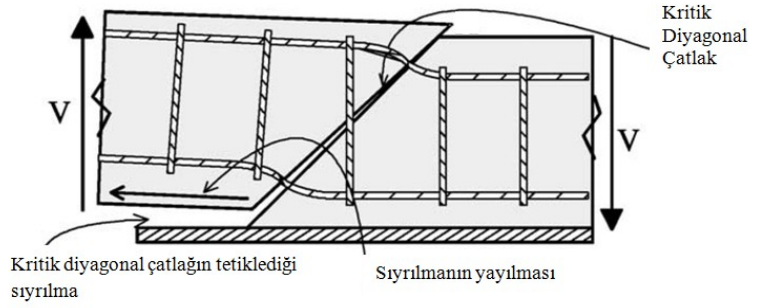


(c)

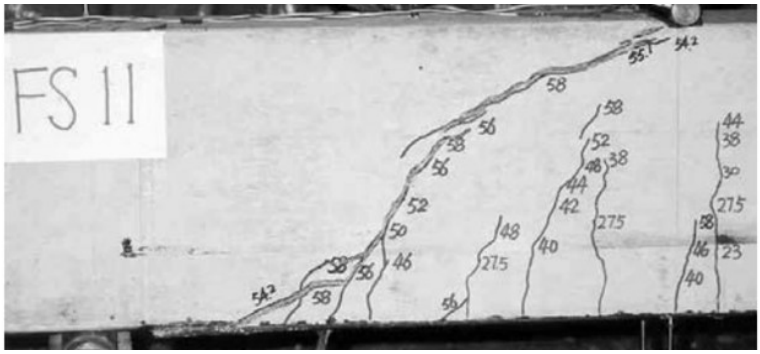
Şekil 6.9. CFRP'nin sıyrılması (a) (Teng ve diğerleri, 2003) (b) (Teng ve diğerleri, 2003) (c) (Teng ve Chen, 2007)

Kritik diyagonal çatlaklar tarafından tetiklenen sıyrılma

Bu sıyrılma mekanizması, kesit yüksekliği boyunca eğik biçimde çatlayan betonarme elemanın iki parçasının çatlak yüzeyi boyunca birbirine göre deplasman yapmasından kaynaklanır (Oehlers ve diğerleri, 2003; Janzse, 1997; Oehlers, 1992). Bu çalışmada test edilenler gibi kesme donatısı barındırmayan döşemelerde güçlendirme için kullanılan FRP malzemeler ani şekilde beton yüzeyinden sıyrılır (Oehlers ve diğerleri, 2003). Güçlendirme için kullanılan FRP malzemenin bu tip çatlakların oluşumunu geciktirdiği de bilinmektedir (Oehlers ve diğerleri, 2003, Teng ve diğerleri, 2001; Ali ve diğerleri, 2001; Mohammed Ali ve Diğerleri, 2000). Şekil 6.10a'da kritik diyagonal çatlağın sıyrılmayı tetiklemesi tipik bir betonarme eleman üzerinden gösterilmiştir. Şekil 6.10b'de ise aynı durum gerçek bir kiriş üzerinden gösterilmiştir.



(a)



(b)

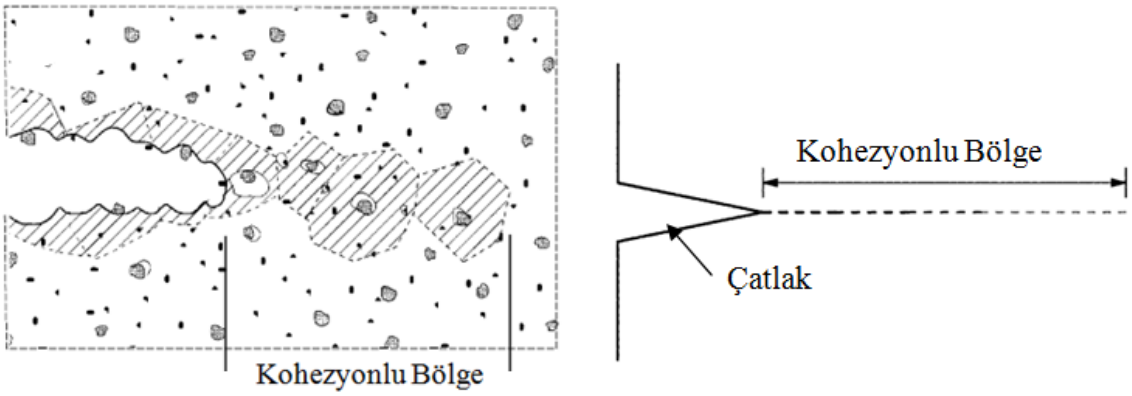
Şekil 6.10. (a) Tipik bir kritik diyagonal çatlak(Oehlers ve diğerleri, 2003), (b) Gerçek bir kiriş üzerinde görülen kritik diyagonal çatlak (Teng ve Chen, 2007)

Yukarda özetlenen sıyrılma mekanizmalarına ait detaylı bilgiler metin içinde sunulan referanslardan elde edilebilir.

CFRP şeritler ile beton arasındaki ara yüzey için kullanılan model

ANSYS(2014) yazılımı betonarme elemanlar ile FRP malzemeler arasındaki ara yüzeyin davranışının modellenebilmesine olanak sağlayan Cohesive Zone Material (CZM) Model (Türkçeye kohezyonlu bölge malzemesi modeli olarak çevrilebilir) adlı bir malzeme modeli sunmaktadır. Yazılımda bu modelin parametrelerinin girilebileceği veya seçilebileceği herhangi bir ara yüz bulunmamaktadır. Model parametreleri programa belirli komutlar yardımıyla girilebilmektedir. Bu model, girdi olarak CFRP ile beton arasındaki ara yüzeyin gerilme ile sıyrılma/ayrılma ilişkisini tanımlayan bazı parametrelerin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu parametrelerin neler olduğunu anlatmadan önce CZM modeli ve bu modelin kullandığı yöntem tanıtılacaktır.

CZM modelinde, bir malzemede oluşan çatlağın izleyeceği yolun başından itibaren artan çatlak açıklığı ile birlikte gerilmenin azaldığı bir bölgenin var olduğu kabul edilir (Xie ve Waas, 2006). Şekil 6.11'de bu bölge şematik olarak gösterilmiştir.

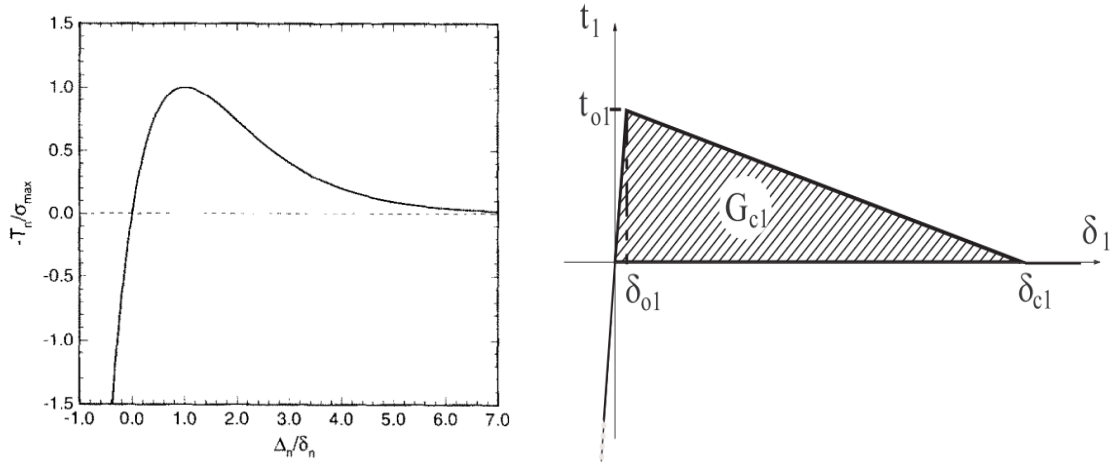


Şekil 6.11. Kohezyonlu bir bölgenin şematik gösterimi (Elices ve diğerleri, 2002 ve De Borst,2003' ten uyarlanmıştır).

Günümüzde sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak analizi yapılan malzemelerin, onları oluşturan tabakalara ayrılmasını (delaminasyon) modellemek için kullanılan yaklaşımlardan olan CZM konseptinin ilk halinin Dugdale (1960) tarafından ortaya çıkarıldığı söylenebilir. Dugdale (1960) yaptığı çalışmada çelik bir levha üzerindeki yırtık etrafında oluşan gerilmeleri ve uygulanan çekme kuvveti ile yırtık gelişimi arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Dugdale (1960) çalışmasında kohezyonlu bölgedeki gerilmelerin malzemenin akma gerilmesine eşit ve düzgün olduğunu kabul etmiştir. Barenblatt (1962) ise kohezyonlu bölge boyunca meydana gelen bu gerilmelerin çatlak uzunluğunun bir fonksiyonu olarak değişeceğini söylemiştir. Beton gibi gevrek malzemeler için ise kohezyonlu alan konsepti ilk kez Hilleborg ve diğerleri (1976) tarafından kullanılmıştır. Wang (2006) ise çalışmasında dıştan FRP malzemelerin yapıştırılması ile güçlendirilmiş beton elemanlarda, beton ile FRP arasındaki ara yüzeyin geniş ölçekli bir kohezyonlu bölge oluşturduğunu daha önce yapılmış deneysel çalışmalara (Chajes ve diğerleri, 1995; 1996; Bizindavyi ve Neale, 1999; Taljsten, 1997) atıfta bulunarak kanıtlamıştır. Buna bağlı olarak bu çalışmada iki çizgili gerilme – sıyrılma ilişkileri kullanılarak CFRP ile beton arasındaki ara yüzeyin ayrılma davranışı CZM modeli ile modellenmiştir.

CZM modelinde delaminasyonun oluştuğu bölgede gözlenen çekmeler ve ayrılmalar; 0 (sağlam durum) ve 1 (tamamen hasar görmüş durum) değerleri arasında değişen bir hasar

değişkeni kullanılan kohezif kurallar ile ilişkilendirilir. Malzemelerin delaminasyon davranışını modellemek için CZM modeli sonlu eleman çalışmalarında sıkça kullanılmaktadır ve buna bağlı olarak araştırmacılar tarafından kohezif kuralar geliştirilmiştir (Sarrado ve diğerleri, 2012). Bu çalışma kapsamında kullanılan ANSYS(2014) yazılımı ise iki farklı kohezif kuralın modelleme için kullanımına izin vermiştir. Bunlardan bir tanesi Xu ve Needleman (1994) tarafından önerilen üstel kural (Şekil 6.12a), diğeri ise Alfano and Crisfield(2001) tarafından önerilen doğrusal kuraldır (Şekil 6.12b).



(a) (b)

Şekil 6.12. (a) Üstel kural (Xu ve Needleman, 1994), (b) Doğrusal kural (Alfano ve Crisfield, 2001)

ANSYS(2014) yazılımında, delaminasyon davranışını modellemek için kullanılabilen iki yöntem vardır. Bu yöntemlerden bir tanesi özel olarak tanımlanmış ara yüzey elemanlarının kullanılması iken diğer yöntem ise daha genel elemanlar olan ve her türden temas durumunu modelleyebilmek için geliştirilmiş olan temas ve kontak elemanı çiftlerinin kullanılmasıdır. Daha önce belirtildiği gibi bu çalışmada, beton ile CFRP arasındaki ara yüzeylerin delaminasyon davranışını modellemek için temas ve kontak elemanları kullanılmıştır. Temas ve kontak elemanlarının kullanılması durumunda ise Xu ve Needleman (1994) tarafından önerilen üstel kuralın kullanımı mümkün olmayıp sadece Alfano ve Crisfield (2001) tarafından önerilen doğrusal kural kullanılabilmektedir. Öte yandan, Sarrado ve diğerleri (2012) yaptığı çalışmada, basit bir kirişin delaminasyon davranışını Alfano ve Crisfield (2001) tarafından önerilen doğrusal kuralı kullanarak

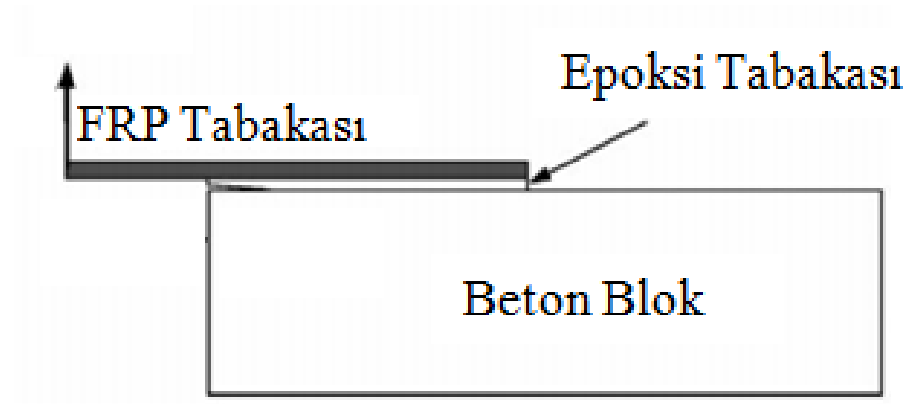
ANSYS yazılımı ile sayısal olarak modellemiş ve elde ettiği sonuçların analitik çözümle tam uyumlu olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada delaminasyon davranışını modellemek için kullanılan yöntemin Alfano ve Crisfield (2001) tarafından geliştirilen doğrusal kuralı işletiyor olması sebebiyle, Xu ve Needleman (1994) tarafından önerilen üstel kurala daha fazla yer verilmeyerek, Alfano ve Crisfield (2001) tarafından geliştirilen doğrusal kuralı işleten yöntem tanıtılacaktır.

Bu yöntemde beton ile CFRP arasındaki ara yüzeyde oluşan delaminasyon, temasın gerçekleştiği yüzeye dik yönde (Mod 1), temasın gerçekleştiği yüzeye teğet yönde (Mod 2) ve bu iki modun etkileşimini içeren şekilde (Mod 3) modellenebilmektedir.

Mod 1

Mod 1 olarak isimlendirilen delaminasyon (Şekil 6.13), temas yüzeyine dik yönde olan ayrılmanın temas yüzeyine teğet yönde olan sıyrılmadan çok daha baskın şekilde meydana geldiği durumlarda görülebilir.



Şekil 6.13. Mod 1 sıyrılma (Au ve Büyüköztürk (2006) ' ten uyarlanmıştır)

Bu durumda ise temas yüzeyine dik yönde oluşan gerilmelerle ayrılmalar arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde tanımlanır (Eşitlikler 6.6 - 6.8)

$$\sigma = K_n u_n (1 - d_n) \tag{6.6}$$

$$d_n = \left(\frac{u_n - \bar{u}_n}{u_n}\right)\left(\frac{u_n^c}{u_n^c - \bar{u}_n}\right) \tag{6.7}$$

$$\Delta_n = \frac{u_n}{\bar{u}_n} \tag{6.8}$$

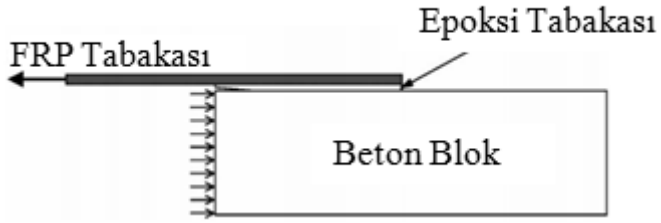
Yukarıda verilen denklemlerde, σ, herhangi bir ayrılma anındaki gerilmeyi, K_n, temas elemanının temas yüzeyine dik yöndeki rijitliğini, d_n delaminasyon parametresini, u_n^c ise delaminasyonun tamamlandığı andaki ayrılma miktarını göstermektedir. Eşitlik 6.8 ile verilen, Δ_n ise anlık ayrılma miktarı, u_n, ile en büyük gerilme altında meydana gelen ayrılma miktarı, $\bar{u}_n$, arasındaki oranı gösterir ve eşitlik 6.7 ile verilen d_n parametresinin alacağı değerlere aşağıda verilen kısıtlamaları getirir (Eşitlik 6.9, 6.10).

$$d_n = 0, \quad eğer\ \Delta_n \leq 1 \tag{5.9}$$

$$0 < d_n \leq 1, eğer\ \Delta_n > 1 \tag{5.10}$$

Mod 2

Mod 2 delaminasyon (Şekil 6.14) ise, temas yüzeyine teğet yönde olan sıyrılmanın temas yüzeyine dik yönde olan ayrılmadan çok daha baskın şekilde meydana geldiği durumlarda görülebilir.



Şekil 6.14. Mod 2 sıyrılma (Au ve Büyüköztürk (2006)' ten uyarlanmıştır)

Bu durumda ise temas yüzeyine teğet yönde oluşan gerilmelerle sıyrılmalar arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde tanımlanır (Eşitlik 6.11 - 6.13)

$$\tau = K_t u_t (1 - d_t) \tag{6.11}$$

$$d_t = \left(\frac{u_t - \bar{u}_t}{u_t}\right)\left(\frac{u_t^c}{u_t^c - \bar{u}_t}\right) \tag{6.12}$$

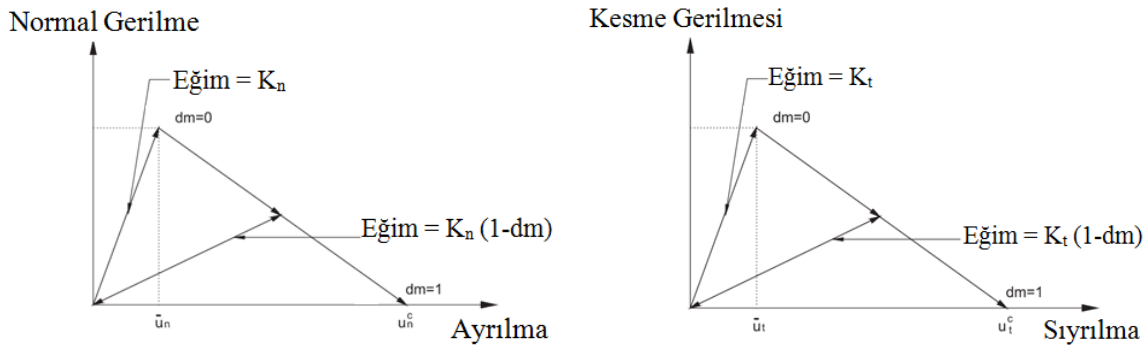
$$\Delta_t = \frac{u_t}{\bar{u}_t} \tag{6.13}$$

Eşitliklerde, τ, herhangi bir sıyrılma anındaki kayma gerilmesini, K_t, temas elemanının temas yüzeyine teğet yöndeki rijitliğini, d_t delaminasyon parametresini, u_t^c ise delaminasyonun tamamlandığı andaki sıyrılma miktarını göstermektedir. Eşitlik 5.13 ile verilen, Δ_t ise anlık sıyrılma miktarı, u_t, ile en büyük gerilme altında meydana gelen sıyrılma miktarı, $\bar{u}_t$, arasındaki oranı gösterir ve Eşitlik 6.12 ile verilen d_t parametresinin alacağı değerlere aşağıda verilen kısıtlamaları getirir (Eşitlikler 6.14 ve 6.15).

$$d_t = 0, \quad eğer\ \Delta_t \leq 1 \tag{6.14}$$

$$0 < d_t \leq 1, eğer\ \Delta_t > 1 \tag{6.15}$$

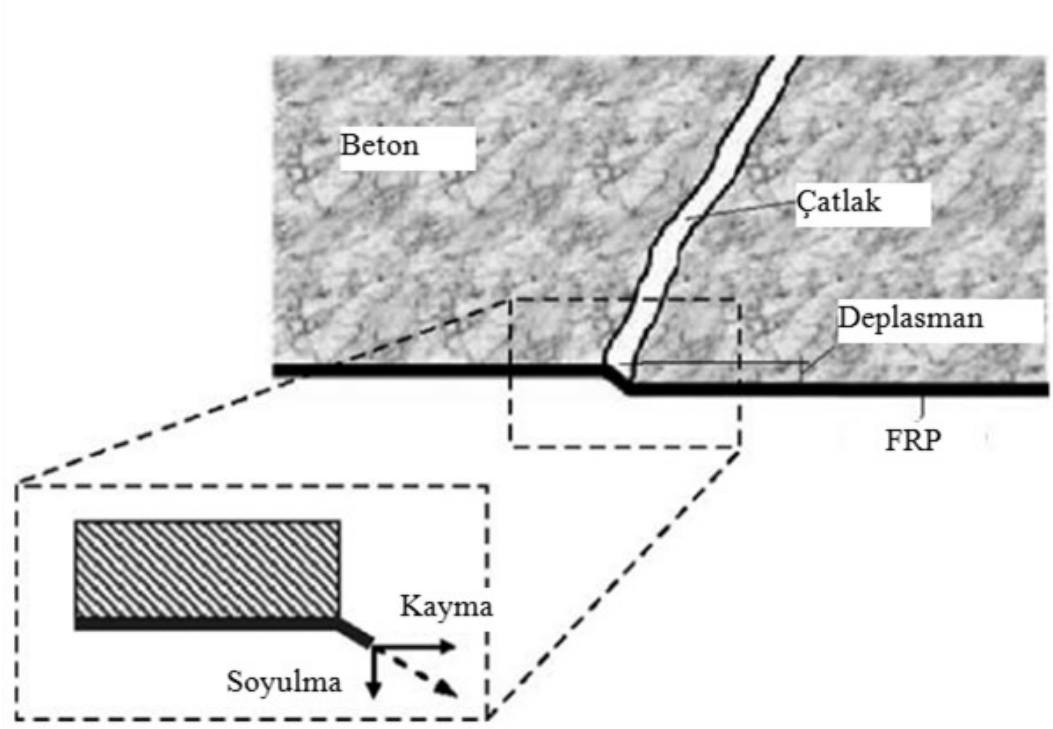
Delaminasyon davranışının temas yüzeyine dik ve teğet yönlerdeki normal gerilme - ayrılma ve kesme gerilmesi - sıyrılma ilişkileri Şekil 6.15'te gösterilmiştir.



Şekil 6.15. Delaminasyon davranışını modellemekte kullanılan (a) normal gerilme – ayrılma, (b) kesme gerilmesi – sıyrılma ilişkileri

Kombine Mod

Şekil 6.15'te normal ve kesme gerilmeleri ile ayrılma ve sıyrılma deformasyonlarını gösteren eğrilerin altında kalan alanlar delaminasyon esnasında serbest bırakılan kırılma enerjisinin miktarını göstermektedir. Davranışın kombine mod (Şekil 6.16) ile modellenmesinde delaminasyon, çekme ve kesme gerilmeleri altında ortaya çıkan kritik enerji miktarlarına ulaşılmadan önce tamamlanır. Çünkü toplam kırılma enerjisi miktarına her iki bileşende katkıda bulunmaktadır.



Şekil 6.16. Kombine mod delaminasyon (Au ve Büyüköztürk (2006)' ten uyarlanmıştır)

Delaminasyonun tamamlanması ise aşağıda verilen enerji tabanlı kriter (Eşitlik 6.16) ile tanımlanmıştır (ANSYS, 2014)).

$$\frac{\int \sigma_n dU_n}{G_{cn}} + \frac{\int \sigma_t dU_t}{G_{ct}} = 1 \tag{6.16}$$

Verilen kriterde, G_{cn} temas yüzeyine normal yöndeki kırılma enerjisini, G_{ct} ise temas yüzeyine teğet yöndeki kırılma enerjisini göstermektedir. Daha önce belirtildiği gibi bu enerjiler, Şekil 6.15' de verilen eğrilerin altında kalan alanlardır. Bu mod için delaminasyon parametresi ise aşağıda verilen eşitliklerle tanımlanmıştır (Eşitlik 6.17-6.21).

$$d_m = \left(\frac{\Delta_m - 1}{\Delta_m}\right)\chi \tag{6.17}$$

$$\Delta_m = \sqrt{\Delta_n^2 + \Delta_t^2} \tag{6.18}$$

$$\chi = \left(\frac{u_n^c}{u_n^c - \bar{u}_n}\right) = \left(\frac{u_t^c}{u_t^c - \bar{u}_n}\right) \tag{6.19}$$

$$d_m = 0, \quad eğer\ \Delta_m \leq 1 \tag{6.20}$$

$$0 < d_m \leq 1, eğer\ \Delta_m > 1 \tag{6.21}$$

χ ile gösterilen kısıtlama ise temas yüzeyine dik doğrultudaki ayrılma oranlarının, temas yüzeyine teğet yöndeki ayrılma oranları ile aynı olmasını sağlamak için yazılım tarafından otomatik olarak sağlanmaktadır.

Betonarme yüzeyler ile CFRP malzemeler arasındaki ara yüzeyin delaminasyon davranışı modellenirken, sadece mod 2 durumunu göz önüne alan çalışmalar (Omran ve El-Hacha, 2012; Coronado ve Lopez, 2006; Pham ve Mahaidi, 2005; Buyle Bodin ve diğerleri, 2002; Soliman ve diğerleri, 2010) yapıldığı gibi, kombine mod etkisini göz önüne alan çalışmalar (Omran ve El-Hacha, 2012) yapıldığı da görülmüştür. Bilindiği gibi sadece bir tek modun etkisini dikkate alarak modelleme yapmak, diğer modun davranışa olan etkisini ihmal etmek anlamına gelecektir. Sadece mod 2 modellenmesinin gerçekçi sonuçlar vereceği durum kirişlerde oluşan eğilme çatlakları durumudur (Wang ve Zang, 2008). Bunun dışında, FRP plakaların uç noktalarında ve eğilme ve kesme çatlaklarının birlikte meydana geldiği durumlarda ise hem kesme gerilmeleri hem de normal gerilmeler ara yüzeyin davranışı üzerinde etkili olacaktır (Wang ve Zang, 2008; Roberts ve Haji- Kazemi, 1989; Malek ve diğerleri, 1998; Jones ve diğerleri, 1988). Öte yandan, Suo ve Hutchinson (1990), doğadaki bütün ara yüzey kırılmalarının kombine mod etkisi altında gerçekleştiğini belirtmiştir. Bunlara bağlı olarak bu çalışmada ara yüzeylerin kombine mod etkisi altında olduğu durum dikkate alınarak modelleme yapılmıştır.

Kombine mod kullanarak modelleme yaparken, ara yüzeyin hem temas yüzeyine normal hem de temas yüzeyine teğet yöndeki gerilme ile ayrılma/sıyrılma ilişkilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında deneyi yapılan boşluklu kirişsiz döşemelerin kuvvet deplasman ilişkilerini sonlu eleman analizleri yoluyla gerçeğe yakın olarak tahmin edebilmek için beton ile CFRP arasındaki ara yüzeyin davranışını tanımlarken kullanılan modelin olası bütün sıyrılma mekanizmalarını dikkate alıyor olması ve ANSYS(2014) tarafından kullanılan doğrusal kurala (Alfano ve Crisfield, 2001) uygun olması gerekmektedir. Bu nedenle, FRP malzemeler ile betonarme yüzeyler arasındaki sıyrılma davranışını konu eden çalışmalar incelenmiş ve Lu ve diğerleri (2005) tarafından iki çizgili doğrusal halde ve doğrudan ANSYS(2014) yazılımı içinde kullanılabilecek formda

sunulan kayma gerilmesi –sıyrılma modeli sonlu eleman analizlerinde kullanılmak üzere seçilmiştir. Lu ve diğerleri (2005) tarafından önerilen iki çizgili kayma gerilmesi – sıyrılma davranışı modeli aşağıdaki eşitliklerle (Eşitlik 6.22-6.25) ifade edilmiştir.

$$\tau_{max} = 1.5\beta_w f_t \tag{6.22}$$

$$u_t^c = \frac{2G_f}{\tau_{max}} \tag{6.23}$$

$$G_f = 0.308{\beta_w}^2 f_t \tag{6.24}$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2.25 - {b_f}/{b_c}}{1.25 + {b_f}/{b_c}}} \tag{6.25}$$

Yukarıda verilen eşitliklerde, f_t betonun çekme dayanımını, β_w, FRP malzemenin genişliğinin betonun genişliğine oranını, τ_{max}, ara yüzeyin taşıyabileceği en büyük kayma gerilmesini, G_f, kırılma enerjisini, b_f ve b_c değerleri ise sırasıyla kullanılan FRP' şeritlerin ve beton elemanın kenar uzunluklarını göstermektedir.

Temas yüzeyine dik yönde ise göçmenin beton ile epoksi arasındaki ara yüzeyde gerçekleşeceği ve en büyük gerilmenin betonun çekme dayanımı ile sınırlı olacağı kabul edilmiştir (Omran ve El-Racha, 2012; Kishi ve diğerleri, 2005). Buna bağlı olarak CEB-FIB(1990) tarafından önerilen şekilde çekme kuvvetleri altında betonun kırılma enerjisi aşağıda verilen denklemlerle tanımlanmıştır.

$$\sigma_{max} = 0{,}62\sqrt{f_c} \tag{6.26}$$

$$u_n^c = G_{f0}\left(\frac{\sqrt{10}f_c}{24{,}3}\right)^{0.2} \tag{6.27}$$

Denklemde, G_{f0}, betonda kullanılan agreganın içindeki en büyük tanenin boyutuna göre belirlenen kırılma enerjisinin taban değeridir. Deney elemanlarında kullanılan en büyük

agrega tanesinin çapı 17 mm[2]' dir. G_{f0} 'ın değeri CEB-FIB(1990) şartnamesinde verilen değerler (Şekil 6.17) arasında interpolasyon yapılarak hesaplanmıştır.

d_{max}	[mm]	8	16	32
G_{Fo}	[N/mm]	0.025	0.03	0.058

Şekil 6.17. En büyük agrega boyutunun, G_{f0} üzerindeki etkisi (CEB-FIB,1990)

Beton ile CFRP arasındaki ara yüzeye ait parametreler tanımlandıktan sonra. ANSYS(2014) yazılımı içinde hazır olarak sunulan CZM modeline, ara yüz kullanmadan, komut yoluyla girilmiştir.

6.3. Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Modellerinin Kurulması

Deneyi yapılan test elemanlarının sonlu eleman analizleri yapılırken dikkat edilen noktalar bu bölümde tanıtılmıştır. Kurulacak modellerle ilgili çalışmalara başlanmadan önce deney sonuçları incelenmiştir. Deney aşamasında çekilen video ve fotoğrafların incelenmesi ise deney elemanlarının köşe noktalarının yükleme boyunca kalktığını ortaya çıkarmıştır (Resim 6.1a). Köşe kalkmasına ait daha yakın bir görüntü ise Resim 6.1b'de sunulmuştur. Resim 6.1'de görülen köşe kalkmasının döşemelerin kuvvet deplasman ilişkileri üzerindeki etkisini incelemek üzere detayları daha sonra anlatılacak olan, boşluksuz ve güçlendirilmemiş haldeki döşemenin sonlu eleman modeli kurulmuştur. Köşe kalkması dikkate alınmadan yapılan analizlerde döşemenin dayanımının ve rijitliğinin deneyden elde edilen değerlerden çok daha fazla olduğu görülmüştür. Bu nedenle Resim 6.1'de açıkça görülen köşe kalkması durumu sonlu eleman analizlerinde modellenmiştir. Köşe kalkmasını modellemek için, deney sırasında kullanılan ve I profilli çelik elemanların kaynaklanmasıyla oluşturulan reaksiyon çerçevesinin üst yüzü elastik çelik plaka olarak tanımlanmıştır. Daha sonra bu plakaların üst yüzleri ile döşemelerin alt yüzleri arasında, temas bölgelerinde basınç altında rijit davranan fakat çekme kuvvetleri altında direnç göstermeyen temas kontak (TARGE170 ve CONTA174) elemanları standart kontak davranışı atanarak kullanılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde gözlenen köşe kalkması durumu, referans numunesine ait çeyrek model üzerinden Şekil 6.18'de gösterilmiştir.

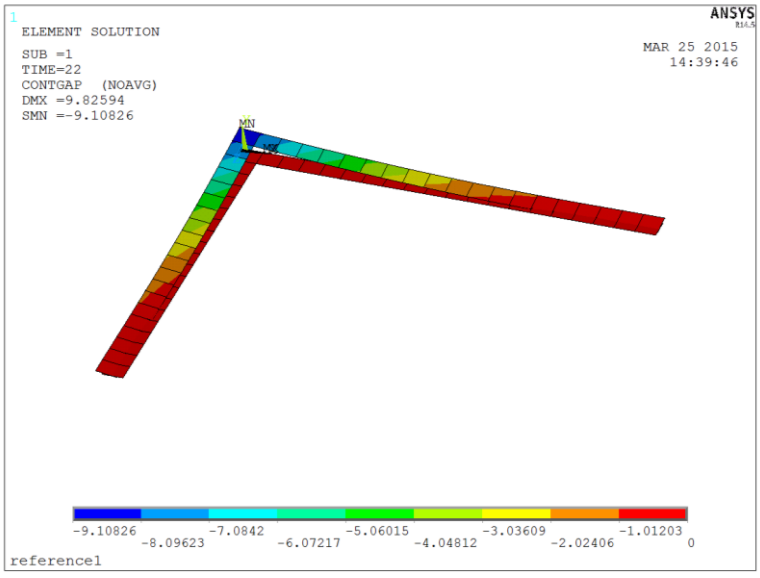


(a)



(b)

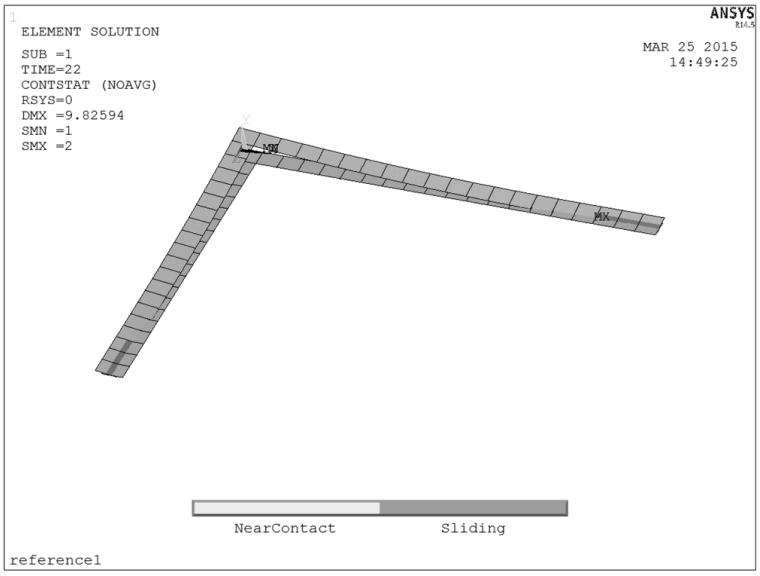
Resim 6.1. Köşe kalkması;(a) genel görüntü, (b) yakınlaştırılmış görüntü



Şekil 6.18. Sonlu eleman analizlerinde köşe kalkması davranışı

Bunun yanı sıra, dikkat edilen bir başka noktada deneylerde döşemeler için sağlanan mesnet koşullarında, döşemelerin döşeme düzlemine dik doğrultusunda hareket etmesini kısıtlayan herhangi bir mesnet şartı olmayışıdır. Döşemelerin yanal yöndeki hareketleri,

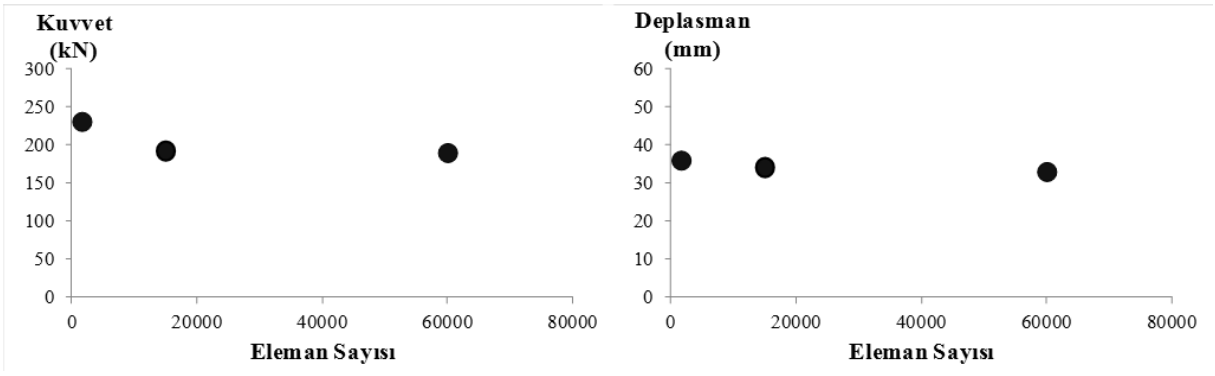
sadece çelik reaksiyon çerçevesi ile döşeme alt yüzünün birbirlerine temas eden bölgelerinde meydana gelen sürtünme ile kısıtlanmaktadır. Bu durum, özellikle simetrik bir geometriye sahip olan döşemelerde, döşeme düzlemine dik düzlemde küçük dönmelere gözlenmesine sebep olacaktır. İşte bu davranışında modelleyebilmek için reaksiyon çerçevesi ile döşeme alt yüzü arasındaki temas bölgelerinde sürtünme katsayısı kullanılmıştır. Yapılan araştırmada, Rabbat ve Russell (1985) tarafından yapılan çalışmada, beton basınç dayanımları bu çalışmada kullanılan betona benzer seviyede olan beton bloklar ile çelik plakalar arasında 0,57 ile 0,7 arasında değişen sürtünme katsayıları görüldüğü bildirilmiştir. Deney çalışmasındaki reaksiyon çerçevesinin ince bir boya tabakası ile kaplı olmasının bu sürtünme miktarının biraz azaltacağı kabul edilerek beton ile boyalı çelik çerçeve arasında 0,4 sürtünme katsayısı kullanılmıştır. Bu katsayının değişiminin modellerin kuvvet deplasman ilişkileri üzerinde ihmal edilebilir derecede farklar oluşturduğu ancak yakınsama ile ilgili problemlerde azalmalara sebep olduğu görülmüştür. Çeyrek model üzerinden yapılan bir analizden elde edilen ve mesnet ile döşeme arasındaki yüzeyde gerçekleşen kayma davranışını gösteren bir ekran görüntüsü ise Şekil 6.19'da verilmiştir.



Şekil 6.19. Sonlu eleman analizlerinde gerçekleşen kayma davranışı

Sonlu eleman analizlerinde dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise analizlerde kullanılan sonlu elemanların boyutlarıdır. Kullanılan eleman sayısındaki artış genellikle daha isabetli sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Öte yandan, artan eleman sayısı,

analizlerin tamamlanması için gereken süreyi de arttırmaktadır. Bu sebeple, artan eleman sayısının analiz sonuçlarında sadece ihmal edilebilir seviyede bir etkiye sebep olduğu noktada eleman sayısını arttırmaktan vazgeçmek gerekir. Bu çalışmada, işlem süresi ve isabetlilik arasındaki bu dengeyi kurabilecek eleman sayısı ise hassasiyet analizleri ile belirlenmiştir. Bunun için, öncelikle diğerlerine kıyasla daha az sayıda elemandan oluşan bir model kurularak analiz edilmiştir. Elde edilen, döşeme orta noktasına ait, en büyük kuvvet ve deplasman değerleri kaydedilerek daha fazla elemana sahip modeller ile yapılan analizlerden elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır (Şekil 6.20).



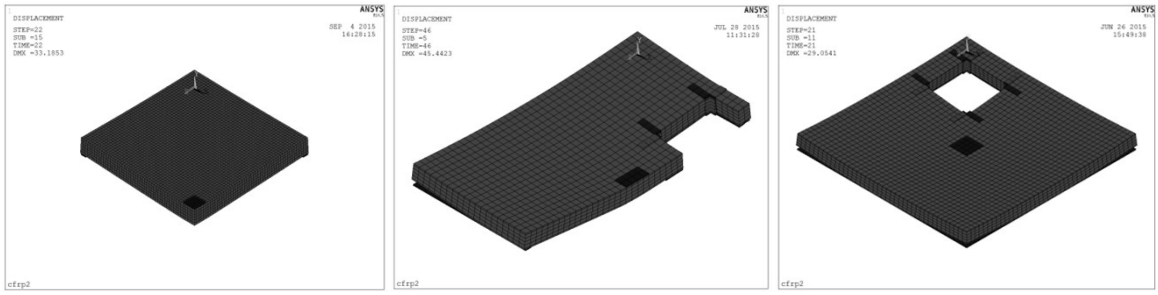
(a) (b)

Şekil 6.20. Hassasiyet analizleri;(a) En büyük kuvvetler, (b) En büyük deplasmanlar

Şekil 6.20'den görüldüğü gibi eleman sayısı en düşük olan modelden (1600 eleman) diğerlerine oranla çok daha büyük kuvvet değerleri elde edilmiştir. Ancak deplasman değerleri birbirine yakındır. Eleman sayısı arttırıldığında (17500 eleman) elde edilen kuvvet değerinde ciddi bir azalma gözlenmiştir. Son olarak eleman sayısı çok daha fazla arttırılmış (60000 eleman) ve model analiz edilmiştir. Şekil 6.20'den görüldüğü gibi eleman sayısının çok arttırılmış olması elde edilen en büyük kuvvet ve en büyük deplasman değerlerini ancak ihmal edilebilir seviyede değiştirmiştir. Buna karşın analiz süresi çok artmıştır. Bu sebeple daha makul analiz süreleri gerektiren ve gerçekçi sonuçlar vermesi beklenen 17500 elemanlı model sonlu eleman analizlerinde kullanılmıştır.

Analizi yapılacak sonlu eleman modellerinin eleman sayıları belirlendikten sonra, boşluksuz referans elemanı iki yönde barındırdığı simetriden dolayı çeyrek modelleme (Şekil 6.21a) ile, simetri ekseni üzerinde bulunan bir boşluğa sahip olan dört model yarım modelleme (Şekil 6.21b) ile, boşlukları simetri eksenlerinden herhangi biri üzerinde

olmayan dört adet model ise tam (Şekil 6.21c) modelleme ile modellenmiştir. Simetriden faydalanılan modeller kurulurken, simetri ekseni üzerinde bulunan düğüm noktaları seçilerek bu düğüm noktalarına ilgili düzlem üzerinde simetri sınır koşulları uygulanmıştır.



(a) (b) (c)

Şekil 6.21. (a) Çeyrek, (b) yarım ve (c) tam modelleme yöntemiyle oluşturulan tipik sonlu eleman modelleri

6.4. Yakınsama ile İlgili Problemler ve Uygulanan Çözüm Teknikleri

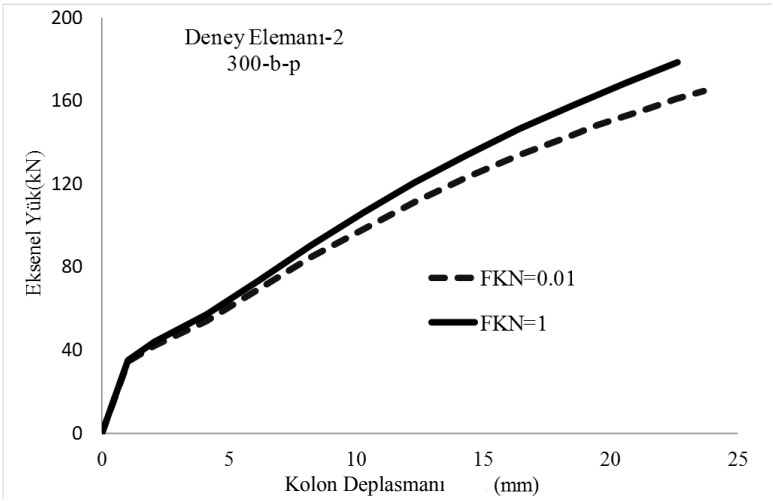
Sonlu eleman analizleri yapılırken karşılaşılan problemler genellikle yük adımlarına bölünmüş analizlerin gerçekleştirilmesi sırasında, bu yük adımları arasındaki geçişe onay vermek için kullanılan kriterlerin sağlanması ile ilgilidir. Özellikle çok sayıda malzeme ve/veya geometrik doğrusal ötesi davranış gösteren sonlu eleman içeren modellerin analizleri sırasında yakınsama ile ilgili bu problemler oldukça engelleyici olabilmektedir. İşte bu problemlerin çözümü için yıllar içinde bazı yöntemler geliştirilmiştir. Önceki bölümlerde detaylı olarak tanıtıldığı gibi bu çalışmada da oldukça fazla sayıda doğrusal olmayan eleman kullanılmıştır. Bu elemanlar: (i) doğrusal ötesi davranan betonarme elemanlar, (ii) döşeme alt yüzeyleri ile mesnet profilleri arasında köşe kalkmasını modellemek için kullanılan elemanlar ve (iii) beton ile CFRP ara yüzeyler arasındaki sıyrılma davranışını modellemek için kullanılan elemanlardır. Bu elemanlar sebebiyle ortaya çıkan yakınsama problemleri ve uygulanan çözümler ile ilgili bilgiler bu bölümde verilmiştir.

Bu problemlerden ilki, betonun çok eksenli yükleme altında ezilmesidir. Daha önce belirtildiği gibi yükleme noktaları altında bulunan betonarme elemanlar, analizlerin erken safhasında ezilerek yakınsama problemlerine sebep olmaktadır (Kachlakev, 2001). İşte bu sebeple, benzer çalışmalarda yapıldığı gibi betonun ezilme özelliği kapatılmıştır. Konuyla

ilgili detaylar, betonun modellenmesi ile ilgili bölümde verilmiştir. Beton davranışı ile ilgili ikinci problem ise çatlamış durumdaki betonun açık ve kapalı haldeyken taşıyabileceği kesme kuvveti miktarıdır. Açık bir çatlağın taşıyabileceği kesme kuvveti için 0,25'in altında bir katsayı kullanmanın genellikle yakınsama problemlerine neden olduğu bilindiği için bu çalışmada bu katsayı 0,25 olarak seçilmiştir.

Diğer yakınsama problemleri ise kullanılan temas elemanları ile ilgilidir. Bu çalışmada kullanılan temas elemanı çiftleri, penetrasyon mekanizmasını kullanmaktadır. Bu mekanizma ise temas yüzeylerinin birbirleri içine nüfuz etmesini gerektirmektedir. Birbirleri ile temas halinde olan yüzeyler arasında rijit yaylar olduğu kabul edilecek olursa bu yaylarda oluşacak kuvvetlerin, yayların rijitliğine (FKN), bir anlamda ise temas yüzeylerinin birbirleri içine nüfuz etmesine, bağlı olduğu görülecektir. Temas elemanlarının problemsiz şekilde çalışması gerekirken, analiz sonuçlarının isabet seviyesinin de bu elemanların yakınsamasına bağlı olarak ciddi şekilde etkilenmemesi gerekir. İşte bu sebeple temas elemanlarının FKN değerlerinin dengeli bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. ANSYS(2014) yazılımı, tarafından temas halindeki elemanların boyutları ve malzeme özellikleri gibi parametreler kullanılarak FKN değerleri hesaplanmaktadır. ANSYS(2014) tarafından önerilen bu değer 0,001 ile 100 arasında değişebilen faktörlerle çarpılarak kullanılabilir (Johnson, 2002). Bu faktörler kullanılırken dikkat edilmesi gereken noktalar ise çok küçük seçilen faktörlerin aşırı penetrasyona sebep olarak analiz sonuçlarının doğruluğunu etkileyeceği, çok büyük seçilen faktörlerin ise çözülmesi imkansız yakınsama problemlerine sebep olacağıdır. Bu çalışmada yapılan analizler sonucunda ANSYS(2014) tarafından hesaplanan değerin yakınsama problemlerine sebep olduğu, sonlu eleman modellerinin ise analizlerin erken safhalarından itibaren çalışmaz hale geldiği görülmüştür. Bu sebeple Metrisin (2008)'in sistematik olarak sunduğu çözüm önerileri dikkate alınarak adım adım bir yakınsama çalışması yapılmış ve sonuç olarak sonlu eleman modellerin çoğunun ANSYS(2014) tarafından önerilen FKN değerinin 0.01 ile çarpılarak analiz edilmesi sonucunda problemsiz olarak yakınsadığı görülmüştür. Analizler boyunca temas bölgelerindeki penetrasyon değerleri kontrol edilmiştir. Dahası, ANSYS(2014) tarafından temas elemanlarının çözümü için önerilen yöntemlerden, "Pure Penalty" yöntemine göre FKN değerine daha az bağımlı olan "Augmented Lagrangian" yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, her adımda elde edilen penetrasyon değeri önceden belirlenen penetrasyon toleransı (penetrasyon toleransının, ANSYS(2014)' tarafından en çok 0,2 alınması önerilmektedir) ile karşılaştırılarak kontrol edilir. Ancak bu yöntemle

çözüm elde etmek için, yapılan penetrasyon kontrolüne bağlı olarak, "Pure Penalty" yöntemine göre daha çok iterasyon yapılması gerekir (Johnson, 2002). Şekil 6.22'de yakınsama problemi gözlenmeyen bir deney elemanı üzerinde yapılan hassasiyet çalışmasının sonuçları verilmiştir. Şekilde, ANSYS(2014) tarafından önerilen FKN değeri kullanılarak yapılan analizden elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile bu değerin 0,01'ile çarpılması ile elde edilmiş FKN değerini kullanarak yapılan analizin sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilde görülen en büyük kuvvet ve deplasman değerleri sayısal olarak karşılaştırıldığında, en büyük kuvvet değerleri arasındaki farkın yaklaşık olarak %5, en büyük deplasman seviyeleri arasındaki farkın ise yaklaşık olarak %3 seviyesinde olduğu gözlenmiştir. Öte yandan konuyla ilgili yapılan sonlu elemanlar çalışmaları incelendiğinde FKN değerinin kalibre edilmesi gereken bir parametre olarak görülüp hiçbir hassasiyet analizine gerek duymadan değiştirildiği görülmüştür. Bu çalışmada ise yapılan hassasiyet analizinden elde edilen sonuçların, analiz sonuçlarını ciddi oranda etkilemediği görülmüş ve yakınsama problemi çıkarmayan en büyük FKN değeri olan 0,01 çarpan olarak kullanılmıştır.



Şekil 6.22. FKN değeri için yapılan hassasiyet analizinin sonuçları

ANSYS(2014) kullanım kılavuzunda dönme serbestlik derecesi barındırmayan modeller için hata toleransı olarak kuvvet ve deplasman kontrolleri için sırasıyla 0,005 ve 0,05 değerleri tavsiye edilmiştir. Ancak bu çalışmada yükleme adımları arasında geçiş yapabilmek için kuvvete bağlı hata toleransı uygulandığında, analizlerin bir çoğunun daha yüklemenin ilk aşamalarında, beton çatlamaya başladığı anda yakınsama problemleri verdiği görülmüştür. Bu sebeple, bu çalışmada yük adımları arasında geçiş yapabilmek için

deplasman kontrolü değeri ANSYS(2014) tarafından önerildiği ve Omran ve El- Hacha (2012) tarafından kullanıldığı şekliyle 0.05 olarak kullanılmış ve analizler tamamlanmıştır. Düzgün yakınsayan modeller elde etmek yapılan diğer düzenlemeler ise yüklemeleri yük yerine deplasman vererek yapmak ve yükleme bölgelerinde noktasal gerilme yığılmalarını önlemek için elastik plakalar kullanmaktır.

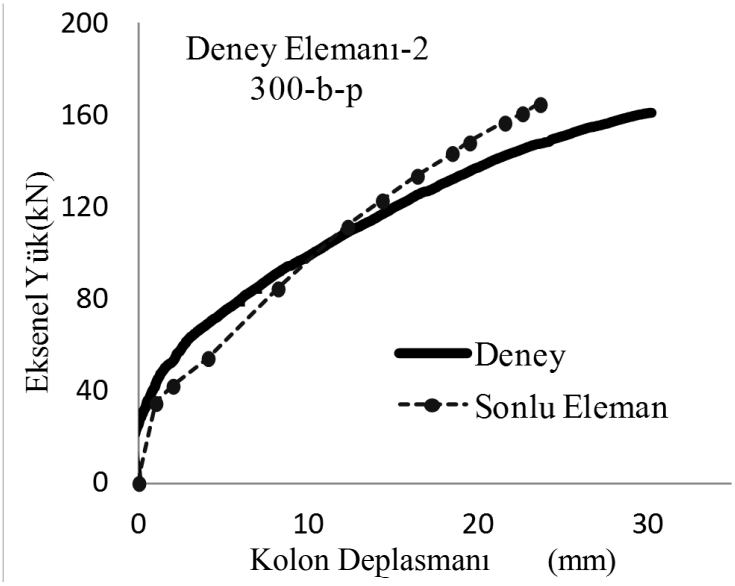
7. SONLU ELEMAN ANALİZLERİNİN SONUÇLARI

7.1. Giriş

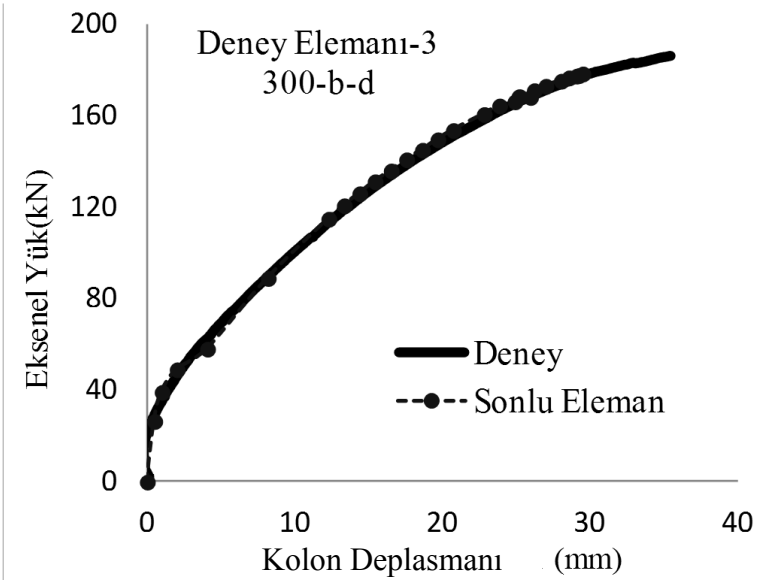
Bu bölümde deney çalışmasından elde edilen sonuçlar, sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak sunulmuştur. Karşılaştırma amacıyla, deney elemanlarının yük- deplasman ilişkileri, çatlak durumları ve güçlendirme için kullanılan CFRP şeritlerin zımbalama anındaki durumları kullanılmıştır. Çatlak durumlarını ve CFRP şeritlerin deformasyon durumlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırabilmek için deney çalışmaları sırasında çekilen fotoğraflar kullanılmıştır. Döşemelerin zımbalamadan hemen önceki deforme olmuş şekilleri de ayrıca sunulmuştur.

7.2. Kuvvet - Deplasman İlişkilerinin Karşılaştırılması

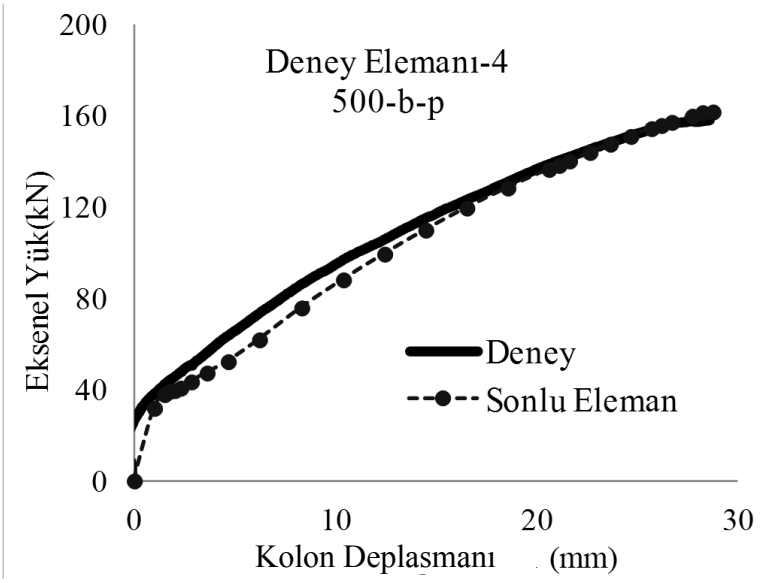
Sonlu eleman analizleri yapılan deney elemanlarının kuvvet deplasman eğrileri deney sonuçları ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bilindiği gibi zımbalama davranışı kirişsiz döşemelerde oldukça ani şekilde meydana gelen gevrek bir davranış biçimidir. Bu sebeple, bir çok elemana ait anlık bilginin birleştirilmesi ile oluşan ve sonlu eleman analizleri için kullanılan genel rijitlik matrisinde zımbalama anında ani ve büyük değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişiklikler sonucu meydana gelecek olan kuvvet – deplasman çiftlerinin tahmin edilebilmesi için oldukça yüksek işlemci gücü gerektiren ve çok yoğun sonlu eleman ağını içeren sonlu eleman modellerinin kurulması ve analiz edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan sonlu eleman yoğunluğu ve işlemci gücü ile ise zımbalama anından sonraki kuvvet – deplasman davranışını (negatif eğimli bölge) tahmin etmek mümkün olmamıştır. Bu sebeple, tamamı deney sonuçlarının sunulduğu bölümde verilmiş olan deneysel kuvvet - deplasman eğrilerinin zımbalama anına kadar olan bölümü karşılaştırma amacı ile kullanılmıştır. Şekil 7.1-7.8'de 8 adet boşluklu deney elemanına ait deneysel kuvvet deplasman eğrisi, sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen kuvvet deplasman eğrileri ile birlikte, sırasıyla, sunulmuştur.



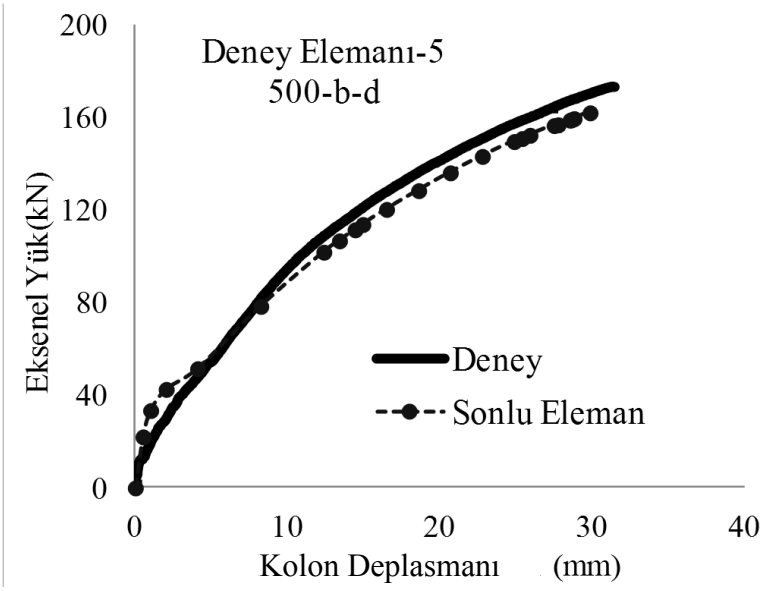
Şekil 7.1. 300 mm, kolona bitişik ve paralel boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması



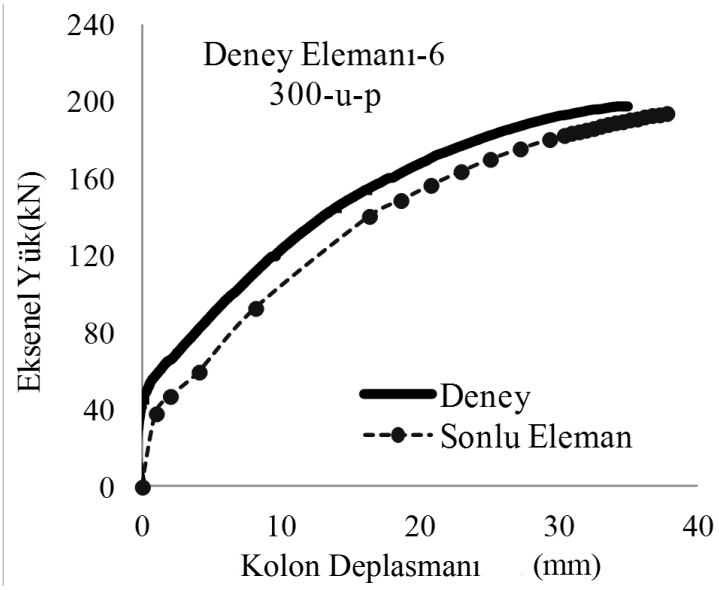
Şekil 7.2. 300 mm, kolona bitişik ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması



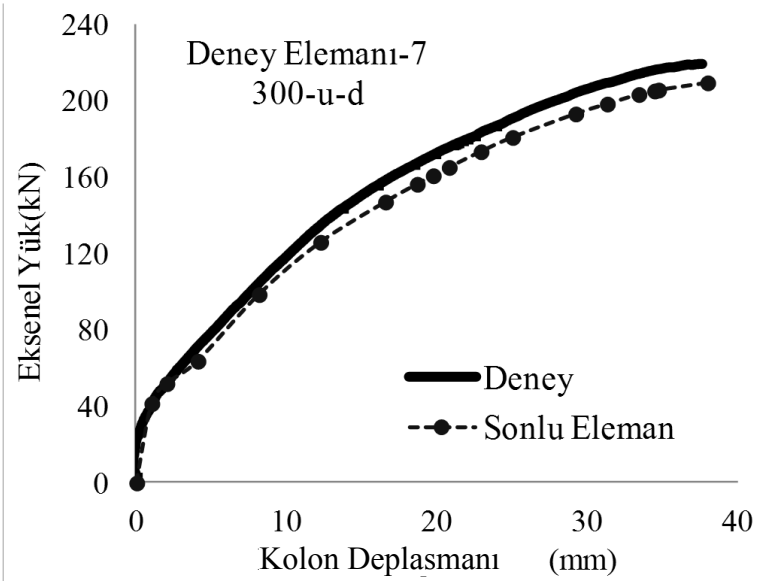
Şekil 7.3. 500 mm, kolona bitişik ve paralel boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması



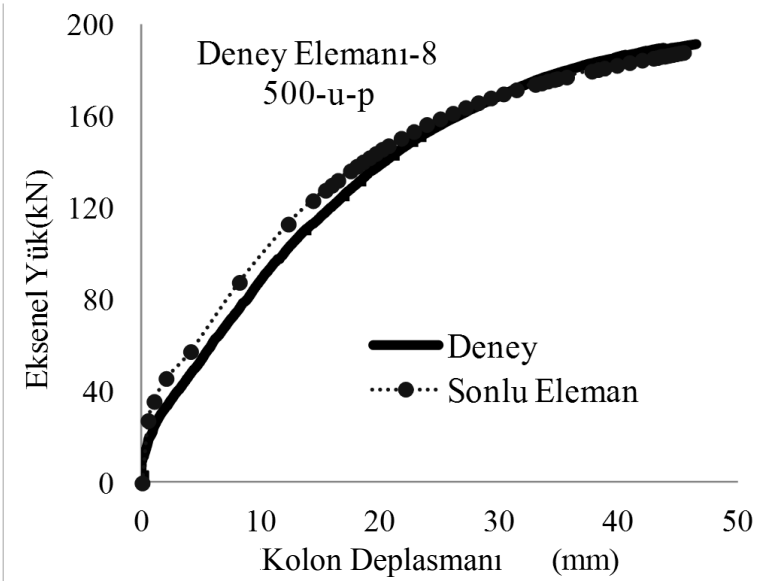
Şekil 7.4. 500 mm, kolona bitişik ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması



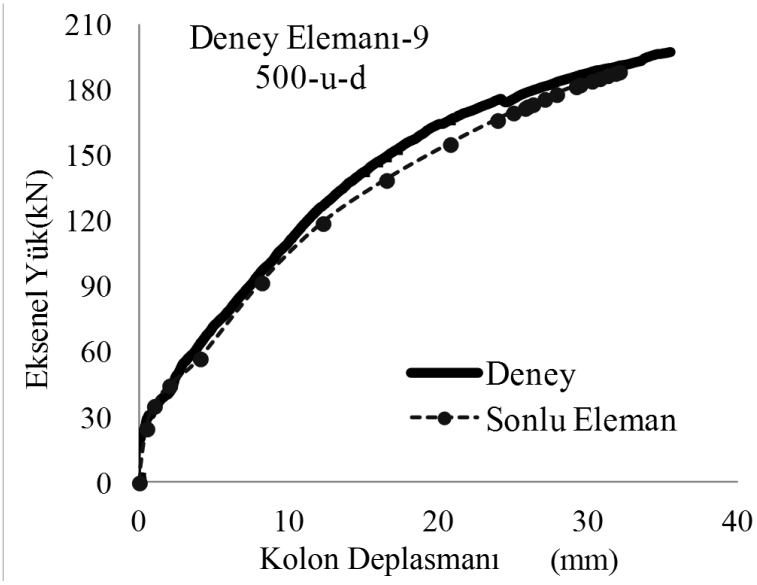
Şekil 7.5. 300 mm, kolona uzak ve paralel boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması



Şekil 7.6. 300 mm, kolona uzak ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması



Şekil 7.7. 500 mm, kolona uzak ve paralel boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması



Şekil 7.8. 500 mm, kolona uzak ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının sonlu eleman analizinden elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin deney çalışmasından elde edilen kuvvet deplasman eğrisi ile karşılaştırılması

Şekillerden görüldüğü gibi, deneylerden elde edilen kuvvet deplasman eğrileri ile sonlu eleman analizlerinden elde edilen kuvvet deplasman analizleri arasında ciddi bir uyum vardır. Şekiller incelendiği zaman, koyu noktalar ile gösterilen deplasman adımlarının, yük ve deplasman miktarı arttıkça sıklaştığı görülmektedir. Deplasman adımı sayısındaki artış ise çatlayan beton elemanlar ile sıyrılan CFRP elemanların sayılarındaki artıştan dolayı

oluşan yoğun elastik ötesi davranışın yakınsama problemleri oluşturduğunu göstermektedir. Bu problemleri aşabilmek için modellere oldukça küçük deplasman adımları uygulanmıştır. Çizelge 7.1'de ise sonlu eleman analizlerinden ve deneylerden elde edilen kuvvet – deplasman eğrilerinden okunan en büyük yük ve deplasman değerlerinin birbirlerine oranları verilmiştir.

Çizelge 7.1. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçların, deney sonuçları ile karşılaştırılması

Eleman #	Deplasman (mm)		Kuvvet (kN)		Oran*	
	Deney	Sonlu Eleman	Deney	Sonlu Eleman	Deplasman	Kuvvet
1	34	34	192	193	0,99	1,01
2	30	24	160	165	0,80	1,03
3	35	30	186	178	0,86	0,96
4	29	29	158	167	1,00	1,06
5	33	30	173	162	0,91	0,94
6	35	38	197	194	1,09	0,98
7	38	37	219	209	0,98	0,95
8	47	45	191	188	0,96	0,98
9	37	32	202	188	0,88	0,93

*Sonlu Eleman / Deney

Çizelge 7.1'deki değerler incelendiğinde, sonlu eleman modellerinin deney elemanlarının kuvvet kapasitelerini 0,93-1,06 oranı aralığında tahmin edebildiği görülmektedir. Aynı okumalar deplasman oranları üzerinden yapıldığında oranlar arasındaki makasın biraz daha açılarak, deplasman kapasitelerinin 0,80-1,09 oranı aralığında tahmin edilebildiği görülmüştür. Bu sonuçlardan ise sonlu eleman analizlerinin en büyük yük miktarlarını, en büyük deplasman oranlarına kıyasla daha başarılı şekilde tahmin ettiği görülebilir. Deplasman oranlarında farkın biraz daha büyük olması ve sonlu eleman analizlerinden elde edilen deplasman değerlerinin 6 adet numune için deney sonuçlarından elde edilen değerlerden küçük olmasının sebebi ise bir çok çalışmada gözlendiği gibi sonlu eleman modellerinin eğrilerinin rijitliklerini tahmin etmede zorlanıyor olmasıdır. Bunun sebebi ise çalışmalarda, deney elemanlarının dökülmesi sırasında ve deney elemanları döküldükten sonra çeşitli sebeplerle oluşabilecek mikro çatlaklar ve donatı ile beton arasında yapılan tam aderans kabulü olduğu söylenebilir.

Elde edilen sonuçları daha iyi değerlendirebilmek için, sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçların deney sonuçlarına oranının 8 deney elemanı için ortalaması alınarak standart sapma varyasyon katsayısı ile birlikte verilmiştir (Çizelge 7.2).

Çizelge 7.2. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçların, deney sonuçları ile istatistiksel olarak karşılaştırılması

Değer	Deplasman	Kuvvet
Ortalama	0,94	0,98
Standart Sapma	0,09	0,04
Varyasyon Katsayısı(%)	9,42	4,36

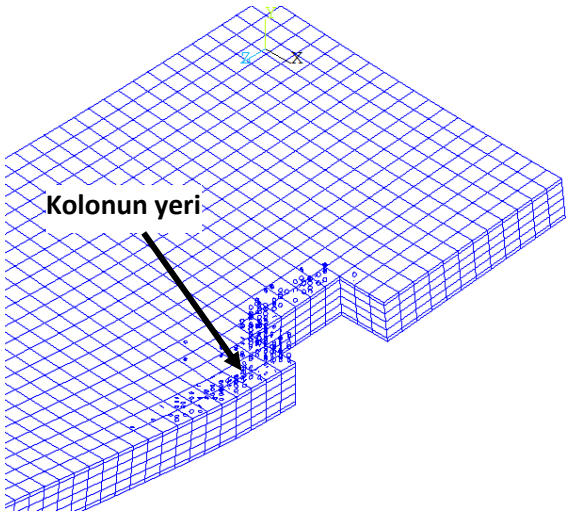
Çizelge 7.2 ‘den görülebileceği gibi sonlu eleman modellerinin kuvvet oranlarını tahmin etmedeki ortalama başarısı (0,98), deplasman oranlarının tahmin etmedeki ortalama başarısından (0,94) daha yüksektir. Kuvvet ve deplasman oranlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesinden elde edilen standart sapma değerleri de kuvvet oranları için deplasman değerlerinden daha küçük okunmuştur. Bu iki durum varyasyon katsayısı (Standart Sapma / Ortalama) kullanılarak incelenirse, en büyük kuvvetler için hesaplanan oran değerlerinin varyasyon katsayılarının daha küçük olduğu görülebilir. Daha küçük varyasyon katsayısı ise, değerlerin ortalamadan daha az saptığını ve kullanılan sonlu eleman modelinin kuvvetleri tahmin etme açısından, deplasmanları tahmin etmede olduğundan daha tutarlı olduğunu gösterir.

7.3. Oluşan Çatlakların Karşılaştırılması

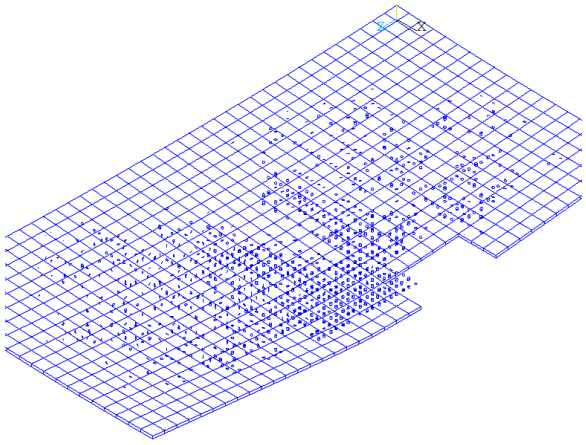
Bu bölümde, deneyi yapılan döşemelerin sonlu eleman analizlerinden elde edilen çatlak dağılımları deney sırasında çekilen fotoğraflarla gösterilen çatlak dağılımları ile karşılaştırılmıştır. ANSYS(2014) yazılımında oluşan çatlakların genişliği hakkında bilgi sunulmamaktadır. Bu sebeple sonlu eleman analizleri sonucunda görülen çatlakların hangilerinin gözle görülebilir genişlikte olduğu çok net değildir. Bununla birlikte bir asal yönde çatlama gerçekleştiğinde bu çatlağın adı, birinci çatlak, iki asal yönde çatlama gerçekleştiğinde ikinci yönde oluşan çatlağın adı ikinci çatlak, üç asal yönde çatlama gerçekleştiğinde ise oluşan çatlağın adı üçüncü çatlak olmaktadır. Yani üçüncü çatlağın görünür olduğu eleman her üç asal yönde çatlamış olmaktadır. Dere ve Dede (2011) yaptıkları çalışmada, genellikle, ANSYS(2014) yazılımı tarafından oluşum sırasına göre

isimlendirilen üçüncü çatlakların gözle görülen çatlaklarla uyumlu olduğunu belirtmiştir. Buna dayanarak, bu çalışmada sonlu eleman modellerinden alınan üçüncü çatlaklar deney sırasından çekilen çatlak fotoğrafları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 7.9-7.16'da deneyi yapılan döşemelerin deney sonuçlarından elde edilen çatlak dağılımları sonlu eleman analizlerinden elde edilen çatlak dağılımları ile karşılaştırmalı olarak, sırasıyla, sunulmuştur.

Şekiller incelendiği zaman, deneyler sonucunda döşeme üst yüzünde oluşan çatlakların sonlu eleman analizleri ile tahmin edilebildiği görülmüştür. Sunulan fotoğrafların nerdeyse tamamında döşeme üst yüzündeki çatlakların kolonun, yani eksenel yükleme noktasının ve boşluğun kolona yakın olan köşelerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Sonlu eleman analizlerinde ise bu çatlakların yoğunlaştığı bölgeler isabetli şekilde tahmin edilmiştir. Döşeme alt yüzünde oluşan çatlaklar incelendiğinde ise bazı fotoğraflarda döşeme alt yüzündeki çatlakların yaygınlığı net olarak görünmemektedir. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen döşeme alt yüzü çatlaklarının ise bütün deney elemanlarında neredeyse döşemenin tüm yüzeyine yayıldığı görülmektedir. Döşeme alt yüzüne ait çatlak fotoğrafları ancak döşemeler üzerindeki eksenel yükleme kaldırıldıktan sonra çekilebilmiştir. Eksenel yükün kaldırılması ise döşeme alt yüzünde oluşan ve çok derin olmayan çatlakların bir kısmının kapanarak gözle görünür olmaktan çıkmasından kaynaklanmaktadır. Bu duruma rağmen, fotoğraflarda ve sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlarda, eksenel yükün kalkmasına bağlı olarak kapanması mümkün olmayan derin çatlaklar, uyumlu olarak özellikle kolona yakın bölgelerde ve döşeme alt yüzündeki CFRP şeritlerin etrafında gözlenmiştir.



(a)



(b)

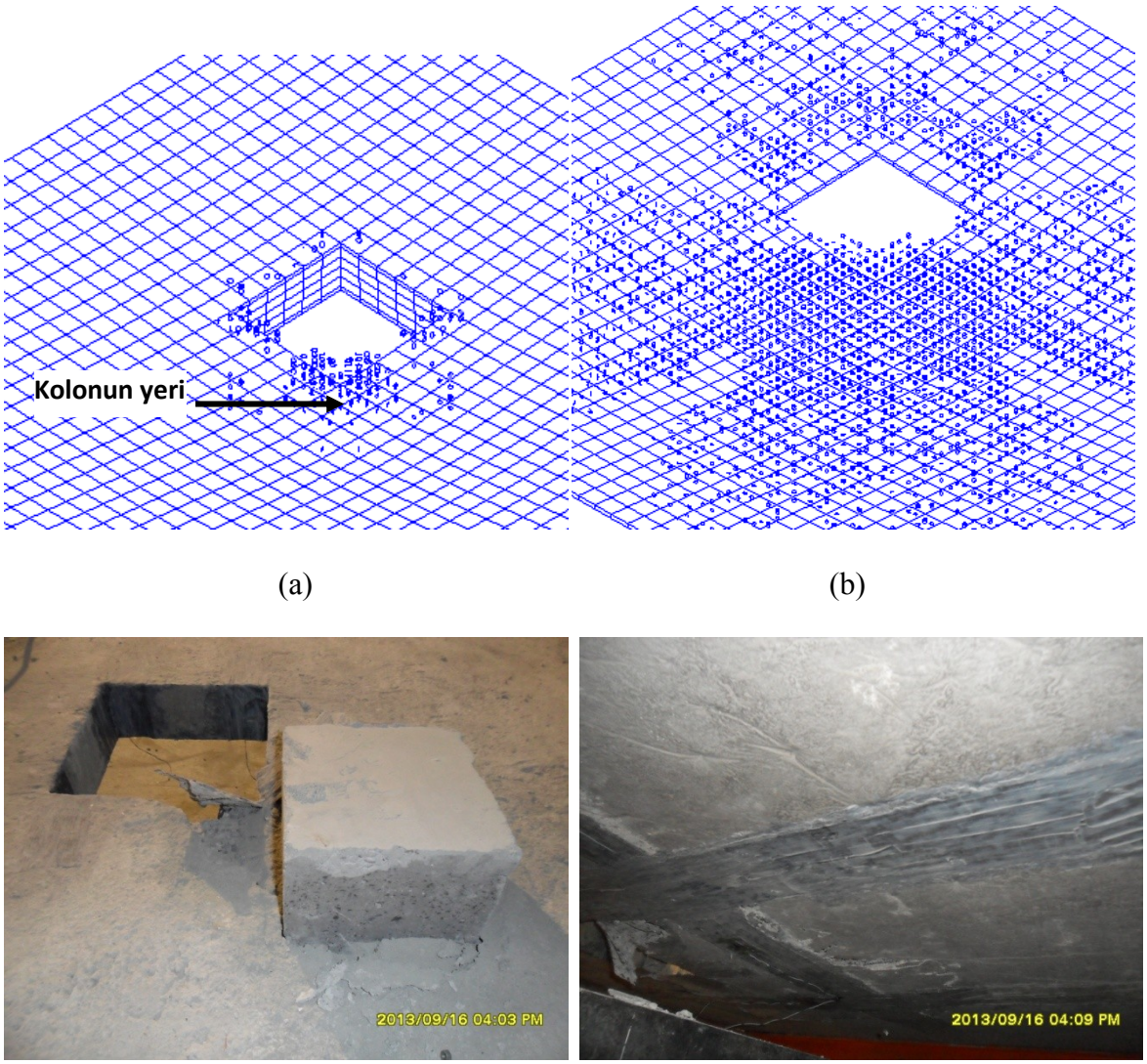


(c)



(d)

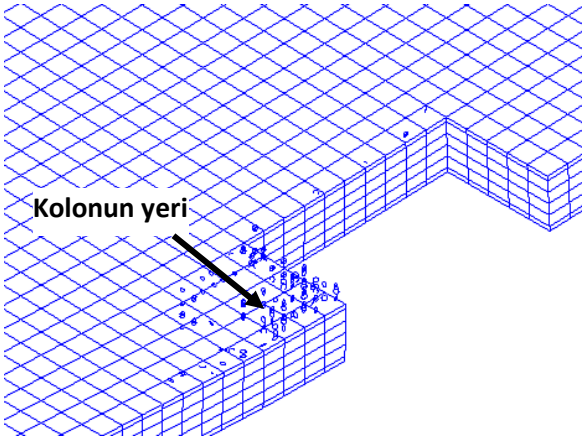
Şekil 7.9. 300 mm, kolona bitişik ve paralel boşluk içeren deney elemanının (Deney elemanı 2) sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması



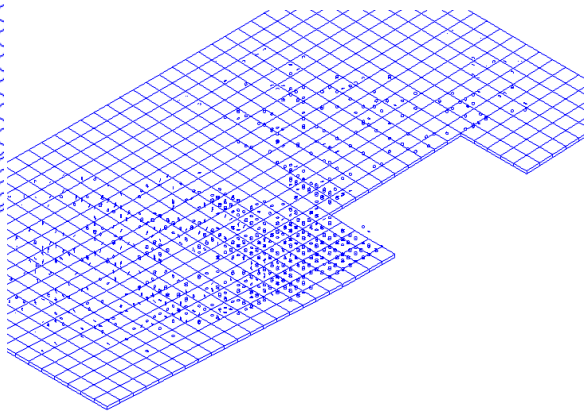
(a) (b)

(c) (d)

Şekil 7.10. 300 mm, kolona bitişik ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının (Deney elemanı 3) sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması



(a)



(b)

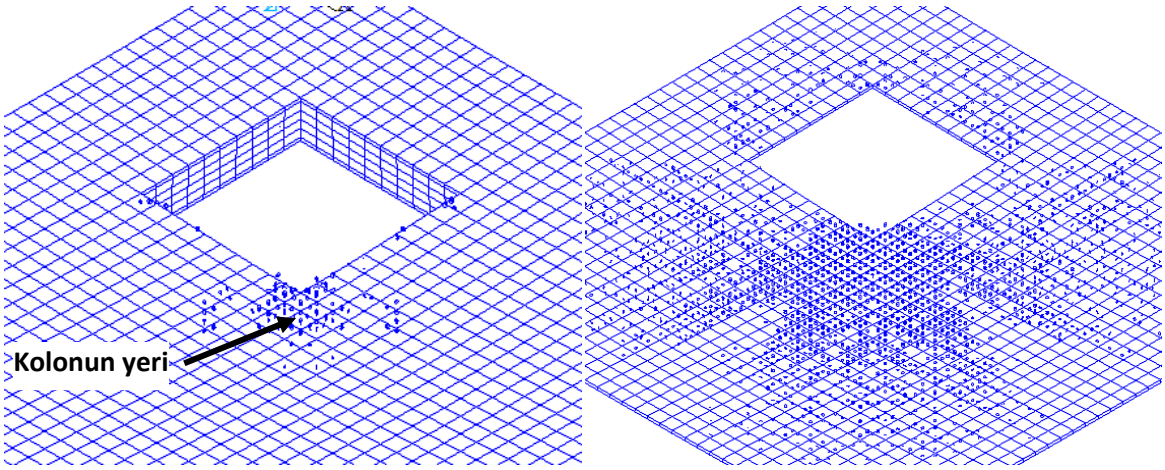


(c)



(d)

Şekil 7.11. 500 mm, kolona bitişik ve paralel boşluk içeren deney elemanının (Deney elemanı 4) sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması

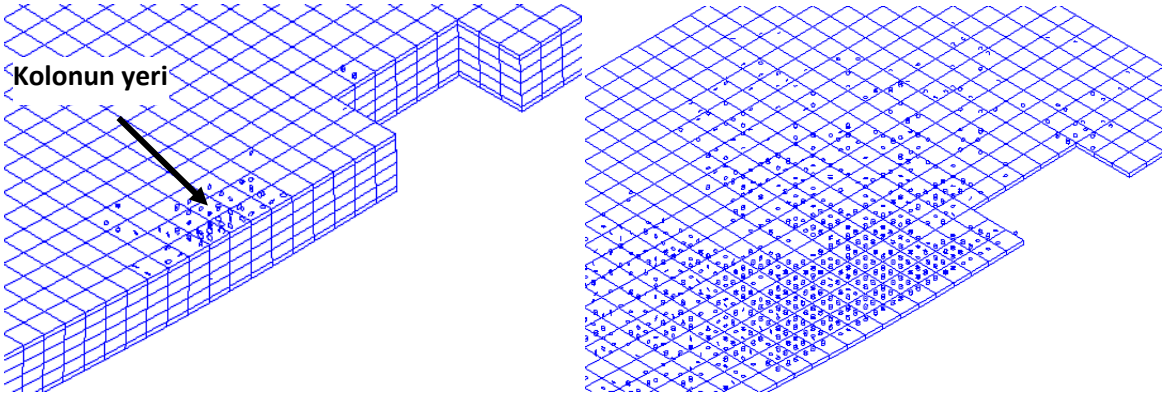


(a) (b)



(c) (d)

Şekil 7.12. 500 mm, kolona bitişik ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının (Deney elemanı 5) sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması

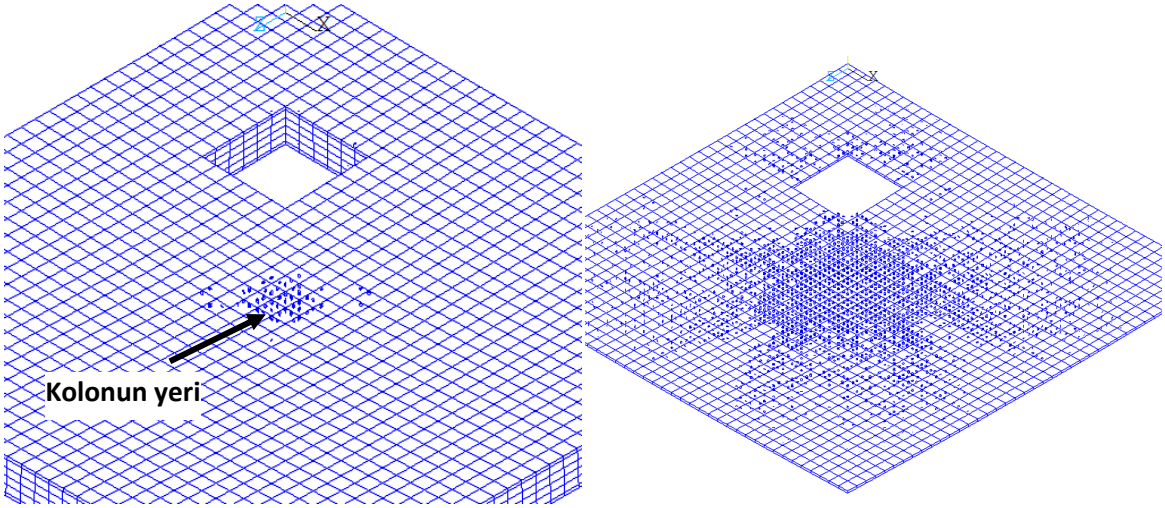


(a) (b)



(c) (d)

Şekil 7.13. 300 mm, kolondan uzak ve paralel boşluk içeren deney elemanının (Deney elemanı 6) sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması

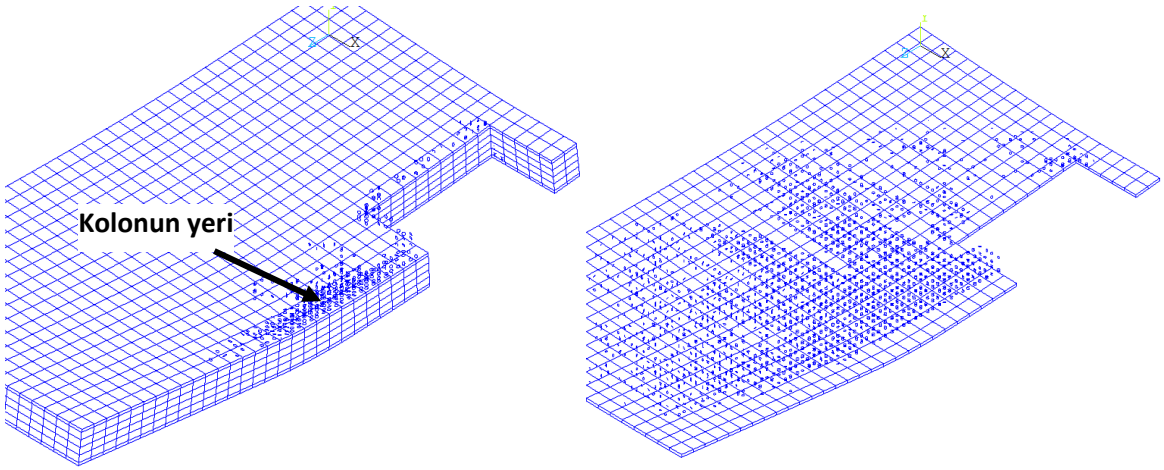


(a) (b)



(c) (d)

Şekil 7.14. 300 mm, kolondan uzak ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının (Deney elemanı 7) sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması

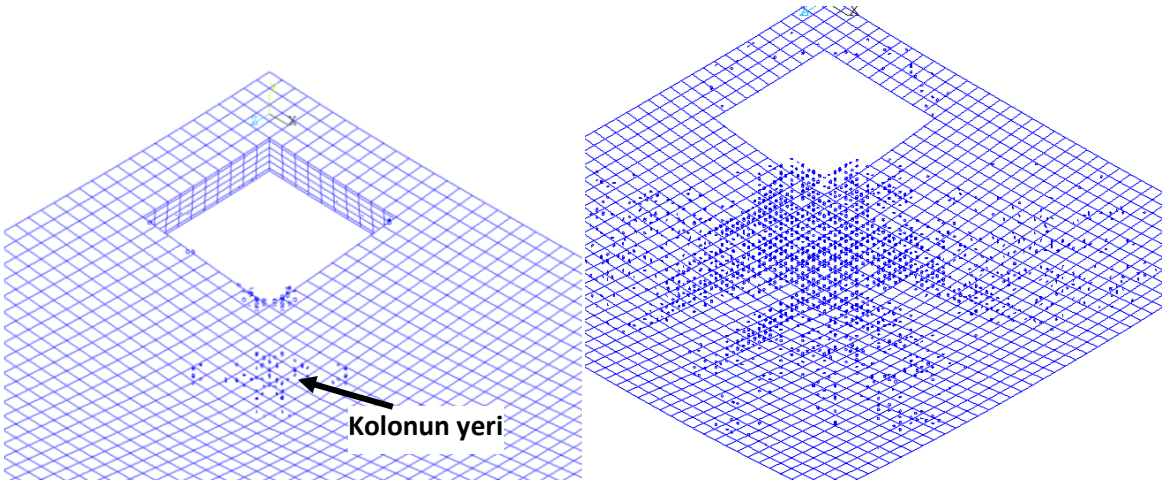


(a) (b)



(c) (d)

Şekil 7.15. 500 mm, kolondan uzak ve paralel boşluk içeren deney elemanının (Deney elemanı 8) sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması



(a) (b)



(c) (d)

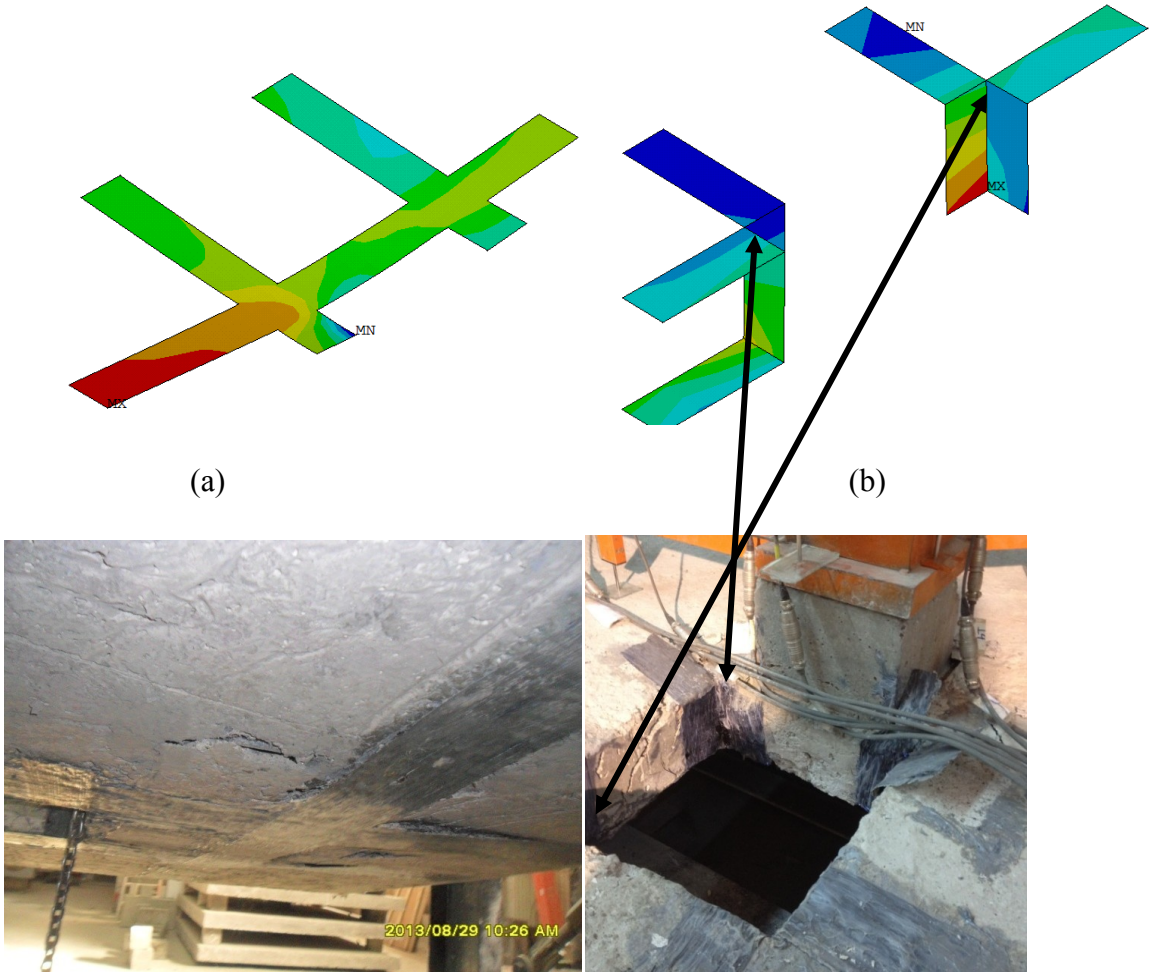
Şekil 7.16. 500 mm, kolondan uzak ve diyagonal boşluk içeren deney elemanının (Deney elemanı 9) sonlu eleman analizinden döşeme (a)üst ve (b) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımının deney çalışmasından döşeme (c)üst ve (d) alt yüzleri için elde edilen çatlak dağılımı ile karşılaştırılması

7.4. CFRP Şeritlerde Oluşan Sıyrılmaların Karşılaştırılması

Deneyi yapılan döşemelerin sonlu eleman analizlerinden elde edilen CFRP şeritlerin beton yüzeyden sıyrılma davranışı deney sırasında çekilen fotoğraflarla karşılaştırmalı olarak, sırasıyla, sunulmuştur (Şekil 7.17- 7.24). Karşılaştırmalar, döşeme üzerindeki boşlukların köşelerine yerleştirilen U şeklindeki ve döşeme alt yüzüne yerleştirilen şerit şeklindeki CFRP'ler için ayrı ayrı yapılmıştır. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sıyrılma davranışını veren şekillerde lacivert ve koyu mavi tonları ile gösterilen bölgeler, herhangi bir sıyrılmanın olmadığı yerleri göstermektedir. Diğer renk tonları ise sıyrılma davranışı gösteren bölgeleri işaretlemektedir. Kırmızı renk sıyrılmanın en yoğun olduğu bölgeleri

tanımlamaktadır. Deney ve sonlu eleman analizlerinin sonuçlarını karşılaştırmalı olarak veren şekiller incelendiği zaman, döşeme alt yüzüne yerleştirilen CFRP şeritlerin sıyrılma davranışının genellikle isabetli şekilde tahmin edildiği görülmektedir. Bu şeritlerin sıyrılması genel olarak paspayı ile birlikte olmuştur. Ancak bazı deney elemanlarında döşeme alt yüzüne yapıştırılan CFRP şeritlerin paspayını kırmadan, sadece birkaç mm derinliğinde betonu beraberinde söktüğü görülmüştür. Bu durum ise genellikle eksenel yükleme noktasından uzak boşluklar barındıran döşemelerde ortaya çıkmıştır. Bu döşemelerde, zımbalamaya etkisinde kalan bölge boşluğa kadar ulaşmadığından döşeme kalınlığı boyunca oluşan eğik kesme çatlakları döşeme alt yüzüne delik çevresinde yapıştırılan CFRP şeritlerin olduğu bölgeye tesir edemeyerek o bölgedeki beton blokların birbirine göre düşey deplasman yapmasına sebep olmamış, CFRP şeritler ise sadece eksenleri doğrultusunda oluşan çekme gerilmeleri altında beton yüzeyinden sıyrılmışlardır.

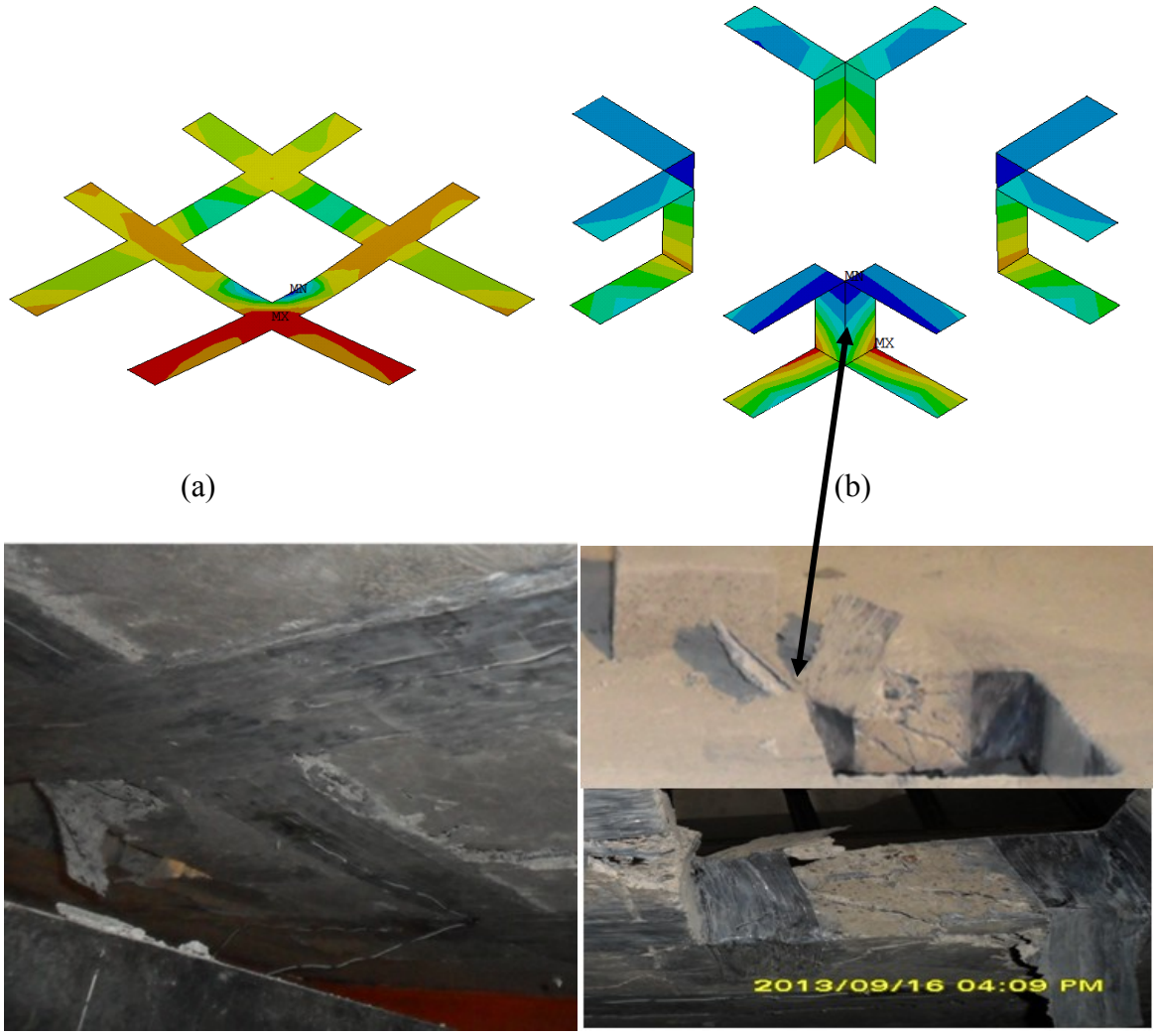
Boşluk köşelerine yerleştirilen U şeklindeki CFRP şeritlerin sıyrılma davranışları incelendiğinde ise çoğu durumda beklendiği şekilde yükleme noktasına yakın boşluk köşelerine yapıştırılan şeritlerin sıyrıldığı görülmüştür. Bu şeritlerin bir kısmı sadece döşeme üst yüzünde sıyrılmışken, bir kısmı döşeme alt yüzünde veya döşeme üst yüzü ile birlikte döşeme yüksekliği boyunca sıyrılmıştır. Döşeme alt ve üst yüzlerindeki CFRP ile beton arasındaki ara yüzeylerde oluşan kayma gerilmelerinin CFRP şeritlerin döşeme yüksekliği doğrultusundaki parçalarında CFRP ile betonun birbirlerine dik doğrulta ayrılmasına sebep olacak kuvvetler oluşturarak bu bölgelerdeki CFRP şeritleri temas yüzeyine dik doğrultuda beton yüzeyinden ayrılmaya zorladığı sonlu eleman analizlerinden görülmüştür. Sonlu eleman analizlerinde görülen bu durumun genel olarak deneylere de yansıdığı görülmüştür. Sonuçlarla ilgili dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise mesnet bölgesine en yakın boşluğu içeren deney elemanında (500-u-p, Deney elemanı 8) görülmüştür. Bu deney elemanının içerdiği boşluk eksenel yükleme noktasından uzakta olduğu için U şeklindeki CFRP şeritlerden eksenel yükleme noktasına yakın olanlarındaki sıyrılma miktarının gözle görülür şekilde olmadığı, buna karşın, boşluğun mesnete yakın köşelerindeki U şeritlerden bir tanesinin tamamen gözle görülecek şekilde sıyrıldığı görülmüştür. Bu sıyrılma ise boşluğun mesnete yakın olmasının döşemenin taşıma gücü üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.



(a) (b)

(c) (d)

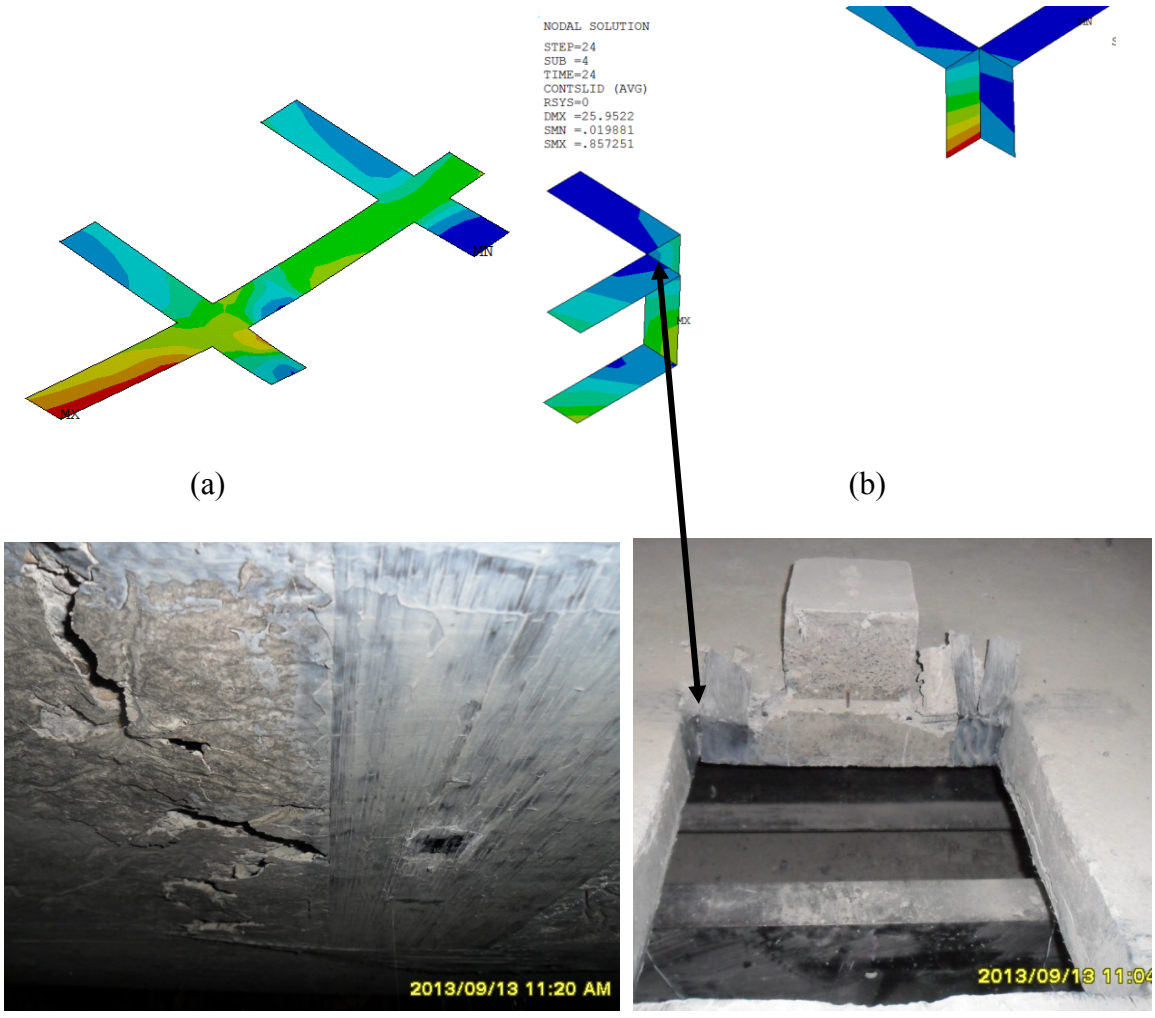
Şekil 7.17. 300 - b-p isimli deney elemanının (Deney elemanı 2) sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması



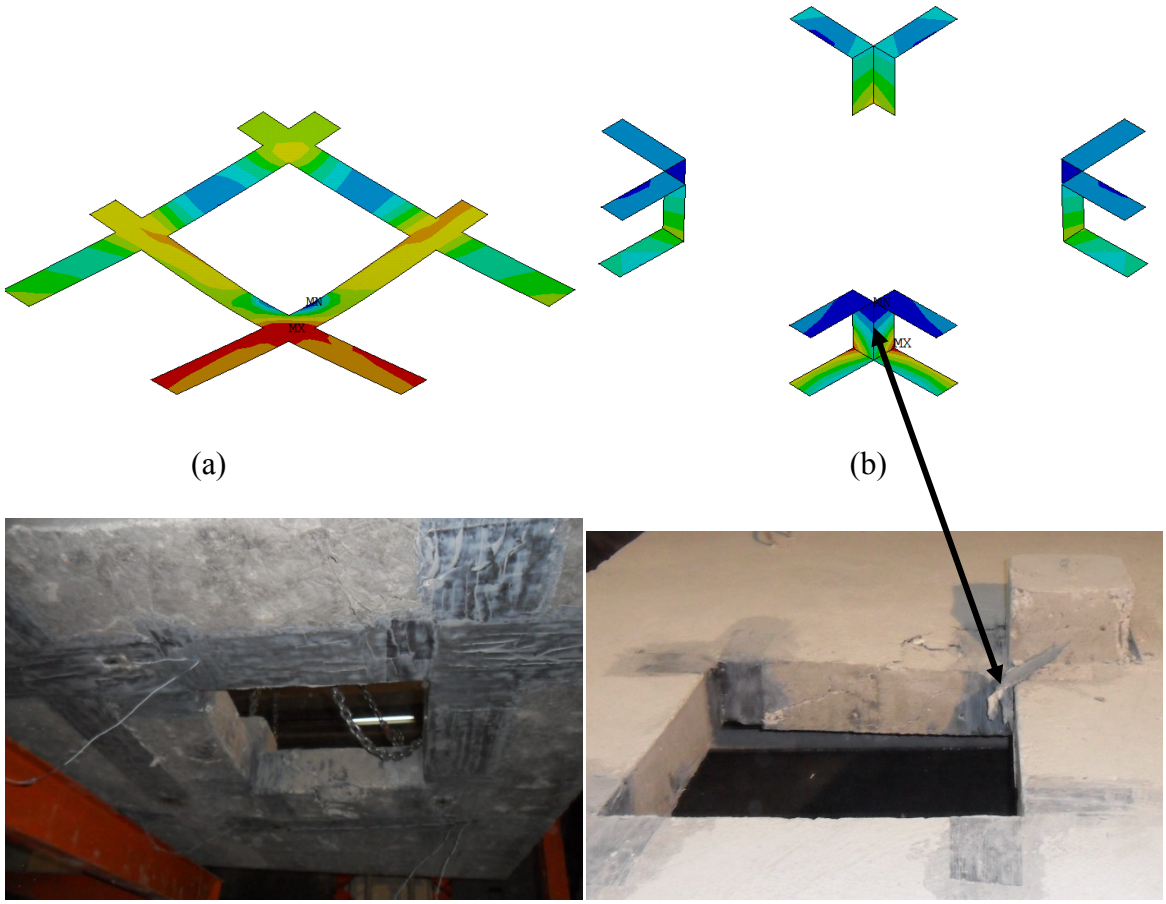
(a) (b)

(c) (d)

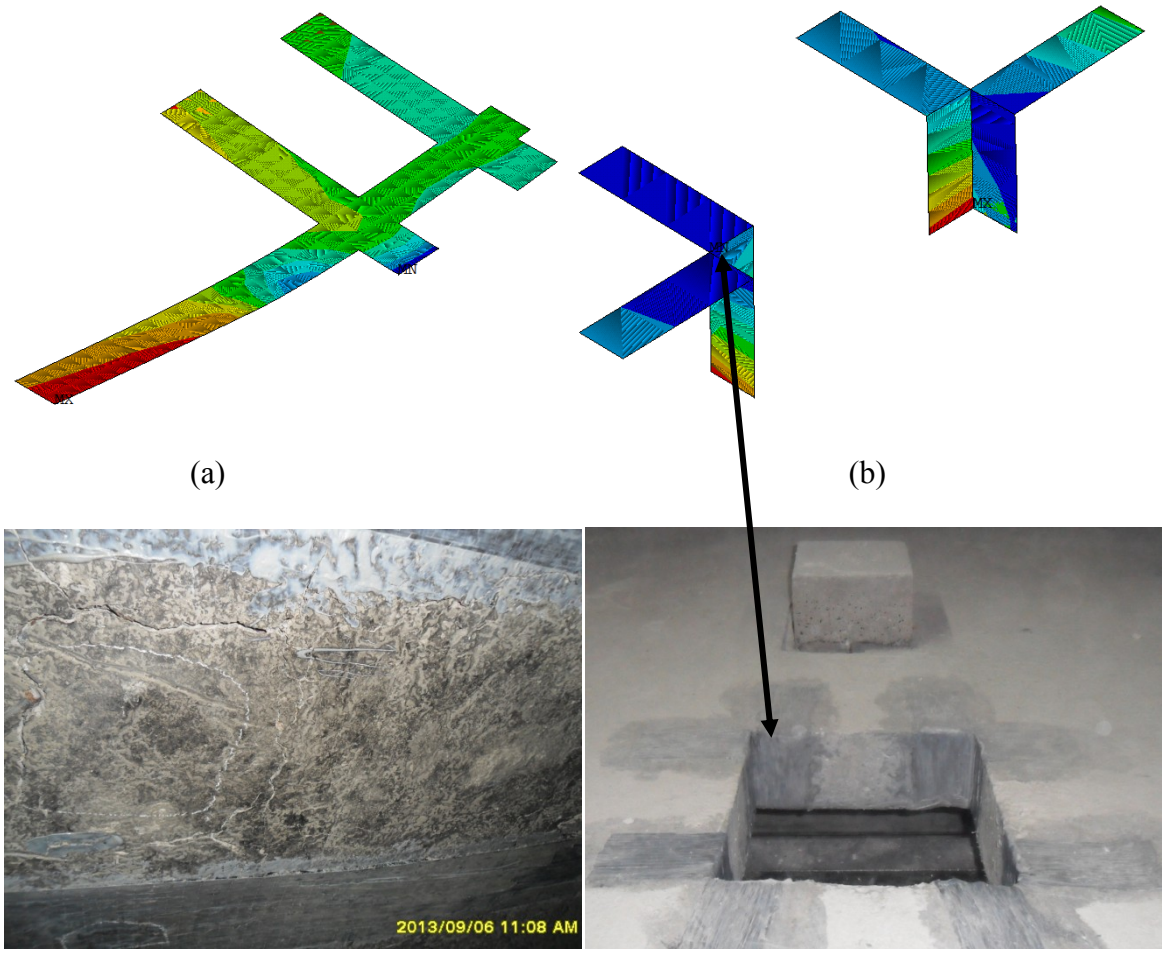
Şekil 7.18. 300 - b- d deney elemanının (Deney elemanı 3) sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması



Şekil 7.19. 500 - b- p deney elemanının (Deney elemanı 4) sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması



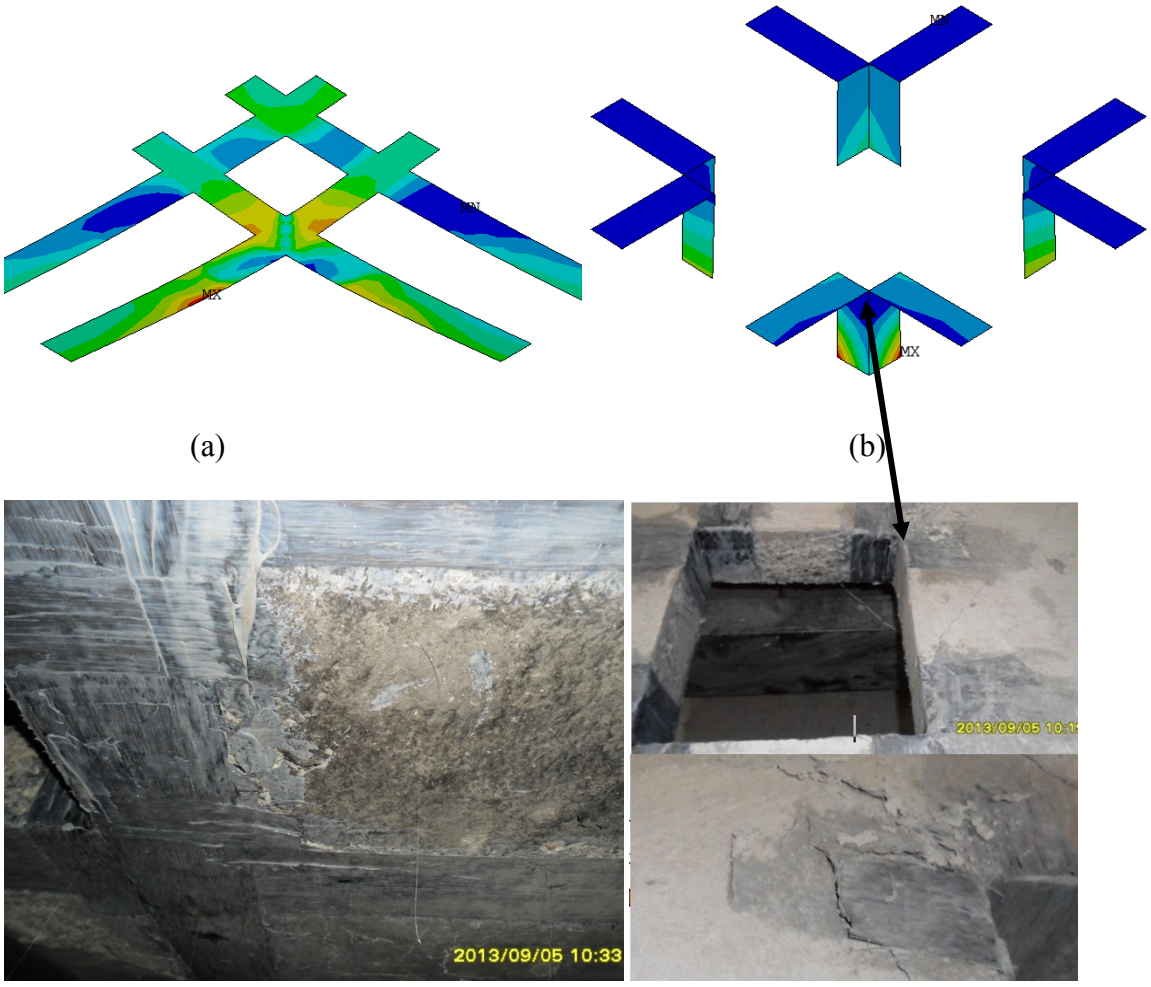
Şekil 7.20. 500 - b - d deney elemanının (Deney elemanı 5) sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması



(a) (b)

(c) (d)

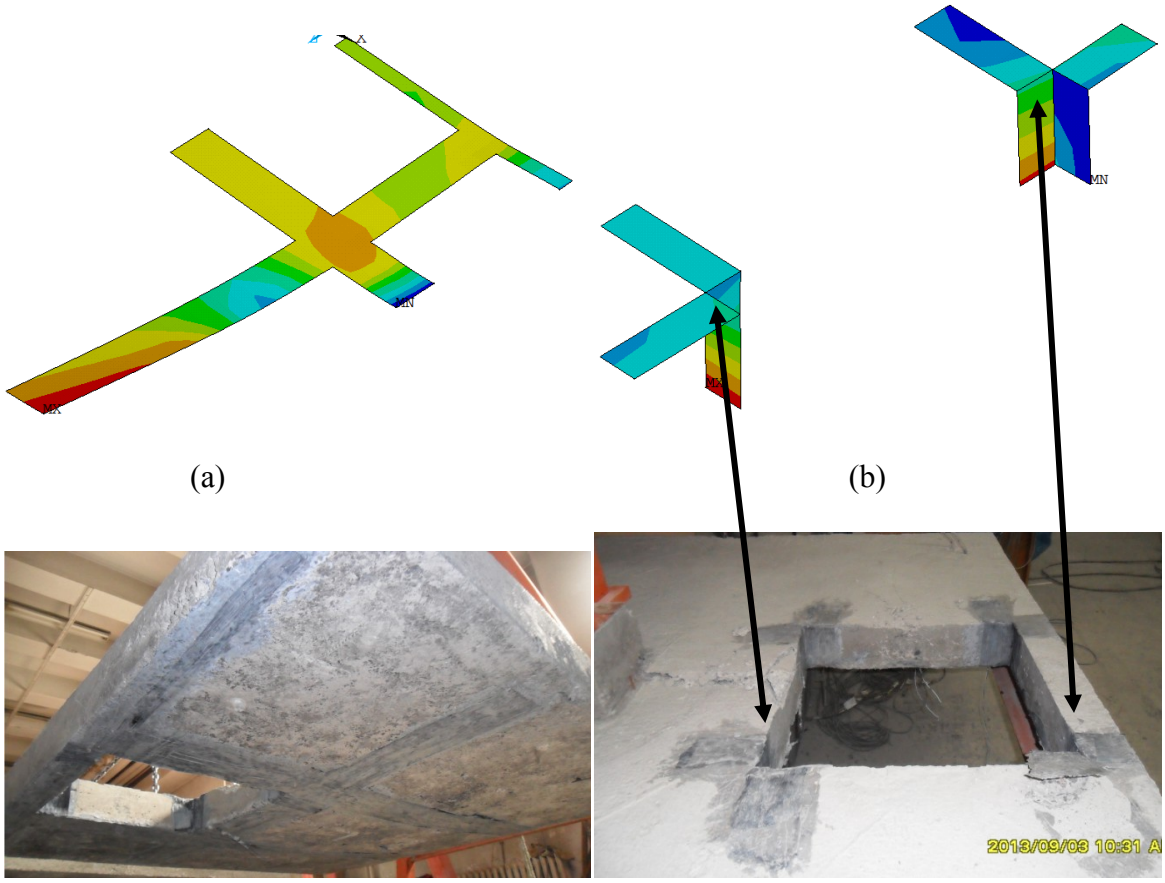
Şekil 7.21. 300 - u - p deney elemanının (Deney elemanı 6) sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması



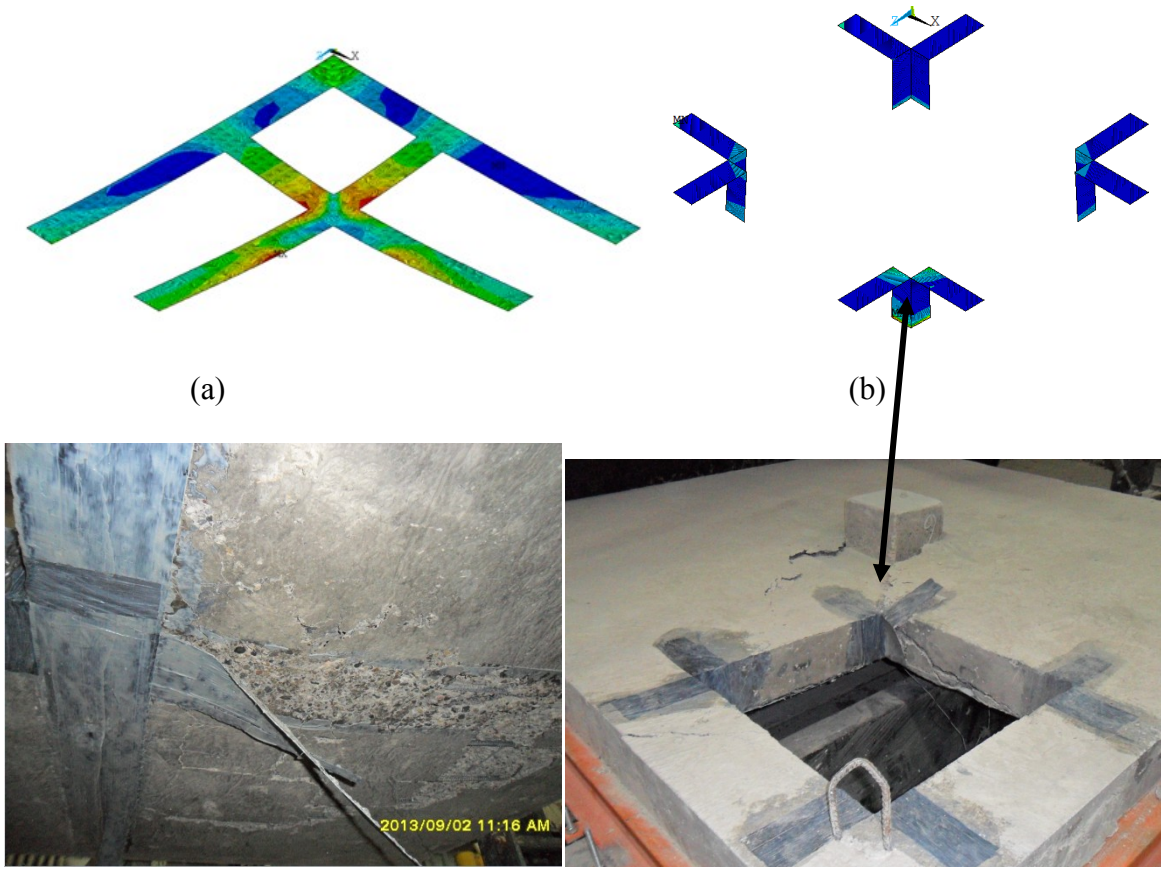
(a) (b)

(c) (d)

Şekil 7.22. 300 - u - d deney elemanının (Deney elemanı 7) sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması



Şekil 7.23. 500 - u- p deney elemanının (Deney elemanı 8) sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 7.24. 500 - u- d deney elemanının (Deney elemanı 9) sonlu eleman analizinden (a) döşeme alt yüzüne ve (b) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışlarının deney çalışmasından (c) döşeme alt yüzüne ve (d) boşluk köşelerine yapıştırılan CFRP şeritler için elde edilen sıyrılma davranışları ile karşılaştırılması

8. ÖZET VE SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, zımbalama etkisi altında göçtüğü önceden yapılan bir deneysel çalışma (Anıl ve diğerleri, 2014) ile belirlenen, kare şeklinde geometriye sahip olan, değişken boyut ve konumda kare şeklinde boşluklar içeren 8 adet betonarme döşeme dıştan yapıştırılan CFRP şeritler kullanılarak güçlendirilmiştir. Güçlendirilen betonarme döşemeler ortalama 20 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanarak imal edilmiştir. Döşemelerin alt ve üst yüzlerinde ızgara şeklinde donatılar kullanılmış olup, kayma donatısı veya boşluk çevrelerinde herhangi bir başka donatı kullanılmamıştır. Deneyi yapılan döşemelerin boyutları, kirişsiz döşeme içeren tipik betonarme yapılarda sıfır moment çizgileri ile çevrili bölgenin boyutları dikkate alınarak seçilmiş ve döşemeler ¾ ölçek ile dört kenarından basit mesnetli olarak imal edilmiştir.

Döşemelerin güçlendirilmesi için ise iki set halinde dıştan yapıştırılan CFRP şeritler kullanılmıştır. Birinci set, döşeme üzerinde açılan boşluklar sebebiyle kesilen donatıların taşıdığı eksenel kuvvetleri taşıyacak miktarda döşeme alt yüzünde boşluk çevresine yapıştırılmıştır. İkinci set ise, boşluksuz deney elemanı ile boşluklu deney elemanları arasındaki zımbalama dayanımı farkını giderecek şekilde, basit kirişlerin CFRP ile kesmeye karşı güçlendirilmesine benzer olarak tasarlanan ve her döşemede bulunan boşluğun dört köşesine yapıştırılan CFRP şeritlerden oluşmuştur. Bu şeritlerden zımbalama yükünün uygulandığı noktaya yakın olanların döşemelerin zımbalama dayanımına doğrudan katkı yapacağı, diğerlerinin ise döşeme boyutları sebebi ile mesnet bölgelerine yaklaşan boşluklardan kaynaklanan ve istenmeyen şekilde göçmelere neden olabilecek zayıflıkları gidermeye katkı sağlayacağı ve boşluk içlerinde döşeme düzlemine paralel olarak paspayının çatlamasını önleyeceği öngörülmüştür. Güçlendirme işlemi yapılırken herhangi bir delme veya ankrajlama işlemi uygulanmamıştır.

Pratik şekilde uygulanan güçlendirme işleminin yapıları kullanan insanlara rahatsızlık vermeden, yapının güçlendirilen bölgelerindeki görünüşü bozmadan ve çok kısa sürede uygulanabilir olması bu sistemin CFRP kullanılarak yapılan diğer yöntemlere göre avantajlarıdır.

Güçlendirme işleminin amacı boşluk içermeyen deney elemanının zımbalama kapasitesinin yakalanması olarak belirlenmiştir. Yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde ise uygulanan pratik güçlendirme yönteminin başarılı olduğu görülmüştür. Deney sonuçları aşağıda verilen maddelerle özetlenmiştir.

- Deneyi yapılan güçlendirilmiş boşluklu döşemelerin zımbalama yükünü taşıma kapasiteleri güçlendirilmemiş duruma göre ortalama %55 oranında arttırılabilmiştir. Bu artış ise ortalama zımbalama yükü taşıma kapasitesinin boşluksuz referans elemanının kapasitesinin %96'sına ulaştığını göstermektedir.
- Benzer şekilde güçlendirilmiş boşluklu döşemelerin göçme anına kadar yaptıkları deplasman ise güçlendirilmemiş duruma göre ortalama %20 oranında arttırılabilmiştir.
- Kuvvet deplasman eğrilerinin altında kalan alanın hesaplanması ile elde edilen enerji sönümleme kapasiteleri ise güçlendirilmemiş elemanlara göre ortalama olarak %85 oranında attırılmıştır.

Sonuçları daha fazla irdeleyebilmek için ise deney elemanları içerdikleri boşluğun özelliklerine göre gruplandırılmıştır. Daha sonra benzer boşluklar içeren grupların deney sonuçları karşılaştırılarak döşeme üzerinde açılan boşluğun özelliklerinin deney sonuçları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu sonuçlar aşağıdaki maddelerde özetlenmiştir.

- Kolona bitişik boşluk içeren deney elemanlarının ortalama zımbalama yükü taşıma kapasiteleri boşluksuz elemanının zımbalama yükü taşıma kapasitesinin %88'ine kadar ulaştırılabilmişken, kolondan uzak boşluk içeren deney elemanlarının ortalama zımbalama yükü taşıma kapasiteleri boşluksuz elemanının zımbalama yükü taşıma kapasitesinin %105'ine kadar çıkmıştır. Buna karşın, kolona bitişik boşluk içeren güçlendirilmiş deney elemanlarının zımbalama dayanımlarındaki artış güçlendirilmemiş elemanlara kıyasla %72 olarak hesaplanmışken, kolona uzak boşluk içeren deney elemanları için bu artış %44 olarak hesaplanmıştır. Deplasman ve enerji sönümleme kapasiteleri içinde benzer sonuçlar çıktığı görülmüştür.
- Kolona paralel boşluk içeren deney elemanlarının ortalama zımbalama yükü taşıma kapasiteleri boşluksuz elemanının zımbalama yükü taşıma kapasitesinin %92'sine kadar ulaştırılabilmişken, kolona diyagonal konumda boşluk içeren deney elemanlarının ortalama zımbalama yükü taşıma kapasiteleri boşluksuz elemanının zımbalama yükü taşıma kapasitesinin %101'ine kadar çıkmıştır. Artış oranı

incelendiğinde ise kolona paralel boşluk içeren güçlendirilmiş deney elemanlarının ortalama zımbalama dayanımındaki artışın %67, kolona diyagonal boşluk içeren durumda ise bu oranın 46% olduğu görülmüştür.

- Boşluk oranı büyük olan deney elemanlarının ortalama zımbalama yükü taşıma kapasiteleri boşluksuz elemanının zımbalama yükü taşıma kapasitesinin %94'üne boşluk oranı düşük olan deney elemanlarının ortalama zımbalama yükü taşıma kapasiteleri ise %99'una kadar çıkmıştır. Güçlendirilmemiş numunelere kıyasla zımbalama kapasitelerindeki artış ise, büyük boşluk içeren deney numuneleri için %71, küçük boşluk içeren numuneler için ise %44 olarak hesaplanmıştır.

Yukarıdaki maddelerde sunulan değerler incelendiğinde güçlendirme sisteminin etkin olarak çalıştığı görülmektedir. Bununla birlikte kolona yakın paralel ve büyük boşluk içeren deney elemanlarının kapasitelerinin güçlendirilmemiş duruma göre yüksek oranda arttığı görülmüştür. Kolondan uzak, diyagonal ve küçük boşluk içeren deney elemanlarında ise zımbalama dayanımındaki artış aynı oranda olmamıştır. Bunun sebebi ise, uygulanan güçlendirme sisteminin döşeme üzerindeki boşluğun zımbalama kapasitesi üzerindeki olumsuz etkisini gidermeye yönelik olmasıdır. Kolondan uzak, diyagonal ve küçük boşluk içeren deney elemanlarında boşluğun zımbalama kapasitesi üzerindeki olumsuz etkisi daha düşük olduğundan, uygulanan güçlendirme ile elde edilen, zımbalama kapasitesindeki artış da daha düşük olmuştur.

Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar şartnameler tarafından önerilen denklemler ile de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapılırken şartnameler döşeme içindeki boyuna donatı oranını dikkate alıp almadıklarına göre iki gruba ayrılmıştır. Daha sonra güçlendirilmemiş haldeki deney elemanlarının kapasiteleri şartname denklemleri ile hesaplanmıştır. Elde edilen değerlerin üzerine ise güçlendirme sistemi tarafından sağlanan ek zımbalama kapasitesi dayanımları eklenmiştir. Elde edilen sonuçlar ise şartnameler tarafından önerilen denklemlerden elde edilen sonuçların ortalama olarak %15 daha düşük kaldıklarını göstermiştir. Bu farkın sebebi ise, ölçekli olarak imal edilen deney elemanlarında boşlukla mesnet arasındaki bölgenin ince kalması ve bu durumun döşemenin daha erken göçmesine sebep olması olarak belirlenmiştir.

Deney elemanlarının üç boyutlu sonlu eleman analizleri de bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Kurulan detaylı sonlu eleman modellerinde, deneylerde gözlenen köşe

kalkması davranışı ve dıştan yapıştırılan CFRP şeritlerin beton yüzeyinden sıyrılması dikkate alınmıştır. Köşe kalkması ve CFRP şeritlerin sıyrılma davranışının modellenmesi için ANSYS(2014) yazılımı tarafından sunulan temas ve kontak elemanı çiftleri kullanılmıştır. CFRP şeritlerin beton yüzeyinden sıyrılması için yine ANSYS(2014) tarafından sunulan ve sıyrılma davranışını modellemekte kullanılan CZM modeli kullanılmıştır. Bu model kullanılırken CFRP şeritlerin gerçeğe uygun şekilde beton yüzeyinden hem temas yüzeyine paralel hem de dik şekilde sıyrılması/ayrılması göz önüne alınmıştır.

Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar deneysel çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılarak sunulmuştur. Karşılaştırmalardan ise sonlu eleman modellerinin CFRP şeritlerle güçlendirilmiş kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımlarını tahmin etmede genel olarak başarılı olduğu görülmüştür. Sonlu eleman modelleri deney elemanlarının zımbalama dayanımlarını ortalama olarak %98, deplasman kapasitelerini ise %94 isabetle tahmin edebilmiştir.

Çatlak dağılımları ve CFRP şeritlerin sıyrılma davranışları incelendiğinde de benzer şekilde 3 boyutlu sonlu eleman analizlerinin genel bir başarısı gözlenmiştir. Bunlara dayanarak, detaylı şekilde oluşturulmuş sonlu eleman modellerinin, CFRP şeritlerle güçlendirilmiş boşluklu döşemelerin zımbalama dayanımlarını tahmin etmede kullanılabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara katkı sağlamak ve sonuçları daha ileri seviyeye taşımak için boşluk köşelerinde kullanılan CFRP şeritlerin oranları ve konumları değiştirilerek elde edilen zımbalama dayanımları parametrik olarak incelenebilir. Bunun yanında uygulanan sistemin pratikliğini geçersiz kılmayacak şekilde U şeritlerin döşeme yüzeyine daha iyi yapışmasını sağlamak için çeşitli yöntemler denenerek yine parametrik sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Abbas, J.L. (2012). Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP sheets Under Cyclic Load. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 5(1),117-137.

ACI 440. (1996). State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures. *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI.

ACI Committee 318 (2008). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08). Detroit, MI: *American Concrete Institute*.

Adetifa, B. ve Polak, M. A. (2005). Retrofit of slab column interior connections using shear bolts. *ACI Structural Journal,* 102(2), 268–274.

Alfano, G. ve Crisfield, M.A. (2001). Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 50, 1701–1736.

Ali, M.S., Oehlers, D.J. ve Park, S. (2001). Comparison between FRP and steel plating of reinforced concrete beams. *Composites: Part A,* 32(9):1319–28.

Al-Rousan, R., Issa, M. ve Shabila, H. (2012). Performance of reinforced concrete slabs strengthened with different types and configurations of CFRP. *Composites: Part B* 43, 510–521.

Altun, F. ve Birdal, F. (2012). Analytical investigation of a three-dimensional FRP-retrofitted reinforced concrete structure's behaviour under earthquake load effect in ANSYS program. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 3701–3707.

Anil, O., Kina, T. ve Salmani, V. (2014). Effect of opening size and location on punching shear behaviour of two-way RC slabs. *Magazine of Concrete Research*. DOI: 10.1680/macr.14.00042

Anıl, Ö., Kaya, N. ve Arslan, O. (2013). Strengthening of one way RC slab with opening Using CFRP strips. *Construction and Building Materials*, 48, 883-893.

ANSYS, ANSYS User's Manual Revision 14.5, *ANSYS Inc*., Cannosburg, Pennsylvania

Bangash, M. Y. H. (1989) Concrete and Concrete Structures: Numerical Modeling and Applications, Elsevier Science Publishers Ltd., London, England.

Barenblatt, G.I. (1962). The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advanced Applied Mechanics,* 7, 55–129.

Binici, B. (2003). *Punching Shear Strengthening of Reinforced Concrete Slabs Using Fiber Reinforced Polymers*. Doktora Tezi, Department of Civil Engineering, University of Texas, Austin.

Binici, B., Bayrak. O. (2005). Upgrading of slab–column connections using fiber reinforced polymers. *Engineering Structures*, 27, 97–107.

Bizindavyi, B.L. ve Neale, K.W. (1999). Transfer Lengths and bond strengths for composites bonded to concrete. *Journal of Composites and Construction*, 3, 153–160.

British Standards Institution. (1997). Structural Use of Concrete, BS8110: Part 1—Code of Practice for Design and Construction, London.

Broms, C. E. (2007b). Flat plates in seismic areas: comparison of shear reinforcement systems. *ACI Structural Journal*, 104(6), 712-721.

Broms, C. E. (2007a). Ductility of flat plates: comparison of shear reinforcement systems. *ACI Structural Journal*, 104(6), 703-711.

Broms, C.E. (1990). Shear Reinforcement for Deflection Ductility of Flat Plates. *ACI Structural Journal*, 87(6), 696-705.

Bu, W. ve Polak, M.A. (2011). Effect of openings and shear bolt pattern in seismic retrofit of reinforced concrete slab–column connections. *Engineering Structures*, 33(12), 3329-3340.

Buyle-Bodin, F., David, E. ve Ragneau, E. (2002). Finite element modelling of flexural behaviour of externally bonded CFRP reinforced concrete structures. *Engineering Structur*es, 24(11),1423–1439.

Büyüköztürk, O. (1977). Nonlinear analysis of reinforced concrete structures. *Computers and Structures*, 7, 149-156.

Casadei, P., Nanni, A. ve Ibell. T. (2003). Experiments on two-way RC slabs with openings strengthened with CFRP laminates. *Center for Infrastructure Engineering Studies*. 3(39).

Chajes, M.J., Finch Jr., W.W., Januszka, T.F. ve Thomson Jr., T.A. (1996). Bond and force transfer of composites materials plates bonded to concrete. *ACI Structural Journal,* 93, 209–217.

Chajes, M.J., Januszka, T.F., Mertz, D.R., Thomson Jr., T.A. ve Finch Jr., W.W. (1995). Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics. *ACI Structural Journal*. 92, 295–303.

Chen, J.F., ve Teng, J.G. (2001). Anchorage strength model for FRP and steel plates attached to concrete. *Journal of Structural Engineering,*127(7),784-791.

Cheng, M.Y. (2009). *Punching shear strength and deformation capacity of fiber reinforced concrete slab – column connections under earthquake – type loading*. Doktora Tezi, The University of Michigan, Michigan.

Ching, A. ve Büyüköztürk, O. (2006). Debonding of FRP plated concrete: A tri-layer fracture treatment. *Engineering Fracture Mechanics*. 73, 348-365.

Coronado, C.A. ve Lopez, M.M. (2006). Sensitivity analysis of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminates. *Cement Concrete and Composites,* 28(1):102–14.

Daniel, I.M. ve Ishai, O. (1994). Engineering Mechanics of Composite Materials. Oxford University Press.

De Borst, R. (2003). Numerical aspects of cohesive-zone models. *Engineering Fracture Mechanics*. 70, 1743-1757.

Desayi, P. ve Krishnan, S. (1964).Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, 61, 345-350.

Dilger, W. H. ve Ghali, A. (1981). Shear reinforcement for concrete slabs. *Journal of Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 107(12), 2403-2420.

Dilger, W.H. ve Ghali, A. (1981). Shear Reinforcement for Concrete Slabs. *Journal of Structural Division*, *ASCE*, 107(12), 2403-2420.

Dugdale, D.S. (1960). Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids,* 8, 100–104.

Ebead, U. ve Marzouk, H. (2002) Strengthening of two-way slabs using steel plates. *ACI Structural Journal*, 99(1), 23–30.

Elgabry, A. A. ve Ghali, A. (1987). Tests on concrete slab-column connections with stud-shear reinforcement subjected to shear-moment transfer. *ACI Structural Journal*, 84(5), 433-442.

Elgabry, A. ve Ghali, A. (1987). Test on Concrete Slab-Column Connections with Stud Shear Reinforcement Subjected to Shear-Moment Transfer, *ACI Structural Journal*, 84(5), 433-442.

Elices, M., Guinea, G.V., Gomez, J. ve Planas, J. (2002). The cohesive zone model: advantages, limitations and challenges. *Engineering Fracture Mechanics*, 69, 137–163.

Elstner, R.C. ve Hognestad, E. (1956). Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs. *Journal of the American Concrete Institute*, 28(1), 29-58.

Erdoğan, H. (2010). *Improvement of punching shear strength of flat plates by using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) dowels*. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi. Ankara

Ersoy, U. ve Tankut, T. (1981). Aselsan araştırma test ve control merkezi taşıyıcı yapısındaki göçme olayına ilişkin bilirkişi raporu. Ankara.

Esfahani, M.R. (2008). Effect of Cyclic Loading on Punching Shear Strength of Slabs Strengthened with Carbon Fiber Polymer Sheets. *International Journal of Civil Engineering*, 6(3), 208-215.

Esfahani, M.R., Kianoush, M.R. ve Moradi, A.R. (2009). Punching shear strength of interior slab – column connections strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets. *Engineering Structures*. 31, 1535-1542.

Eurocode 2. (2002). Design of concrete structures - part 1: General rules and rules for buildings. Commission of the European Comminities.

Farghaly, A.S. ve Ueda, T. (2011). Prediction of Punching Shear Strength of Two-Way Slabs Strengthened Externally with FRP Sheets. *Journal of Composites for Construction*, 15(2),181-193.

Farghaly, A.S.ve Ueda, T. (2011). Prediction of Punching Shear Strength of Two-Way Slabs Strengthened Externally with FRP Sheets. *Journal of Composites for Construction*, 15(2),181-193.

Favre, R., Jaccoud J.P., Burdet, O. ve Charif, H. (2004). Dimessionement des structures en beton – aptitude au service et elements de structures. Presse Polytechnique et Universitaires Romandes. Traite de Genie Civil, 8(3), 612.

Federal Statistical Office. (2012). Annual building and housing statistics. Construction expenditure by type of activity. Swiss Statistical Encylopedia, Neuchatel, İsviçre.

Ferreira, M.P., Melo, G.S., Regan, P.E. ve Vollum, R.L. (2014). Punching of reinforced concrete flat slabs with double- headed shear reinforcement. *ACI Structural Journal*, 111(2),363-374.

Florut, S.C., Stoian, V., György, T.N., Dan, D. ve Diaconu, D. (2010). Retrofitting of two way RC slabs with and without cut-out openings by using FRP composite materials. *Latest Trends on Engineering Mechanics, Structures, Geology*.245-250.

Garden, H.N., Hollaway, L.C. ve Thorne, A.M. (1997). A preliminary evaluation of carbon fibre reinforced polymer plates for strengthening reinforced concrete members. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 127– 142.

Gardner, N.J., Huh, J. ve Chung L. (2002). Lessons from Sampoong Department Store Collapse. *Cement and Concrete Composites*, 24(2),523- 529.

Ghali, A. ve Hammill, N. (1992). Effectiveness of Shear Reinforcement in Slabs. *Concrete International*, 14(1),60-65.

Ghali, A. ve Megally, S. (2000). Stud shear reinforcement for punching: North American and European practices. Proceedings of the international workshop on punching shear capacity of RC slabs, Kungl Tekniska Hogskolan institute for Byggkonstruktion, Stockholm, Sweden, 201-209.

Ghali, A., Sargious, M. A. ve Huizer, A. (1974). Vertical pre-stressing of flat plates around columns. Shear in reinforced concrete, *ACI Structural Journal - special publication* 42(2) 905–920.

Hassan, M., Ahmed, E.A. ve Benmokrane, B. (2013). Punching shear strength of glass fiber reinforced polymer reinforced concrete flat slabs. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 40,951-960.

Hassan, M., Ahmed, E.A. ve Benmokrane, B. (2014). Punching shear design equation for two way concrete slabs reinforced with FRP bars and stirrups. *Construction and Building Materials*, 66, 522-532.

Hawkins, N. M., Mitchell, D. ve Sheu, M. S. (1974). Cyclic Behavior of Six Reinforced Concrete Slab-Column Specimens Transferring Moment and Shear., *Progress Report 1973-74 on NSF Project GI-38717*, Department of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, Washington.

Hemmaty, Y., DeRoeck, G. ve Vandewalle, L. (1992). Parametric Study of RC Corner Joints Subjected to Positive Bending Moment by Nonlinear FE Model. Proceedings of the ANSYS Conference, 2, Pittsburgh, Pennsylvania.

Hillerborg, A., Modeer, M. ve Petersson, P.E. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement Concrete Research,* 6, 773-782.

Huyse, L., Hemmaty, Y. ve Vandewalle, L. (1994). Finite Element Modeling of Fiber Reinforced Concrete Beams. Proceedings of the ANSYS Conference, 2, Pittsburgh, Pennsylvania.

Ibrahim, A.M. ve Mahmood, M.S. (2009). Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Laminates. *European Journal of Scientific Research*, 30(4),526-541.

Inacio, M.M.G., Ramos, A.P. ve Faria, D.M.V. (2012). Strengthening of flat slabs with transverse reinforcement by introduction of steel bolts using different anchorage approaches. *Engineering Structures*. 44, 63-77.

Islam, S. ve Park, R. (1976). Tests of slab-column connections with shear and unbalanced flexure. *Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 102(3), 549-569.

Jansze, W. (1997). Strengthening of RC members in bending by externally bonded steel plates, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft.

Johnson, G.P. ve Robertson, I.A. (2004). Retrofit of slab column connections using CFRP. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, Canada. Paper No:142.

Kachlakev, D., Miller, T., Yim, S., Chansawat, K. ve Potisuk, T. (2001). Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with frp laminates. Oregon Department of Transportation Research Group ve Federal Highway Administration.

Kaminetzky, D. (1991). Design and construction failures, lessons from forensic investigations. New York: McGraw-Hill, 600

Kang, T. H. K. ve Wallace, J. W. (2004). *Shake table tests and analytical studies of reinforced and post-tensioned concrete flat plate frames*. Doktora Tezi, University of California, Los Angeles.

Kazaz, İ. (2001). Betonarme perde duvarların sonlu eleman analizinde aderans kaymasının uygulanması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3),155-163.

Khaleel, G.I., Shaaban, I.G., Elsayedand, K.M. ve Makhlouf, M.H. (2013). Strengthening of Reinforced Concrete Slab-Column Connection Subjected to Punching Shear with FRP Systems. *International Journal of Engineering and Technology*, 5(6),657-661.

Kim, Y.J., Longworth, J.J., Wight, R.G. ve Green, M.F. (2009). Punching Shear of Two-way Slabs Retrofitted with Prestressed or Non-prestressed CFRP Sheets. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. DOI: 10.1177/0731684409103143

Koppitz, R., Kenel, A. ve Keller, T. (2013). Punching shear of RC flat slabs – Review of analytical models for new and strengthening of existing slabs. *Engineering Structures*, 52,123-130.

Kwak, H.G. ve Filippou, F.C. (1990). Finite element analysis of reinforced concrete structures under monotonic loads. REPORT NO. UCB/SEMM-90/14. Department of Civil Engineering, University of California. Berkeley, California.

Langohr, P. H., Ghali, A. ve Dilger, W. H. (1976). Special shear reinforcement for concrete flat plates. *ACI Structural Journal*, 141-146.

Li, R., Cho, Y.S. ve Zhang, S. (2007). Punching shear behavior of concrete flat plate slab reinforced with carbon fiber reinforced polymer rods. *Composites: Part B*, 38, 712–719.

Lips, S. ve Muttoni, A. (2010). Experimental investigation of reinforced concrete slabs with punching shear reinforcement. 8th fib PhD Symposium in Kgs. Lyngby, Denmark

Lu, X.Z., Teng, J.G., Ye, L.P., ve Jiang, J.J. (2005). Bondslip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Engineering Structures*, 27(6), 920-937.

MacGregor, J.G. ve Wight, J. K. (2005). Reinforced Concrete – Mechanics and Design 4th Edition. Prentice Hall.

Mahmoud, A.M. (2012). Strengthening of concrete beams having shear zone openings using orthotropic CFRP modeling. *Ain Shams Engineering Journal*, 3, 177-190.

Megally, S. ve Ghali, A. (2000). Seismic Behavior of Edge Column-Slab Connections with Stud Shear Reinforcement. *ACI Structural Journal*, 97(1), 53-60.

Meleka, N.N., Safan, M.A., Bashandy, A.A. ve Abd-Elrazek, A.S. (2013). Rehabilitation of elliptical parabolic reinforced concrete shells with openings. *Asian Journal of Civil Engineering.* 14(6), 945-963.

Michel, L., Ferrier, E., Bigaud, D. ve Agbossou, A. (2007). Criteria for punching failure mode in RC slabs reinforced by externally bonded CFRP. *Composite Structures*, 81, 438–449.

Mindess, S. ve Young, J. F. (1981). Concrete, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Mirzaei, Y. (2010). *Post- punching behavior of reinforced concrete slabs.* Doktora Tezi, Ecole Polytechnique Federale de Laussane, Suisse.

Mitchell, D., De Vall, R.H., Saatcioglu, M., Simpson, R., Tinawi ,R. ve Tremblay, R. (1995). Damage to Concrete Structures due to the 1994 Northridge Earthquake. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 22(4), 361-377.

Mitchell, D., Tinawi, R. ve Redwood, R.G. (1990). Damage to buildings due to the 1989 Loma Prieta earthquake – A Canadian code perspective. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 17(5), 813-834.

Moe, J. (1961). Shearing strength of reinforced concrete slabs and footings under concentrated loads. *Development Department Bulletin D47, Portland Cement Association*, 130.

Mohamed Ali, M.S., Oehlers, D.J. ve Bradford, M.A. (2000). Shear peeling of steel plates adhesively bonded to the sides of reinforced concrete beams. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, 249–259.

Mokhtar, A.S., Ghali, A. ve Dilger, W. (1985). Stud Shear Reinforcement for Flat Plates. *ACI Structural Journal*, 82(5), 676-683.

Mukhopadhyaya, P. ve Swamy, N. (2001). Interface shear stress: a new design criterion for plate debonding. *Journal of Composites for Construction*, 5(1), 35–43.

Nguyen, D.M., Chan, T.K. ve Cheong, H.K. (2001). Brittle failure and bond development length of CFRP concrete beams. *Journal of Composites for Construction*, 5(1), 12–17.

Oehlers, D.J.(1992). Reinforced concrete beams with plates glued to their soffits. *Journal of Structural Division,*2023–2038.

Oehlers, D.J., Park, S.M. ve Mohamed Ali, M.S. (2003). A structural engineering approach to adhesive bonding longitudinal plates to RC beams and slabs. *Composites: Part A*, 34, 887–897.

Omran, H.Y. ve El-Hacha, R. (2012). Nonlinear 3D finite element modeling of RC beams strengthened with pre-stressed NSM-CFRP strips. *Construction and Building Materials* 31, 74-85.

Pham, H.B. ve Al-Mahaidi, R. (2005). Finite element modelling of RC beams retrofitted with CFRP fabrics. In: Proceeding of the 7th international symposium on FRP reinforcement for concrete, Kansas City, MO, USA, 499–514.

Polak, M. A., El-Salakawy, E. ve Hammill, N. L. (2005). Shear Reinforcement for Concrete Flat Slabs. *Punching Shear in Reinforced Concrete Slabs, SP-232, American Concrete Institute Special Publication*, 75-95.

Polies ,W., Ghrib, F. ve Sennah, K. (2010). Rehabilitation of interior reinforced concrete slab–column connections using CFRP sheets. *Construction and Building Materials*, 24, 1272–1285.

Pralong, J., Brändli, W. ve Thürlimann, B. (1979). Durch stanz versuche an Stahl beton und Spann beton platen. *Institut für Baustatik und Konstruktion*, ETH Zürich, 7305-3, 89.

Radnic, J., Matesan, D., Grgic, N. ve Baloevic, G. (2015). Impact testing of RC slabs strengthened with CFRP strips. *Composite Structures*, 121, 90-103.

Rezaiefar, A. (2013). Finite element modeling of cyclically loaded FRP-retrofitted RC squat shear walls. Yüksek Lisans Tezi. Concordia University. Montréal, Québec, Canada

Ritchie, P.A., Thomas, D.A., Lu, L.W. ve Connely, G.M. (1991). External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics. *ACI Structural Journal,* 88(4),490–500

Roberts, T.M., Haji-Kazemi, H., (1989). Theoretical study of the behavior of reinforced concrete beams strengthened by externally bonded steel plates. Proceedings of the Institution of the Civil Engineers, Part 2, 87 (1), 35–39.

Robertson, I. N., Kawai, T., Lee, J. ve Johnson G. (2002). Cyclic Testing of Slab-Column Connections with Shear Reinforcement. *ACI Structural Journal*, 99(5), 605-613.

Ruiz, M.F., Muttoni, A., ve Kunz, J. (2010). Strengthening of Flat Slabs Against Punching Shear Using Post-Installed Shear Reinforcement. *ACI Structural Journal,*107(4), 434-442.

Rusinowski, P. (2005). *Two-way concrete slab with openings.* Yüksek Lisans Tezi, Lulea University of Technology. Lulea

Saadatmanesh, H. ve Malek, A.M. (1998). Design guidelines for flexural strengthening of RC beams with FRP plates. *Journal of Composites for Construction*,2(4):158–164

Santhakumar, R. ve Chandrasekaran, E. (2004). Analysis of Retrofitted Reinforced Concrete Shear Beams using Carbon Fiber Composites. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 4, 66-74.

Sarrado, C. Turon, A., Renart, J. ve Urresti, I. (2012). Assesment of energy dissipation during mixed mode delamination growth using cohesive zone models. *Composites: Part A*, 43, 2128-2136

Sasmal, S., Kalidoss, S. ve Srinivas, V. (2013). Nonlinear Finite Element Analysis of FRP Strengthened Reinforced Concrete Beams. *Journal of the Institution of Engineers India Series A*., 93(4), 241–249

Seible, F., Ghali, A. ve Dilger W. H. (1980). Preassembled shear reinforcing units for flat plates. *ACI Journal*, 77(1), 28-35.

Shah, S. P., Swartz, S. E. ve Ouyang, C. (1995). Fracture Mechanics of Concrete, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Sharif, A., Al-Sulaimani, G.J., Basunbul, I.A., Baluch, M.H. ve Ghaleb, B.N. (1994). Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates. *ACI Structural Journal*, 91(2),160–8.

Sissakis, K. (2002). Strengthening Concrete Slabs for Punching Shear with CFRP Laminates. Yüksek Lisans Tezi. Department of Civil Engineering, University of Toronto.

Smith, S.T. ve Teng, J.G. (2002). FRP-strengthened RC structures-I: review of debonding strength models. *Engineering Structures*, 24(4), 385–395.

Soliman, S.M., El-Salakawy, E. ve Benmokrane, B. (2010). Flexural behaviour of concrete beams strengthened with near surface mounted fibre reinforced polymer bars. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(10):1371–1382.

Soudki, K., El-Sayed, A.K. ve Vanzwol T. (2012). Strengthening of concrete slab-column connections using CFRP strips.

Stehle, J. S. (2002). The Seismic Performance of Reinforced Concrete Wide Band Beam Frames: Interior Connections, The University of Melbourne, Australia.

Taljsten, B. (1997). Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete. *International Journal of Adhesives,* 17, 319–327.

Taljsten, B. (1999). Concrete beams strengthened for bending using CFRP-sheets. In: Forde MC, editor. Proceedings of the Eighth International Conference on Advanced Composites for Concrete Repair. London, UK.

Tan, Y. ve Teng, S. (2005). Interior slab-rectangular column connections under biaxial lateral loadings. Punching shear in reinforced oncrete slabs. *ACI SP,* 232, 147-174.

Task Group 9.3 (2001). FRP reinforcement for concrete structures. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical Report. Switzerland.

Teng, J.G. ve Chen, J.F. (2007). Debonding failures of RC beams strengthened with externally bonded frp reinforcement: behavior and modeling. *Asia-Pacific Conference on FRP in Structures.*

Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.M. ve Lam, L. (2001). FRP strengthened RC structures. England: Wiley.

Teng, J.G., Smith, S.T., Yao, J. ve Chen, J.F. (2003). Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs. *Construction and Building Materials* 17,447–462.

Tumialan, G., Serra, P., Nanni, A. ve Belarbi, A.(1999). Concrete cover delamination in reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets. In: Dolan CW, Rizkalla SH, Nanni A, editors. Proceedings of the Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures. Maryland (USA), 725-735.

Türk Standartları Enstitüsü. (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TSE TS-500, Ankara, (In Turkish).

Van Mier, J.G.M. (1997), Fracture Processes of Concrete - Assessment of Material Parameters for Fracture Models, CRC Press, Boca Raton.

Varastehpour, H. ve Hamelin, P. (1997). Strengthening of concrete beams using fiber-reinforced plastics. *Materials and Structures,* 30:160–176.

Varghese, P.C. (2006). Advanced reinforced concrete design. Second Edition. Prentice-Hall of India. 211.

Wang, J. ve Zhang, C. (2008). Nonlinear fracture mechanics of flexural–shear crack induced debonding of FRP strengthened concrete beams. *International Journal of Solids and Structures,* 45 (2008) 2916–2936.

Wang, J. (2006). Cohesive zone model of intermediate crack-induced debonding of FRP-plated concrete beam. *International Journal of Solids and Structures*, 43, 6630–6648.

William, K. J. ve Warnke, E. P. (1975). Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete. Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering, 19, 174.

Xie, D. ve Waas, A.M. (2006). Discrete cohesive zone model for mixed-mode fracture using finite element analysis. *Engineering Fracture Mechanics*, 73, 1783–1796.

Xu, X. and Needleman, A. (1994). Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 42, 1397–1434.

Yao, J. ve Teng, J.G. (2007). Plate end debonding in FRP-plated RC beams—I: Experiments. *Engineering Structures,* 29,2457–2471.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı	: DURUCAN, Cengizhan
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 16.05.1984, Ankara
Medeni hali	: Evli
Telefon	: 0 (312) 582 32 04
Faks	: -
e-mail	: cengizhandurucan@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Doktora	ODTÜ/ Mühendislik Bilimleri	Devam ediyor
Yüksek lisans	ODTÜ/ Mühendislik Bilimleri	2009
Lisans	Gazi Üniversitesi/ İnşaat Mühendisliği	2006
Lise	Mehmet Emin Resulzade Anadolu Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2006-2012	Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Durucan, C. ve Anıl, Ö. (2015). Effect of Opening Size and Location on the Punching Shear Behaviour of Interior Slab-Column Connections Strengthened with CFRP Strips. *Engineering Structures*, 105,22-36.

Durucan, C. ve Dicleli M. (2015). A_p/V_p Specific Inelastic Displacement Ratio for Seismic Response Estimation of Structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(7), 1075-1097.

Dicleli, M. ve Durucan, C. (2014). Evaluation of Displacement Coefficient Method for Seismically Retrofitted Buildings with Various Ductility Capacities. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(9), 1285-1306.

Durucan, C. ve Dicleli, M. (2010). Analytical Study on Seismic Retrofitting of Reinforced Concrete Buildings Using Steel Braces with Shear Link. *Engineering Structures*, 32(10), 2995-3010.

Hobiler

Satranç



GAZİ GELECEKTİR..