



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI

**TEKSTİL İLE TAKVİYE EDİLMİŞ HARÇ ŞERİTLER İLE BETON YÜZEYİ
ARASINDAKİ YÜK-DEPLASMAN DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

MURAT YÜNCÜLER

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. ÖZLEM ÇALIŞKAN

BİLECİK, 2026

10595069

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI

**TEKSTİL İLE TAKVİYE EDİLMİŞ HARÇ ŞERİTLER İLE BETON YÜZEYİ
ARASINDAKİ YÜK-DEPLASMAN DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

MURAT YÜNCÜLER

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. ÖZLEM ÇALIŞKAN

BİLECİK, 2026

10595069

BEYAN

Tekstil ile Takviye Edilmiş Harç Şeritler ile Beton Yüzeyi Arasındaki Yük–Deplasman Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi başlıklı doktora tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, [Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine](#) uygun olarak tez/dönem projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışma Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından 2022-02.BŞEÜ.01-01 nolu proje ile desteklenmiştir.

Murat Yüncüler

.././2026

İmza:

ÖN SÖZ

Tez çalışmam kapsamında, tekstil ile takviye edilmiş harç şeritler (TRM) ile beton yüzeyi arasındaki yük–deplasman davranışının deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır.

Doktora tezim boyunca bilgisini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, çalışmamın her aşamasında bana yol gösteren, araştırma konusunun belirlenmesi ve seçilmesinde değerli fikir ve katkılarından yararlandığım, çok kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Özlem ÇALIŞKAN'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Deney düzeneğinin hazırlanması ve kullanılması konusunda bana yol gösteren, değerli bilgi ve birikimlerini benden esirgemeyen Prof. Dr. Özgür ANIL ve Doç. Dr. Ömer MERCİMEK hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel süreçte, numune üretimi ve deney aşamalarında bana destek olan Arş. Gör. S. Tuna AKKAYA'ya teşekkür ederim.

Bu çalışma, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2022-02.BŞEÜ.01-01 numaralı proje ile desteklenmiştir.* Desteğinden dolayı Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri'ne (BAP) teşekkür ederim.

Doktora sürecim boyunca her zaman yanımda olan, sabrı ve desteğiyle bu çalışmamın tamamlanmasında en büyük paya sahip olan sevgili eşim Derya YÜNCÜLER'e, yoğun çalışma temposu içinde bana güç ve motivasyon kaynağı olan ikiz çocuklarım Demir ve Yiğit YÜNCÜLER'e, tüm hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, yaşamım boyunca her zaman varlıklarını yanımda hissettiğim annem, babam ve kardeşime sonsuz teşekkür ederim.

ÖZET

Tekstil takviyeli malzemelerin, 1980'li yıllardan itibaren betonarme ve yığma yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılması konusunda çeşitli araştırmalar yapılsa da uygulama ve araştırma sıklığı özellikle son yıllarda dikkate değer artış göstermiştir. Tekstil Takviyeli Harç (TRM) olarak adlandırılan inorganik harç matris bazlı kompozit malzeme, eski güçlendirme sistemlerine alternatif olarak yapısal güçlendirme alanında kullanılan yenilikçi bir malzemedir. Yapısal güçlendirmede kullanımı giderek artan TRM yöntemi ile geliştirilen bir güçlendirme detayının genel performans kriterlerinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için TRM şeritler ile beton yüzeyi arasındaki arayüzey performansının bilinmesi son derece önemlidir. Tez çalışması kapsamında, tekstil donatılı harç şeritler ile beton yüzeyi arasındaki yük–deplasman davranışının deneysel olarak araştırılması hedeflenmiştir. Deneysel çalışmada, özel olarak tasarlanmış bir deney düzeneği kullanılarak doğrudan çekme altında toplam 84 adet beton numune test edilmiştir. Çalışmada ele alınan temel değişkenler; beton dayanımı (C15 ve C30), TRM şerit genişliği (50 mm ve 100 mm), TRM bağ uzunluğu (150 mm, 300 mm ve 450 mm), ankraj sabitleme tipi (epoksi esaslı fan tipi ankraj, çimento esaslı harç ile sabitlenen fan tipi ankraj) ve ankraj yerleşim düzeni (ankraj yok, 1/1, 2/1, 3/1, 2/2 ve 3/2) olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, beton dayanımı, ankraj kullanımı, ankraj yerleşim düzeni ve TRM geometrisinin; TRM–beton kompozit sistemlerin yapısal performansını, deformasyon kapasitesini ve güvenilirliğini doğrudan etkileyen başlıca tasarım parametreleri olduğunu açıkça göstermektedir. Bu çalışma, TRM arayüzey mekaniğinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamakta ve betonarme yapıların güçlendirilmesine yönelik tasarım ve optimizasyon çalışmalarına önemli girdiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Ankraj, Arayüzey, Beton, TRM, Yük–Deplasman Davranışı.

ABSTRACT

Research on the use of textile-reinforced materials for strengthening reinforced concrete and masonry structural elements dates back to the 1980s; however, both experimental and practical applications have increased markedly, particularly in recent years. Textile Reinforced Mortar (TRM), an inorganic mortar-based composite material, has emerged as an innovative alternative to conventional strengthening systems in the field of structural retrofitting. For strengthening details developed using the TRM method, whose application in structural retrofitting has been steadily increasing, accurate evaluation of the overall performance criteria requires a thorough understanding of the interfacial behavior between TRM strips and the concrete substrate. Within the scope of this thesis, it is aimed to experimentally investigate the interfacial load–displacement behavior between textile-reinforced mortar (TRM) strips and concrete surfaces. In the experimental program, a total of 84 concrete specimens were tested under direct tension using a specially designed test setup. The main variables considered in the study were: concrete strength (C15 and C30), TRM strip width (50 mm and 100 mm), TRM bond length (150 mm, 300 mm, and 450 mm), anchor fixing type (epoxy-based fan-type anchors and fan-type anchors fixed with cement-based mortar) and anchor layout configuration (no anchors, 1/1, 2/1, 3/1, 2/2, and 3/2). The findings clearly demonstrate that concrete strength, the use of anchors, anchor layout configuration, and TRM geometry are the principal design parameters directly influencing the structural performance, deformation capacity, and reliability of TRM–concrete composite systems. This study contributes to a better understanding of TRM interface mechanics and provides significant input for the design and optimization of strengthening applications for reinforced concrete structures.

Keywords: Anchorage, Concrete, Interface, Load–Displacement Behavior, TRM.

İÇİNDEKİLER

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. TRM Tekstilleri.....	2
1.2. TRM Harçları.....	4
1.3. TRM Mekanik Davranışı.....	5
1.4. Çalışmanın Amacı.....	7
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	8
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	16
3.1. Malzeme Özellikleri.....	16
3.1.1. Karbon Tekstil.....	16
3.1.2. Tamir Harcı.....	17
3.1.3. Karbon Lifli Polimer (CFRP).....	18
3.1.4. Epoksi.....	18
3.1.5. Harç.....	19
3.2. Deney Elemanları.....	20
3.2.1. Deney Elemanlarının Tasarımı.....	20
3.2.2. Deney Elemanlarının İsimlendirilmesi.....	22
3.2.3. Deneysel Değişkenler.....	23
3.3. Deney Elemanlarının Üretimi.....	26
3.3.1. Beton Blokların Üretimi.....	26
3.3.2. Ankrajların Hazırlanması.....	27
3.3.3. Karbon Tekstil Şeritlerin Beton Yüzeğe Yapıştırılması.....	28
3.3.4. Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) Analizi İçin Yüzey Hazırlığı.....	31
3.4. Deney ve Ölçüm Düzenegi.....	33
3.4.1. Deney Düzenegi.....	33

3.4.2. Ölçüm Düzenegi.....	35
3.5. Yük ve Deplasman Değerlerinin Ölçülmesi	36
3.6. Performans İndekslerinin Hesaplanması.....	37
3.7. Göçme Modları.....	38
4. DENEY SONUÇLARI.....	41
4.1. Yük-Deplasman Eğrileri.....	41
4.2. Performans İndeksleri	42
4.2.1. Maksimum Yük	42
4.2.1.1. Ankrajsız (NA) Numunelerde Maksimum Yük.....	42
4.2.1.2. Epoksi (E) İle Sabitlenen Numunelerde Maksimum Yük.....	44
4.2.1.3. Harç (M) İle Sabitlenen Numunelerde Maksimum Yük.....	45
4.2.2. Maksimum Yükte Deplasman	46
4.2.2.1. Ankrajsız (NA) Numunelerde Maksimum Yükte Deplasman.....	46
4.2.2.2. Epoksi (E) İle Sabitlenen Numunelerde Maksimum Yükte Deplasman.....	48
4.2.2.3. Harç (M) İle Sabitlenen Numunelerde Maksimum Yükte Deplasman	49
4.2.3. Rijitlik	50
4.2.3.1. Ankrajsız (NA) Numunelerde Rijitlik.....	51
4.2.3.2. Epoksi (E) İle Sabitlenen Numunelerde Rijitlik	52
4.2.3.3. Harç (M) İle Sabitlenen Numunelerde Rijitlik	53
4.2.4. Maksimum Deplasman.....	55
4.2.4.1. Ankrajsız (NA) Numunelerde Maksimum Deplasman	55
4.2.4.2. Epoksi (E) İle Sabitlenen Numunelerde Maksimum Deplasman	57
4.2.4.3. Harç (M) İle Sabitlenen Numunelerde Maksimum Deplasman	58
4.2.5. Enerji Yutma Kapasitesi.....	60
4.2.5.1. Ankrajsız (NA) Numunelerde Enerji Yutma Kapasitesi	60
4.2.5.2. Epoksi (E) İle Sabitlenen Numunelerde Enerji Yutma Kapasitesi	62
4.2.5.3. Harç (M) İle Sabitlenen Numunelerde Enerji Yutma Kapasitesi	63
4.3. DIC Analiz Sonuçlarına Göre Birim Deformasyon ve Hasar Dağılımları.....	65
4.3.1. Ankrajsız Numunelerin Birim Deformasyon Dağılımları	65
4.3.2. Ankrajsız Numunelerin Hasar Dağılımları ve Göçme Modları.....	68
4.3.3. Epoksi Esaslı Ankrajlı Numunelerin Birim Deformasyon Dağılımları.....	69
4.3.4. Epoksi Esaslı Ankrajlı Numunelerin Hasar Dağılımları ve Göçme Modları.....	71
4.3.5. Harç Esaslı Ankrajlı Numunelerin Birim Deformasyon Dağılımları.....	74
4.3.6. Harç Esaslı Ankrajlı Numunelerin Hasar Dağılımları ve Göçme Modları.....	76

5. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI VE YORUMLANMASI	78
5.1. Maksimum Yük Değerlerinin Karşılaştırılması.....	78
5.2. Maksimum Yükte Deplasman Değerlerinin Karşılaştırılması.....	82
5.3. Rijitlik Değerlerinin Karşılaştırılması.....	85
5.4. Maksimum Deplasman Değerlerinin Karşılaştırılması	88
5.5. Enerji Yutma Kapasitelerinin Karşılaştırılması	92
5.6. Beton Sınıfının Etkisi	95
5.7. TRM Şerit Genişliğinin Etkisi.....	98
5.8. TRM Şerit Bağ Uzunluğunun Etkisi	100
5.9. TRM Şerit Bağ Yüzey Alanının Etkisi	102
5.10. Ankraj Kullanımının Etkisi	104
5.11. Ankraj Sabitleme Türünün Etkisi.....	107
5.12. Ankraj Yerleşim Düzeninin Etkisi	108
5.13. Deneysel Parametrelerin Görelî Etkisi	111
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	115
KAYNAKÇA	118
EKLER.....	121

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Karbon Grid (Mesh) Tekstilin Özellikleri.....	17
Tablo 3.2. Yapısal Tamir Harcının Özellikleri.....	17
Tablo 3.3. Ankraj Yapımında Kullanılan Karbon Lifli Polimerin (Tek Yönlü) Özellikleri ...	18
Tablo 3.4. Ankraj Sabitlemek İçin Kullanılan Epoksinin Özellikleri	19
Tablo 3.5. Ankraj Sabitlemek İçin Kullanılan Harcın Özellikleri.....	19
Tablo 3.6. C15 Deney Elemanlarının Özellikleri	24
Tablo 3.7. C30 Deney Elemanlarının Özellikleri	25
Tablo 3.8. 28 Günlük Küp Numunelerin Basınç Dayanım Değerleri (MPa)	27
Tablo 3.9. Göçme Modları.....	38
Tablo 5.1. Deneysel Parametrelerin Görelî Etkisi.....	112

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Grid Kumaşlar: (a) Tek Yönlü Grid Kumaş, (b) Çift Yönlü Grid Kumaş.....	3
Şekil 1.2. Yapay Lif ile Hazırlanmış Tekstiller: (a) Karbon, (b) Bazalt, (c) Cam, (d) PBO	4
Şekil 1.3. Doğal Lif ile Hazırlanmış Tekstiller: (a) Jüt, (b) Sisal, (c) Kenevir, (d) Keten.....	4
Şekil 1.4. Ana Lif Yönüne Paralel Tek Eksenli Çekme Durumu İçin İdealize Edilmiş Gerilme Şekil Değiştirme Eğrisi	6
Şekil 3.1. Ankrajsız Serinin Geometrik Detayları	20
Şekil 3.2. (a) 1/1, (b) 2/1, (c) 3/1 Ankrajlı Deney Elemanlarının Geometrik Detayları	21
Şekil 3.3. 2/2 ve 3/2 Ankrajlı Deney Elemanlarının Geometrik Detayları	22
Şekil 3.4. Beton Blokların Üretimi: (a), (b) Kalıp İmalatı; (c) Vibrasyon, (d) Kütleme, (e), (f) Hazırlanmış Deney Elemanları	27
Şekil 3.5. Ankrajların Hazırlanması: (a), (b) CFRP Kesilmesi; (c) Donatı Kesilmesi; (d), (e) Sarım ve Sabitleme; (f) Uç Kısımların Kesilmesi.....	28
Şekil 3.6. Tekstil Şeritler İçin Yüzey Hazırlığı: (a) Numaralandırma; (b) Taşlama; (c) Şerit ve Ankraj Konumlarının İşaretlenmesi; (d), (e) Delme İşlemi; (f) Temizleme İşlemi	29
Şekil 3.7. Tekstil Şeritlerin Beton Yüzeye Yapıştırılması: (a), (b) Epoksi ve Harç Hazırlanması; (c), (d) Ankrajların Sabitlenmesi; (e), (f) Harç Uygulaması.....	31
Şekil 3.8. DIC Analizi İçin Yüzey Hazırlığı: (a), (b) Taşlama; (c), (d), (e), Boyama; (f) Benekleme İşlemleri.....	32
Şekil 3.9. Deney ve Ölçüm Düzeneği Şeması.....	34
Şekil 3.10. Deney ve Ölçüm Düzeneği	34
Şekil 3.11. Performans İndekslerini Hesaplama Yaklaşımı	37
Şekil 4.1. NA-Maksimum Yük Değerleri	43
Şekil 4.2. E-Maksimum Yük Değerleri.....	44
Şekil 4.3. M-Maksimum Yük Değerleri	45
Şekil 4.4. NA-Maksimum Yükte Deplasman	46
Şekil 4.5. E-Maksimum Yükte Deplasman.....	48
Şekil 4.6. M-Maksimum Yükte Deplasman.....	49
Şekil 4.7. NA-Rijitlik	51

Şekil 4.8. E-Rijitlik	52
Şekil 4.9. M-Rijitlik	54
Şekil 4.10. NA-Maksimum Deplasman	56
Şekil 4.11. E-Maksimum Deplasman.....	57
Şekil 4.12. M-Maksimum Deplasman	59
Şekil 4.13. NA-Enerji Yutma Kapasitesi	61
Şekil 4.14. E-Enerji Yutma Kapasitesi	62
Şekil 4.15. M-Enerji Yutma Kapasitesi	64
Şekil 4.16. C15-Ankrajsız Numunelerin Birim Deformasyon Dağılımları	66
Şekil 4.17. C30-Ankrajsız Numunelerin Birim Deformasyon Dağılımları	67
Şekil 4.18. C15-Ankrajsız Numunelerin Hasar Dağılımları	68
Şekil 4.19. C30-Ankrajsız Numunelerin Hasar Dağılımları	69
Şekil 4.20. C15-Epoksi Esaslı Ankrajlı Numunelerin Hasar Dağılımları.....	72
Şekil 4.21. C30-Epoksi Esaslı Ankrajlı Numunelerin Hasar Dağılımları.....	73
Şekil 4.22. C15-Harç Esaslı Ankrajlı Numunelerin Hasar Dağılımları	77
Şekil 4.23. C30-Harç Esaslı Ankrajlı Numunelerin Hasar Dağılımları	78
Şekil 5.1. C15-Normalize Maksimum Yük Değerleri	79
Şekil 5.2. C30-Normalize Maksimum Yük Değerleri	80
Şekil 5.3. C15-Normalize Maksimum Yükte Deplasman Değerleri.....	82
Şekil 5.4. C30-Normalize Maksimum Yükte Deplasman Değerleri.....	84
Şekil 5.5. C15-Normalize Rijitlik Değerleri	86
Şekil 5.6. C30-Normalize Rijitlik Değerleri	87
Şekil 5.7. C15-Normalize Maksimum Deplasman Değerleri	89
Şekil 5.8. C30-Normalize Maksimum Deplasman Değerleri	91
Şekil 5.9. C15-Normalize Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri	93
Şekil 5.10. C30-Normalize Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri	94
Şekil 5.11. Beton Sınıfının Etkisi.....	96
Şekil 5.12. Şerit Genişliğinin Etkisi.....	98
Şekil 5.13. Şerit Bağ Uzunluğunun Etkisi	101

Şekil 5.14. Şerit Yüzey Alanının Etkisi	103
Şekil 5.15. Ankraj Kullanımının Etkisi.....	105
Şekil 5.16. Ankraj Sabitleme Türü Etkisi	107
Şekil 5.17. Ankraj Yerleşim Düzeninin Etkisi.....	109

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

D_{maks.}: Maksimum Yükteki Deplasman

D_{kopma}: Kopma Anındaki Deplasman

E_{cr}: Çatlak Oluşma Safhasındaki Elastite Modülü

f_c: Beton Basınç Dayanımı

P_{maks.}: Maksimum Yük

ε_{x-x}: x-x Eksenine Boyunca Birim Deformasyon

ε_{max}: Maksimum Uzama

σ_{cr,1}: İlk Çatlakların Oluşmaya Başladığı Andaki Çekme Gerilmesi

σ_{max}: Maksimum Gerilme

ACI: American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)

AR-Cam: Alkali Resistant Glass (Alkaliye Dayanıklı Cam)

C: Beton

CFRP: Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon Lifli Polimer)

DIC: Digital Image Correlation (Dijital Görüntü Korelasyonu)

E: Epoksi

EN: European Norm (Avrupa Normu)

FRCM: Fibre Reinforced Cementitious Matrix (Kumaş Donatılı Çimento Esaslı Matris)

FRP: Fibre Reinforced Polymer (Lif Takviyeli Polimer)

K: Rijitlik

L: Şerit Genişliği

LED: Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)

LVDT: Linear Variable Differential Transformer (Lineer Değişken Diferansiyel Transformatör)

M: Harç

NA: No Anchorage (Ankraj Yok)

PBO: PolybenzoxazoleFibres (Polipfenilenbenzobisoksazol)

RILEM: International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (İnşaat Malzemeleri, Sistemleri ve Yapıları Alanında Uluslararası Laboratuvarlar ve Uzmanlar Birliği)

ROI: Region of Interest (İlgi Bölgeleri)

TRC: Textile Reinforced Concrete (Tekstil Takviyeli Beton)

TRM: Textile Reinforced Mortar (Tekstil Takviyeli Harç)

W: Bağ Uzunluğu

1. GİRİŞ

Mevcut yapıların taşıyıcı sistem performanslarının iyileştirilmesine yönelik güçlendirme uygulamaları, son yıllarda yapı stokunun büyük bir bölümünü oluşturan betonarme yapıların çeşitli nedenlerle yetersiz hale gelmesiyle birlikte daha da önem kazanmıştır. Bu ihtiyaç; yapı elemanlarında çevresel etkilere bağlı zamanla meydana gelen malzeme bozulmaları, bakım ve onarım eksiklikleri ile değişen ve güncellenen yapı yönetmeliklerinin gerektirdiği performans standartlarının karşılanamaması gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, inşaat maliyetlerindeki artış, mevcut yapıların yıkılarak yeniden inşa edilmesini ekonomik açıdan sürdürülebilir bir çözüm olmaktan uzaklaştırmakta; dolayısıyla güçlendirme uygulamaları hem teknik yeterlilik hem de maliyet etkinliği açısından daha tercih edilebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Deprem tehlikesinin yüksek olduğu coğrafyalarda deprem performansı düşük çok sayıdaki yapının güçlendirilmesi gerekliliği, söz konusu yapıların kısa sürede, içeride yaşayan insanları minimum düzeyde rahatsız ederek, düşük maliyetli ve çok yüksek düzeyde uzmanlık gerektirmeyecek bir işçilik ile güçlendirme çalışmalarının yapılması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Yürütülen çalışmalar, klasik güçlendirme tekniklerinin (püskürtme beton, harç enjeksiyonu, çelik gergiler ile öngerilme uygulaması vb.) yerine yeni güçlendirme detaylarının geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmış ve kısa sürede, kolay uygulanabilir ve ekonomik malzemelerin kullanıldığı güçlendirme detaylarının geliştirilmesi konusundaki araştırmalar artış göstermiştir (Mercimek vd., 2021).

1980'li yıllardan itibaren lif takviyeli polimerler (FRP) ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmaya başlanmış olup 2000'li yıllardan itibaren güçlendirme tekniği olarak yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu durum, FRP malzemelerin yüksek mukavemet/ağırlık oranı, korozyon direnci, kolay ve hızlı uygulanabilirlikleri ile yapı geometrisinde minimum değişiklik gerektirmesi gibi avantajlı özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Ancak, FRP güçlendirme tekniğinin bazı dezavantajları da bulunmaktadır; bu dezavantajlar esas olarak epoksi reçinelerin kullanımına bağlıdır. Bunlar arasında yüksek maliyet, yüksek sıcaklıklarda zayıf performans, yangına karşı zayıf direnç, ıslak yüzeylere uygulanamama, beton veya yığma yapı malzemeleriyle uyumsuzluk gibi sorunlar yer almaktadır (Koutas vd.,2019). Bu sorunları gidermek amacıyla epoksi esaslı yapıştırıcı yerine inorganik bir harç matrisi kullanılarak oluşturulan yenilikçi kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Bu yeni sistemler literatürde Tekstil Takviyeli Harç (TRM) veya Tekstil Takviyeli Beton (TRC) olarak

adlandırılmaktadır; ABD’de ise benzer malzemeler Kumaş Donatılı Çimento Esaslı Matris (FRCM) sistemi adıyla anılır (Koutas vd., 2019).

TRM, açık ağ (mesh) formunda yüksek mukavemetli lif tekstillerinin çimento veya hidrolik kireç esaslı inorganik harç içerisine gömülmesiyle oluşan kompozit bir güçlendirme malzemesidir. Bu sistemler düşük maliyetli, uygulayıcı açısından kolaylık sağlayan, yangına dayanıklı, mevcut beton ve yığma alt tabakalar ile uyumlu olup nemli yüzeylere ve düşük sıcaklıklara sahip ortamlara dahi uygulanabilir özelliktedir. Bu sayede TRM, epoksi esaslı FRP sistemlerin kısıtlı kaldığı tarihi yığma yapılarda veya yangın riski bulunan ortamlarda da avantaj sağlayan bir dış takviye yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca TRM bileşenlerinin inorganik olması, yüksek sıcaklık gibi ekstrem koşullarda aderans performansını FRP’ye göre üstün kılmaktadır; örneğin epoksi bağlayıcıların yumuşayarak dayanım yitirdiği sıcaklıklarda, çimento esaslı harçlı TRM sistemleri yapışma özelliğini koruyabilmektedir (Koutas vd., 2019). Ancak TRM sistemlerinde lif–matris arayüzündeki erken sıyrılma, liflerin kopma dayanımına ulaşmasını engellediğinden, teorik olarak aynı donatı miktarına sahip FRP’ye göre biraz daha düşük nihai taşıma gücü elde edildiği de bazı çalışmalarda belirtilmiştir.

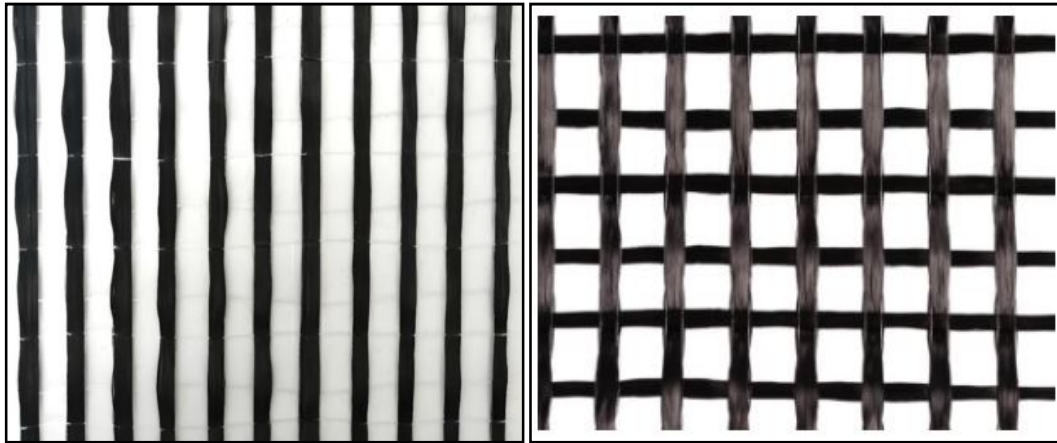
Son yıllarda TRM sistemlerinin betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılması üzerine önemli araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar kapsamında; betonarme yapı elemanlarının eğilme davranışının iyileştirilmesi, kesme dayanımının artırılması, betonarme kolonların sargılanarak dayanımlarının yükseltilmesi, betonarme kolonların sismik performansının güçlendirilmesi ve betonarme döşemelerin eğilme kapasitesini artırma konularına odaklanılmıştır. Ancak TRM kompozitlerinin beton yüzeylerle olan arayüzey performans davranışına yönelik yapılan çalışmaların sayısı görece sınırlı kalmıştır. Oysa TRM sistemlerinin beton ile arasındaki arayüzey aderansının detaylı olarak incelenmesi son derece önemlidir. Bu incelemeler, tekstil donatılarından harca ve nihayetinde beton alt tabakasına yük aktaran karmaşık mekanizmaların daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu alanda yapılacak olan detaylı incelemeler, güçlendirme uygulamalarında kullanılacak tasarım modellerinin oluşturulabilmesi adına temel bir aşama olarak değerlendirilmektedir.

1.1. TRM Tekstilleri

TRM, açık ağ formunda yüksek mukavemetli lif tekstillerinin çimento veya kireç esaslı inorganik harç (matris) içerisine gömülmesiyle oluşan kompozit bir güçlendirme sistemidir.

Tekstil malzemeler doğal veya yapay liften yapılmış ipliklerden; dokuma, örme, yapışma gibi yöntemlerle elde edilen son ürün veya malzemedir. İplik, yapay veya doğal liflerin belirli bir büküm ve doğrultuda eğilerek uzun, ince ve sürekli bir form kazanmasıyla elde edilen, tekstil yüzeylerinin üretiminde temel ham madde olarak kullanılan yapısal bir elemandır. Kumaş üretiminde çözü ve atkı, ipliği tekstil kumaşlarına dönüştürmek için dokumada kullanılan iki temel bileşendir. Dokuma kumaşı oluşturan ipliklerden dikey olanına atkı, yatay olanına da çözü denilmektedir. Kenara paralel çözü iplikleri tezgâhta gergin bir şekilde sabit tutulurken, kenara dik atkı ipliği çözü ipliğinin içinden (üstünden ve altından) geçirilir.

Grid (mesh) kumaşlar, genellikle güçlendirme ve restorasyon alanında kullanılan, iplikler arasında hücre boşluklarının bulunduğu ağ yapısına sahiptirler. Tek (Şekil 1.1.a) ve çift yön (Şekil 1.1.b) grid kumaşlar olmak üzere ikiye ayrılır. Karbon, bazalt ve cam gibi yüksek performanslı çözü (0°) ve atkı (90°) ipliklerinin arasında boşluk bırakılarak dokunur. Farklı hücre boşluk alanlarında karbon, bazalt ve cam elyafın birlikte kullanılmasıyla hibrit kumaş olarak da üretilir (Spinteks, 2022).

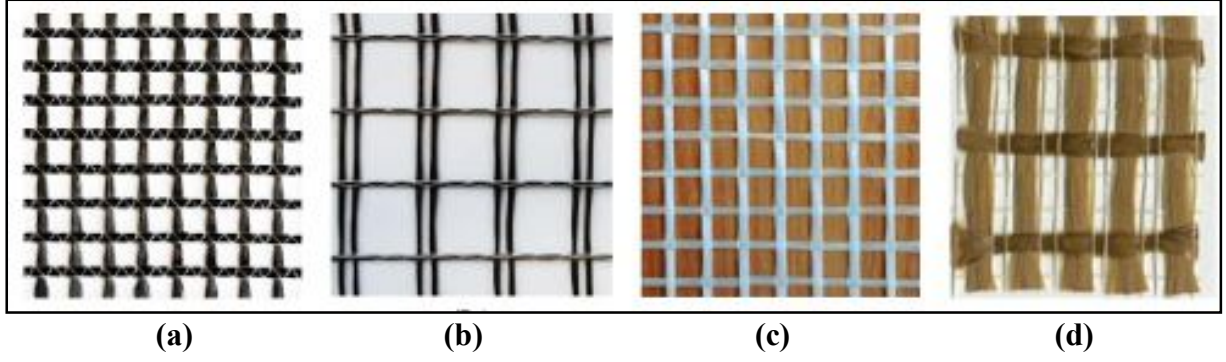


(a)

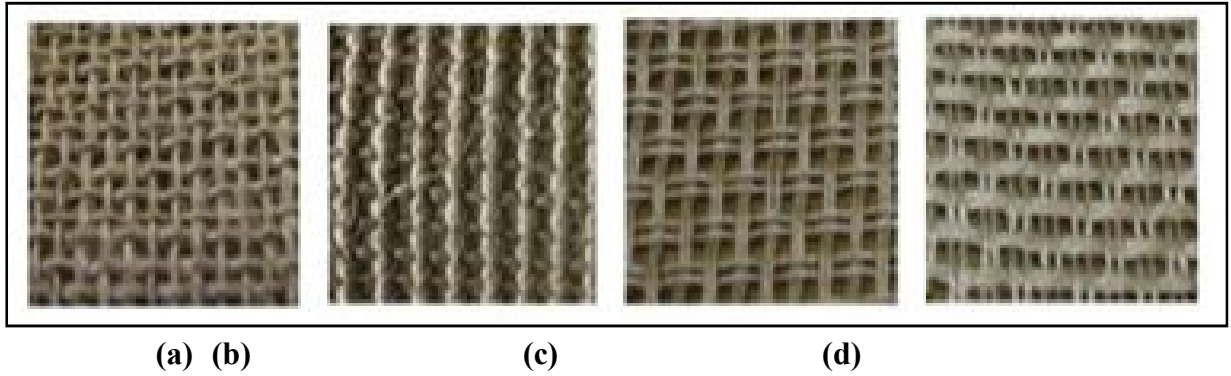
(b)

Şekil 1.1. Grid Kumaşlar: (a) Tek Yönlü Grid Kumaş, (b) Çift Yönlü Grid Kumaş (Spinteks, 2022)

Yapısal tekstillerin üretiminde çoğunlukla karbon, bazalt, cam ve polipfenilenbenzobisoksazol (PBO) vb. yapay lifler kullanılır (Şekil 1.2). Tekstiller, genellikle lif demetlerinin iki yönde ızgara şeklinde düzenlenmesiyle üretilir, ancak lif demetlerinin tek doğrultuda, ya da ikiden fazla doğrultuda yönlendirildiği çok doğrultulu tekstiller de mevcuttur. Yapısal tekstil üretiminde jüt, sisal, keten, kenevir (Şekil 1.3) gibi dokunmuş doğal lifler de kullanılmaktadır (Codispoti vd.,2015).



Şekil 1.2.Yapay Lif ile Hazırlanmış Tekstiller: (a) Karbon, (b) Bazalt, (c) Cam, (d) PBO(Raof, 2017)



Şekil 1.3. Doğal Lif ile Hazırlanmış Tekstiller: (a) Jüt, (b) Sisal, (c) Kenevir, (d) Keten (Codispoti vd., 2015)

TRM tekstillerinin kompozitin davranışına etkisi; tekstilin cinsi, kullanılan liflerin miktarı, mekanik özellikleri, tekstilin dokuma biçimi, tekstildeki aralıkların matrisin nüfuzuna izin vermesi ve matris ile bağlanma düzeyi, dış etkilere dayanıklılığına bağlıdır. Ayrıca lifler, standart tekstil makinelerinde düşük bir maliyet ile TRM takviye tekstiline dönüştürülebilmeli ve tekstil kolay işlenebilir olmalıdır (Güneş, 2011).

Tekstil takviyeli harç esaslı kompozitlerin performansı, kullanılan liflerin türü, miktarı ve yönleneşine doğrudan bağlıdır. Bu nedenle tekstili oluşturan liflerin belirli mekanik özelliklerinin (çekme dayanımı, elastisite modülü, şekil değiştirme vb.) kullanım amacına ve kompozitin gereksinimlerine göre bilinmesi gereklidir. Ayrıca kompozit yapının istenilen performansı gösterebilmesi için, tekstil ve matris arasında yüksek aderans sağlanmalıdır. Bu yüzden kullanılan tekstil malzemesi kadar harç malzemesi de önemlidir.

1.2. TRM Harçları

TRM kompozit sistemlerinde matris fazını oluşturan ince taneli harç, gömülü takviye tekstilini çevresel etkilere karşı korur ve kompozit ile uygulandığı yüzey arasında gerilme transferini sağlayarak yük taşıma kapasitesine katkıda bulunur. Bu harçlar genellikle çimento veya kireç esaslı karışımlardan oluşur. Harç ile tekstil arasındaki yapışmayı güçlendirmek ya

da harcın işlenebilirliğini arttırmak amacıyla organik esaslı polimer katkıları harç karışımına eklenebilir. Organik polimer bileşenleri, işlenebilirlik, priz süresi ve mekanik özelliklerin istenilen seviyede olması için zaman zaman kullanılmaktadır (ACI, 2013).

Tekstil takviyeli harç esaslı kompozitlerin performansı, kullanılan harç malzemesinin mekanik özelliklerine de bağlıdır. TRM kompozitleri için tasarlanan matris malzemesi yük aktarımı için yeterli mekanik özelliklere sahip olmalı, tekstile iyi nüfuz etmeli ve tekstil matris arayüzünde yeterli bağlanmayı sağlamalı, tekstil ve uygulama yüzeyi ile termal ve kimyasal uyumluluğu olmalı, ısı ve yangına dayanıklı, işlenebilirlik ve maliyet açısından avantajlı olmalıdır.

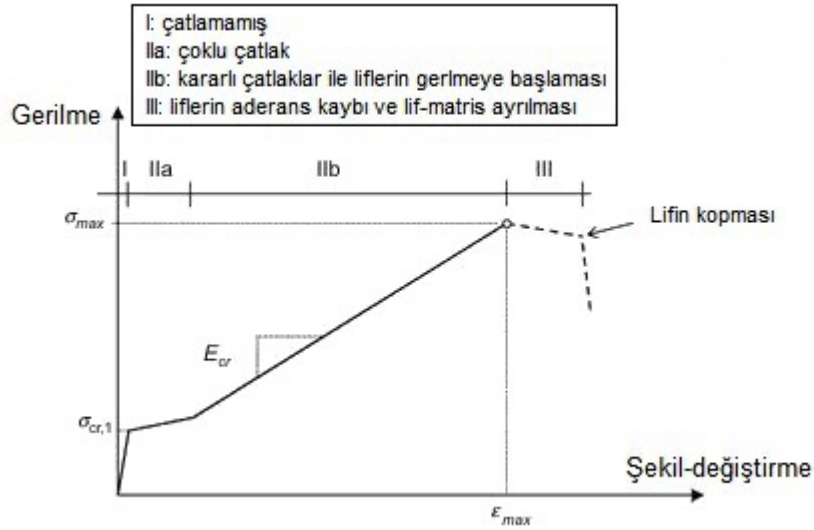
1.3. TRM Mekanik Davranışı

Beton yüzeyine harçla yapıştırılan TRM sistemlerinin yapısal güçlendirmedeki etkinliği büyük ölçüde TRM ile alt yüzey arasındaki aderans ve tekstil lifleri ile harç arasındaki bağ davranışına bağlıdır. Güçlendirme sonrası yük aktarımının başarılı olabilmesi için TRM ile beton arasındaki bağ dayanımı kritik önem taşır. Ayrıca tekstil lifleri ile harç arasındaki kenetlenme de büyük ölçüde etkilidir. TRM sistemlerinde, lifler çekme yüklerinin taşınmasında ve sistemin rijitliğinin artırılmasında temel rol oynarken, matris ise lifler arasında yük transferini sağlar ve aynı zamanda lifleri çevresel etkilere karşı korur. Tekstil donatılar ile harç arasındaki kompozit davranış, harcın tekstil açıklıklarına mekanik olarak kenetlenmesi sayesinde elde edilir. Lif-matris arayüzündeki aderansın tam anlamıyla sağlanmaması bileşenler arasında göreceli kaymaların meydana gelmesine sebep olabilir.

TRM sistemleri, FRP sistemlerinin aksine, doğrusal elastik bir malzeme gibi davranmaz. Harç tabakası, beton yüzey ile tekstil donatı arasında gerilme transferini sağlar; uygulanan çekme kuvvetiyle birlikte arayüzeyde kayma gerilmeleri gelişir ve belirli bir yük seviyesine kadar kompozit birlikte çalışır. Tipik olarak, düşük yük seviyelerinde TRM ile beton arayüzü kaymasız (tam yapışma) durumda olup yük-taşıyıcı sistem yüksek başlangıç rijitliğiyle davranır. Şekil 1.4'te gösterildiği gibi, ana lif yönüne paralel aksel çekme altında gösterdiği tepki, başlangıçta doğrusal elastik bir davranışla (I: çatlamamış matris) başlar. Yük arttıkça harçta ilk çatlaklar oluşur ve aderans eğrisinde rijitliğin azalmasına yol açan doğrusal olmayan bir aşamaya geçilir. Nihai kapasiteye ulaşmadan önce harç boyunca çoklu çatlakların (IIa: çoklu çatlak) oluştuğu ve tekstil boyunca gerilmelerin dağıldığı gözlenir. Bu çatlaklanma kararlı hale (IIb) geldikten sonra, lifler gerilmeye başlar ve yükü taşırlar; ancak zamanla aderanslarını kaybeder, matristen ayrılır (pull out) ve nihayetinde koparlar (III). Sonrasında

aderans mekanizması, çeşitli kopma modlarına bağlı olarak ani veya kademeli bir gerilme düşüşü sergiler.

Gerilme-Şekil değiştirme eğrisinde σ_{max} maksimum gerilme, $\sigma_{cr,1}$ ilk çatlakların oluşmaya başladığı andaki çekme gerilmesi, ϵ_{max} maksimum uzama ve E_{cr} çatlak oluşma safhasındaki elastisite modülünü ifade etmektedir. Bu değerler deneysel araştırmalar temelinde elde edilir (Triantafillou, 2016).



Şekil 1.4. Ana Lif Yönüne Paralel Tek Eksenli Çekme Durumu İçin İdealize Edilmiş Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi (Triantafillou, 2016)

Yapılan çalışmalar sonucunda çeşitli göçme modları gözlemlenmiştir. Bunlar; yüzeyin kırılması ile birlikte ayrılma, TRM tabakasının yüzeyden ayrılması, tekstil ile matris arasındaki arayüzeyde meydana gelen ayrılma, tekstil liflerinin matris içinden sıyrılması ve tekstil liflerinin kopmasıdır (De Felice vd., 2018). Yapılan bazı çalışmalarda genel olarak göçme modunun tekstil liflerinin matris içerisinden sıyrılması ve TRM tabakasının deney elemanı yüzeyinden ayrılması şeklinde olduğu rapor edilmiştir (Raof vd., 2017). Tekstil liflerinin matris içerisinden sıyrılması durumunda, tekstil donatıyı oluşturan lif demetleri harç içerisinden sürtünme ile sıyrılarak çıkmaya başlar; bu süreçte yük taşıma kapasitesi kademeli olarak düşer ancak tamamen sıfıra inmez. Liflerle harç arasındaki sürtünme ve kenetlenme, bir miktar artık dayanım sağlayarak sistemin ani kırılma göçmesini engeller. Nitekim tek katmanlı veya düşük donatı oranlı TRM güçlendirmelerinde genelde bu şekilde artıksız dayanımlı sünek bir yapışma-kayma davranışı gözlemlenmiştir. Yüzeyden ayrılma durumunda ise, harç-tabaka ile beton alt tabaka arasındaki aderans aniden kopar ve TRM kaplaması betondan tamamen ayrılır; bu tip kopma genellikle yükün tepe değerine ulaştığı anda meydana gelir ve yük taşıma kapasitesi keskin biçimde sıfıra düşer. Çok katmanlı veya

yüksek dayanımlı harç kullanılan TRM uygulamalarında arayüz gerilmeleri daha yüksek olup, beton yüzeyinden ayrılma (ya da beton koruma tabakasının soyulması) şeklinde gevrek bir göçme görülebilir. Bu durum, epoksi yapıştırıcılı FRP sistemlerinin tipik beton kaplama kopması moduna benzerlik göstermektedir. Öte yandan, TRM sistemlerinde liflerin harç içerisinde sıyırılması modu daha yaygın olup, bu sayede FRP'ye kıyasla daha tok ve sünek bir aderans davranışı elde edilebilir (Raouf vd., 2017).

1.4. Çalışmanın Amacı

TRM ile beton arasındaki aderansın ve davranışın incelenmesi, TRM'nin bir güçlendirme malzemesi olarak etkinliğinin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. TRM ile beton arasındaki aderans davranışını etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında; beton dayanım sınıfı, TRM bağ uzunluğu ve genişliği, ankraj kullanımı, ankraj sabitleme türü ile ankraj yerleşim düzeni gibi değişkenler, TRM ile beton arasındaki aderans performansını ve sistem davranışını incelemek amacıyla seçilmiştir. Bu parametreler, TRM güçlendirme sisteminin yük aktarım mekanizması ve arayüzey davranışı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

Yapılan çeşitli araştırmalar ve çalışmalar, TRM sistemlerinin beton yüzeylerle olan bağ davranışındaki karmaşıklığa işaret etmekte ve güçlendirme uygulamalarına yönelik güvenilir ve optimize edilmiş tasarım modellerinin geliştirilebilmesi için kapsamlı araştırmaların gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, mevcut literatürde özellikle TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, beton basınç dayanımı ve ankraj tipi gibi kritik parametrelerin arayüzey aderans performansı üzerindeki hem bireysel hem de etkileşimli etkilerini sistematik olarak değerlendiren çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

Gerçekleştirilen deneysel çalışma kapsamında TRM ve beton arasındaki yük-deplasman davranışının incelenmesi, tekstil liflerinden matrise ve buradan beton alt tabakaya doğru gerçekleşen karmaşık yük aktarım mekanizmasının daha iyi anlaşılmasını amaçlamaktadır. Elde edilen deneysel sonuçlar ve gözlemlenen göçme modları karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek TRM güçlendirme sisteminin yapısal performansına yönelik daha gerçekçi ve uygulanabilir bir yaklaşım geliştirilmesi hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Betonarme yapıların güçlendirilmesine ilişkin çeşitli durumlarda TRM'den yararlanmak için eğilme, betonarme elemanların kesme güçlendirmesi, betonarme kolonların sismik güçlendirmesi, dolgulu betonarme çerçevelerin sismik güçlendirmesi gibi önemli araştırma çalışmaları yapılmıştır. TRM kompozitlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar genellikle küçük ölçekli numuneler üretilerek gerçekleştirilir. Literatürde genellikle; aksenal çekme, eğilme, kayma ve yüzeye yapışma testleri kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda; tekstil şerit uzunluğu ve genişliği, tekstil katman sayısı, tekstil cinsi, matris katman kalınlığı ve cinsi, ankraj yerleştirilmesi şeklinde değişkenler kullanılmış ve bu değişkenlerin TRM mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Literatürde, elemanlara çekme testinin yapıldığı birçok çalışma bulunmakla beraber çekme etkisinde yapışma arayüzey davranışının araştırıldığı, TRM ile beton arasındaki bağ davranışı üzerine yapılan çalışmaların sayısı nispeten sınırlı kalmıştır. İncelenen çalışmalarda görüldüğü üzere TRM ile güçlendirilmiş birleşim bölgelerinde ayrılma genellikle beton yüzeyinden değil, kompozit katman içinde aderans kaybı ile oluşmuştur. Özellikle, bu yapışma kaybı genellikle lif-matris arayüzeyinde kayma şeklinde gerçekleşir; oysa FRP sistemlerinde bu ayrılma genellikle beton-yapıştırıcı arayüzeyinde meydana gelir.

Bournas vd. (2007), boyuna donatılarının burkulması nedeniyle kapasitesi sınırlı olan betonarme kolonların sarılarak güçlendirilmesinde, TRM kaplamalarının etkinliğini bu çalışmada deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan basınç testleri, TRM kaplamalarının, boyuna donatıların burkulmasını geciktirerek basınç dayanımı ve şekil değiştirme kapasitesinde önemli artış sağladığını göstermiştir. TRM kaplamanın hacimsel oranının artması dayanım ve şekil değiştirme kapasitesinde artış sağlamıştır. FRP kaplamalarla karşılaştırıldığında, bu çalışmada kullanılan TRM kaplamaların, dayanım ve şekil değiştirme kapasitesini artırma açısından yaklaşık %10 oranında daha az etkili olduğu tespit edilmiştir. Neredeyse gerçek boyutlu kolonlar üzerinde döngüsel tek eksenli eğilme altında yapılan testler, TRM kaplamalarının, donatı burkulmasını geciktirerek, kötü detaylandırılmış eski tip betonarme kolonların döngüsel şekil değiştirme kapasitesi ile enerji sönümlenme yeteneğini artırmada son derece etkili ve kolonların sarılarak güçlendirilmesi için umut verici bir çözüm olduğunu göstermiştir.

D'Ambrisi vd. (2013), PBO liflerden oluşan FRCM sistemlerinin beton yüzeylerle aderansını çift kayma testleriyle inceleyerek, bağ uzunluğunun, lif katman sayısının ve lif

kesit özelliklerinin aderans dayanımı üzerindeki etkilerini ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar, lif-matris arayüzünde belirgin bir kayma gerçekleşmesinin ardından, aderans kaybı mekanizmasının meydana geldiğini, ayrıca etkili ankraj uzunluğunun belirlenebildiğini ve bunun tek tabakalı uygulamalar için yaklaşık 250–300 mm olduğunu tespit etmiştir. Bu bulgular, FRCM türü güçlendirme uygulamalarında tasarım modellerinin geliştirilmesi için gerekli olan yerel aderans–kayma (bond-slip) ilişkilerinin oluşturulmasına önemli bir temel sağlamaktadır.

Sneed vd. (2014), PBO-FRCM şeritlerinin betona yapıştırılması durumunda, göçmenin lif demetlerinin çevresindeki harç matrisinden kayarak ayrılmasıyla gerçekleştiğini ve beton yüzeyinde herhangi bir gözle görülür hasar oluşmadığını gözlemlemişlerdir.

Tran vd. (2014), PBO-FRCM'nin betona aderansını incelemişler ve yerel aderans gerilmesi–kayma ilişkisini elde etmek için tek taraflı çekme testleri kullanarak tekstil için etkili bir yapışma uzunluğu tanımlamışlardır. Bu optimum yapışma uzunluğunun ötesinde, fazladan kumaş gömülmesinin, aderans gerilmeleri bu etkili uzunluk boyunca tamamen aktarılmadığı için maksimum yük kapasitesini arttırmadığını belirlemişlerdir. Yapışma uzunluğunun belirli bir eşik değerin ötesine artırılmasının, yük taşıma kapasitesinde sınırlı ilave artışlar sağladığını gözlemlemişlerdir. Bu bulgu, TRM şeritleri için etkili yapışma uzunluğu (effective bond length) kavramını ifade etmekte olup, tasarım aşamasında kritik eşik değerlerin belirlenmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

Awani vd. (2015), çift kesme deneyleri ile harç esaslı FRCM sistemlerini epoksi esaslı sistemlerle kıyaslayarak harç esaslı numunelerde kumaşın matristen sıyrılmasının belirleyici hasar türü olduğunu ve epoksi esaslı sistemlere kıyasla daha düşük bağ gerilmelerine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Harç esaslı numunelerin göçme öncesinde çatlama davranışı sergilediğini, epoksi esaslı sistemde ise çatlama oluşmadan kumaşın ani kopması ile gevrek bir şekilde göçtüğünü tespit etmişlerdir.

D'Antino vd. (2015), FRCM kompozitlerin beton yüzeyle arasındaki aderans davranışını inceleyerek farklı fiber türlerinin (karbon, cam ve çelik lifler) ve çimento esaslı matrislerin arayüz performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Tekil bindirme doğrudan kesme deneyleriyle gerçekleştirilen bu çalışmada, farklı bağ uzunlukları ve kompozit türleri değerlendirilmiştir. Deneysel bulgulara göre, karbon ve cam lifli FRCM kompozitlerde hasar genellikle liflerin matris içerisinden sıyrılarak gerçekleşirken, çelik lifli FRCM kompozitlerde hasar kompozitin beton alt tabakasından tamamen ayrılması şeklinde ortaya çıkmıştır.

Özellikle karbon lifli kompozitlerin bağ performansı açısından, kullanılan matris türüne bağlı olarak farklı davranışlar sergilediği ve daha yüksek mukavemetli matrislerin daha iyi bağ performans gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, cam lifli FRCM kompozitlerin hasar sürecinde lif demetleri arasında farklı matris emilimi nedeniyle teleskopik davranış olarak adlandırılan bir mekanizmanın devreye girdiği tespit edilmiştir. Bu çalışma, FRCM kompozitlerin beton yüzeyleri ile arasındaki karmaşık kuvvet aktarım mekanizmasını ve fiber-matris etkileşiminin kritik rolünü ortaya koyarak, söz konusu kompozitlerin etkin kullanımına dair tasarım yaklaşımlarının oluşturulması için önemli bilgiler sunmaktadır.

Ombres (2015), tarafından yürütülen tekil bindirme kesme deneylerinde, PBO lifli FRCM sistemlerinin beton ile arasındaki aderansın esas olarak lif-matris arayüzeyinde bozulduğu, bu durumun ise bağ uzunluğu, tekstil katman sayısı ve yüksek sıcaklık gibi çevresel koşullardan etkilendiği ortaya konmuştur.

Raouf vd. (2016), TRM ile beton yüzeyler arasındaki aderans davranışını deneysel olarak incelemiş ve bağ uzunluğu, TRM katman sayısı, beton yüzey hazırlığı, beton basınç dayanımı, tekstil kaplaması ve ankrajlama yöntemlerinin aderans–kayma (bond–slip) davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda, bağ uzunluğunun 200-300 mm’yi aşmasının bağ dayanımını sınırlı düzeyde artırdığı, TRM katman sayısının artmasıyla aderans kapasitesinin doğrusal olmayan şekilde yükseldiği ve katman sayısının artmasının aynı zamanda göçme modunu değiştirdiği belirtilmiştir. Ayrıca, tekstillerin epoksi reçinesiyle kaplanmasının bağ dayanımını önemli ölçüde artırdığı ve TRM katmanlarının uç bölgede sarılarak ankrajlanmasının maksimum yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde iyileştirdiği vurgulanmıştır.

Koutas ve Bournas (2017), çalışmalarında iki yönlü betonarme döşemelerin eğilme kapasitesini artırmak amacıyla TRM uygulamasını deneysel olarak incelemişlerdir. İncelenen parametreler arasında TRM katman sayısı, TRM yerleşim düzeni, tekstil lif malzemesi (karbon ve cam lifleri) ile döşemedeki ilk çatlakın rolü yer almaktadır. Bu amaçla, altı büyük ölçekli betonarme döşeme üretilmiş ve dört nokta altında monotonik yüklemeye kırılmaya kadar test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, TRM’nin; çatlama öncesi rijitliğini, çatlama yükünü, çatlama sonrası rijitliğini ve nihayetinde iki yönlü betonarme döşemelerin eğilme kapasitesini önemli ölçüde artırdığı ve TRM yerleşim düzeninin önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir.

Raouf ve Bournas (2017), çalışmalarında TRM ve FRP sistemlerinin betonla olan aderansını farklı sıcaklıklarda karşılaştırmaktadır. Numunelere farklı sıcaklık ortamlarında çift eksenli kayma testi uygulamışlardır. Sonuçlar genel olarak TRM sistemlerinin yüksek sıcaklıkta mükemmel performans sergilediğini göstermiştir. Sürekli durum testlerinde, TRM numuneleri 400°C'ye kadar aderans dayanımının ortalama %85'ini korumuşken, FRP numunelerinde bu oran 150°C'de yalnızca %17 olmuştur. Geçici test koşullarında da TRM sistemleri hem uygulanan yükü koruma süresi hem de kopmadan önce ulaşılan sıcaklık açısından FRP sistemlerine göre üstün performans sergilemiştir.

Raouf vd. (2017), çalışmalarında TRM ve FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme performansını karşılaştırmışlardır. Değişken olarak TRM/FRP katman sayısı, tekstil yüzey durumu (kaplamalı ve kaplamasız), tekstil lif malzemesi çeşidi (karbon, bazalt, cam lifi), ankraj varlığı kabul edilmiştir. Betonarme kirişler dört noktalı eğilme deneyiyle test edilmiştir. TRM'nin FRP'ye kıyasla betonarme kirişlerin eğilme kapasitesini artırmada daha zayıf kaldığı, TRM katman sayısının birden üçe çıkarılmasıyla TRM'nin etkinlik oranının FRP'ye kıyasla daha arttığı, tekstilin kaplanmasıyla TRM etkinliğini artırdığı, kullanılan farklı tekstil malzemelerinin farklı eğilme kapasitesi artışlarına neden olduğu, ankraj eklenmesinin güçlendirilmiş kirişlerin performansına sınırlı etki yaptığı sonuçlarına varmışlardır.

Younis vd. (2017), Karbon-TRM, PBO-TRM ve Cam-TRM numunelerini tek eksenli çekme yükü altında test etmişler ve her bir numune için kopma anındaki ortalama çekme gerilmesi ve şekil değiştirme değerlerini raporlayarak gerilme-şekil değiştirme diyagramlarını çizmişlerdir. PBO-TRM numunesinin daha yüksek gerilme değerleri gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Caggegi vd. (2018), deneysel çalışmalarında homojen bir yüzeye uygulanan bir bazalt TRM sisteminin etkili aderans (yapışma) uzunluğunu belirlemeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntem sayesinde yer değiştirme ve birim deformasyon alanları tanımlanabilmiş ve testler sırasında gözlemlenen ayrılma (debonding) olayları daha iyi şekilde açıklanabilmiştir. Bazalt TRM güçlendirme sistemiyle ilişkili etkili aderans uzunluğu yaklaşık 125 mm bulunmuştur. DIC tekniğinin kullanılması, hasarın gelişiminin ayrıntılı bir şekilde incelenmesine ve test sırasında gerilme aktarım bölgesinin konumuna dair daha fazla bilgi elde edilmesine olanak tanımıştır.

Dalalbashi vd. (2018), çalışmalarında; elyafın gömülü uzunluğunun ve yerleşim düzeninin, elyaf-harç aderans davranışı üzerindeki etkisini derinlemesine inceleyen deneysel ve analitik bir çalışma sunmaktadırlar. Elde edilen sonuçlara dayanarak, tek ve çift yönlü donatı ızgaralarından oluşan TRM kompozitler için bağ-kayma yasaları önermektedirler. Ayrıca, çekip çıkarma testleri ile geleneksel tek yüzeyli kayma aderans testleri (single-lap shear bond tests) sonuçları karşılaştırılarak, bu iki test yöntemi arasındaki benzerlikler ve farkları ortaya koymuşlardır. Tek yüzeyli kayma testlerindeki gerilme durumu, TRM kompozitin gerçek kullanım koşullarına daha yakın olmakla birlikte, deneysel sonuçların yorumu dikkatli şekilde yapılmalıdır. Buna karşın, çekip çıkarma testleri, elyaf-harç bağ davranışının karakterizasyonu için daha uygun olup, sayısal modellemelerde kullanılmak üzere bağ-kayma yasalarının çıkarılması açısından önemli bir fırsat sunmaktadır.

Tetta vd. (2018), hasar türlerine göre sınıflandırılmış güvenilir veriler kullanarak TRM kaplamasının toplam kesme dayanımına katkısını hesaplamaya yönelik bir tasarım modeli geliştirmişlerdir. Harç içinden liflerin kayması, kaplamanın beton yüzeyden ayrılması, beton örtüsünün soyulması, TRM kaplamasının kırılması şeklinde hasar türleri tanımlanmış ve her bir hasar türü için, TRM kaplamasının betonarme kirişin toplam kesme dayanımına katkısını hesaplamaya yönelik tasarım formülleri önermişlerdir.

Haitham ve Kaish (2020), TRM'nin, dairesel kesitli betonarme kolonların sarılarak güçlendirilmesinde etkinliğini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneylerinde farklı sarma tasarımlarına sahip cam elyaf TRM ile sarılan numuneleri basınç yükü altında test etmişlerdir. Araştırmalarının sonucunda, TRM ile sarılan dairesel kolonların, sarılmamış kolonlara kıyasla yük taşıma kapasitelerinde artış sağladığı belirlenmiş olup, en iyi tasarım formunun kolonların %100 oranında sarılması olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmayla TRM sarım tasarımının etkinliğini kanıtlamışlardır.

Heins vd. (2020), zorlayıcı çevresel koşullara maruz kalan TRM'nin uzun vadeli aderans ve çekme dayanımlarıyla ilgili deneysel bir çalışma yapmışlardır. TRM'nin uzun vadeli aderans ve çekme dayanımını hızlandırılmış yaşlandırma yöntemiyle araştırmışlardır. Nem, yüksek sıcaklık ve donma-çözülme döngüleri, zorlu çevresel koşulları simüle edilerek testler yapmışlardır. Aderans testlerinin sonuçları, TRM'nin neme karşı önemli ölçüde zayıfladığını göstermiştir. Öte yandan, donma-çözülme döngüleri ve yüksek sıcaklık koşullarının, TRM'nin çekme dayanımı üzerinde önemsiz (ihmal edilebilir) bir etkisi olduğu ifade edilmiştir.

Sui vd. (2020), yangından zarar görmüş prefabrik beton boşluklu döşemeleri güçlendirmek ve onarmak amacıyla karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ve TRM güçlendirme tekniklerini kullanmışlardır. Gerçek çok katlı bir yığma binadan alınan numuneleri, TRM ve CFRP ile güçlendirilmiş betonarme boşluklu döşemelerin eğilme performansını araştırmak amacıyla test etmişlerdir. İncelenen parametreler arasında güçlendirme yöntemi (CFRP'ye karşı TRM), CFRP katman sayısı ve yangına maruz kalma durumu yer almıştır. Ortam sıcaklığında yapılan dört noktalı eğilme testleriyle, göçme şekilleri, yük ve şekil değiştirme tepkileri kaydedilmiş ve tartışılmıştır. Hem CFRP hem de TRM güçlendirme yöntemleri, yangından zarar görmüş boşluklu döşemelerin çatlama yükü ve tepe yükü ile erken evredeki rijitliğini önemli ölçüde artırmıştır. CFRP ile güçlendirilen boşluklu döşemeler, nihai taşıma kapasitesi açısından daha iyi performans göstermektedir, ancak CFRP katman sayısı arttıkça süneklik azalmaktadır. Öte yandan, TRM güçlendirme tekniğinin; eğilme rijitliği ve şekil değiştirme kapasitesi açısından yangından zarar görmüş boşluklu döşemelerin performansını iyileştirmek için CFRP'ye göre daha uygun bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Azimi vd. (2022), TRM kompozitlerine ikinci bir tekstil katmanının eklenmesinin etkisini netleştirmeyi ve tekstil düzenlemesinin kompozit sistemin çekme davranışını nasıl etkilediğini araştırmayı amaçlamışlardır. Bu amaçla, kireç bazlı harç içinde tek katmanlı ve çok katmanlı farklı düzenlemelere sahip alkaliye dayanıklı cam (AR-cam) ve çelik esaslı TRM kompozitleri kullanmışlardır. Sonuçlar, iki kat tekstil örgüsü kullanımının TRM kompozitlerinin çekme davranışını iyileştirdiğini göstermektedir. Ayrıca, farklı katmanların matristeki düzenleniş şeklinin, TRM'nin farklı gerilme evrelerindeki tepkisini etkilediği bulunmuştur. İki tekstil katmanı arasına ince bir harç tabakası eklenmesi, çatlama durumuyla rijitliği artırmakta ve TRM'nin nihai dayanımını hafifçe azaltmaktadır.

Dong vd. (2022), çalışmalarında, farklı şekillere sahip karbon iplikler ve farklı matris türleri kullanılarak üretilen TRM kompozitlerinin çekme davranışlarını incelemişlerdir. Eliptik ve yassı kesit şekline sahip ipliklerle takviye edilmiş numuneleri; çatlama şekli, çekme dayanımı, çekme gerilme-şekil değiştirme tepkisi ve şekil değiştirme enerjisi açısından karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, çekme dayanımının %11 ile %67 oranında artırılabilirliğini göstermiştir. Matris içerisindeki tekstil donatılarının kullanımı çekme dayanımını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Yassı kesit şekline sahip iplikler, aderans özelliğinin artmasına etkili bir şekilde katkı sağlamıştır. Daha büyük aderans yüzeyi sayesinde iplik ile matris arasındaki

kayma engellenmiştir. İpliğin kesit şekliyle ilişkili olan şekil katsayısına dayalı olarak, çekme dayanımını öngörmeye yönelik güncellenmiş bir indeks modeli önermişlerdir.

Laringa vd. (2022), çalışmalarında eski yapılardan alınan düşük kalitedeki betonarme kirişlerde, eğilme dayanımını artırmak amacıyla dıştan yapıştirılarak uygulanan TRM tekniğinin etkisini değerlendirmek için kolay uygulanabilir bir sayısal hesaplama yöntemi geliştirmişlerdir. Güçlendirme gerektiren kirişleri simule etmek için zayıf mekanik özelliklere sahip, eski ve bozulmuş yapıların durumunu yansıtan betonarme kirişler üretmişler ve eğilme testleri uygulamışlardır. Testler sonucunda TRM tekniğinin, düşük kaliteli betonarme yapılarda eğilme yükleri altında deformasyon ve taşıma kapasitesini artırmada etkili bir çözüm olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, istenmeyen erken ayrılma nedeniyle oluşabilecek göçme mekanizması, U şeklindeki ankrajlar kullanılarak etkili biçimde engellenmiş ve güçlendirilmiş kirişler, kompozitin çekme dayanımına ulaşarak göçmeye uğramıştır.

Mercimek vd. (2022), çalışmalarında yeterli deprem dayanımı olmayan betonarme kolonların TRM ile güçlendirilmesini incelemişlerdir. Çalışmada incelenen değişkenler TRM şerit genişliği, şeritler arasındaki boşluk ve şerit örtüşme noktasında ankraj kullanılıp kullanılmamasıdır. Deneylerde kare kesitli betonarme kolonlar aksenal yük altında test edilmiştir. Test sonuçlarına göre, TRM ile güçlendirilen betonarme kolonların maksimum taşıma gücü kapasitesi, başlangıç rijitliği ve enerji yutma kapasitelerinin arttığı, genişliği daha büyük olan TRM şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarında daha başarılı sonuçlar elde edildiği, şerit eksenleri arasındaki mesafe değerinin artmasının maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği, ve enerji yutma kapasitesi değerlerinde düşüşe neden olduğu, ankraj kullanımının betonarme kolonların davranışını ve performansını etkileyen en önemli unsurlardan biri olduğu, TRM kullanımının deplasman süneklilik oranında bir düşüş oluşturduğu fakat bunun da ankraj uygulanması ile çözüldüğü sonuçlarına ulaşmışlardır.

Cao vd. (2024), TRM ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışını simule etmek için doğrusal olmayan sonlu elemanlar modeli önermişlerdir. Geliştirilen model, deneysel sonuçlarla doğrulanmış ve daha sonra TRM ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin tasarımında kullanılmıştır. Tekstil katman sayısı, tekstilin boyuna uzunluğu ve tekstil ağ (mesh) boyutu incelenen parametreler arasındadır. Modelleme sonuçları, tekstil katman sayısının ve boyuna uzunluğun artırılmasının, ağ boyutunun küçültülmesinin TRM ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme dayanımını artırabileceğini ortaya koymuştur. Yapılan deneyler ile de bu sonucu doğrulamışlardır.

Escobar vd. (2024), çalışmalarında TRM sistemlerinin aderans (bağ) özelliklerinin verimliliğini ve mekanik özelliklerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Araştırmalarında karbon ve bazalt tekstiller, klasik çimento harcı ile kısa cam veya sentetik lif içeren alternatif harçlarla tek eksenli çekme deneyi uygulayarak incelemiştir. Her iki tekstil tipinde de yapışma uzunluğu arttıkça taşıma kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir. TRM bileşimi ne olursa olsun, tekstil ile matris arasındaki kayma ve bunu takiben meydana gelen liflerin kopması, bağ testlerinde en yaygın göçme (hasar) modu olarak gözlemlenmiştir. Beton yüzeyin dayanımının etkisi ise ihmal edilebilir düzeyde bulunmuştur.

Mercimek vd. (2024), çok açıklıklı iki yönlü çalışan betonarme döşemelerin delinme etkisine karşı güçlendirme yöntemlerini karşılaştıran bir çalışma yapmışlardır. Açıklıklara sahip betonarme döşemelerin delinme etkisine karşı TRM ve CFRP ile güçlendirilmesini incelemişler, delinme taşıma kapasitelerini, başlangıç rijitliklerini ve enerji tüketim kapasitelerini karşılaştırmışlardır. En başarılı güçlendirme yönteminin TRM ile yapılan güçlendirme olduğu sonucuna varmışlardır.

Zhang vd. (2024), kısa liflerin TRM sistemlerine eklenmesinin aderans (bağ) performansı üzerindeki etkisini tek taraflı kesme deneyleri ile incelemiştir. Çalışmada; tekstil tipi, tekstil tabaka sayısı, matris dayanımı, tekstil yönelimi ve beton arayüzeyinin yüzey işlemi gibi faktörleri değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, artan kısa lif içeriğinin aderans dayanımını, çatlak kontrolünü ve taşıma kapasitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, farklı tekstil geometrileri ve iplik emprenye yöntemlerinin, tekstil–matris aderans performansını belirgin şekilde etkilediği tespit edilmiştir. Elde edilen bulgulara dayanarak, kısa lif takviyeli karbon TRM sistemlerinin karmaşık arayüz davranışını daha iyi anlamak ve etkin tasarım modelleri geliştirmek amacıyla kapsamlı bir bağ–kayma modeli önermişlerdir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tekstil ile takviye edilmiş harç (TRM) şeritlerin beton yüzeylere yapışma davranışı, deneysel olarak değerlendirilmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda yük–deplasman ilişkisi belirlenmiştir. Deneysel programda, 84 adet tam ölçekli çekme tipi numune üretilmiş olup üç ana parametre grubu incelenmiştir:

- Ankrajsız referans seri (NA)
- Epoksi esaslı fan tipi ankrajlar (E)
- Çimento esaslı harçla sabitlenen fan tipi ankrajlar (M).

Deneyler; farklı beton basınç dayanımı (C: 15 MPa ve 30 MPa), TRM şerit genişliği (W: 50 mm ve 100 mm), bağ uzunluğu (L: 150 mm, 300 mm, 450 mm) ve ankrajlı-ankrajsız (NA) olarak gerçekleştirilmiştir.


3.1. Malzeme Özellikleri

Deneysel çalışmada beton yüzeylerin güçlendirilmesi için karbon esaslı tekstil donatı ile özel lif katkılı yüksek performanslı harç kullanılmıştır. TRM sisteminin bileşenleri; beton, tekstil donatı, harç, ankraj ve ankraj sabitleme malzemelerinden oluşmaktadır. Ankraj sistemleri için de epoksi esaslı (E) ve çimento esaslı (M) harç ile sabitlenen fan tipi ankrajlar kullanılmıştır.

3.1.1. Karbon Tekstil

TRM kompozitinde takviye olarak göz aralığı 25 mm olan çift doğrultulu karbon tekstil (hasır şeklinde) kullanılmıştır. Kullanılan karbon fiber tekstil ağının, dikey ve yatay yönlerde düzenlenmiş karbon ipliklerinden oluşan kare açıklıklara sahip bir ızgara yapısı vardır. Üretici firmadan temin edilen özellikler Tablo 3.1’de verilmiştir. Ağın nominal kalınlığı 1.43 mm olup, alan ağırlığı 350 g/m²’dir. Hem boyuna hem de enine iplikler, 235 GPa çekme elastisite modülüne sahip karbon liflerinden yapılmıştır. Bu ızgara tipi yapı, harcın düzgün bir şekilde tekstile nüfuz etmesini ve matrisle tekstil arasında etkili bir mekanik kilitleme sağlamayı mümkün kılmış, böylece eksenel yük altında daha iyi bir yapışma davranışı sağlamıştır.


Tablo 3.1.Karbon Grid (Mesh) Tekstilinin Özellikleri

Özellik	Karbon Grid Tekstil
Görsel	
Çekme Dayanımı (kN/m)	255
Ağırlık (g/m ²)	350
Kalınlık (mm)	1.43
Elastisite Modülü (GPa)	235
Göçme Uzaması (%)	1.7

3.1.2. Tamir Harcı

Karbon tekstilin beton yüzeyinden ayrılmasını geciktirmek için geleneksel sıva karışımlarının yerine Tablo 3.2’de özellikleri verilen yapısal kalın tamir harcı tercih edilmiştir. Tamir harcının özellikleri üretici firmadan temin edilmiştir. Karışım; çimento esaslı, tek bileşenli, polimer ve fiber takviyeli, tiksotropik yapısal tamir harcıdır. 25 kg’lık torbada bulunan karışım, içinde 4 litre su bulunan kaba yavaş yavaş boşaltılıp mikser yardımıyla karıştırılarak hazırlanmıştır.


Tablo 3.2. Yapısal Tamir Harcının Özellikleri

Özellik	Tamir Harcı
Görsel	
Basınç Dayanımı (MPa)	
1 gün	>25
7 gün	>50
28 gün	>70
Eğilme Dayanımı (28 gün) (MPa)	>8.0
Betona Yapışma Dayanımı (28 gün) (MPa)	>2.0
Elastisite Modülü (28 gün) (MPa)	>20000

3.1.3. Karbon Lifli Polimer (CFRP)

Deney elemanlarının üretilmesinde güçlendirme çalışmalarında da yaygın olarak tercih edilen CFRP fan tipi ankraj seçilmiştir. Fan şeklindeki ankrajlar için kullanılan CFRP levhalar, tek yönlü karbon liflerinden üretilmiş olup, nominal kalınlıkları 0.12 mm ve ağırlıkları 300 g/m²'dir. Lifler ayrıca 225 GPa elastisite modülüne sahiptir. Deney elemanlarında kullanılan fan ankrajları, 50 mm uzunluğunda 12 mm çapındaki donatıya CFRP sarılarak üretilmiştir. Üretici firmadan temin edilen özellikler Tablo 3.3'te verilmiştir.


Tablo 3.3. Ankraj Yapımında Kullanılan Karbon Lifli Polimerin (Tek Yönlü) Özellikleri

Özellik	CFRP
Görsel	
Birim Ağırlık (g/m ²)	300 ± 10
Kalınlık (mm)	0.12
Çekme Dayanımı (MPa)	3500
Çekmede Elastisite Modülü (MPa)	225000
Maksimum Çekme Birim Deformasyonu (%)	1.7

3.1.4. Epoksi

Ankraj uygulamalarında, epoksi esaslı ankraj ve çimento esaslı ankraj olacak şekilde 2 tip ankraj sabitleme şekli uygulanmıştır. Epoksi esaslı ankraj uygulamalarında fan tipi karbon tekstil, çift bileşenli epoksi (reçine+sertleştirici) içerisine gömülerek sabitlenmiştir. Bu çift bileşen dörde bir miktarda karıştırılarak epoksi elde edilmiştir. Üretici firmadan temin edilen özellikler Tablo 3.4'te verilmiştir.


Tablo 3.4. Ankraj Sabitlemek İçin Kullanılan Epoksinin Özellikleri

Özellik	Epoksi
Görsel	
Yoğunluk (kg/lt)	1.31
Karışım Oranı	Beyaz/Gri bileşen =4/1
Uygulama Sıcaklığı	Min +10°C, max +35°C
Çekme Dayanımı (MPa)	30
Eğilmede Elastisite Modülü (MPa)	3800
Çekmede Elastisite Modülü (MPa)	4500
Maksimum Çekme Birim Deformasyonu (%)	0.9

3.1.5. Harç

Ankraj uygulamalarında, epoksi esaslı ankraj ve çimento esaslı ankraj olacak şekilde 2 tip ankraj sabitleme şekli uygulanmıştır. Harç esaslı ankraj uygulamalarında çimento esaslı, tek bileşenli, kendiliğinden yerleşen grout harcı kullanılmıştır. Üretici firmadan temin edilen özellikler Tablo 3.5’te verilmiştir.

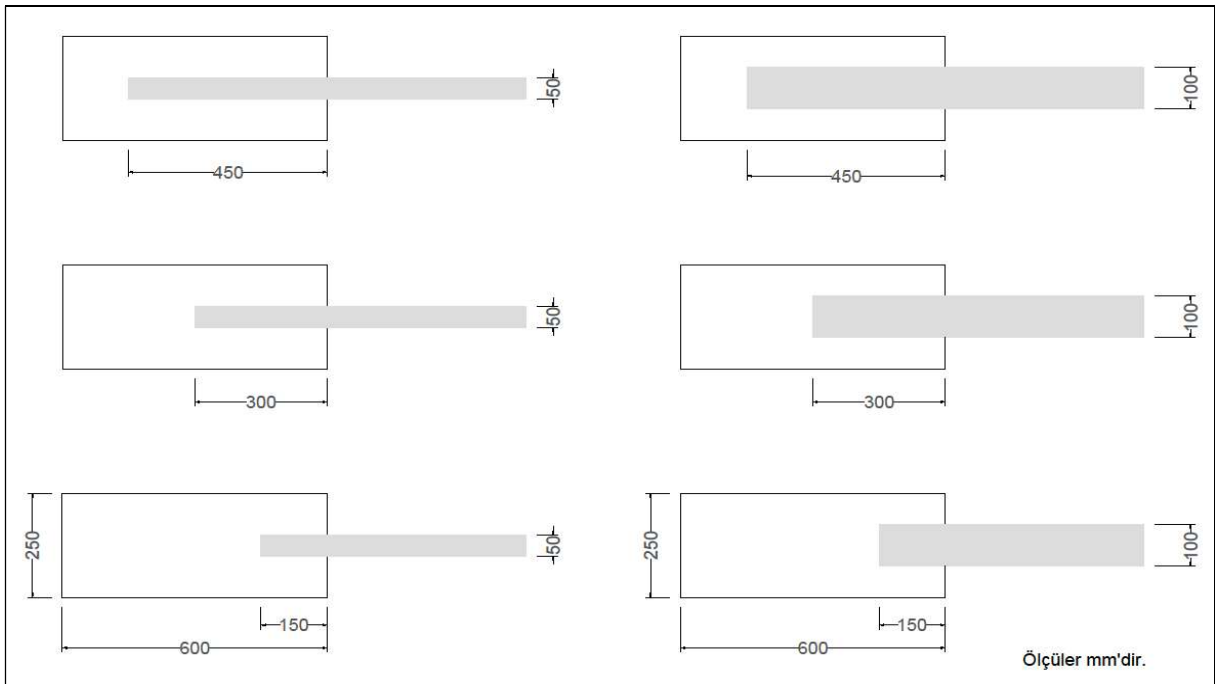
Tablo 3.5. Ankraj Sabitlemek İçin Kullanılan Harcın Özellikleri

Özellik	Harç
Görsel	
Basınç Dayanımı (MPa)	
1 gün	>30
7 gün	>50
28 gün	>60
Eğilme Dayanımı (28 gün) (MPa)	>8.0
Betona Yapışma Dayanımı (28 gün) (MPa)	>2.0
Elastisite Modülü (28 gün) (MPa)	>20000

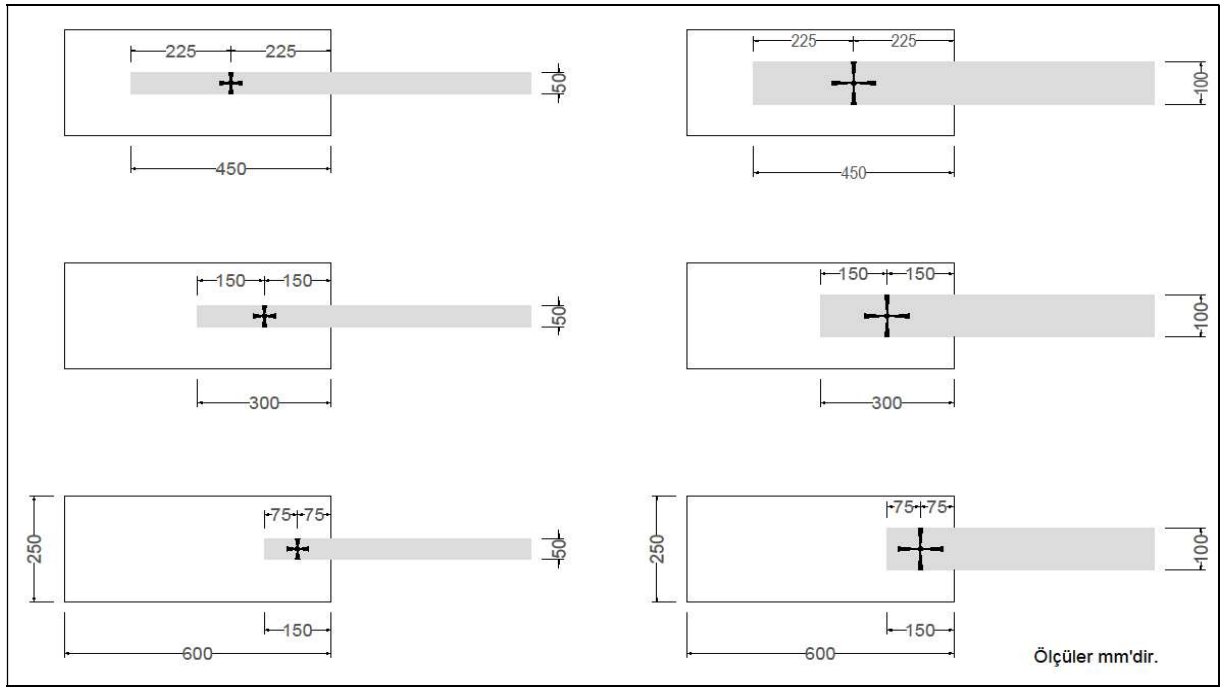
3.2. Deney Elemanları

3.2.1. Deney Elemanlarının Tasarımı

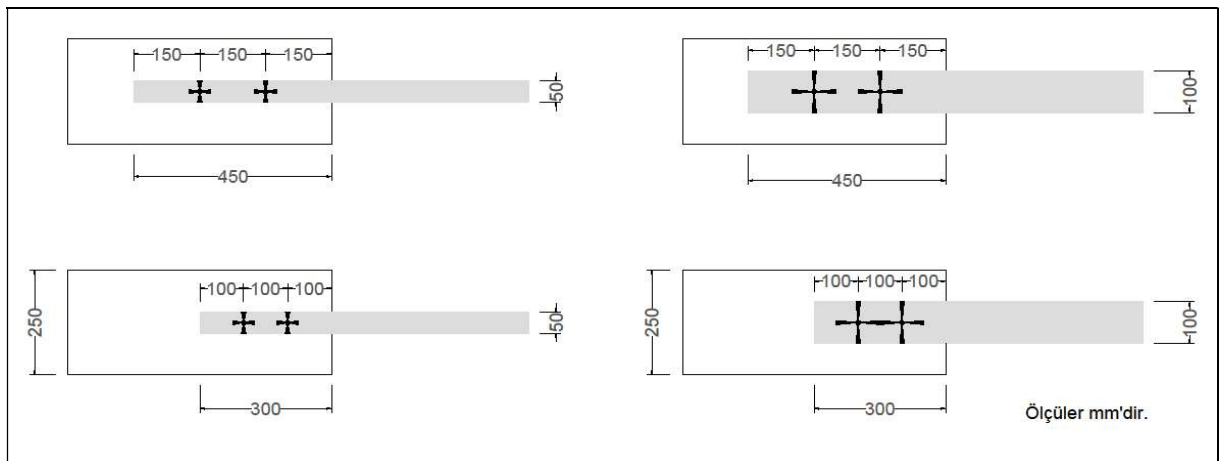
Deneyel çalışma kapsamında 250×300×600 mm kesit boyutlarında tam ölçekli dikdörtgen prizma çekme tipi beton numuneler üretilmiştir. Beton numuneler, test düzeneğinin kavrama sistemiyle uyumlu boyutlara sahip standart dikdörtgen kalıplarda dökülmüştür. Deney numunelerinde üç ana parametre grubu incelenmiştir: (i) ankrajsız referans seri, (ii) epoksi esaslı fan tipi ankrajlar ve (iii) çimento esaslı harçla sabitlenen fan tipi ankrajlar. Numunelerin geometrik özellikleri, boyutları ve genel yerleşim detayları Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te şematik olarak sunulmuştur. Şekil 3.1 herhangi bir mekanik ankraj içermeyen referans numunelerin boyutlarını göstermektedir. Bu numunelerde TRM şeritleri doğrudan beton blokların yüzeyine yapıştırılmıştır. Şekil 3.2, TRM şeritlerinin CFRP fan tipi ankrajlar kullanılarak üç farklı konfigürasyonda ankrajlandığı numuneleri sunmaktadır: (a) 1/1, (b) 2/1 ve (c) 3/1. Şekil 3.3 ise daha kapsamlı ankraj düzenlerine sahip numuneleri göstermektedir. Bunlar sırasıyla (a) 2/2 ve (b) 3/2 konfigürasyonlarıdır. Ankraj konfigürasyonları, yapıştırılan arayüzeydeki ankrajların kolon ve sıra (kolon/sıra) sayılarına göre 1/1, 2/1, 3/1, 2/2 veya 3/2 olarak adlandırılmıştır. Farklı bağlanma uzunlukları, şerit genişlikleri ve beton dayanımı parametrelerinin birlikte incelenmesiyle TRM-beton arayüzündeki aderans mekanizmasının daha iyi anlaşılması hedeflenmiştir.



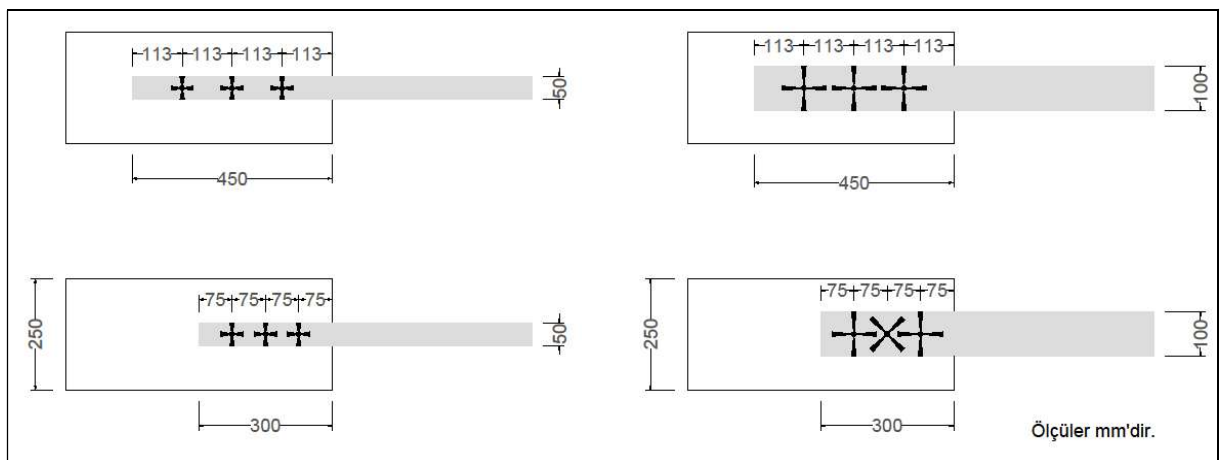
Şekil 3.1. Ankrajsız Serinin Geometrik Detayları



(a)

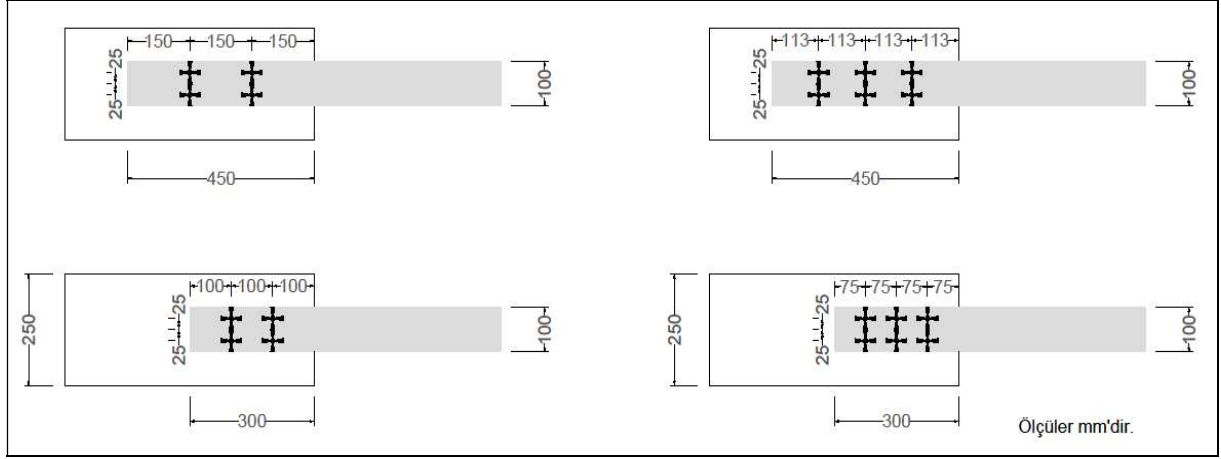


(b)



(c)

Şekil 3.2. (a) 1/1, (b) 2/1 ve (c) 3/1 Ankrajlı Deneç Elemanlarının Geometrik Detayları



Şekil 3.3. 2/2 ve 3/2 Ankrajlı Dency Elemanlarının Geometrik Detayları

3.2.2. Dency Elemanlarının İsimlendirilmesi

Dency elemanlarının isimlendirilmesi, numunelerde kullanılan temel parametrelerin sistematik ve açık bir biçimde tanımlanabilmesini sağlamak amacıyla yapılandırılmıştır. İsimlendirme yapısı, betonun basınç dayanım sınıfı, TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu ve varsa ankraj konfigürasyonunu ve ankraj sabitleme tipini içermektedir. Genel formülasyon şu şekildedir:

[Beton Sınıfı] -W [Şerit Genişliği]- L [Bağ Uzunluğu] - [Ankraj Konfigürasyonu] - [Ankraj Sabitleme Tipi]

Örneğin, “C15-W50-L300-2/1-E” olarak adlandırılan bir numune; 15 MPa beton dayanımına sahip örnekte, 50 mm genişliğinde bir TRM şeridinin 300 mm bağ uzunluğu ile uygulandığını ve her sırada 2 adet, her kolonda 1 adet olmak üzere epoksi esaslı fan tipi ankraj ile sabitlendiğini ifade etmektedir.

“C30-W100-L450-3/2-M” olarak adlandırılan bir numune; 30 MPa beton dayanımına sahip örnekte, 100 mm genişliğinde bir TRM şeridinin 450 mm bağ uzunluğu ile uygulandığını ve her sırada 3 adet, her kolonda 2 adet olmak üzere çimento esaslı harçla sabitlenen fan tipi ankraj kullanıldığını ifade etmektedir.

“C30-W50-L150-NA” olarak adlandırılan bir numune; 30 MPa beton dayanımına sahip örnekte, 50 mm genişliğinde bir TRM şeridinin 150 mm bağ uzunluğu ile uygulandığını ve ankrajsız bir şekilde sabitlendiğini ifade etmektedir.

“E” Epoksi esaslı fan tipi ankraj, “M” Çimento esaslı harçla sabitlenen fan tipi ankrajı, “NA” (No Anchorage) ifadesiyle biten numuneler de ankrajsız referans serileri temsil etmektedir.

3.2.3. Deneysel Değişkenler

Deneysel çalışmada beton yüzey ile TRM şeritleri arasındaki yük–deplasman davranışını incelemek amacıyla 84 adet numune kullanılmış olup, deneysel değişkenler dikkate alınarak hazırlanan Tablo 3.6, C15 beton sınıfına ait ve Tablo 3.7, C30 beton sınıfına ait deney elemanlarının ayrıntılarını içermektedir.

Numuneler, beş temel deneysel değişkene göre sınıflandırılmıştır. Bunlar, betonun basınç dayanımı, TRM şerit genişliği, TRM şeritlerinin bağ uzunluğu, ankraj sabitleme tipi ve ankraj konfigürasyonudur.

Çalışmada C15 ve C30 olmak üzere iki farklı beton dayanım sınıfı kullanılmıştır. Tüm numuneler dikdörtgen kesitli olup, TRM şeritleri beton blokların yan yüzeyine yapıştırılmıştır. Kullanılan TRM sistemi, karbon tekstillerle donatılmış çimento esaslı bir matristen oluşmaktadır.

Şerit genişliğinin etkisini incelemek amacıyla 50 mm ve 100 mm olacak şekilde iki farklı TRM şerit genişliği dikkate alınmıştır. Ayrıca, bağ alanının arayüzey performansı üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmek için 150 mm, 300 mm ve 450 mm olmak üzere üç farklı bağ uzunluğu kullanılmıştır.

Ankraj sabitleme tipi olarak epoksi esaslı fan tipi ankraj (E) ve çimento esaslı harç ile sabitlenen fan tipi ankrajlar (M) kullanılmıştır. Ayrıca referans olması amacıyla ankrajsız numuneler (NA) üretilmiş olup, bu sayede ankraj sistemlerinin katkısı doğrudan değerlendirilebilmiştir.

TRM şeritlerinin ankrajanması amacıyla, CFRP fan tipi ankrajlar kullanılarak farklı konfigürasyonlarda numuneler hazırlanmıştır. 1/1, 2/1 ve 3/1 konfigürasyonları basit ankraj düzenlerini, 2/2 ve 3/2 konfigürasyonları ise daha kapsamlı ve yoğun ankraj yerleşimlerini ifade etmektedir. Bu konfigürasyonlar ankraj yoğunluğunun ve yerleşim düzeninin etkilerini incelemek amacıyla tasarlanmıştır.

Aşağıda, incelenen değişkenler özetlenmektedir:

- Beton dayanımı: C15 ve C30
- TRM şerit genişliği: 50 mm ve 100 mm
- Bağ uzunluğu: 150 mm, 300 mm ve 450 mm
- Ankraj sabitleme tipi: Epoksi esaslı (E) ve çimento esaslı harç (M) ile sabitlenen fan tipi ankrajlar
- Ankraj konfigürasyonu: Yok (NA), CFRP fan ankrajların 1/1, 2/1, 3/1, 2/2 ve 3/2 konfigürasyonları

Tablo 3.6. C15 Deney Elemanlarının Özellikleri

Numune No	Numune Adı	Beton Basınç Dayanımı C (MPa)	Tekstil Takviyeli Harç Şerit		Ankraj			
			Genişlik W (mm)	Bağ Uzunluğu L (mm)	Tipi	Kolon/Satır		
1	C15-W50-L150-NA	50	50	150	-----			
2	C15-W50-L300-NA			300				
3	C15-W50-L450-NA			450				
4	C15-W50-L150-1/1-E			150	Epoksi ile Sabitlenen CFRP Fan Tipi Ankraj	1/1		
5	C15-W50-L300-1/1-E			300		1/1		
6	C15-W50-L450-1/1-E			450		1/1		
7	C15-W50-L300-2/1-E			300		2/1		
8	C15-W50-L450-2/1-E			450		2/1		
9	C15-W50-L300-3/1-E			300		3/1		
10	C15-W50-L450-3/1-E			450		3/1		
11	C15-W50-L150-1/1-M			150		Harç ile Sabitlenen CFRP Fan Tipi Ankraj	1/1	
12	C15-W50-L300-1/1-M			300			1/1	
13	C15-W50-L450-1/1-M			450			1/1	
14	C15-W50-L300-2/1-M			300	2/1			
15	C15-W50-L450-2/1-M			450	2/1			
16	C15-W50-L300-3/1-M			300	3/1			
17	C15-W50-L450-3/1-M			450	3/1			
18	C15-W100-L150-NA			15	100		150	-----
19	C15-W100-L300-NA					300		
20	C15-W100-L450-NA					450		
21	C15-W100-L150-1/1-E					150	Epoksi ile Sabitlenen CFRP Fan Tipi Ankraj	1/1
22	C15-W100-L300-1/1-E	300	1/1					
23	C15-W100-L450-1/1-E	450	1/1					
24	C15-W100-L300-2/1-E	300	2/1					
25	C15-W100-L450-2/1-E	450	2/1					
26	C15-W100-L300-3/1-E	300	3/1					
27	C15-W100-L450-3/1-E	450	3/1					
28	C15-W100-L300-2/2-E	300	2/2					
29	C15-W100-L450-2/2-E	450	2/2					
30	C15-W100-L300-3/2-E	300	3/2					
31	C15-W100-L450-3/2-E	450	3/2					
32	C15-W100-L150-1/1-M	150	Harç ile Sabitlenen CFRP Fan Tipi Ankraj			1/1		
33	C15-W100-L300-1/1-M	300				1/1		
34	C15-W100-L450-1/1-M	450				1/1		
35	C15-W100-L300-2/1-M	300				2/1		
36	C15-W100-L450-2/1-M	450				2/1		
37	C15-W100-L300-3/1-M	300				3/1		
38	C15-W100-L450-3/1-M	450				3/1		
39	C15-W100-L300-2/2-M	300				2/2		
40	C15-W100-L450-2/2-M	450				2/2		
41	C15-W100-L300-3/2-M	300				3/2		
42	C15-W100-L450-3/2-M	450		3/2				

Tablo 3.7. C30 Deney Elemanlarının Özellikleri

Numune No	Numune Adı	Beton Basınç Dayanımı C (MPa)	Tekstil Takviyeli Harç Şerit		Ankraj				
			Genişlik W (mm)	Bağ Uzunluğu L (mm)	Tipi	Kolon/Satır			
43	C30-W50-L150-NA	30	50	150	----				
44	C30-W50-L300-NA			300					
45	C30-W50-L450-NA			450					
46	C30-W50-L150-1/1-E			150	Epoksi ile Sabitlenen CFRP Fan Tipi Ankraj	1/1			
47	C30-W50-L300-1/1-E			300		1/1			
48	C30-W50-L450-1/1-E			450		1/1			
49	C30-W50-L300-2/1-E			300		2/1			
50	C30-W50-L450-2/1-E			450		2/1			
51	C30-W50-L300-3/1-E			300		3/1			
52	C30-W50-L450-3/1-E			450		3/1			
53	C30-W50-L150-1/1-M			150		Harç ile Sabitlenen CFRP Fan Tipi Ankraj	1/1		
54	C30-W50-L300-1/1-M			300			1/1		
55	C30-W50-L450-1/1-M			450	1/1				
56	C30-W50-L300-2/1-M			300	2/1				
57	C30-W50-L450-2/1-M			450	2/1				
58	C30-W50-L300-3/1-M			300	3/1				
59	C30-W50-L450-3/1-M			450	3/1				
60	C30-W100-L150-NA			30	100		150	----	
61	C30-W100-L300-NA						300		
62	C30-W100-L450-NA					450			
63	C30-W100-L150-1/1-E					150	Epoksi ile Sabitlenen CFRP Fan Tipi Ankraj	1/1	
64	C30-W100-L300-1/1-E					300		1/1	
65	C30-W100-L450-1/1-E					450		1/1	
66	C30-W100-L300-2/1-E					300		2/1	
67	C30-W100-L450-2/1-E					450		2/1	
68	C30-W100-L300-3/1-E					300		3/1	
69	C30-W100-L450-3/1-E					450		3/1	
70	C30-W100-L300-2/2-E					300		2/2	
71	C30-W100-L450-2/2-E					450		2/2	
72	C30-W100-L300-3/2-E	300	3/2						
73	C30-W100-L450-3/2-E	450	3/2						
74	C30-W100-L150-1/1-M	150	Harç ile Sabitlenen CFRP Fan Tipi Ankraj			1/1			
75	C30-W100-L300-1/1-M	300				1/1			
76	C30-W100-L450-1/1-M	450				1/1			
77	C30-W100-L300-2/1-M	300				2/1			
78	C30-W100-L450-2/1-M	450				2/1			
79	C30-W100-L300-3/1-M	300				3/1			
80	C30-W100-L450-3/1-M	450				3/1			
81	C30-W100-L300-2/2-M	300				2/2			
82	C30-W100-L450-2/2-M	450				2/2			
83	C30-W100-L300-3/2-M	300	3/2						
84	C30-W100-L450-3/2-M	450	3/2						

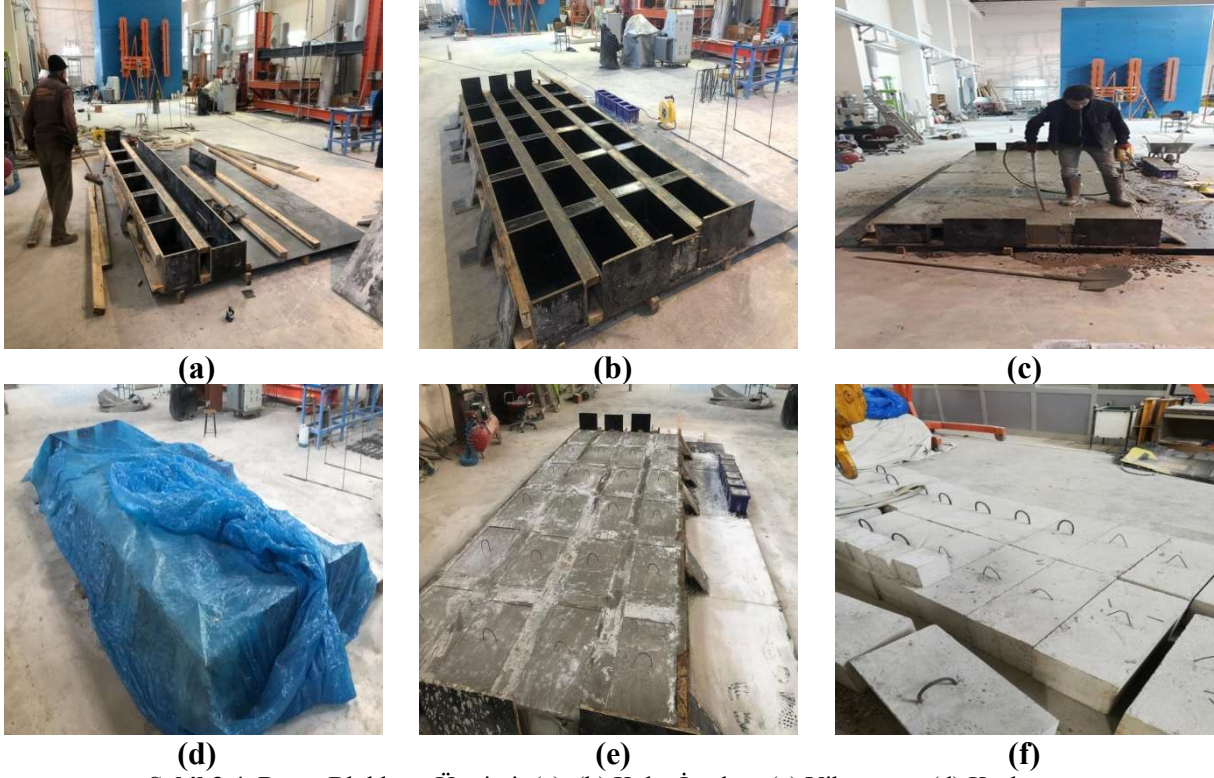
3.3. Deney Elemanlarının Üretimi

Deney elemanları; beton blokların üretimi, CFRP fan tipi ankrajların imalatı, karbon tekstil şeritlerin beton yüzeye yapıştırılması ve Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) analizi için yüzey hazırlığı olmak üzere dört aşamada üretilmiştir.

3.3.1. Beton Blokların Üretimi

Numune üretiminin ilk aşaması, boyutları ve yüzey kalitesi tutarlı beton blokların hazırlanmasını içermektedir. Döküm işlemi boyunca geometrik hassasiyetin ve stabilitenin sağlanabilmesi için ahşap kalıplar özenle monte edilmiştir. Beton dökümünden sonra sökülme işleminin kolay olması ve deney numunelerinin hasar almamaları için ahşap kalıp üzerindeki tüm parçacıklar ve tozlar temizlenerek ahşap kalıp yağlanmıştır. Kalıpların hazırlanmasının ardından, hedef basınç dayanımları yaklaşık 15 MPa (C15) ve 30 MPa (C30) olan hazır beton karışımları kalıplara dökülmüştür. Betonun homojenliğini artırmak ve boşluk oluşumunu engellemek amacıyla döküm sırasında vibratör ile mekanik vibrasyon uygulanmıştır. Beton döküldükten sonra düzgün bir yüzey elde etmek için çelik mala ile perdah yapılmıştır. Her bir beton sınıfı için altışar adet 150×150×150 mm boyutlarında küp numune örnekleri alınmıştır. Beton dökülmesi esnasında sonraki hazırlık ve test aşamalarında numunelerin güvenli ve tekrarlanabilir bir şekilde taşınmasını ve kaldırılmasını kolaylaştırmak amacıyla beton üst yüzeyine çelik kancalar yerleştirilmiştir.

Beton dökümü tamamlandıktan bir gün sonra betonun kürlenmesi için beton sulanarak deney elemanlarının üzeri bez ve naylon yardımıyla sarılmıştır. Deney elemanları kalıptan çıkarıldıktan sonra yaklaşık bir ay boyunca günde 2 kere sulanarak kür işlemine devam edilmiştir. Beton blokların üretimine ilişkin; kalıp imalatı, vibrasyon, kürlenme ve hazırlanmış deney elemanları Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Beton basınç dayanım sınıfını tespit etmek için küp numuneler de kalıptan çıkarılarak kür havuzuna yerleştirilmiştir. 28 gün kür işlemi uygulanan 150×150×150 mm boyutlarındaki küp numuneler tek eksenli basınç yükü altında test edilmiştir. İki farklı beton dayanımı sınıfı hedeflenerek hazırlanan numuneler için her bir beton sınıfından altı adet küp numune alınmıştır ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır (Tablo 3.8).



Şekil 3.4. Beton Blokların Üretimi: (a), (b) Kalıp İmalatı; (c) Vibrasyon; (d) Kürleme; (e), (f) Hazırlanmış Deney Elemanları

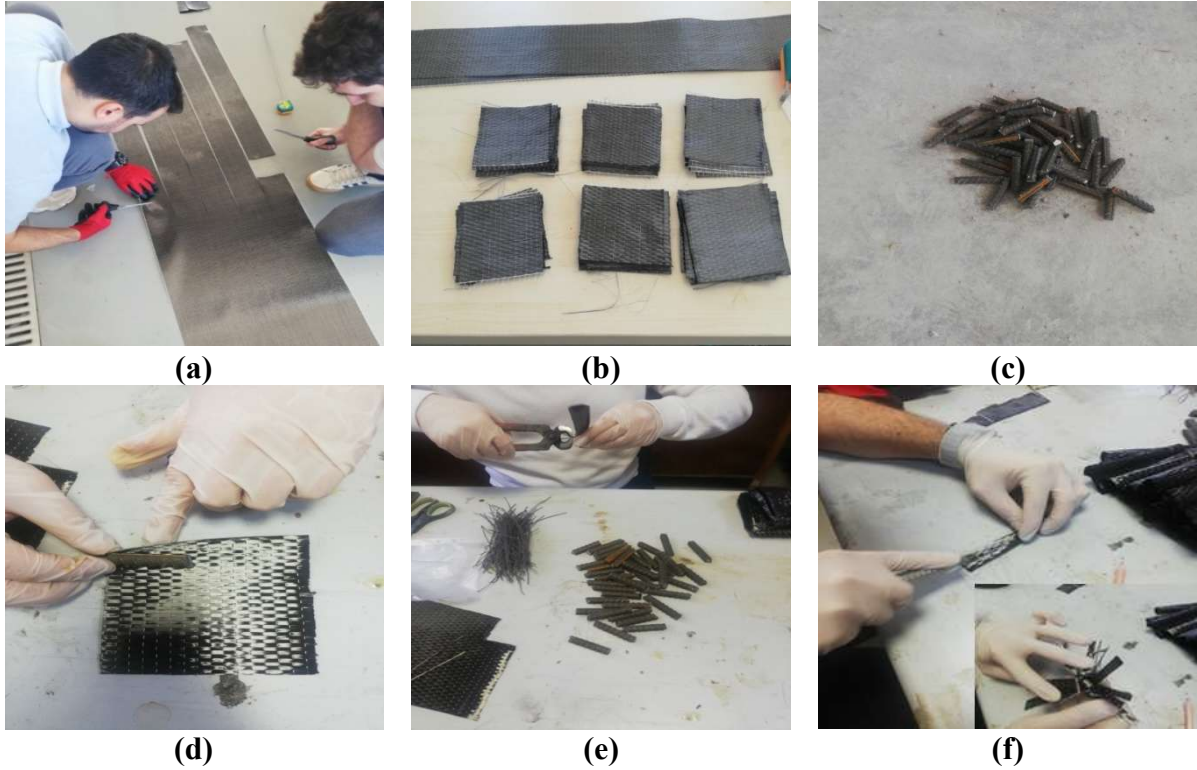
Tablo 3.8. 28 Günlük Küp Numunelerin Basınç Dayanım Değerleri (MPa)

Seriler	I	II	III	IV	V	VI	Ortalama dayanım
C15	17.8	16.5	16.9	17.2	17.3	17.1	17.1
C30	30.6	31.8	29.9	33.1	30.5	31.0	31.2

3.3.2. Ankrajların Hazırlanması

Numune hazırlığının ikinci aşaması, TRM şeridi ile beton yüzey arasındaki mekanik kenetlenmeyi artırmak amacıyla tasarlanan CFRP fan tipi ankrajların imalatını içermektedir. İlk olarak, her bir numune için ankraj konfigürasyonuna bağlı olarak CFRP şeritler 100 mm genişliğinde, 75 mm ve 100 mm uzunluklarında kesilmiştir. Betona gömülmesi planlanan ankraj donatıları, 12 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır. Sıkı ve güvenli bir bağlantı sağlamak amacıyla, CFRP şeridi donatı elemanının etrafına sarılmış ve çelik tel ile sabitlenmiştir. Bu bağlama işlemi, şerit ile donatının birleşik bir ankraj sistemi gibi davranmasını sağlamıştır. Tüm ankrajların sarılması ve sabitlenmesinin ardından, CFRP şeritlerin donatının dışında kalan 25 mm ve 50 mm'lik fan biçimindeki uç kısımları istenen açılma geometrisini elde etmek için bir maket bıçağı kullanılarak dikkatlice kesilmiştir. Bu şekilde açılmış fan uçları, bağlantı bölgesine gömüldüklerinde gerilme

aktarımı için daha geniş bir etkin yüzey alanı sağlamıştır. Ankraj hazırlama aşamaları Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Ankrajların Hazırlanması: (a), (b) CFRP Kesilmesi; (c) Donatı Kesilmesi; (d), (e) Sarım ve Sabitleme; (f) Uç Kısımların Kesilmesi

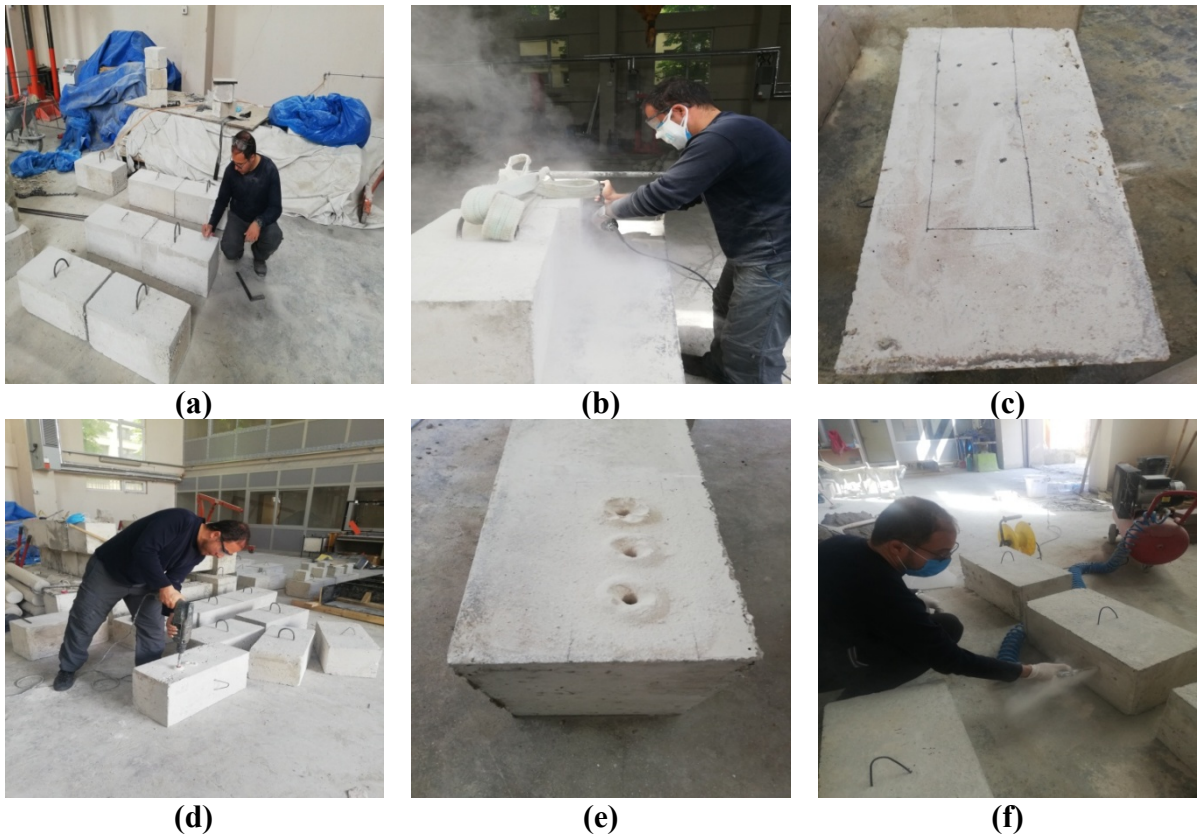
3.3.3. Karbon Tekstil Şeritlerin Beton Yüzeye Yapıştırılması

Numune hazırlığının üçüncü aşaması, tekstil şeritlerin beton yüzeyine yapıştırılmasını ve ankraj konfigürasyonuna göre fan şeklindeki ankrajların yerleştirilmesini içermektedir.

İlk olarak, isimlendirme şemasına uygun olacak şekilde deney eleman numaraları beton numuneler üzerine yazılmıştır. Yapıştırma yüzeyi, yüzeydeki şerbet tabakasını uzaklaştırmak ve mekanik kenetlenmeye uygun, temiz ve pürüzlü bir doku elde etmek amacıyla isimlendirme şeması ve yerleşim detayında belirtildiği üzere TRM şerit ölçülerine uygun olacak şekilde spiral ile mekanik olarak taşlanmıştır. Bu işlemlere ait görseller Şekil 3.6'da verilmiştir.

Bunun ardından hem TRM şeritlerinin hem de ankraj deliklerinin konumları, uygulama sırasında doğru hizalama sağlamak amacıyla beton yüzey üzerine dikkatlice işaretlenmiştir. Belirlenen noktalarda matkap yardımı ile 16 mm çapında, 50 mm derinliğinde ankraj delikleri delinmiş, ardından delik derinlikleri, fan tipi ankrajların doğru gömülmesini sağlamak için derinlik ölçer kumpas yardımıyla ölçülüp doğrulanmıştır.

Delme ve yüzey hazırlığı tamamlandıktan sonra, beton yüzeyinde kalan toz ve kalıntılar, basınçlı hava kullanılarak tamamen temizlenmiştir. Beton yüzeyler güçlendirmeye hazır hale getirildikten sonra karbon tekstil şeritlerin hazırlanması aşamasına geçilmiştir. Her numune için hedeflenen şerit genişlikleri ve yapıştırma boylarına göre kesilmiştir. Yerleşim şemasındaki geometrik detaylara göre karbon tekstil şeritler, 50 mm ve 100 mm genişliğinde; bağlanma uzunluğuna (150 mm, 300 mm ve 450 mm) ve deney düzeneğinin tasarımı (çelik plakanın sabitlendiği hareketli çekme düzeneği ile beton plağın sabitlendiği kısım arasındaki mesafe) göz önünde bulundurularak 1300 (150+1150) mm, 1450 (300+1150) mm ve 1600 (450+1150) mm uzunluğunda kesilmiştir.

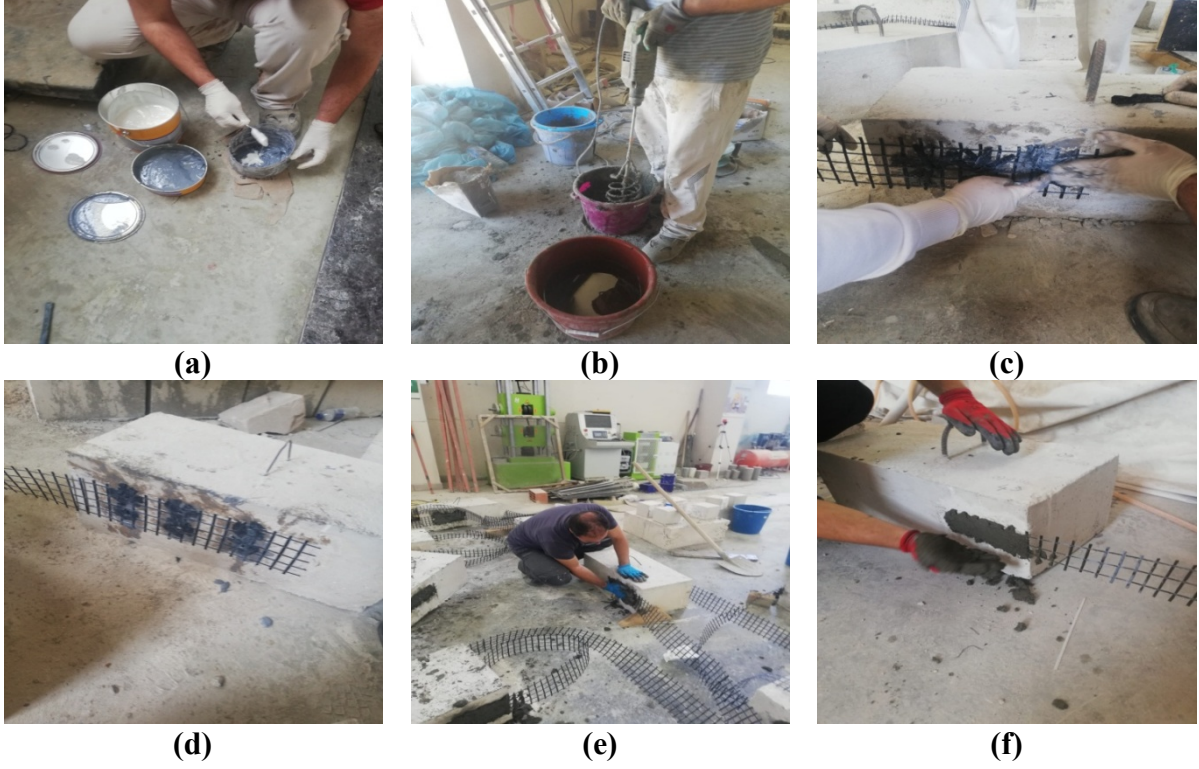


Şekil 3.6. Tekstil Şeritler İçin Yüzey Hazırlığı: (a) Numaralandırma; (b) Taşlama; (c) Şerit ve Ankraj Konumlarının İşaretlenmesi; (d), (e) Delme İşlemi; (f) Temizleme İşlemi

CFRP fan tipi ankrajların montajı, beton alt tabaka ile güvenilir bir mekanik kenetlenme sağlamak amacıyla dikkatle kontrol edilen bir dizi adım izlenerek gerçekleştirilmiştir. Ankraj gerektirmeyen numunelerde yüksek performanslı lif takviyeli tamir harcı karıştırılmış ve yapıştırma alanına uygulanmıştır. Bu harç tabakasının üzerine karbon tekstil şeritler yerleştirilmiş ve üzerine tekrar tamir harcı tabakası uygulanmıştır. Ankraj gerektiren numunelerde; ilk olarak, üretici talimatlarına uygun olarak, iki bileşenli epoksi yapıştırıcı; reçine ve sertleştiricinin hacimce 4:1 oranında karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Karışım, homojen bir kıvam elde edilene kadar iyice karıştırılmış ve böylece

optimum yapışma performansı sağlanmıştır. Uygulamaya hazır hale getirilen çift bileşenli epoksi, şırınga vasıtasıyla ankraj deliklerine enjekte edilmiştir. Deliklerin hava boşluğu oluşmadan eşit şekilde doldurulmasına özen gösterilmiş; aksi durumda ankrajların gömülme kalitesi olumsuz etkilenebileceğinden bu aşama dikkatle yürütülmüştür. Daha sonra karbon tekstil şeritler çizilen şablon üzerine konularak, CFRP fan tipi ankrajların kök bölümleri ankraj deliklerinin içerisine yerleştirilmiştir. Dışarıda kalan önceden kesilip şekillendirilmiş fan uçlarının, altına ve üzerine epoksi sürülerek karbon tekstil şeritin beton yüzey ile sabitlenmesi sağlanmıştır. Tüm bileşenler, tam temasın sağlanması ve boşlukların giderilmesi amacıyla hafifçe bastırılmıştır. Bu ankraj uygulama prosedürü, TRM–beton arayüzeyinin kompozit davranışını güçlendirmede ve çekme yükleri altında erken ayrılmaları (debonding) önlemede kritik bir rol oynamaktadır. Harç ile sabitlenen CFRP tipi ankraj uygulaması için tek bileşenli, kendiliğinden yerleşen grout harcı ankrajlara sürülerek deliklere yerleştirilmiş ve ankraj ile şerit arasında yine ince bir tabaka halinde harç sürülerek ankrajların fan kısımları şerit üzerine açılmıştır ve sabitlenmiştir. İşlemlere ait görseller Şekil 3.7’de verilmiştir.

Ankraj uygulamasından sonra karbon tekstil ağ şeritlerin harç ile kaplanması aşamasına geçilmiştir. Karbon tekstilin beton yüzeyinden soyulmasını geciktirmek için geleneksel sıva karışımlarının yerine yüksek performanslı lif takviyeli tamir harcı tercih edilmiştir. Üretici firma tarafından önerildiği şekilde hazırlanan harç ile ankraj bölgelerinin ve karbon tekstil şeritlerin üzeri düzgün bir şekilde kapatılmış ve ıslak sünger ile silinerek düzgün bir yüzey elde edilmesi amaçlanmıştır. Karbon tekstil ağda yer alan 25×25 mm boyutlarındaki boşluklardan şeritler üzerine sürülen harç malzemesi hem şeritlerin altına hem de üst yüzeyine rahatlıkla tutunarak şeritlerin beton numuneye bağlanmasını sağlamıştır. Karbon tekstil ağ şeritler üzerine sürülen harcın dayanıma ulaşması ve deney elemanlarına uygulanan güçlendirmenin tamamlanması için harç uygulanan bölümlere 7 gün boyunca su püskürtme işlemi uygulanarak kür işlemi yapılmıştır ve sonrasında 21 gün laboratuvar ortamında kuruması beklenerek 28 günlük süre tamamlanmıştır.



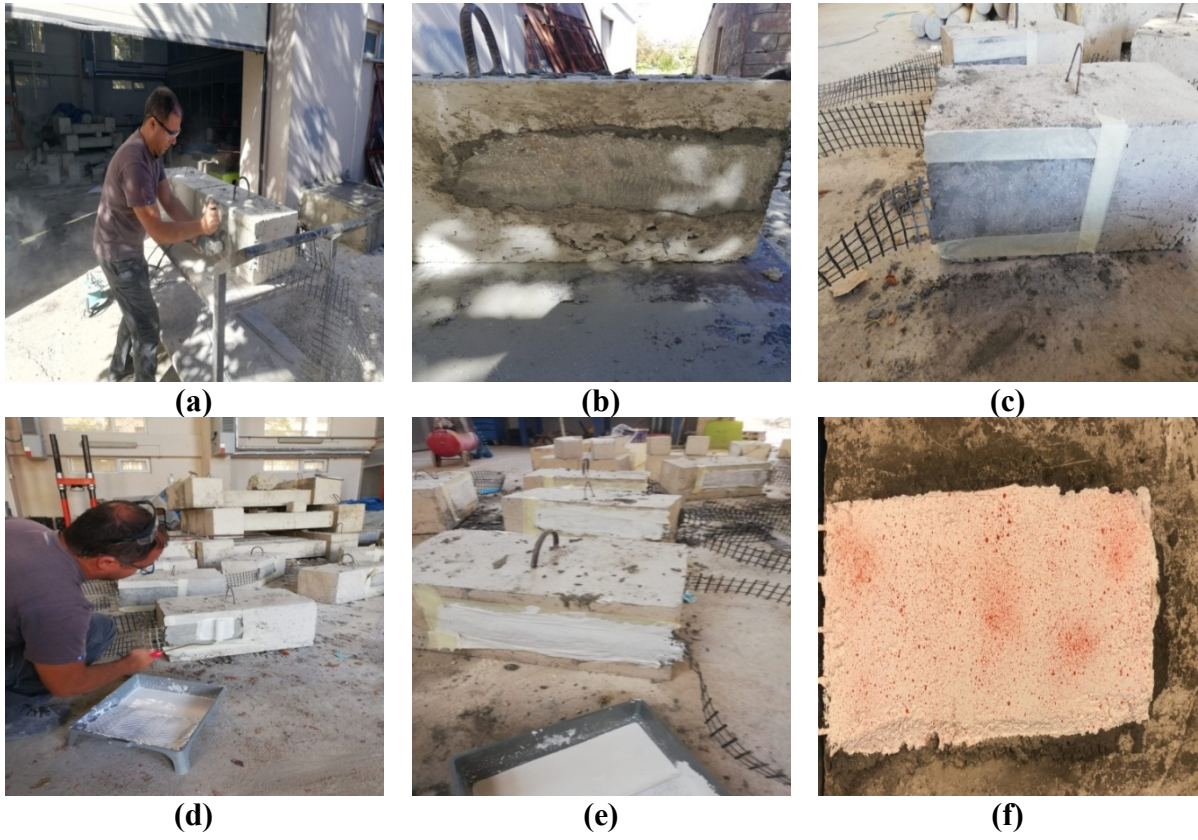
Şekil 3.7. Tekstil Şeritlerin Beton Yüzeye Yapıştırılması: (a), (b) Epoksi ve Harç Hazırlanması; (c), (d) Ankrajların Sabitlemesi; (e), (f) Harç Uygulanması

3.3.4. Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) Analizi İçin Yüzey Hazırlığı

Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC), mekanik yükleme altındaki malzemelerde deformasyon ve yer değiştirmelerin hassas bir şekilde ölçülmesine olanak sağlayan gelişmiş, temassız bir optik tekniktir. Bu yöntemde, yükleme öncesinde ve yükleme sırasında yüzeyden alınan ardışık görüntüler analiz edilerek, gelişmiş korelasyon algoritmaları aracılığıyla piksel düzeyindeki hareketler belirlenir.

Doğru bir takibin sağlanabilmesi için, yüzey hazırlığı çok önemlidir. Kür işlemi tamamlanan ve dayanıma ulaşan sıva katmanı üzeri spiral yardımı ile düzeltilmiştir. Bu işlem yapılırken tekstil şeritlerin zarar görmemesine özen gösterilmiştir. Bu işlemden sonra görüntüleme alanının sınırlandırılması amacı ile kâğıt bantla yapıştırma işlemi yapılmıştır. Düzeltme işlemi tamamlandıktan sonra benekleme işleminin yapılabilmesi amacı ile sıva katmanları üzeri boyanmıştır. Numunelere önce bir kat beyaz renkte örtücü astar sonra iki kat beyaz dış cephe boyası rulo ile sürülmüştür. Arka planı beyaz boya ile hazırlanmış numuneler üzerine kırmızı sprey boya ile belirli bir mesafeden boya püskürtülerek rastgele bir benek deseni uygulanmıştır. Benekler, farklı bir arka plan renginde belirli bir rengin ayırt edilebilir özellikleri olarak tanımlanır. Buradaki amaç, oluşturulan her bir alt kümenin benzersiz desene sahip olmasını sağlamaktır. Numune yüzeyi tekrarsız, yönden bağımsız ve yüksek kontrastlı

olduğunda, benzersiz alt kümelerin oluşma ihtimali artarak gerçeğe daha yakın analiz sonuçlarının alınması sağlanmaktadır. En iyi ve en yaygın desen uygulaması yüksek derecede rastgelelik içeren desenleme yöntemleridir. Benekleme üzerine literatürde bulunan öneriler görünüşte rastgelelik içeren beneklemeyi tavsiye etmekte ve numune için tasarlanmış özel bir beneklemeyi tercih etmemektedir. Beneklendirme ile ilgili belli bir standart henüz bulunmamaktadır (Mazzoleni vd., 2015). Ön çalışmalar sonucunda elde edilen benek desenlerine göre bu çalışmanın nihai benek deseni belirlenmiştir. Uygulanan işlemler ile görüntülerin etkin bir şekilde işlenebilmesi için gerekli olan benzersiz ve yüksek kontrastlı bir yüzey dokusu oluşturulmuştur. Bu işlemlere ait görseller Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. DIC Analizi İçin Yüzey Hazırlığı: (a), (b) Taşlama; (c), (d), (e) Boyama; (f) Benekleme İşlemleri

3.4. Deney ve Ölçüm Düzenegi

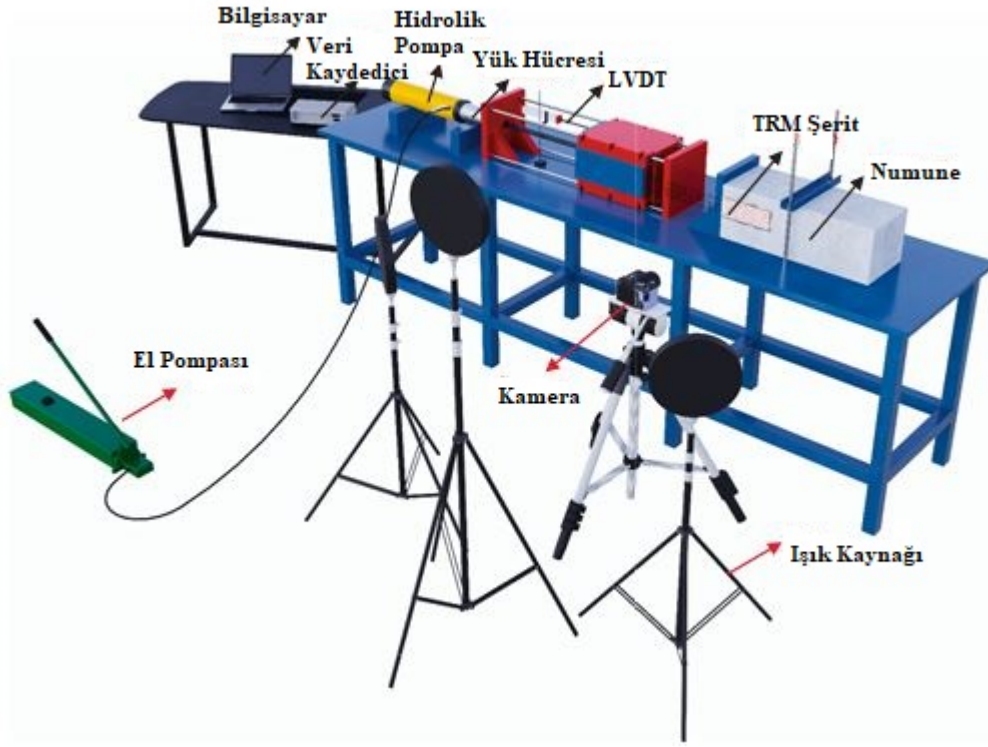
3.4.1. Deney Düzenegi

TRM şeritleri ile beton alt tabaka arasındaki yük–deplasman davranışını ayrıntılı olarak incelemek amacıyla, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da gösterilen özel olarak tasarlanmış bir deney düzenegi geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Deney sistemi, önceki araştırmalardan ve yazarların önceki deneyimlerinden elde edilen bilgiler doğrultusunda tasarlanmış olup, test süreci boyunca hem ölçüm hassasiyetini hem de güvenilirliği sağlamayı amaçlamaktadır. Test sırasında beton bloğun hareket etmesini önlemek amacıyla beton numuneler sabit çelik çerçeveye çelik profil yardımıyla sabitlenmiştir. Karbon tekstil şeritlerin uçları cıvata kullanılarak çelik plakalara bağlanmıştır. Yük, lif yönü boyunca, TRM şeridin kopması veya aderans kaybı (sıyırılma) meydana gelene kadar uygulanmıştır.

Eksenel yük, 500 kN kapasiteye sahip hidrolik bir kriko kullanılarak uygulanmış; uygulanan kuvvet ise maksimum 400 kN kapasiteli, kalibre edilmiş bir yük hücresi ile sürekli olarak izlenmiştir. TRM şeridi ile beton yüzey arasındaki arayüzeydeki deplasman, 100 mm ölçüm aralığına sahip yüksek hassasiyetli bir Lineer Değişken Diferansiyel Transformatör (LVDT) kullanılarak ölçülmüştür. LVDT’nin konumlandırılması, yalnızca arayüzeydeki yer değiştirmenin ölçülmesini, TRM şeridi içinde meydana gelen deformasyonların ölçüme dâhil edilmemesini sağlayacak şekilde dikkatle ayarlanmıştır.

LVDT, manyetik tabanlı rijit bir mesnet üzerine monte edilmiştir ve yay yüklü ucu, TRM şeridine sabitlenmiş bir çelik plaka ile sürekli temas halinde olacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu düzenleme, yükleme süreci boyunca TRM şeridinin hareketi ve beton yüzey ile TRM şeridi arasındaki arayüzeyde oluşan rölatif yer değiştirmelerin doğru bir şekilde izlenmesini sağlamıştır. Tüm deneylerde yükleme işlemi, karşılaştırılabilir ve tutarlı sonuçlar elde etmek amacıyla sabit ve kontrollü bir hızda gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasında, TRM şeritler boyunca birim deformasyon dağılımının belirlenmesi amacıyla başlangıçta gerinim ölçerlerin kullanılması planlanmıştır. Ancak, sürekli ve tam alan ölçüm imkânı sunan ve son yıllarda inşaat mühendisliği deneysel çalışmalarında kullanımı giderek artan dijital görüntü korelasyonu (DIC) yönteminin uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla referans bir numune üzerinde DIC ölçümleri gerçekleştirilmiş ayrıca bu numuneye beş adet gerinim ölçer yerleştirilerek uzunluk boyunca meydana gelen şekil değişimi iki yöntemle izlenmiştir. DIC sonuçlarının gerinim ölçer verileriyle uyumlu olduğu doğrulandıktan sonra, deneysel programın tamamında deformasyon ölçümleri için DIC yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Deney ve Ölçüm Düzenegi Şeması (Çelik vd., 2025)



Şekil 3.10. Deney ve Ölçüm Düzenegi (Mercimek vd., 2026)

3.4.2. Ölçüm Düzenegi

Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC), mekanik yüke maruz bırakılan malzemelerdeki deformasyon ve yer değiştirmelerin hassas bir şekilde ölçülmesini sağlayan gelişmiş, temassız bir optik tekniktir. Bu yöntem, yükleme öncesinde ve sırasında çekilen yüzey görüntülerini analiz ederek, pikseller düzeyindeki hareketleri karmaşık korelasyon algoritmaları aracılığıyla belirler. Doğru takibi mümkün kılmak için, genellikle numune yüzeyine spreyci boya kullanılarak rastgele bir benek deseni uygulanır; bu desen, etkili bir görüntü işleme için gerekli olan benzersiz ve yüksek kontrastlı bir doku oluşturur. DIC yöntemi, temas gerektirmemesi, mikrodüzeydeki deformasyonları yüksek hassasiyetle tespit edebilmesi ve numune yüzeyinin tamamında ölçüm yapılmasına imkân tanınması gibi önemli avantajlar sunar.

DIC analizi, rastgele benekli desene kaplanmış numunenin deforme olmadan ve deforme olduktan sonraki iki görüntüsü arasındaki model uyuşması üzerine kuruludur. Buradaki amaç eşleşen görüntü fonksiyonlarının yakalanmasıdır. DIC'nin temel ilkesi, deforme olmamış haldeki numune yüzeyi üzerinde analiz edilecek bölge (region of interest-ROI) içindeki küçük kareler arasında maksimum korelasyonu aramaktır. Bir dizi piksel içeren küçük kare bölüm alt küme, altındaki iki grubun arasındaki mesafe adım aralığı olarak tanımlanır. Alt küme boyutu, yer değiştirme ölçümü için ardışık görüntüler arasında izlenen görüntünün alanını belirler. Adım aralığı ise yer değiştirmeyi tahmin etmek için alt kümenin üzerinde kaydırılması gereken piksel sayısını belirler (Kashfuddojavd, 2014).

Deneyler sırasında, numune yüzeylerinin yüksek çözünürlüklü dijital görüntüleri, görüntü yüzeyi ile numunenin paralelliğini sağlamak için yüzeye dik olarak konumlandırılmış bir Canon EOS 700D dijital kamera kullanılarak düzenli zaman aralıklarında kaydedilmiştir. Deney süresince aydınlatmanın sabit kalmasını sağlamak amacıyla, 3000 K renk sıcaklığına sahip üç adet M666-14 dairesel LED ışık kaynağı kullanılmıştır. Bu düzenek, testler boyunca kararlı ve net görüntüleme koşulları sağlamıştır. TRM şeritlerinin şekil değiştirme davranışlarını yakalamak için kullanılan DIC sisteminin şematik konfigürasyonu şekil 3.9'da sunulmuştur.

Elde edilen görüntüler, MATLAB (MATLAB, 2021) ortamında çalışan açık kaynaklı bir DIC yazılımı olan Ncorr (Blaber vd., 2015) kullanılarak işlenmiştir. Yazılım, kullanıcı tarafından tanımlanan İlgi Bölgeleri (ROI) üzerinden malzemenin referans ve deformasyona uğramış durumlarını karşılaştırarak, gelişmiş korelasyon algoritmaları yardımıyla yüzey yer değiştirmelerini ve deformasyon değerlerini hesaplamaktadır. Bu çıktıları hem sayısal hem de

grafiksel formatlarda elde edilerek, yük altında yerel deformasyon desenlerinin ve şekil değiştirme dağılımlarının ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

DIC ölçümlerinin güvenilirliğini ve tutarlılığını sağlamak amacıyla, temel analiz parametreleri dikkatli bir şekilde seçilmiştir. Alt küme yarıçapı, görüntü çözünürlüğüne bağlı olarak 10 ile 12 piksel arasında belirlenmiş; tüm numuneler için maksimum yineleme sayısı 100 olarak sabitlenmiştir. Yineleme sayısı, her alt küme için korelasyon algoritmasının kaç defa çalışacağını gösteren bir terimdir. Alt küme yarıçapı ve yineleme sayısının standartlaştırılması, elde edilen sonuçların hem doğruluğunu hem de deney matrisi genelinde karşılaştırılabilirliğini güvence altına almıştır.

3.5. Yük ve Deplasman Değerlerinin Ölçülmesi

Deney süresince eksenel yük 500 kN kapasiteli bir hidrolik kriko kullanılarak kontrollü bir şekilde monotonik olarak artırılarak uygulanmıştır. Uygulanan kuvvet ise maksimum 400 kN kapasiteye sahip kalibre edilmiş bir yük hücresi aracılığıyla sürekli olarak izlenmiştir. TRM şeridi ile beton yüzeyi arasındaki arayüzeyde meydana gelen deplasman, ölçüm aralığı 100 mm olan yüksek hassasiyetli bir Lineer Değişken Diferansiyel Transformatör (LVDT) kullanılarak ölçülmüştür. LVDT'nin konumlandırılması, yalnızca arayüzeyde oluşan deplasmanı ölçmek ve TRM şeridinin kendi bünyesinde meydana gelen deformasyonları ölçüme dâhil etmemek amacıyla dikkatlice ayarlanmıştır. LVDT, manyetik tabanlı rijit bir destek üzerine monte edilmiş ve yay yüklü ucu, TRM şeridine sabitlenmiş bir çelik plaka ile sürekli temas halinde olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu düzenek sayesinde yükleme süreci boyunca arayüzeyde meydana gelen görelî yer değiştirme hassas bir şekilde takip edilebilmiştir. Tüm numuneler, sonuçların tutarlılığını ve karşılaştırılabilirliğini sağlamak amacıyla sabit ve kontrollü bir yükleme hızında yüklemeye tabi tutulmuştur. Ölçülen yük ve yer değiştirme değerleri veri toplama sistemi aracılığıyla eş zamanlı olarak kaydedilerek yük-deplasman eğrileri oluşturulmuştur.

TRM numunelerinde elde edilen yük–deplasman eğrileri genellikle üç temel davranış bölgesinden oluşur:

1- Elastik Bölge (Başlangıç Bölgesi): Eğrinin başlangıç kısmında yük ile yer değiştirme arasında yaklaşık doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Bu bölgede sistemin davranışı büyük ölçüde harç matrisinin elastik özellikleri tarafından kontrol edilir. Lif yönüne paralel eksenel çekme altında gösterdiği tepki, başlangıçta doğrusal elastik bir davranışla (çatlamamış matris) başlar. Bu doğrusal kısmın eğimi, sistemin başlangıç rijitliğini temsil

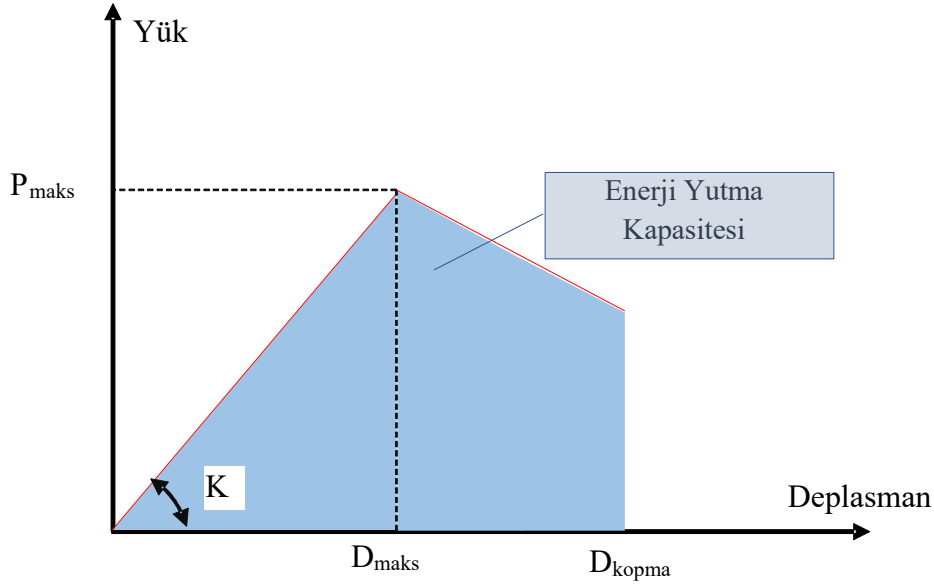
eder. Tipik olarak, düşük yük seviyelerinde TRM ile beton arayüzü kaymasız (tam yapışma) durumda olup yük-taşıyıcı sistem yüksek başlangıç rijitliğiyle davranır.

- 2- **Çatlak Oluşumu ve Dağılımı Bölgesi:** Yükün artmasıyla birlikte harç matrisinde ilk çatlaklar oluşmaya başlar. Bu aşamadan sonra yük artışı devam ederken eğride eğim azalır ve yer değiştirme daha hızlı artar. Çatlakların ilerlemesiyle yük, giderek daha fazla tekstil lifleri tarafından taşınmaya başlanır. Bu bölge, TRM sistemlerinin çatlak kontrolü ve gerilme aktarım mekanizmasının gözlemlendiği önemli bir aşamadır.
- 3- **Tekstil Liflerinin Taşıyıcı Olduğu Bölge ve Göçme:** Harç matrisindeki çatlakların gelişmesiyle birlikte yük taşıma kapasitesi büyük ölçüde tekstil lifleri tarafından karşılanır. Bu aşamada eğride genellikle daha düşük eğimli bir doğrusal davranış görülür. Nihayetinde numune; lif kopması, liflerin matristen sıyrılması veya matris–tekstil aderans kaybı sonucu ayrılması gibi mekanizmalar sonucunda göçer. Sonrasında aderans mekanizması, çeşitli kopma modlarına bağlı olarak ani veya kademeli bir gerilme düşüşü sergiler (Triantafillou, 2016).

3.6. Performans İndekslerinin Hesaplanması

Deney elemanlarına ait maksimum yük, maksimum yükteki deplasman, başlangıç rijitliği, maksimum deplasman ve enerji yutma kapasitesi gibi temel yapısal performans indeksleri Şekil 3.11’de verilen yük-deplasman eğrisinde gösterilmiştir. Maksimum yük taşıma kapasiteleri, yük-deplasman eğrilerinde ulaşılan maksimum yük değerlerinin okunması ile elde edilmiştir. Yük-deplasman eğrilerinde yükün maksimum olduğu değer $P_{maks.}$ olarak, bu yükteki deplasman değeri ise $D_{maks.}$ olarak tanımlanmıştır. Deneyle kopmaya kadar sürdürülmesi sonucunda, numunenin nihai kırılma anındaki deplasman değeri D_{kopma} olarak kaydedilmiştir. Yük–deplasman eğrisi altında kalan alan, numune tarafından yutulan toplam enerjiyi temsil etmekte olup bu büyüklük kırılma (kopma) enerjisi veya enerji yutma kapasitesi olarak tanımlanmaktadır (Hillerborg, 1985). Bu bağlamda enerji yutma kapasitesi, yük etkisi altında sistem tarafından sönmölen toplam enerji miktarını ifade etmektedir. Rijitlik ise yük-deplasman eğrisinin maksimum yük öncesindeki doğrusal (elastik) bölgesinin eğiminden (K) belirlenmiştir. Maksimum yük değerinin o noktadaki deplasman değerine oranlanması ($P_{maks.}/D_{maks.}$) ile rijitlik değeri hesaplanmıştır. Rijitlik, bir malzemenin veya yapısal elemanın uygulanan yük altında şekil değiştirmeye karşı gösterdiği dirençtir ve belirli bir deformasyon oluşturmak için gerekli yük miktarını ifade eder

Yük-deplasman eğrisinde P_{maks} maksimum yük, K doğrusal bölgenin eğimi, D_{maks} maksimum yükteki deplasman ve D_{kopma} kopma anındaki deplasman değerini ifade etmektedir.

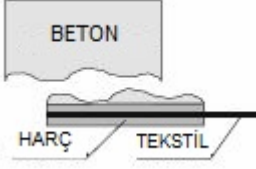
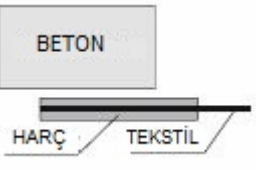
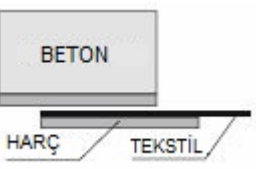
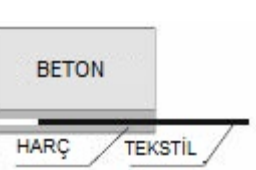
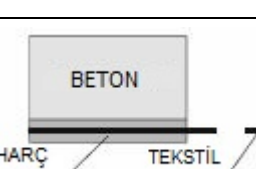
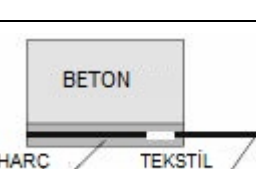


Şekil 3.11. Performans İndekslerini Hesaplama Yaklaşımı (Erbaş, 2025)

3.7. Göçme Modları

Yapı elemanlarının güçlendirilmesinde güçlendirme işleminin etkinliği, TRM ile alt tabaka arasındaki aderans davranışına bağlıdır. Bu nedenle söz konusu aderans davranışının, güçlendirme tasarımının yapılabilmesi ve güçlendirilmiş yapısal elemanın performansının değerlendirilebilmesi için karakterize edilmesi gerekmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar ile TRM ile alt tabaka arasındaki aderans kopmasının yalnızca alt tabaka yüzeyinden değil aynı zamanda kompozit tabakanın içerisinde de meydana geleceği anlaşılmıştır. TRM ile alt tabaka arasındaki yük aktarım mekanizması matris ile alt tabaka arasındaki aderansa, tekstil ile matris arasındaki yapışmaya ve lifler arasındaki bağa bağlıdır. Yük aktarım kapasitesi; tekstil liflerinin yapısı ve çeşidinden, matrisin mekanik özellikleri ve kalınlığından, alt tabaka (yapışma tabakası) dayanımı, yüzey durumu ve nem içeriği şeklindeki özelliklerinden, uygulama koşulları ve kür kalitesinden etkilenebilmektedir. (De Felice vd., 2018). RILEM teknik komitesi tarafından yapılan deneyler sonucunda farklı tipte göçme modları gözlemlenmiş olup göçme modları ve deneyler sonrasında numunelerin yüzeylerinde gözlemlenen hasar tanımları Tablo 3.9’da sınıflandırılmıştır.

Tablo 3.9. Göçme Modları (De Felice vd., 2018)

Göçme Modu	Şematik Çizim	Açıklama
A		Beton yüzeyin hasar alarak kırılmasıyla meydana gelen ayrılma
B		TRM şerit bütünlüğünün korunarak beton yüzey-harç arayüzeyinde meydana gelen ayrılma
C		TRM şeridin yüzeyindeki harç katmanının hasar görmesi sonucunda tekstil-harç arayüzeyinde meydana gelen ayrılma
D		TRM şeridin alt ve üst yüzeylerindeki harç katmanlarında çatlak oluşsun ya da oluşmasın (genellikle hasar oluşmadan) matris içerisinde tekstilin kayarak arayüzeyden sıyrılması
E-1		Matris dışında kalan karbon tekstil ağın kopması
E-2		Karbon tekstil ağın matris içinde bulunan bölgeden kopması

Göçme modları genellikle aşağıda belirtildiği durumlarda ortaya çıkar:

- A göçme modu; güçlü bir matrisin (örneğin yüksek dayanımlı harç vb.) zayıf bir alt tabakaya bağlandığı durumlarda ortaya çıkar.
- B göçme modu; genellikle pürüzsüz, düzgün yüzeylerde, alt tabaka hazırlığının yetersiz yapıldığı durumlarda veya elverişsiz kür koşullarında oluşur.

- C göçme modu, tekstil ağ boşluklarından geçen harç miktarı tarafından kontrol edilir ve genellikle küçük göz aralığına sahip tekstillerden oluşan TRM sistemlerinde görülür.
- D göçme modu, genellikle kaplama veya ön emprenye sağlanmamış kuru lif demetleri ya da matrisle nispeten zayıf aderans özelliğine sahip düzgün tekstil ağlar kullanıldığında ortaya çıkar.
- E-1 ve E-2 göçme modları nispeten zayıf ve yeteri kalınlıkta olmayan tekstil ağların kullanımından kaynaklanabilir (De Felice vd., 2018).

4. DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde, aksel çekme kuvveti uygulanan TRM ile güçlendirilmiş beton numunelerin yük–deplasman performansına ilişkin deneysel bulgular sunulmaktadır. Deneysel çalışma kapsamında TRM şeritlerin aksel çekme kuvveti etkisindeki yük–deplasman davranışları incelenmiş olup performans değerlendirilmesi; yük taşıma kapasitesi, maksimum deplasman, rijitlik ve enerji yutma kapasitesi gibi başlıca yapısal parametreler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) yöntemi ile numunelerin birim deformasyon dağılımları incelenmiş ve göçme modları belirlenmiştir. Numuneler; beton dayanımı, TRM bağ uzunluğu, tekstil genişliği, ankraj konfigürasyonu ve ankraj sabitleme çeşidi gibi temel parametrelere göre gruplandırılmış ve analiz edilmiştir.

Deneysel parametreler olarak beton basınç dayanımı (C:15 ve 30 MPa), şerit genişliği (W:50 ve 100 mm), bağ uzunluğu (L:150, 300 ve 450 mm), ankraj sabitleme tipi (E-epoksi ve M-harç) ve ankraj konfigürasyonu (NA, 1/1, 2/1, 3/1, 2/2, 3/2) seçilmiş olup, yük–deplasman eğrilerinden maksimum yük (kN), maksimum yükteki deplasman (mm), rijitlik (kN/mm), maksimum deplasman (mm) ve enerji yutma kapasitesi (kN.mm) performans indeksleri hesaplanmıştır.

4.1. Yük-Deplasman Eğrileri

TRM güçlendirme sisteminde yapılan çekme deneylerinde elde edilen yük–deplasman eğrileri, malzemenin çekme davranışını, aderans mekanizmasını ve göçme özelliklerini değerlendirmek için kullanılan temel araçlardan biridir.

Ankrajlı numuneler için EK-1 ve EK-2’de, epoksi esaslı ankraj numuneleri için EK-3 – EK-6’da ve çimento esaslı harç ile sabitlenen fan tipi ankrajlı numunelerde ise EK-7 – EK-10’da sunulan yük–deplasman eğrileri birlikte değerlendirildiğinde, numunelerin genel olarak benzer bir mekanik davranış sergilediği görülmektedir. Tüm numunelerde başlangıç aşamasında belirgin bir doğrusal elastik davranış gözlenmiş, bu bölgeyi takiben tepe yüküne yaklaşıırken rijitlikte azalma ile karakterize edilen doğrusal olmayan (plastik) deformasyon süreci başlamıştır. Tepe yükünün aşılmasının ardından ise numunelerde, hasar mekanizmasına bağlı olarak ani (gevrek) veya kademeli (sünek) dayanım kaybı meydana gelmiştir. Bu durum, numunelerin taşıma kapasitesi sonrasında farklı enerji tüketim ve hasar yayılım karakteristikleri sergilediğini ortaya koymaktadır.

4.2. Performans İndeksleri

Bu çalışmada TRM kompozitlerinin çekme yükü altındaki performansları, yük-deplasman eğrileri ve tanımlanan performans indekslerine göre değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen yük-deplasman eğrileri, yapı elemanlarının mekanik davranışının değerlendirilmesinde önemli bir araçtır. Bu eğriler yardımıyla numunenin maksimum yük taşıma kapasitesi, maksimum yükteki deplasman değeri, başlangıç rijitliği, maksimum deplasman ve enerji yutma kapasitesi gibi temel performans indeksleri belirlenmiş olup C15 ve C30 beton dayanım sınıfı için sırasıyla EK-11 ve EK-12’de sunulmuştur.

4.2.1. Maksimum Yük

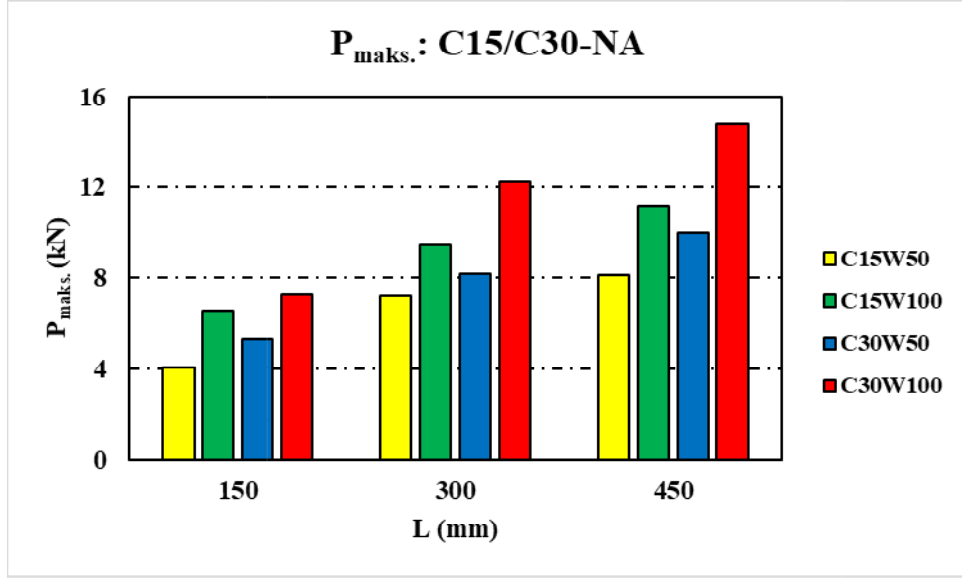
Maksimum yük taşıma kapasitesi, bir yapı elemanının, malzemenin veya deney numunesinin göçme meydana gelmeden önce taşıyabildiği en büyük yük değeridir. Bu değer genellikle deney sırasında elde edilen yük-deplasman eğrisinde tepe noktasına karşılık gelir ve sistemin nihai dayanımını temsil eder. Yük taşıma kapasitesi, bir yapı elemanının dayanımını, göçme davranışını ve güçlendirme yöntemlerinin etkinliğini değerlendirmede temel bir parametre olarak kullanılır.

4.2.1.1. Ankrajsız (NA) Numunelerde Maksimum Yük

Deneysel program kapsamında değerlendirilen temel performans indekslerinden biri olan maksimum yük taşıma kapasitesi değerleri, ankrajsız numuneler için Şekil 4.1’de sunulmuştur. Söz konusu numunelerin davranışının analizinde, deneysel değişkenler olarak belirlenen beton basınç dayanımı, TRM şerit genişliği ve TRM bağ uzunluğu temel parametreler olarak dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, anılan değişkenlerin maksimum yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere, tüm numune gruplarında bağ uzunluğunun (L) 150 mm’den 300 mm’ye ve 450 mm’ye artırılmasıyla birlikte maksimum yük taşıma kapasitesinde düzenli bir artış meydana gelmiştir. Bu artış eğilimi, aderans yüzeyinin büyümesine bağlı olarak yük aktarımının daha etkin gerçekleştiğini göstermektedir.

Beton basınç dayanımının etkisi incelendiğinde, C30 sınıfı beton numunelerin, aynı şerit genişliği ve bağ uzunluğu koşullarında C15 sınıfı numunelere kıyasla daha yüksek maksimum yük değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Örneğin, 450 mm bağ uzunluğunda C30W100 numunesi 14.78 kN maksimum yük seviyesine ulaşırken, 450 mm bağ uzunluğuna sahip C15W100 numunesi 11.17 kN maksimum yük seviyesinde kalmıştır. Bu durum, beton dayanımındaki artışın TRM-beton aderans performansını ve dolayısıyla yük taşıma kapasitesini olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır.



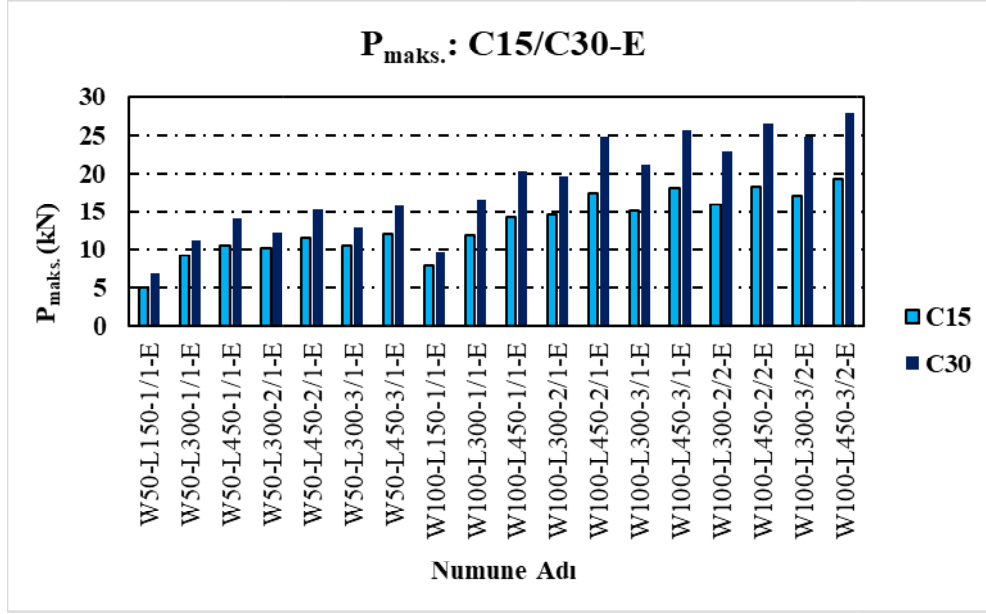
Şekil 4.1. NA-Maksimum Yük Değerleri

TRM şerit genişliğinin etkisi değerlendirildiğinde ise, 50 mm genişliğindeki numunelere kıyasla 100 mm genişliğindeki numunelerin tüm bağ uzunluklarında daha yüksek yük taşıma kapasitesi sergilediği görülmektedir. Örneğin, 300 mm bağ uzunluğunda C15W50 numunesi 7.23 kN yük taşıırken, C15W100 numunesi 9.51 kN seviyesine ulaşmıştır. Benzer şekilde C30 serisinde de TRM şerit genişlik artışıyla birlikte belirgin kapasite artışları gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, Şekil 4.1’de sunulan veriler, bağ uzunluğu, beton basınç dayanımı ve TRM şerit genişliğinin maksimum yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli ve pozitif etkilere sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu parametrelerin birlikte artırılması, ankrajsız TRM güçlendirme sistemlerinin yapısal performansını belirgin şekilde iyileştirmektedir.

4.2.1.2. Epoksi (E) İle Sabitlenen Numunelerde Maksimum Yük

Şekil 4.2’de, epoksi ile sabitlenen ankrajlı numunelerin maksimum yük taşıma kapasiteleri ($P_{maks.}$), diğer deney parametreleri (TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj sayısı ve yerleşim düzeni) her bir numune çifti için sabit tutulmak koşuluyla beton basınç dayanımına bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur.



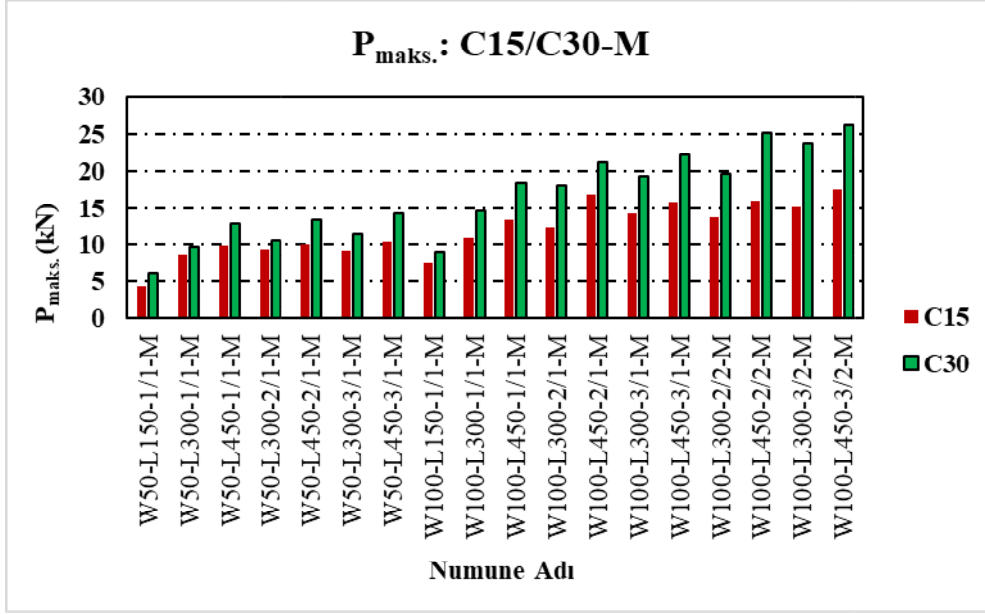
Şekil 4.2. E-Maksimum Yük Değerleri

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere, tüm numune serilerinde C30 sınıfı beton numuneler, C15 sınıfı beton numunelere kıyasla daha yüksek maksimum yük taşıma kapasitesi değerleri sergilemiştir. İncelenen numuneler arasında, en düşük bağ uzunluğu, şerit genişliği ve daha sınırlı ankraj etkisine sahip olan W50-L150-1/1-E serisinde C15 numunesi 5 kN seviyesinde kalırken, C30 numunesi 6.82 kN mertebesine ulaşmıştır. Şerit genişliği, bağ uzunluğu ve ankraj sayısının artmasıyla birlikte maksimum yük değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiş; W100-L450-2/1-E serisinde C15 numunesi 17.52 kN seviyesine çıkarken, C30 numunesi 24.85 kN olarak bulunmuştur.

Bu eğilim, beton basınç dayanımındaki artışın, epoksi ile sabitlenen ankrajların etkinliğini artırarak TRM-beton arayüzündeki gerilme transfer mekanizmasını iyileştirdiğini göstermektedir. Daha yüksek dayanımlı beton, ankraj çevresinde oluşan yerel gerilmeleri daha etkin karşılayabilmekte ve sıyrılma/ayrılma davranışını geciktirerek sistemin daha yüksek yük seviyelerine ulaşmasına olanak tanımaktadır. Sonuç olarak, Şekil 4.2’de sunulan veriler, epoksi ile sabitlenen ankrajlı TRM güçlendirme sistemlerinde beton basınç dayanımının, maksimum yük taşıma kapasitesi üzerinde belirleyici ve artırıcı bir parametre olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

4.2.1.3. Harç (M) İle Sabitlenen Numunelerde Maksimum Yük

Şekil 4.3’te, harç ile sabitlenen ankrajlı numunelerin maksimum yük taşıma kapasiteleri ($P_{maks.}$), diğer deney parametreleri (TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj sayısı ve yerleşim düzeni) her bir numune çifti için sabit tutulmak koşuluyla beton basınç dayanımına bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur.



Şekil 4.3. M-Maksimum Yük Değerleri

Şekil 4.3'te görüldüğü üzere, tüm numune serilerinde C30 sınıfı beton numuneler, C15 sınıfı numunelere kıyasla daha yüksek maksimum yük taşıma kapasiteleri sergilemiştir. En düşük parametre seviyelerine sahip olan W50-L150-1/1-M serisinde C15 numunesi 4.43 kN seviyesinde kalırken, C30 numunesi 6.12 kN mertebesine ulaşmıştır. Bu durum, beton basınç dayanımındaki artışın, ankraj çevresindeki gerilme dağılımını iyileştirerek yük taşıma kapasitesini artırdığını göstermektedir.

Şerit genişliği, bağ uzunluğu ve ankraj sayısındaki artışa bağlı olarak maksimum yük değerlerinde belirgin bir artış eğilimi gözlenmiştir. W100-L300-1/1-M ve W100-L300-2/1-M aralıklarındaki orta seviyedeki numune gruplarında C15 numuneleri yaklaşık 11–13 kN seviyelerine ulaşırken, C30 numuneleri 15–19 kN bandına yükselmiştir. En yüksek parametre kombinasyonlarının yer aldığı W100-L300-3/2-M ve W100-L450-3/2-M numune çiftlerinde ise C15 numunelerinin yaklaşık 15–18 kN seviyelerine ulaştığı, buna karşılık C30 numunelerinin yaklaşık 24–26 kN aralığında maksimum yük taşıdığı belirlenmiştir.

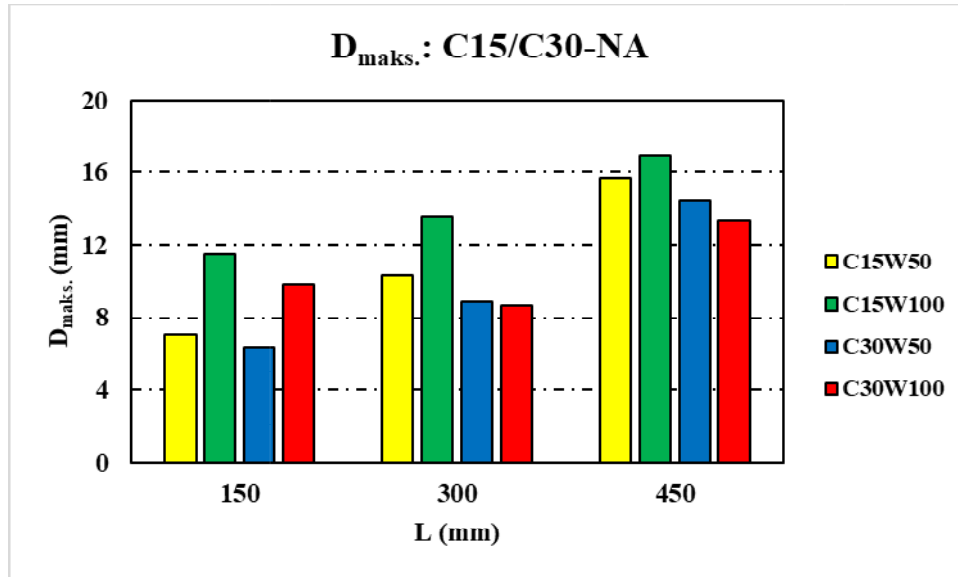
Elde edilen bu bulgular, harç ile sabitlenen ankrajlı TRM sistemlerinde beton basınç dayanımının, maksimum yük taşıma kapasitesi üzerinde belirleyici bir parametre olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Daha yüksek dayanımlı beton kullanımı, ankrajların gömülme bölgesinde oluşan yerel gerilmelerin daha etkin karşılanmasını sağlamakta, sıyrılmaya ve aderans kaybı mekanizmalarını geciktirerek sistemin daha yüksek yük seviyelerine ulaşmasına imkân tanımaktadır.

4.2.2. Maksimum Yükte Deplasman

Deneysel program kapsamında incelenen temel performans parametrelerinden biri olan maksimum yük altındaki deplasman değerleri; ankrajsız numuneler, epoksi ile sabitlenen ankrajlı numuneler ve harç ile sabitlenen ankrajlı numuneler için ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu kapsamda, söz konusu deplasman değerleri deneysel değişkenler (beton basınç dayanımı, TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj sayısı ve yerleşim düzeni) dikkate alınarak değerlendirilmiş ve ilgili parametrelerin etkisini ortaya koyacak şekilde grafiksel olarak sunulmuştur.

4.2.2.1. Ankrajsız (NA) Numunelerde Maksimum Yükte Deplasman

Deneysel program kapsamında değerlendirilen temel performans indekslerinden biri olan maksimum yükte deplasman ($D_{maks.}$) değerleri, ankrajsız numuneler için Şekil 4.4'te sunulmuştur. Söz konusu numunelerin davranışının analizinde, deneysel değişkenler olarak belirlenen beton basınç dayanımı, TRM şerit genişliği ve TRM bağ uzunluğu temel parametreler olarak dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, anılan değişkenlerin maksimum yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



Şekil 4.4. NA-Maksimum Yükte Deplasman

Şekil 4.4 incelendiğinde, genel olarak numune gruplarında bağ uzunluğunun 150 mm'den 450 mm'ye doğru artmasıyla birlikte maksimum yükte deplasman değerlerinin belirgin bir şekilde artışı gözlenmektedir. C15W50 serisi incelendiğinde deplasman değeri 150 mm bağ uzunluğu için 7.07 mm iken 450 mm bağ uzunluğu için 15.70 mm seviyesine yükselmektedir. C15W100 serisi için bu değer 11.51 mm'den 16.97 mm seviyesine

ulaşmaktadır. Benzer şekilde C30 serisinde de bağ uzunluğunun artışıyla birlikte genel olarak deplasman değerleri artmaktadır. Bu durum, bağ uzunluğunun aderans performansını artırarak sistemin daha fazla deformasyon yapabilmesine olanak sağladığını göstermektedir.

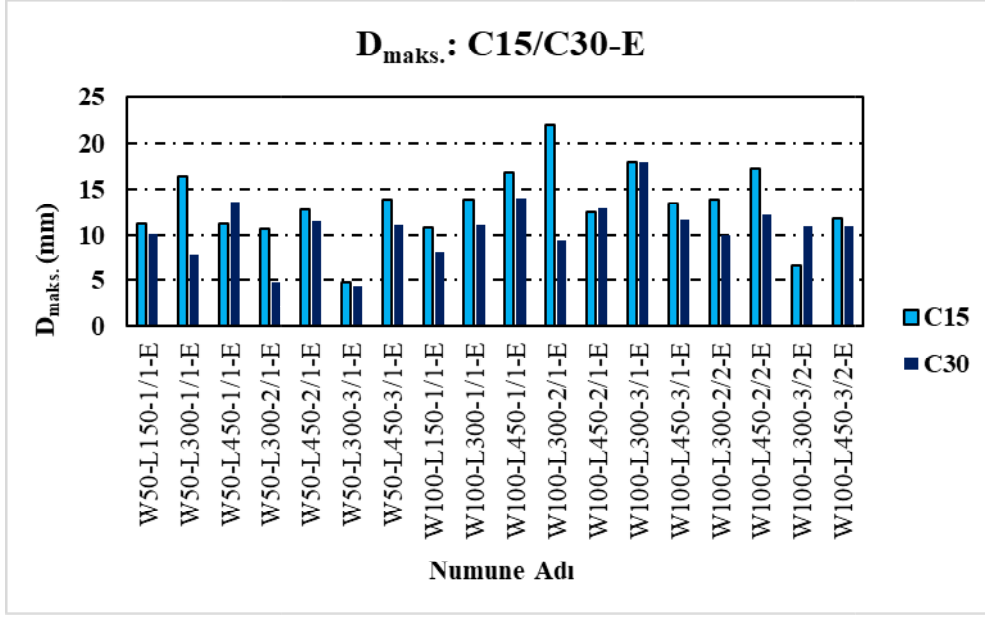
Beton basınç dayanımı açısından karşılaştırma yapıldığında, aynı bağ uzunluğu ve TRM genişliği için C15 serisinin C30 serisine göre daha yüksek deplasman değerleri verdiği görülmektedir. Örneğin 300 mm bağ uzunluğunda C15W100 numunesi 13.54 mm deplasman gösterirken, C30W100 numunesi 8.65 mm seviyesinde kalmaktadır. Bu eğilim tüm bağ uzunluklarında benzer şekilde devam etmekte olup, düşük dayanımlı betonun daha düşük rijitlik nedeniyle daha fazla deplasman yapabildiğini ortaya koymaktadır.

TRM genişliği açısından değerlendirme yapıldığında, C15 serisinde W100 genişliğinin tüm bağ uzunluklarında W50'ye kıyasla daha yüksek deplasman değerleri verdiği görülmektedir. Bu durum düşük dayanımlı betonlarda artan şerit genişliğinin aderans alanını artırarak deformasyon kapasitesini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Ancak C30 serisinde aynı eğilim görülmemektedir. 150 mm bağ uzunluğunda W100, W50'ye kıyasla daha yüksek deplasman sağlarken, 300 mm ve 450 mm bağ uzunlukları için W100'deki deplasman değerlerinin W50'nin altında kaldığı görülmektedir. Bu durum, yüksek dayanımlı betonlarda sistem davranışının daha rijit hale gelmesi ve genişliğin artmasının her zaman daha yüksek deformasyon kapasitesi sağlamaması anlamına gelmektedir.

Bağ uzunluğu genel olarak tüm serilerde maksimum yükteki deplasmanı artıran baskın parametre olmaya devam ederken, beton basınç dayanımı artıkça deplasman kapasitesinin azaldığı, TRM genişliği etkisinin ise beton sınıfı ve bağ uzunluğuna bağlı olarak değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle TRM genişliğinin etkisi, diğer parametrelerle birlikte değerlendirilmesi gereken, doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. Bununla birlikte, deneysel parametrelerin iyileştirilmesinin, numunenin benzer deformasyon seviyelerinde daha yüksek yükler taşımasına olanak sağladığını göstermiştir.

4.2.2.2. Epoksi (E) İle Sabitlenen Numunelerde Maksimum Yükte Deplasman

Şekil 4.5'te, epoksi ile sabitlenen ankrajlı numunelerin maksimum yükte deplasman ($D_{maks.}$) değerleri, diğer deney parametreleri (TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj sayısı ve yerleşim düzeni) her bir numune çifti için sabit tutulmak koşuluyla beton basınç dayanımına bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur.



Şekil 4.5. E-Maksimum Yükte Deplasman

Şekil 4.5 incelendiğinde, düşük dayanımlı beton kullanılan C15 serisi numunelerin maksimum yükteki deplasman değerlerinin, aynı parametrelere sahip C30 serisi numunelere kıyasla genel olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, düşük beton dayanımına sahip numunelerde daha fazla deformasyon geliştiğini göstermektedir.

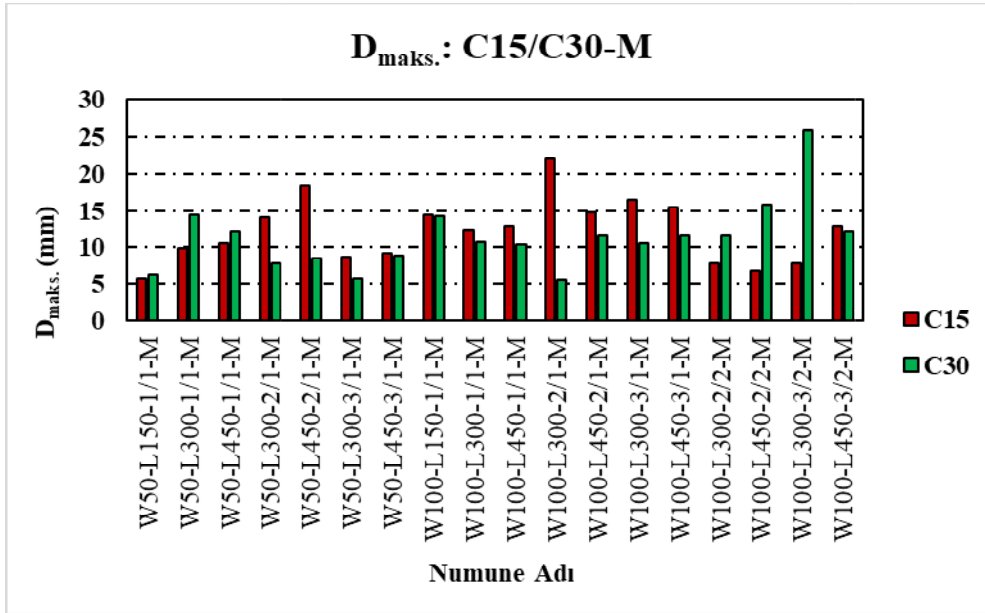
W50 serisi numunelerde C15 beton sınıfına ait maksimum yükte deplasman değerlerinin çoğunlukla yaklaşık 11–16 mm aralığında değiştiği, buna karşılık aynı parametrelere sahip C30 numunelerinde bu değerlerin yaklaşık 5–14 mm aralığında kaldığı belirlenmiştir. Özellikle W50-L300-1/1-E numunesi C15 serisi 16.40 mm düzeyinde maksimum deplasmana ulaştığı, C30 serisinde ise 7.82 mm seviyesinde kaldığı görülmektedir. Benzer şekilde W50-L450-3/1-E numunesinde C15 beton sınıfı 13.84 mm deplasman gösterirken, C30 beton sınıfında bu değer 11.04 mm olarak gerçekleşmiştir.

W100 serisi numunelerde de benzer eğilim korunmuştur. En yüksek maksimum yükteki deplasman değeri yaklaşık 22.04 mm ile W100-L300-2/1-E numunesi C15 beton dayanımında elde edilirken, aynı parametrelere sahip C30 numunesinde maksimum yükte deplasman değeri 9.39 mm seviyesinde ölçülmüştür. Ayrıca W100-L300-3/1-E ve W100-L450-2/2-E numunelerinde de C15 serisinin C30 serisine göre daha yüksek deplasman kapasitesi sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte bazı numunelerde iki beton sınıfı arasındaki farkın sınırlı kaldığı, özellikle W100-L450-3/2-E numunesinde değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu dikkat çekmektedir.

Elde edilen sonuçlar, beton basınç dayanımındaki artışın sistem rijitliğini artırarak maksimum yük altında oluşan deplasmanları azalttığını göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, yüksek dayanımlı beton kullanılan C30 serisi numunelerde daha rijit bir davranış meydana gelirken, C15 serisi numunelerde daha yüksek deformasyon kapasitesi ve daha sünek bir davranış gözlenmiştir.

4.2.2.3. Harç (M) İle Sabitlenen Numunelerde Maksimum Yükte Deplasman

Şekil 4.6’da, harç ile sabitlenen ankrajlı numunelerin maksimum yükte deplasman ($D_{maks.}$) değerleri, diğer deney parametreleri (TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj sayısı ve yerleşim düzeni) her bir numune çifti için sabit tutulmak koşuluyla beton basınç dayanımına bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur.



Şekil 4.6. M-Maksimum Yükte Deplasman

Grafik genel olarak değerlendirildiğinde, epoksi ile sabitlenen numunelerden farklı olarak harç ile sabitlenen numunelerde beton basınç dayanımının maksimum yükteki deplasman üzerindeki etkisinin daha değişken olduğu görülmektedir. Bazı numunelerde C15 serisi daha yüksek deplasman kapasitesi gösterirken, bazı numunelerde ise C30 serisi daha yüksek deplasman değerlerine ulaşmıştır.

W50 serisi numuneler incelendiğinde, W50-L450-2/1-M numunesinde C15 beton sınıfının 18.35 mm ile oldukça yüksek bir maksimum yükte deplasman değeri sergilediği, aynı parametrelere sahip C30 numunesinde ise bu değer 8.57 mm seviyesinde kaldığı görülmektedir. Benzer şekilde W50-L300-3/1-M numunesinde C15 serisi 8.62 mm deplasmana ulaşırken, C30 serisi 5.67 mm olarak ölçülmüştür. Buna karşılık W50-L300-1/1-

M numunesinde C30 serisinin 14.35 mm ile C15 serisinden daha yüksek deplasman gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, harç ile sabitlenen sistemlerde beton dayanımının tek başına belirleyici olmadığını ve aderans davranışının da önemli rol oynadığını göstermektedir.

W100 serisi numunelerde de benzer şekilde farklı eğilimler gözlenmiştir. Özellikle W100-L300-2/1-M numunesinde C15 beton sınıfı 22.04 mm ile serideki en yüksek deplasman değerlerinden birini göstermiştir. Aynı numunenin C30 serisinde ise maksimum yükte deplasman değeri 5.57 mm seviyesinde kalmıştır. Buna karşılık W100-L300-3/2-M numunesinde C30 serisinin 25.90 mm ile tüm numuneler içerisindeki en yüksek maksimum yükte deplasman değerine ulaştığı görülmektedir. Aynı parametrelerdeki C15 numunesi ise 6.65 mm deplasman göstermiştir. Ayrıca W50-L450-3/1-M ve W100-L150-1/1-M numunelerinde iki beton sınıfına ait deplasman değerlerinin birbirine yakın olduğu dikkat çekmektedir.

Elde edilen sonuçlar, harç ile sabitlenen ankrajlı numunelerde maksimum yükteki deplasman davranışının yalnızca beton basınç dayanımına bağlı olmadığını, aynı zamanda ankraj-harç-beton etkileşimi ve aderans performansından da önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Bununla birlikte genel eğilim olarak, düşük dayanımlı beton kullanılan bazı C15 numunelerinde daha yüksek deformasyon kapasitesi gözlenmiş, ancak belirli numunelerde C30 serisinin daha yüksek deplasman değerlerine ulaşması nedeniyle davranışın epoksi ile sabitlenen sistemlere göre daha düzensiz olduğu anlaşılmıştır.

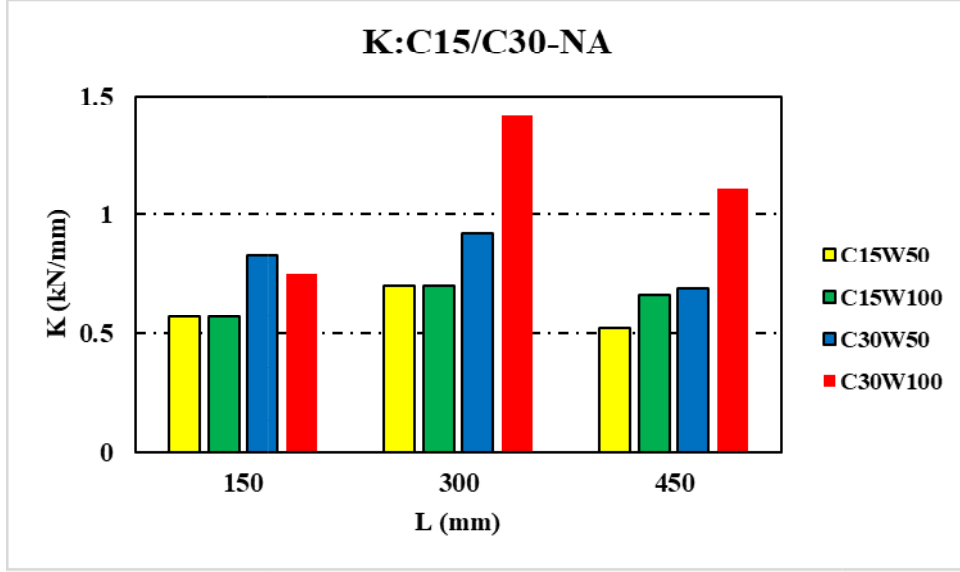
4.2.3. Rijitlik

Yük–deplasman eğrisinin başlangıç kısmında gözlenen yaklaşık doğrusal davranış bölgesi, sistemin elastik davranışını ifade etmektedir. Bu bölgedeki eğim değeri, numunenin başlangıç rijitliği olarak tanımlanır. Rijitlik; Şekil 3.11’de belirtildiği şekilde maksimum yükün, o andaki deplasmana bölünmesiyle hesaplanmıştır. Rijitlik, yapı elemanının uygulanan yüke karşı gösterdiği deformasyon direncini temsil eder. Başlangıç rijitliğinin yüksek olması, elemanın yük altında daha az deformasyon yaptığını ve daha rijit bir davranış sergilediğini göstermektedir.

Yük artışı ile birlikte malzeme içerisinde çatlakların oluşması veya doğrusal olmayan davranışın başlaması sonucunda yük–deplasman eğrisinin eğimi azalmaktadır. Bu durum sistemin rijitliğinde bir azalma meydana geldiğini göstermektedir. Özellikle betonarme ve kompozit güçlendirme sistemlerinde çatlak oluşumu ile birlikte yük aktarım mekanizması değişmekte ve elemanın deformasyon kapasitesi artarken rijitlik değeri düşmektedir.

4.2.3.1. Ankrajsız (NA) Numunelerde Rijitlik

DeneySEL program kapsamında değerlendirilen temel performans indekslerinden biri olan rijitlik (K), ankrajsız numuneler için Şekil 4.7’de sunulmuştur. Söz konusu numunelerin davranışının analizinde, deneysel değişkenler olarak belirlenen beton basınç dayanımı, TRM şerit genişliği ve TRM bağ uzunluğu temel parametreler olarak dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, anılan değişkenlerin rijitlik üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



Şekil 4.7. NA-Rijitlik

Şekil 4.7 incelendiğinde, beton basınç dayanımındaki artışın ve TRM şerit genişliğinin artırılmasının numunelerin başlangıç rijitliği üzerinde belirgin bir olumlu etki oluşturduğu görülmektedir. Buna karşılık bağ uzunluğunun rijitlik üzerindeki etkisinin sınırlı ve değişken olduğu anlaşılmaktadır.

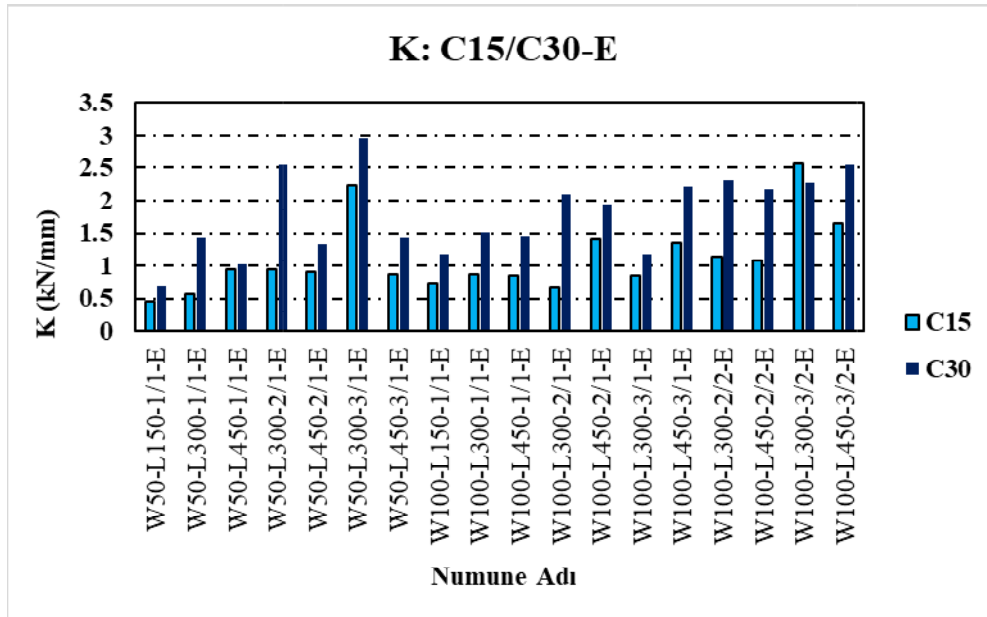
W50 serisi numuneler değerlendirildiğinde, C15 beton sınıfında en yüksek rijitlik değeri 0.70 kN/mm ile 300 mm bağ uzunluğunda elde edilirken, 450 mm bağ uzunluğunda rijitlik 0.52 kN/mm seviyesine düşmüştür. C30 beton sınıfına ait W50 serisi numunelerde ise 300 mm bağ uzunluğunda rijitliğin 0.92 kN/mm seviyesine ulaştığı, 450 mm bağ uzunluğunda ise 0.69 kN/mm civarında olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, aynı TRM şerit genişliğinde beton dayanımının artmasının rijitliği artırdığını göstermektedir. Fakat 300 mm bağ uzunluğundan 450 mm bağ uzunluğuna geçildiğinde rijitlik değerlerinde azalma olduğu tespit edilmiştir.

Özellikle 300 mm bağ uzunluğuna sahip C30W100 numunesinde rijitlik 1.42 kN/mm seviyesine ulaşmış ve diğer tüm numunelerden belirgin biçimde ayrılmıştır. Aynı seride 450 mm bağ uzunluğunda rijitlik yaklaşık 1.11 kN/mm seviyesinde gerçekleşmiştir. Buna karşılık 150 mm bağ uzunluğunda yaklaşık 0.75 kN/mm değeri elde edilmiştir.

Genel değerlendirme sonucunda, TRM şerit genişliğinin 50 mm'den 100 mm'ye çıkarılmasının ve beton basınç dayanımının C15'ten C30'a yükseltilmesinin rijitlik değerlerini genel olarak artırdığı belirlenmiştir. Özellikle yüksek dayanımlı beton ile daha geniş TRM şeritlerinin birlikte kullanıldığı numunelerde sistemin daha rijit davrandığı görülmüştür. Bununla birlikte bağ uzunluğunun etkisinin doğrusal olmadığı, en yüksek rijitlik değerlerinin 300 mm bağ uzunluğuna sahip numunelerde elde edildiği görülmüştür. Bu durum, aderans gerilmelerinin önemli bir bölümünün ilk 300 mm'lik bağ bölgesi içerisinde geliştiğini göstermekte olup, söz konusu sistem için etkin bağ uzunluğunun 300–450 mm aralığında yer aldığını ortaya koymaktadır.

4.2.3.2. Epoksi (E) İle Sabitlenen Numunelerde Rijitlik

Şekil 4.8'de, epoksi ile sabitlenen ankrajlı numunelerin rijitlik (K) değerleri, diğer deney parametreleri (TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj sayısı ve yerleşim düzeni) her bir numune çifti için sabit tutulmak koşuluyla beton basınç dayanımına bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur.



Şekil 4.8. E-Rijitlik

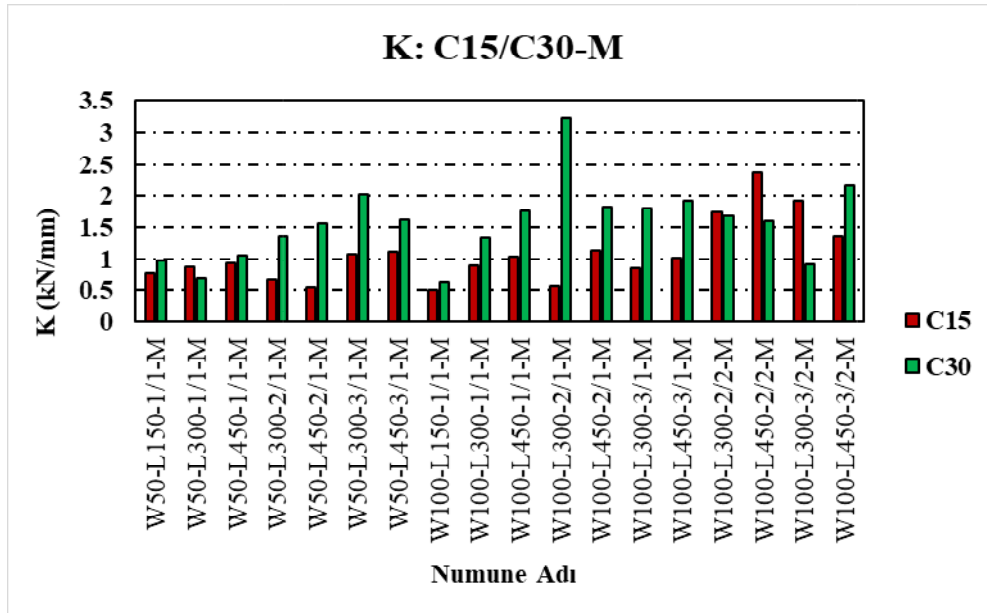
Şekil 4.8 incelendiğinde, aynı TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj sayısı ve yerleşim düzenine sahip numunelerde C30 beton sınıfına ait rijitlik değerlerinin C15 beton sınıfına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Özellikle W50-L300-3/1-E numunesinde C15 betonunda 2.24 kN/mm olan rijitlik değerinin C30 betonunda 2.96 kN/mm seviyesine yükseldiği görülmektedir.

Düşük bağ uzunluğuna ve daha az ankraj sayısına sahip numunelerde rijitlik değerlerinin nispeten düşük kaldığı görülmektedir. Örneğin W50-L150-1/1-E numunesinde rijitlik değeri C15 betonunda 0.45 kN/mm, C30 betonunda ise 0.68 kN/mm olarak belirlenmiştir. Buna karşılık bağ uzunluğu ve ankraj sayısının artmasıyla birlikte rijitlik değerlerinde belirgin artışlar meydana gelmiştir. 3/1 ve 3/2 ankraj yerleşim düzenine sahip ve daha büyük bağ uzunluğuna sahip numunelerde rijitlik artışı daha belirgin olmuştur. TRM şerit genişliğinin etkisi, diğer parametrelere görece daha sınırlı kalmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, beton basınç dayanımındaki artışın epoksi ile sabitlenen ankrajlı TRM sistemlerinin rijitliğini olumlu yönde etkilediği anlaşılmaktadır. Daha yüksek dayanımlı betonun, TRM sisteminin yük aktarım kapasitesini artırarak arayüzey deformasyonlarını azalttığı ve böylece daha rijit bir davranış sağladığı söylenebilir.

4.2.3.3. Harç (M) İle Sabitlenen Numunelerde Rijitlik

Şekil 4.9’da harç ile sabitlenen ankrajlı numunelerin rijitlik (K) değerleri, diğer deney parametreleri (TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj sayısı ve yerleşim düzeni) her bir numune çifti için sabit tutulmak koşuluyla beton basınç dayanımına bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur.



Şekil 4.9. M-Rijitlik

Şekil 4.9 incelendiğinde, diğer deney parametreleri sabit tutulduğunda C30 beton dayanımına sahip numunelerin rijitlik değerlerinin genel olarak C15 serisi numunelerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, beton basınç dayanımındaki artışın numune

sisteminin elastik davranışını olumlu yönde etkilediğini ve yük altında daha rijit bir davranış sergilenmesini sağladığını göstermektedir.

W50 serisi numunelerde, C15 beton sınıfına ait rijitlik değerlerinin yaklaşık 0.80–1.00 kN/mm aralığında değiştiği, buna karşılık C30 serisinde bu değerlerin yaklaşık 1.00–1.50 kN/mm seviyelerine ulaştığı görülmüştür. Benzer eğilim W100 serisi numunelerde de gözlenmiş olup, C30 beton sınıfına sahip numunelerin büyük bölümünde rijitlik değerleri 1.50 kN/mm'nin üzerine çıkmıştır.

Grafikte en yüksek rijitlik değeri 3.23 kN/mm ile W100-L300-2/1-M numunesi C30 serisinde elde edilmiştir. Aynı parametrelere sahip C15 numunesinin daha düşük rijitlik göstermesi, yüksek dayanımlı betonun ankraj ve TRM sistemi ile birlikte çalışarak deformasyonları sınırladığını ortaya koymaktadır. Fakat Şekil 4.9'da genel eğilim C30 beton dayanımına sahip numunelerin daha yüksek rijitlik göstermesi yönünde olsa da W100-L450-2/2-M ve W100-L300-3/2-M numunelerinde C30 serisinin C15 serisine göre daha düşük rijitlik değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, beton dayanımının rijitlik üzerindeki olumlu etkisinin her durumda doğrusal biçimde gerçekleşmediğini ve davranışın yalnızca beton basınç dayanımına bağlı olmadığını göstermektedir. Söz konusu farklılığın temel nedenlerinden biri, ankraj–TRM–beton etkileşimindeki yerel gerilme yoğunlaşmaları olabilir. Yüksek dayanımlı betonlar daha rijit ve gevrek davranış gösterdiğinden, yük aktarımı sırasında arayüzeyde oluşan gerilmeler daha sınırlı deformasyon kapasitesi ile karşılanmaktadır. Bu durum, özellikle ankraj yoğunluğunun arttığı veya yük aktarım bölgesinin daha karmaşık hâle geldiği numunelerde mikro çatlak oluşumunu hızlandırarak başlangıç rijitliğinin beklenenden düşük ölçülmesine neden olabilmektedir. W100-L450-2/2-M ve W100-L300-3/2-M numunelerinde gözlenen bu durum ayrıca, ankraj yerleşim düzeninin yük dağılımını tam olarak homojen sağlayamamasından da kaynaklanabilir. Ankraj sayısının artması her zaman rijitlikte doğrusal bir artış oluşturmamakta; bazı durumlarda yükün belirli bölgelerde yoğunlaşmasına ve lokal deformasyonların artmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, C30 beton sınıfında daha yüksek dayanım elde edilmesine rağmen, söz konusu numunelerde rijitlik değerleri C15 serisine kıyasla sınırlı düzeyde düşük gerçekleşmiştir.

Genel olarak, Şekil 4.9'da sunulan veriler, beton basınç dayanımındaki artışın ankrajlı TRM sistemlerinin rijitlik performansını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Fakat lokal aderans davranışı, ankraj yerleşim etkisi ve deneysel değişkenlerin birleşik etkisi ile genel eğilime aykırı sonuçlar elde etmek mümkündür.

4.2.4. Maksimum Deplasman

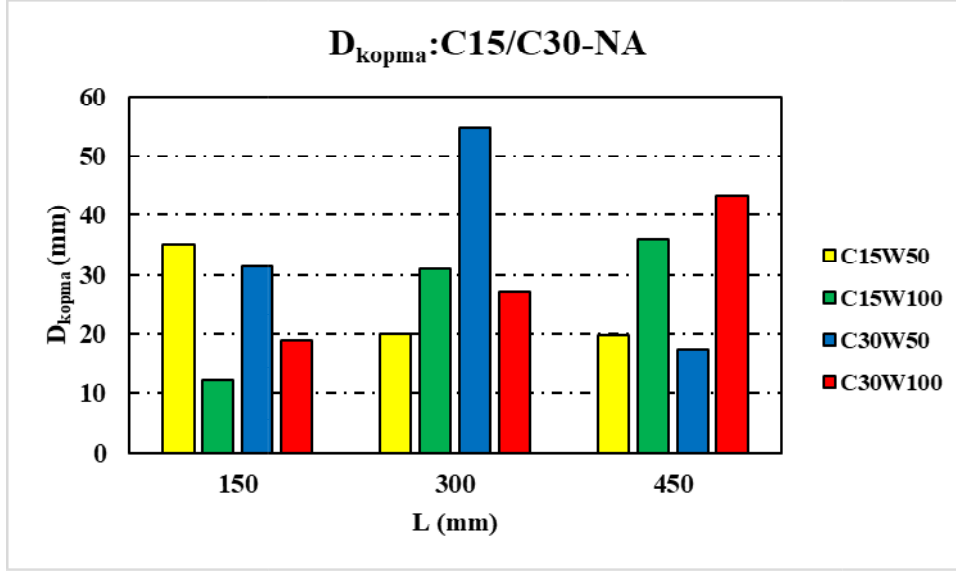
Deneysel çalışmalarda elde edilen yük–deplasman eğrileri, yapı elemanlarının yalnızca dayanımını değil aynı zamanda deformasyon kapasitesini de değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bu kapsamda önemli parametrelerden biri maksimum deplasman değeridir. Maksimum deplasman, deney süresince numunenin göçme noktasına ulaşıncaya kadar gerçekleştirdiği en büyük yer değiştirme miktarı olarak tanımlanmaktadır. Bu değer genellikle yük–deplasman eğrisinin son noktasına karşılık gelmekte olup, numunenin deformasyon kapasitesini ve göçme davranışını karakterize eden önemli bir göstergedir.

Yük–deplasman eğrisinin maksimum deplasman değeri, sistemin yük altında maruz kaldığı toplam şekil değiştirme kapasitesini ortaya koymaktadır. Maksimum deplasmanın yüksek olması, yapı elemanının göçme öncesinde daha büyük deformasyonlar yapabildiğini ve dolayısıyla daha sünek bir davranış sergilediğini göstermektedir. Buna karşılık maksimum deplasmanın düşük olması, sistemin daha gevrek bir davranış sergilediğine ve göçmenin daha sınırlı deformasyonlar altında gerçekleştiğine işaret etmektedir.

4.2.4.1. Ankrajsız (NA) Numunelerde Maksimum Deplasman

Deneysel program kapsamında değerlendirilen temel performans indekslerinden biri olan maksimum deplasman (D_{kopma}), ankrajsız numuneler için Şekil 4.10’da sunulmuştur. Söz konusu numunelerin davranışının analizinde, deneysel değişkenler olarak belirlenen beton basınç dayanımı, TRM şerit genişliği ve TRM bağ uzunluğu temel parametreler olarak dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, anılan değişkenlerin maksimum deplasman üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Şekil 4.10 incelendiğinde, maksimum deplasman değerlerinin yaklaşık 12 mm ile 55 mm arasında değiştiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, numunelerin deformasyon kapasitesinin deney parametrelerine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini ve deneysel parametrelerdeki iyileştirmelerin maksimum deplasman değerinde sistematik ve tutarlı bir artışa yol açmadığını göstermiştir.



Şekil 4.10. NA-Maksimum Deplasman

300 mm bağ uzunluğunda ise farklı bir davranış eğilimi ortaya çıkmıştır. Özellikle C30W50 numunesi 54.86 mm ile tüm ankrajsız numuneler arasında en yüksek maksimum deplasman değerine ulaşmıştır. Aynı bağ uzunluğunda C15W50, C15W100 ve C30W100 numunelerinde sırasıyla 20 mm, 31.13 mm ve 27.05 mm deplasman değerleri elde edilmiştir.

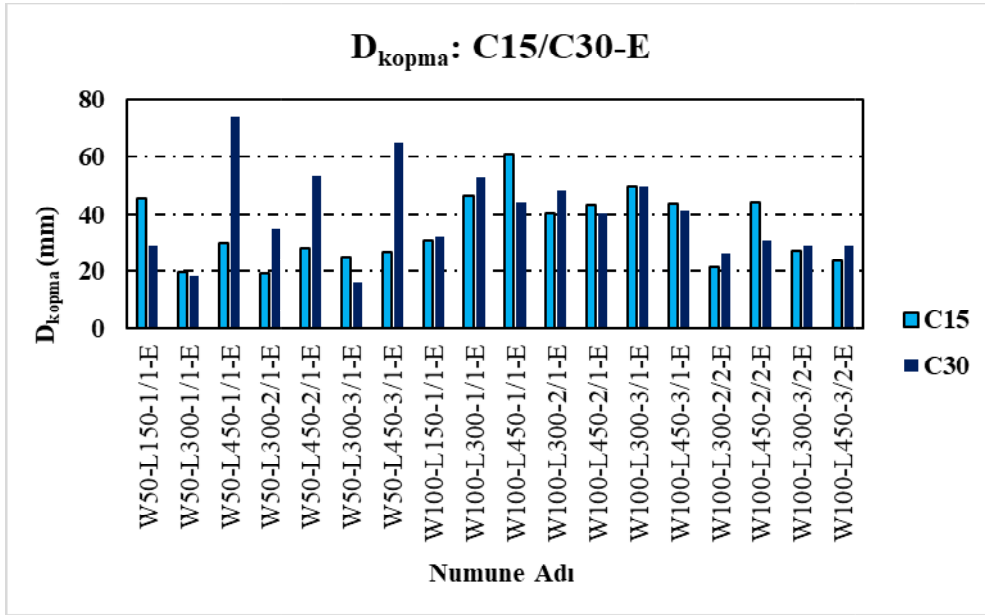
450 mm bağ uzunluğunda ise C30W100 numunesinin 43.24 mm ile en yüksek deplasman kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Aynı bağ uzunluğunda C15W100 numunesi 35.98 mm, C15W50 numunesi 19.82 mm ve C30W50 numunesi 17.49 mm maksimum deplasman değerine ulaşmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Şekil 4.10'da sunulan sonuçlar maksimum deplasman davranışının yalnızca beton basınç dayanımına bağlı olmadığını; TRM şerit genişliği ve bağ uzunluğunun da deformasyon kapasitesi üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Özellikle geniş TRM şeritleri ve uzun bağ bölgeleri bazı numunelerde daha sünek davranış oluşturarak kopma öncesi daha yüksek deplasman değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, maksimum deplasman davranışının genellenmiş bir eğilim üzerinden yorumlanması yerine, her bir numunenin ve ilgili deneysel parametrelerin kendi özel koşulları çerçevesinde ayrı ayrı değerlendirilmesi daha uygun ve bilimsel açıdan daha sağlıklı bir yaklaşım olacaktır.

4.2.4.2. Epoksi (E) İle Sabitlenen Numunelerde Maksimum Deplasman

Şekil 4.11'de, epoksi ile sabitlenen ankrajlı numunelerin maksimum deplasman (D_{kopma}) değerleri, diğer deney parametreleri (TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj

sayısı ve yerleşim düzeni) her bir numune çifti için sabit tutulmak koşuluyla beton basınç dayanımına bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur.



Şekil 4.11. E-Maksimum Deplasman

W50 serisi numuneler incelendiğinde, özellikle bağ uzunluğunun artmasıyla birlikte C30 beton sınıfına sahip numunelerde maksimum deplasman değerlerinde belirgin artışlar meydana geldiği görülmektedir. W50-L450-1/1-E numunesinde C15 serisi 29.90 mm deplasman gösterirken, C30 serisinde bu değer 74.02 mm'ye ulaşarak tüm numuneler içerisindeki en yüksek maksimum deplasman değeri elde edilmiştir. Benzer şekilde W50-L450-2/1-E ve W50-L450-3/1-E numunelerinde de C30 serisinin C15'e göre daha yüksek deplasman kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. W100 serisi numunelerde ise maksimum deplasman değerlerinin daha dengeli dağıldığı, farkın çok fazla olmadığı görülmektedir.

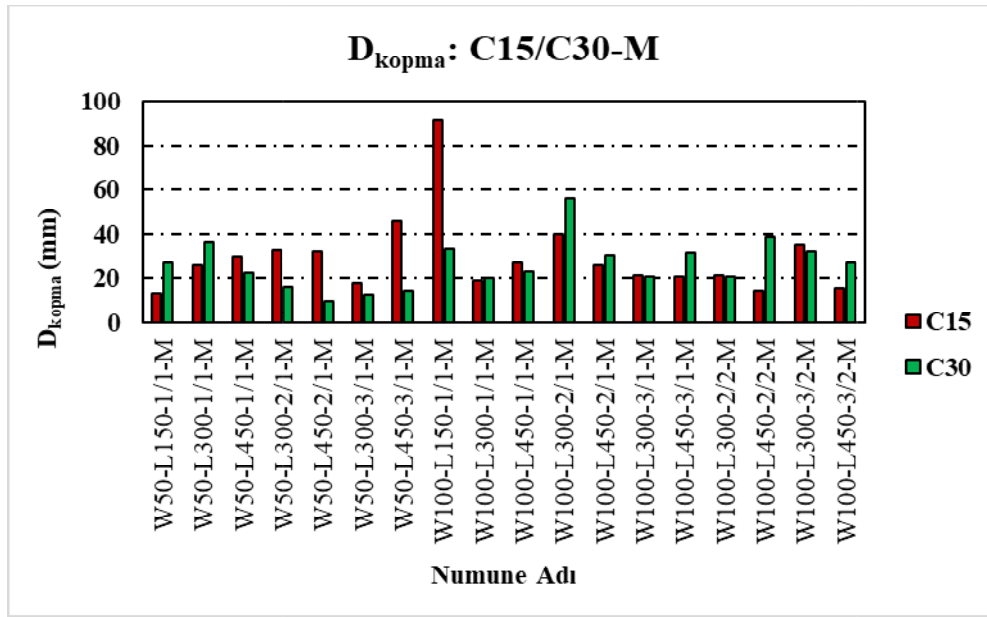
2/2 ve 3/2 ankraj düzenine sahip numunelerde maksimum deplasman değerlerinin genel olarak daha düşük seviyelerde kaldığı belirlenmiştir. Özellikle W100-L300-2/2-E ve W100-L450-3/2-E numunelerinde maksimum deplasman değerleri yaklaşık 20–30 mm aralığında gerçekleşmiştir. Bu durum, ankraj yoğunluğunun artmasıyla sistem rijitliğinin yükselmesine bağlı olarak deformasyon kapasitesinin sınırlanması ile açıklanabilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Şekil 4.11'de sunulan sonuçlar maksimum deplasman davranışının yalnızca beton dayanımına bağlı olmadığı; TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj sayısı ve ankraj yerleşim düzeni gibi parametrelerin birlikte etkili olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, beton basınç dayanımının maksimum deplasman üzerindeki

etkisinin tek başına belirleyici olmadığı, sistem davranışının tüm deney parametrelerinin ortak etkisiyle şekillendiği sonucuna ulaşılmıştır.

4.2.4.3. Harç (M) İle Sabitlenen Numunelerde Maksimum Deplasman

Şekil 4.12’de, harç ile sabitlenen ankrajlı numunelerin maksimum deplasman (D_{kopma}) değerleri, diğer deney parametreleri (TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj sayısı ve yerleşim düzeni) her bir numune çifti için sabit tutulmak koşuluyla beton basınç dayanımına bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur.



Şekil 4.12. M-Maksimum Deplasman

Şekil 4.12 incelendiğinde, beton basınç dayanımındaki artışın maksimum deplasman üzerinde düzenli ve sistematik bir artış oluşturmadığı, bazı numunelerde deplasman kapasitesini artırırken bazı numunelerde ise azalttığı belirlenmiştir. Bu durum, maksimum deplasman davranışının yalnızca beton dayanımına değil; TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj sayısı ve ankraj yerleşim düzeni gibi parametrelerin ortak etkisine bağlı olduğunu göstermektedir.

W50 serisi numuneler incelendiğinde, C30 beton dayanımına sahip bazı numunelerde maksimum deplasman değerlerinin C15 serisine göre arttığı görülmektedir. Özellikle W50-L150-1/1-M numunesinde C15 serisi 13.09 mm deplasman gösterirken, C30 serisinde bu değer 27.44 mm’ye ulaşmıştır. Benzer şekilde W50-L300-1/1-M numunesinde de C30 serisinin daha yüksek deformasyon kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık W50-L450-1/1-M ve W50-L450-2/1-M numunelerinde C15 serisinin daha yüksek maksimum deplasman değerleri verdiği görülmektedir. Bu durum, yüksek dayanımlı betonun bazı

durumlarda daha gevrek davranarak kopma öncesi deformasyon kapasitesini sınırlayabildiğini göstermektedir.

Grafikte dikkat çeken en önemli sonuçlardan biri, W100-L150-1/1-M numunesi C15 serisinde 91.61 mm ile tüm numuneler arasında en yüksek maksimum deplasman değerinin elde edilmesidir. Aynı numunenin C30 serisinde maksimum deplasman 33.63 mm seviyesinde kalmıştır. Bu sonuç, düşük dayanımlı betonun daha fazla deformasyon yapabilmesi nedeniyle sistemin daha sünek davranış sergilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, W100-L300-2/1-M numunesinde C30 serisinin 56.37 mm ile C15 serisine göre belirgin şekilde daha yüksek maksimum deplasman kapasitesi sergilediği görülmektedir. Bu durum ise uygun bağ uzunluğu ve ankraj düzeni altında yüksek dayanımlı betonun aderans performansını artırarak daha kararlı deformasyon davranışı sağlayabildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, Şekil 4.12’de sunulan veriler, harç ile sabitlenen ankrajlı numunelerde beton basınç dayanımının maksimum deplasman üzerindeki etkisinin tek başına belirleyici olmadığını göstermektedir. Beton dayanımındaki artış bazı numunelerde deformasyon kapasitesini artırırken, bazı numunelerde daha gevrek davranış nedeniyle maksimum deplasman değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Bu nedenle maksimum deplasman davranışının, beton dayanımı ile birlikte TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu ve ankraj düzeninin ortak etkisi altında değerlendirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

4.2.5. Enerji Yutma Kapasitesi

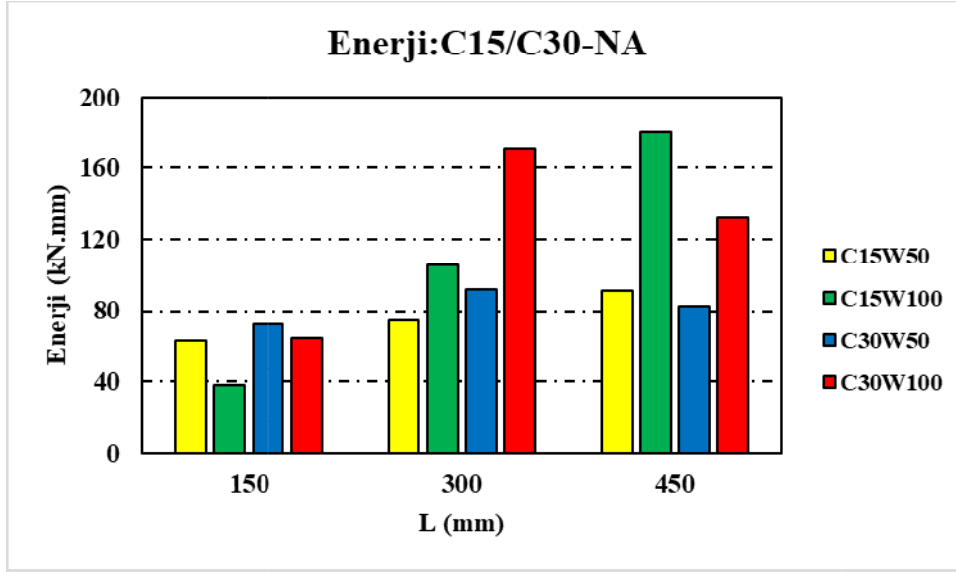
Enerji yutma kapasitesi, bir yapı elemanının veya deney numunesinin yük altında deformasyon yaparken absorbe ettiği toplam enerji miktarını ifade eden önemli bir mekanik parametredir. Bu kapasite, özellikle deprem ve darbeli yükler gibi dinamik etkilere maruz kalan yapı elemanlarının performansını değerlendirmede kritik bir göstergedir.

Deneysel çalışmalarda enerji yutma kapasitesi, yük–deplasman eğrisinin altında kalan alan olarak hesaplanır. Eğride yük (kN) ile deplasman (mm) eksenleri arasındaki alan, sistemin yük uygulaması sırasında yaptığı deformasyon boyunca absorbe ettiği enerjiyi temsil eder. Bu bağlamda enerji yutma kapasitesi ne kadar yüksekse, yapı elemanı daha fazla enerji absorbe edebilir ve ani göçmeye karşı daha dirençli olur.

4.2.5.1. Ankrajsız (NA) Numunelerde Enerji Yutma Kapasitesi

Deneysel program kapsamında değerlendirilen temel performans indekslerinden biri olan enerji yutma kapasitesi, ankrajsız numuneler için Şekil 4.13’te sunulmuştur. Söz konusu numunelerin davranışının analizinde, deneysel değişkenler olarak belirlenen beton basınç dayanımı, TRM şerit genişliği ve TRM bağ uzunluğu temel parametreler olarak dikkate

alınmıştır. Bu kapsamda, anılan değişkenlerin enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



Şekil 4.13. NA-Enerji Yutma Kapasitesi

150 mm bağ uzunluğuna sahip numunelerde enerji yutma kapasitesi değerlerinin genel olarak daha düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Bu bağ uzunluğunda C15W50 numunesi 63.08 kN.mm enerji yutma kapasitesi gösterirken, C15W100 numunesi 38.31 kN.mm ile en düşük değere sahip olmuştur. C30 beton dayanımına sahip numunelerde ise C30W50 ve C30W100 serileri sırasıyla 72.63 kN.mm ve 64.31 kN.mm enerji yutma kapasitesi sergilemiştir. Bu durum, kısa bağ uzunluğunda yüksek beton dayanımının enerji yutma kapasitesini sınırlı düzeyde artırdığını göstermektedir.

300 mm bağ uzunluğunda ise enerji yutma kapasitesinde belirgin artışlar meydana geldiği görülmektedir. Özellikle C30W100 numunesi 170.67 kN.mm ile yüksek bir enerji yutma kapasitesine ulaşmıştır. Aynı bağ uzunluğunda C15W100 numunesinin 105.74 kN.mm, C30W50 numunesinin 91.99 kN.mm ve C15W50 numunesinin 74.58 kN.mm enerji yutma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, bağ uzunluğunun artmasıyla birlikte TRM–beton arayüzündeki aderans mekanizmasının daha etkin hâle geldiğini ve sistemin daha fazla enerji tüketebildiğini göstermektedir.

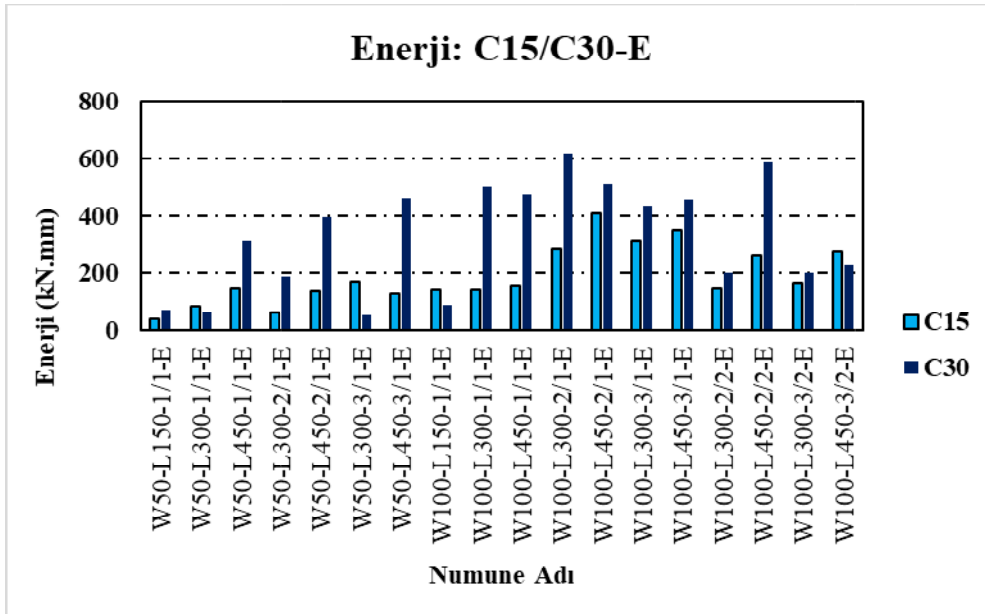
450 mm bağ uzunluğunda ise enerji yutma kapasitesinin özellikle W100 serisinde önemli ölçüde arttığı görülmektedir. C15W100 numunesi 180.61 kN.mm ile tüm ankrajsız numuneler arasında en yüksek enerji yutma kapasitesini göstermiştir. Aynı bağ uzunluğunda C30W100 numunesi 131.91 kN.mm, C15W50 numunesi 91.04 kN.mm ve C30W50 numunesi 82.48 kN.mm enerji yutma kapasitesi değerine ulaşmıştır. Bu durum, geniş TRM şeritlerinin

ve uzun bağ bölgelerinin birlikte çalışmasıyla sistemin daha sünek davranarak daha fazla enerji tüketebildiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Şekil 4.13'te sunulan sonuçlar enerji yutma kapasitesinin yalnızca beton basınç dayanımına bağlı olmadığını; TRM şerit genişliği ve bağ uzunluğunun da önemli rol oynadığını göstermektedir. Beton basınç dayanımı, şerit genişliği ve bağ uzunluğunun artmasıyla enerji yutma kapasitesinin belirgin biçimde yükseldiği belirlenmiştir. Bunun nedeni, daha geniş TRM şeritlerinin yük transfer alanını artırması ve uzun bağ bölgelerinde aderans davranışının daha kararlı hâle gelmesidir.

4.2.5.2. Epoksi (E) İle Sabitlenen Numunelerde Enerji Yutma Kapasitesi

Şekil 4.14'te, epoksi ile sabitlenen ankrajlı numunelerin enerji yutma kapasitesi değerleri, diğer deney parametreleri (TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj sayısı ve yerleşim düzeni) her bir numune çifti için sabit tutulmak koşuluyla beton basınç dayanımına bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur.



Şekil 4.14. E-Enerji Yutma Kapasitesi

Şekil 4.14 incelendiğinde genel eğilim olarak, C30 beton dayanımına sahip numunelerin enerji yutma kapasitesi değerlerinin C15 serisi numunelere kıyasla belirgin biçimde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, yüksek dayanımlı betonun epoksi ankraj sistemi ile birlikte daha kararlı aderans davranışı sergileyerek yük altında daha fazla enerji tüketilmesini sağladığını göstermektedir.

W50 serisi numuneler incelendiğinde, özellikle W50-L450-2/1-E numunesinde C30 serisi 393.24 kN.mm enerji yutma kapasitesine ulaşırken, aynı numunenin C15 serisi 137.06

kN.mm seviyesinde kalmıştır. Benzer şekilde W50-L450-3/1-E numunesinde C30 serisinin 457.82 kN.mm enerji yutma kapasitesine ulaştığı ve C15 serisine göre önemli ölçüde daha yüksek performans gösterdiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, yüksek beton dayanımının ankrajlı sistemde aderans dayanımını artırarak daha fazla enerji tüketimine olanak sağladığını göstermektedir.

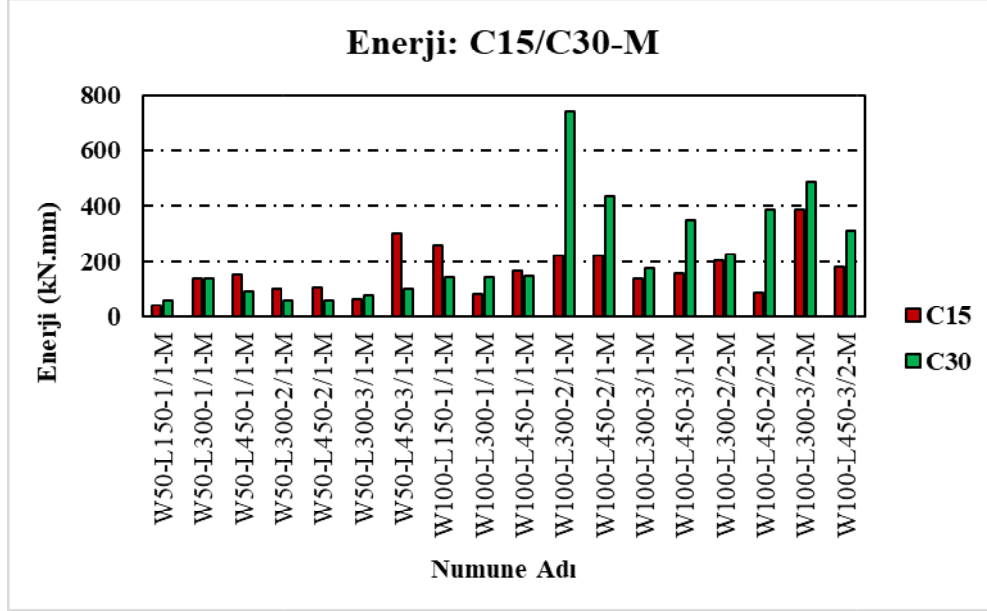
W100 serisi numunelerde ise enerji yutma kapasitesindeki artışın daha belirgin hâle geldiği görülmektedir. Özellikle W100-L300-2/1-E numunesi C30 serisi 617.47 kN.mm ile tüm numuneler arasında en yüksek enerji yutma kapasitesini göstermiştir. Aynı numunenin C15 serisinde enerji yutma kapasitesi 287.80 kN.mm olarak belirlenmiştir. Bunun yanında W100-L450-2/1-E, W100-L300-3/1-E ve W100-L450-2/2-E numunelerinde de C30 serisinin yaklaşık 450–600 kN.mm aralığında enerji yutma kapasitesi sergilediği görülmektedir. Bu durum, geniş TRM şeritleri ile birlikte uygun bağ uzunluğu ve ankraj düzeninin sistemin sünek davranışını artırarak enerji tüketimini önemli ölçüde geliştirdiğini göstermektedir.

Grafik genel olarak değerlendirildiğinde, bağ uzunluğunun artmasıyla enerji yutma kapasitesinin de arttığı görülmektedir. Özellikle 300 mm ve 450 mm bağ uzunluğuna sahip numunelerde, aderans bölgesinin büyümesi sayesinde yük transferinin daha geniş bir alana yayıldığı ve böylece sistemin daha fazla enerji tüketebildiği anlaşılmaktadır. Ayrıca W100 serisi numunelerin çoğunda enerji yutma kapasitesinin W50 serisine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni, daha geniş TRM şeritlerinin daha yüksek çekme kuvvetlerini taşıyabilmesi ve sistemin deformasyon kapasitesini artırmasıdır.

Sonuç olarak, Şekil 4.14'te sunulan veriler, beton basınç dayanımındaki artışın epoksi ile sabitlenen ankrajlı numunelerin enerji yutma kapasitesi üzerinde önemli ölçüde olumlu etkisi olduğunu göstermektedir. Yüksek dayanımlı beton kullanımı sayesinde TRM–beton arayüzündeki aderans performansı iyileşmiş, buna bağlı olarak sistem daha sünek davranarak daha yüksek enerji yutma kapasitesine ulaşmıştır. Bununla birlikte enerji yutma kapasitesinin yalnızca beton dayanımına bağlı olmadığı; TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu ve ankraj yerleşim düzeninin de sistem davranışında belirleyici rol oynadığı sonucuna ulaşılmıştır.

4.2.5.3. Harç (M) İle Sabitlenen Numunelerde Enerji Yutma Kapasitesi

Şekil 4.15'te harç ile sabitlenen ankrajlı numunelere ait enerji yutma kapasitesi değerleri, beton basınç dayanımının etkisini ortaya koyacak şekilde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.15. M-Enerji Yutma Kapasitesi

Grafik genel olarak değerlendirildiğinde, W100 serisi numunelerin enerji yutma kapasitesinin W50 serisine kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, daha geniş TRM şeritlerinin yük transfer alanını artırması ve sistemin daha yüksek çekme kuvvetleri altında daha kararlı davranış göstermesiyle açıklanabilir. Ayrıca bağ uzunluğunun artmasıyla aderans bölgesinin genişlediği ve buna bağlı olarak enerji yutma kapasitesinin arttığı belirlenmiştir.

W100 serisi numunelerde W50 serisi numunelere göre enerji yutma kapasitesindeki artışın daha belirgin olduğu görülmektedir. Özellikle W100-L300-2/1-M numunesi ve C30 serisi 739.69 kN.mm ile tüm numuneler arasında en yüksek enerji yutma kapasitesini göstermiştir. Aynı numunenin C15 serisi 222.91 kN.mm seviyesinde kalmıştır. Bu sonuç, yüksek beton dayanımı ile birlikte uygun bağ uzunluğu ve ankraj düzeninin aderans davranışını önemli ölçüde iyileştirdiğini ve sistemin daha fazla enerji tüketmesini sağladığını göstermektedir.

Benzer şekilde W100-L450-2/1-M ve W100-L300-2/2-M numunelerinde de C30 serisinin enerji yutma kapasitesi yaklaşık 430–450 kN.mm seviyelerine ulaşmış ve C15 serisine göre daha yüksek performans göstermiştir. W100-L450-2/2-M ve W100-L300-3/2-M

numunelerinde ise her iki beton sınıfının birbirine yakın enerji yutma kapasitesi sergilediği görülmektedir. Bunun nedeni, yüksek ankraj yoğunluğunun sistem rijitliğini artırması ve deformasyon kapasitesini belirli ölçüde sınırlandırması olabilir.

Sonuç olarak, Şekil 4.15'te sunulan sonuçlar, harç ile sabitlenen ankrajlı numunelerde beton basınç dayanımının enerji yutma kapasitesi üzerinde genel olarak olumlu etkisi olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte bazı numunelerde C15 beton sınıfının daha yüksek enerji yutma kapasitesi gösterdiği tespit edilmiştir. Yüksek dayanımlı betonlar daha yüksek yük taşıma kapasitesi sayesinde enerji yutma kapasitesini artırabilirken, düşük dayanımlı betonlar daha sünek davranış sergileyerek daha büyük deplasman yaptığı durumlarda daha yüksek enerji tüketimi sağlayabilmektedir. Dolayısıyla enerji yutma kapasitesinin yalnızca beton dayanımına bağlı olmadığı; TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu ve ankraj yerleşim düzeninin ortak etkisi altında şekillendiği sonucuna ulaşılmıştır.

4.3. DIC Analiz Sonuçlarına Göre Birim Deformasyon ve Hasar Dağılımları

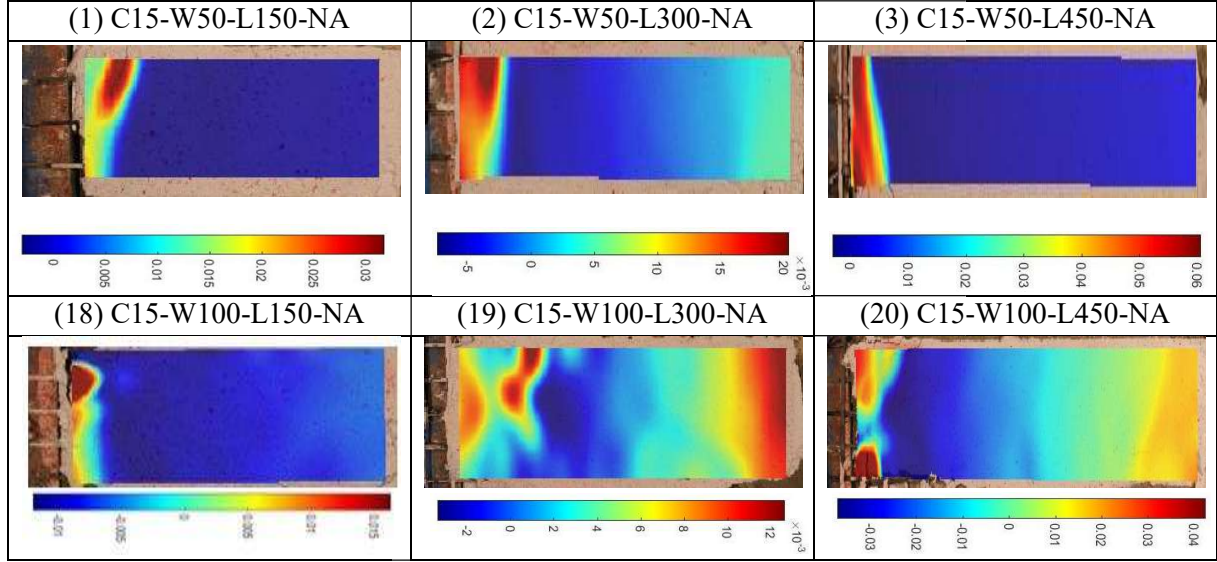
DIC analizi sonucunda deney sonlandırıldığı durumda TRM şeritlerin uygulandığı yüzeyde x-x eksenini boyunca birim deformasyon dağılımları (ϵ_{xx}) iki farklı lejant (renk ölçeği ayarı) altında belirlenmiştir. İlk aşamada, birim deformasyon dağılımları her numune için kendi orijinal ölçeği kullanılarak ayrı ayrı belirlenmiş, ardından bütün elemanların birim deformasyon dağılımlarının değerlendirilmesi sonucunda belirlenen ortak lejanta göre belirlenmiştir. Ncorr yazılımı ile elde edilen görüntüler analiz edildikten sonra deformasyon haritaları her bir görüntü için oluşturulmuştur. TRM şeritlerin uygulandığı yüzeyde x-x eksenini yönündeki değişimleri gösteren birim deformasyonlar ϵ_{xx} olarak elde edilmiş ve renklendirilmiştir. Kırmızı renk maksimum deformasyonun olduğu bölgeyi gösterirken, mavi renk deforme olmamış bölgeyi belirtmektedir. Ayrıca deney sonrası numunelerde gözlemlenen hasar dağılım görüntüleri oluşturulmuştur. Elde edilen birim deformasyon haritaları ve hasar görüntüleri yardımıyla numune üzerindeki çatlak oluşumları tespit edilmiş ve göçme modları belirlenmiştir.

DIC analiz incelemeleri ankrajsız numuneler, epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılan ankrajlı numuneler ve harç esaslı yapıştırıcı kullanılan ankrajlı numuneler olmak üzere üç ana grup altında değerlendirilmiştir.

4.3.1. Ankrajsız Numunelerin Birim Deformasyon Dağılımları

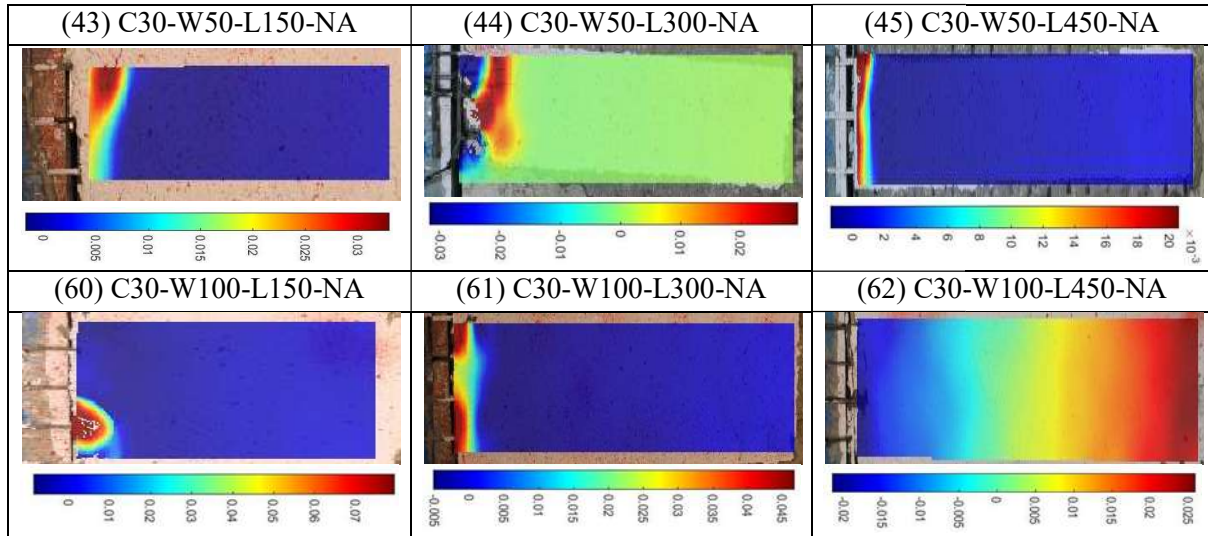
Deney numunelerinin yüzeylerindeki birim deformasyon (ϵ_{xx}) dağılımları iki farklı şekilde analiz edilmiştir. İlk olarak, her bir numune için birim deformasyon dağılımları kendi özgün ölçeklerine göre ayrı ayrı belirlenmiştir. Daha sonra, tüm numuneler için birim

deformasyon dağılımları ortak bir ölçek esas alınarak yeniden değerlendirilmiştir. Ankrajsız numuneler beton dayanım sınıfına (C15-C30) göre gruplandırılmıştır. C15 ve C30 numuneleri için, kendi özgün ölçeklerine göre elde edilen birim deformasyon dağılımları sırasıyla Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’te sunulmuştur. Tüm numuneler değerlendirilerek ortak bir ölçek alınarak elde edilen birim deformasyon dağılımları C15 ve C30 beton dayanım sınıfı için sırasıyla EK-13 ve EK-14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.16. C15-Ankrajsız Numunelerin Birim Deformasyon Dağılımları

Beton dayanım sınıfının (C15–C30), TRM şerit genişliğinin (50–100 mm) ve TRM şerit bağ uzunluğunun (150–300–450 mm), DIC analizi sonuçları üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. DIC sonuçlarına göre, maksimum birim deformasyon yoğunlaşma bölgelerinin; beton sınıfı, TRM şerit genişliği ve uzunluğuna bağlı olarak değiştiği; bu bölgelerin genellikle hidrolik yükleme sistemine en yakın kenar civarında yoğunlaştığı, buna karşılık numunenin orta bölgelerinde ve yükleme noktasına en uzak kenarlarda belirgin şekilde daha düşük birim deformasyon değişimlerinin gözlemlendiği belirlenmiştir.



Şekil 4.17. C30-Ankrajsız Numunelerin Birim Deformasyon Dağılımları

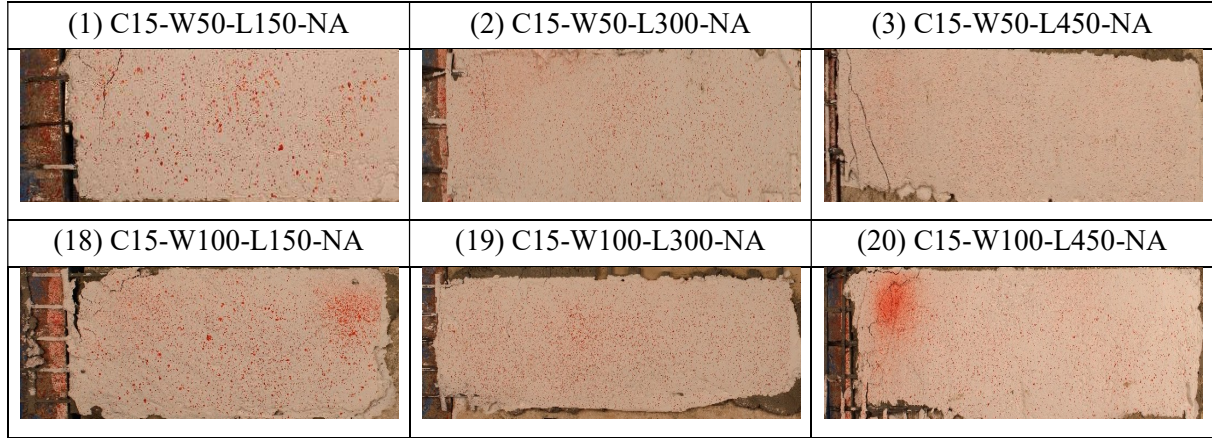
Aşağıda, birim deformasyon değerlerine ilişkin elde edilen sonuçlar sunulmuştur:

- Birim deformasyon değerleri beton dayanım sınıfına (C15, C30) göre incelendiğinde, maksimum birim deformasyon değerlerinin C15 beton sınıfına ait 1, 3 ve 20 numaralı numunelerde; C30 beton sınıfına ait 44, 60 ve 61 numaralı numunelerde elde edildiği belirlenmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda, C30 beton numunelerinden elde edilen ortalama birim deformasyon değerlerinin, C15 beton numunelerine kıyasla daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- TRM şerit genişliğinin (50–100 mm) birim deformasyon değerleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, maksimum birim deformasyon değerlerinin 50 mm TRM şerit genişliğine sahip 1, 3, 43 ve 44 numaralı numunelerde; 100 mm TRM şerit genişliğine sahip 20, 60 ve 61 numaralı numunelerde elde edildiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, 50 mm TRM şerit genişliğine sahip numunelerin ortalama birim deformasyon değerlerinin, 100 mm şerit genişliğine sahip numunelere kıyasla az bir miktar daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- TRM şerit bağ uzunluğuna (150–300–450 mm) bağlı olarak birim deformasyon değerleri incelendiğinde, maksimum birim deformasyon değerlerinin 150 mm şerit bağ uzunluğuna sahip 43 ve 60 numaralı numunelerde; 300 mm şerit uzunluğuna sahip 44 ve 61 numaralı numunelerde; 450 mm şerit uzunluğuna sahip 3 ve 20 numaralı numunelerde elde edildiği belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmede, TRM şerit bağ uzunluğu arttıkça ortalama birim deformasyon değerlerinin de arttığı; 450 mm şerit uzunluğuna sahip numunelerin, 300 mm ve 150 mm uzunluğa sahip

numunelere kıyasla daha yüksek ortalama birim deformasyon değerleri sergilediği tespit edilmiştir.

4.3.2. Ankrajsız Numunelerin Hasar Dağılımları ve Göçme Modları




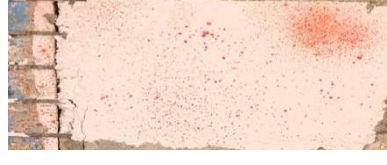


Deney elemanları Tablo 3.9’da verilen ve RILEM teknik komitesi tarafından önerilen farklı tipteki göçme modlarına göre incelenmiştir. Deneyler sonrasında numunelerin yüzeylerinde gözlemlenen hasar dağılımları C15 ve C30 beton dayanım sınıfı için sırasıyla şekil 4.18 ve şekil 4.19’da gösterilmiştir.



şekil 4.18. C15-Ankraj-sız Numunelerin Hasar Dağılımları

Hem DIC sonuçlarına hem de hasar desenlerine ilişkin görsel incelemelere dayanarak, test edilen numunelerde çeşitli göçme modları belirlenmiştir. Özellikle Numune 1, 3, 18, 20 ve 43’te, matris çatlağı gözlenmiş, bunu harç tabakasının kademeli olarak tekstilden ayrılması izlemiş ve süreç nihayetinde göçmeye yol açmıştır (C tipi göçme modu).

Buna karşılık 2, 19, 45, 60, 61 ve 62 numaralı numunelerde göçme, tekstilin harç tabakası içerisinde içsel kayması şeklinde meydana gelmiştir (D tipi göçme modu). Bu durumlarda harç yüzeyinde belirgin bir dökülme ya da çatlak oluşumu gözlenmemiş; bunun yerine yerel sürtünmeli kayma veya donatı tekstilinin kademeli olarak çekilip çıkması hâkim mekanizma olarak değerlendirilmiştir.

(43) C30-W50-L150-NA	(44) C30-W50-L300-NA	(45) C30-W50-L450-NA
		
(60) C30-W100-L150-NA	(61) C30-W100-L300-NA	(62) C30-W100-L450-NA
		

Şekil 4.19. C30-Ankrajlı Numunelerin Hasar Dağılımları

Matris dışında kalan karbon tekstil ağın kopması şeklinde tanımlanan E-1 tipi göçme yalnızca 44 numaralı numunede gözlemlenmiştir.

Tüm numunelerde, beton dayanım sınıfından bağımsız olarak, beton altlığın parçalanması (A tipi göçme modu) veya TRM şerit bütünlüğünün korunarak beton arayüzeyinden doğrudan ayrılması (B tipi göçme modu) şeklinde herhangi bir göçme gözlenmemiştir.

4.3.3. Epoksi Esaslı Ankrajlı Numunelerin Birim Deformasyon Dağılımları

Deney numunelerinin yüzeylerindeki birim deformasyon (ϵ_{xx}) dağılımları iki farklı şekilde analiz edilmiştir. İlk olarak, her bir numune için birim deformasyon dağılımları kendi özgün ölçeklerine göre ayrı ayrı belirlenmiştir. Daha sonra, tüm numuneler için birim deformasyon dağılımları ortak bir ölçek esas alınarak yeniden değerlendirilmiştir. Epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılan ankrajlı numuneler beton dayanım sınıfına (C15–C30) göre gruplandırılmıştır. C15 ve C30 numuneleri için, kendi özgün ölçeklerine göre elde edilen birim deformasyon dağılımları sırasıyla EK-15 ve EK-16’da sunulmuştur. Tüm numuneler değerlendirilerek ortak bir ölçek alınarak elde edilen birim deformasyon dağılımları, epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılan ankrajlı numuneler için C15 ve C30 beton dayanım sınıfı olarak gruplandırılarak sırasıyla EK-17 ve EK-18’de gösterilmiştir.

DIC sonuçları; beton dayanım sınıfı (C15–C30), TRM şerit genişliği (50–100 mm), TRM bağ uzunluğu (150–300–450 mm), ankraj sayısı (1–6) ve ankraj yerleşimi (1 sıra, 2 sıra) gibi çeşitli deneysel parametrelerin etkileri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Birim deformasyon haritaları, maksimum birim şekil değiştirme yoğunlaşmalarının ilgili deneysel parametrelere (beton dayanım sınıfı, TRM şerit geometrisi, ankraj sayısı ve yerleşimi) bağlı olarak belirgin şekilde değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte,

genellikle birim deformasyon yoğunlaşmalarının, hidrolik yükleme sistemine en yakın numune kenarı civarında ve ankraj bölgeleri etrafında meydana geldiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık, hidrolik sisteme en uzak kenarda ve numunelerin orta bölgesinde ihmal edilebilir düzeyde birim deformasyon değişimleri tespit edilmiştir.

DIC analizi ile elde edilen birim deformasyon dağılımı üzerinde her bir değişkenin ayrıntılı etkileri aşağıda özetlenmiştir:

- Birim deformasyon değerleri beton dayanım sınıfına (C15, C30) göre incelendiğinde, maksimum birim deformasyon değerlerinin C15 beton sınıfına ait 4, 10, 23, 30 ve 31 numaralı numunelerde; C30 beton sınıfına ait 49, 52 ve 67 numaralı numunelerde elde edildiği belirlenmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda, C30 beton numunelerinden elde edilen ortalama birim deformasyon değerlerinin, C15 beton numunelerine kıyasla daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, daha yüksek dayanımlı betonlarda birim deformasyon gelişiminin daha belirgin olduğunu göstermektedir.
- TRM şerit genişliğinin (50–100 mm) birim deformasyon değerleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, maksimum birim deformasyon değerlerinin 50 mm TRM şerit genişliğine sahip 10, 49 ve 52 numaralı numunelerde; 100 mm TRM şerit genişliğine sahip 23, 30, 31 ve 67 numaralı numunelerde elde edildiği belirlenmiştir. 100 mm genişliğe sahip TRM şeritlerinde ortalama birim deformasyon değerlerinin, 50 mm şeritlere kıyasla bir miktar daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, şerit genişliğinin artmasıyla birlikte birim deformasyon kapasitesinde sınırlı düzeyde bir artış olduğunu göstermektedir.
- TRM şerit bağ uzunluğuna (150–300–450 mm) bağlı olarak birim deformasyon değerleri incelendiğinde, maksimum birim deformasyon değerlerinin 450 mm şerit uzunluğuna sahip 23, 29 ve 31 numaralı numunelerde elde edildiği belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmede, TRM şerit bağ uzunluğu arttıkça ortalama birim deformasyon değerlerinin de arttığı; 450 mm şerit uzunluğuna sahip numunelerin, 300 mm ve 150 mm uzunluğa sahip numunelere kıyasla daha yüksek ortalama birim deformasyon değerleri sergilediği tespit edilmiştir.
- Ankraj sayısına (1–6) bağlı olarak birim deformasyon değerleri incelendiğinde en yüksek ortalama birim deformasyon değerleri, altı ankrajla donatılmış numunelerde gözlemlenirken, en düşük değerler yalnızca bir ankraja sahip numunelerde

kaydedilmiştir. Bu bulgular, ankraj sayısının artırılmasının TRM–beton arayüzeyi boyunca birim deformasyon gelişimini artırdığını göstermektedir.

- Ankrajların konumuna (1 sıra, 2 sıra) bağlı olarak birim deformasyon değerleri incelendiğinde tek sıra ankraj düzenlemesine sahip numunelerin, iki sıra ankraj düzenlemesine sahip olanlara kıyasla daha yüksek ortalama birim deformasyon değerleri sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, düşey ankraj sıra sayısının artırılmasının, muhtemelen artan kısıtlama etkisi ve mekanik ankraj kuvvetlerinin daha etkin dağılımı nedeniyle, daha sınırlı bir birim deformasyon tepkisine katkı sağladığını göstermektedir.



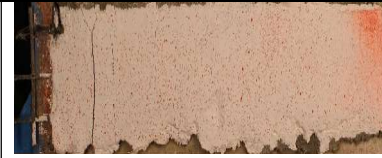







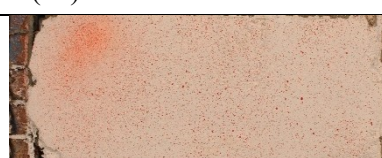







4.3.4. Epoksi Esaslı Ankrajlı Numunelerin Hasar Dağılımları ve Göçme Modları

Hem DIC sonuçlarına hem de hasar desenlerine ilişkin görsel incelemelere dayanarak, test edilen numunelerde çeşitli göçme modları belirlenmiştir. Deneyler sonrasında numunelerin yüzeylerinde gözlemlenen hasar dağılımları C15 ve C30 beton dayanım sınıfı için sırasıyla Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de gösterilmiştir.

Numune 6, 10, 27, 29, 65, 68, 71 ve 72’de, önemli düzeyde matris çatlağı gözlenmiş, bunu harç tabakasının kademeli olarak ayrılması izlemiş ve süreç nihayetinde göçmeye yol açmıştır (C tipi göçme modu).















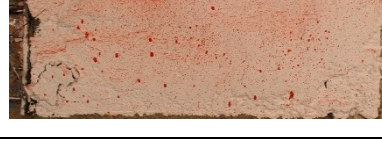

Buna karşılık, kalan numunelerin büyük çoğunluğunda özellikle numune 5, 7, 8, 21, 24, 25, 26, 28, 30, 46, 50, 51, 64, 67, 70 ve 73’te göçme, ağırlıklı olarak tekstilin harç tabakası içerisinde içsel kayması şeklinde meydana gelmiştir (D tipi göçme modu). Bu durumlarda harç yüzeyinde belirgin bir dökülme ya da çatlak oluşumu gözlenmemiş; bunun yerine yerel sürtünmeli kayma veya donatı tekstilinin kademeli olarak çekilip çıkması hâkim mekanizma olarak değerlendirilmiştir.

Matris dışında kalan karbon tekstil ağın kopması şeklinde tanımlanan E-1 tipi göçme yalnızca 4, 9 ve 47 numaralı numunelerde gözlemlenmiştir. 22, 23, 29, 49, 63, 66 ve 69 numaralı numunelerde göçme karbon tekstil ağın matris içinde bulunan bölgeden kopması (E-2 tipi göçme modu) şeklinde ortaya çıkmıştır. Bu durumda harç yüzeyinde belirgin bir şekilde pul pul dökülme, harç tabakasında parçalanma ve derin çatlaklar gözlemlenmiştir.

(4) C15-W50-L150-1/1-E	(5) C15-W50-L300-1/1-E	(6) C15-W50-L450-1/1-E
		
(7) C15-W50-L300-2/1-E	(8) C15-W50-L450-2/1-E	(9) C15-W50-L300-3/1-E
		
(10) C15-W50-L450-3/1-E	(21) C15-W100-L150-1/1-E	(22) C15-W100-L300-1/1-E
		
(23) C15-W100-L450-1/1-E	(24) C15-W100-L300-2/1-E	(25) C15-W100-L450-2/1-E
		
(26) C15-W100-L300-3/1-E	(27) C15-W100-L450-3/1-E	(28) C15-W100-L300-2/2-E
		
(29) C15-W100-L450-2/2-E	(30) C15-W100-L300-3/2-E	(31) C15-W100-L450-3/2-E
		

Şekil 4.20. C15-Epoksi Esaslı Ankrajlı Numunelerin Hasar Dağılımları

Aderansta iyileştirme sağlamak amacıyla kullanılan yüksek dayanımlı harç, her iki beton dayanım türünde beton numune yüzeyi ile mükemmel yapışma göstermiştir. Bu durum göçmenin beton alt tabakaya ilerlemesini engellemiştir. Tüm numunelerde, beton dayanım sınıfından bağımsız olarak, beton altlığın parçalanması (A tipi göçme modu) veya TRM şerit bütünlüğünün korunarak beton arayüzeyinden doğrudan ayrılması (B tipi göçme modu) şeklinde herhangi bir göçme gözlenmemiştir.

(46) C30-W50-L150-1/1-E	(47) C30-W50-L300-1/1-E	(48) C30-W50-L450-1/1-E
		
(49) C30-W50-L300-2/1-E	(50) C30-W50-L450-2/1-E	(51) C30-W50-L300-3/1-E
		
(52) C30-W50-L450-3/1-E	(63) C30-W100-L150-1/1-E	(64) C30-W100-L300-1/1-E
		
(65) C30-W100-L450-1/1-E	(66) C30-W100-L300-2/1-E	(67) C30-W100-L450-2/1-E
		
(68) C30-W100-L300-3/1-E	(69) C30-W100-L450-3/1-E	(70) C30-W100-L300-2/2-E
		
(71) C30-W100-L450-2/2-E	(72) C30-W100-L300-3/2-E	(73) C30-W100-L450-3/2-E
		

Şekil 4.21. C30-Epoksi Esaslı Ankrajlı Numunelerin Hasar Dağılımları

Beton dayanımının artırılması ya da ankraj kullanımı; yük taşıma kapasitesi, enerji yutma kapasitesi gibi performans indekslerinde belirgin iyileşmelere yol açsa da gözlemlenen hasar dağılımı ve göçme modları temelde değişmemiştir. Hasar esas olarak matris çatlama (C tipi göçme modu) veya tekstil-harç arayüzeyindeki aderans kaybı yoluyla sıyrılma (D tipi göçme modu) şeklinde meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, beton dayanımı, şerit uzunluğu, şerit bağ uzunluğu, ankraj kullanımı ve ankraj yerleşim düzeni gibi parametrelerin yapısal performansa olumlu katkı sağlamakla birlikte, hasar dağılımı ve göçme modunu üzerinde belirleyici bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

4.3.5. Harç Esaslı Ankrajlı Numunelerin Birim Deformasyon Dağılımları

Deney numunelerinin yüzeylerindeki birim deformasyon (ϵ_{xx}) dağılımları iki farklı şekilde analiz edilmiştir. İlk olarak, her bir numune için birim deformasyon dağılımları kendi özgün ölçeklerine göre ayrı ayrı belirlenmiştir. Daha sonra, tüm numuneler için birim deformasyon dağılımları ortak bir ölçek esas alınarak yeniden değerlendirilmiştir. Epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılan ankrajlı numuneler beton dayanım sınıfına (C15–C30) göre gruplandırılmıştır. C15 ve C30 numuneleri için, kendi özgün ölçeklerine göre elde edilen birim deformasyon dağılımları sırasıyla EK-19 ve EK-20’de sunulmuştur. Tüm numuneler değerlendirilerek ortak bir ölçek alınarak elde edilen birim deformasyon dağılımları, harç esaslı yapıştırıcı kullanılan ankrajlı numuneler için C15 ve C30 beton dayanım sınıfı olarak gruplandırılarak sırasıyla EK-21 ve EK-22’de gösterilmiştir.

DIC sonuçları; beton dayanım sınıfı (C15–C30), TRM şerit genişliği (50–100 mm), TRM bağ uzunluğu (150–300–450 mm), ankraj sayısı (1–6) ve ankraj yerleşimi (1 sıra, 2 sıra) gibi çeşitli deneysel parametrelerin etkileri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Birim deformasyon haritaları, maksimum birim şekil değiştirme yoğunlaşmalarının ilgili deneysel parametrelere (beton dayanım sınıfı, TRM şerit geometrisi, ankraj sayısı ve yerleşimi) bağlı olarak belirgin şekilde değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, genellikle birim deformasyon yoğunlaşmalarının, hidrolik yükleme sistemine en yakın numune kenarı civarında ve ankraj bölgeleri etrafında meydana geldiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık, hidrolik sisteme en uzak kenarda ve numunelerin orta bölgesinde ihmal edilebilir düzeyde birim deformasyon değişimleri tespit edilmiştir.

DIC analizi ile elde edilen birim deformasyon dağılımı üzerinde her bir değişkenin ayrıntılı etkileri aşağıda özetlenmiştir:

- Birim deformasyon değerleri beton dayanım sınıfına (C15, C30) göre incelendiğinde, maksimum birim deformasyon değerlerinin C15 beton sınıfına ait 15, 35 ve 39 numaralı numunelerde; C30 beton sınıfına ait 53, 79, 82 ve 83 numaralı numunelerde elde edildiği belirlenmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda, C30 beton numunelerinden elde edilen ortalama birim deformasyon değerlerinin, C15 beton numunelerine kıyasla daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. C30 beton numunelerinde ölçülen ortalama birim deformasyon değerinin C15 beton numunelerde ölçülen ortalama değerinin yaklaşık iki katı olduğu

tespit edilmiştir. Bu durum, daha yüksek dayanımlı betonlarda birim deformasyon gelişiminin daha belirgin olduğunu göstermektedir.

- TRM şerit genişliğinin (50–100 mm) birim deformasyon değerleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, maksimum birim deformasyon değerlerinin 50 mm TRM şerit genişliğine sahip 15, 53 ve 55 numaralı numunelerde; 100 mm TRM şerit genişliğine sahip 35, 39, 82 ve 83 numaralı numunelerde elde edildiği belirlenmiştir. 100 mm genişliğe sahip TRM şeritlerinde ortalama birim deformasyon değerlerinin, 50 mm şeritlere kıyasla bir miktar daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, daha geniş TRM şeritlerinin aderans yüzeyi boyunca daha fazla birim deformasyon gelişimine olanak sağladığını göstermektedir.
- TRM şerit bağ uzunluğuna (150–300–450 mm) bağlı olarak birim deformasyon değerleri incelendiğinde, maksimum birim deformasyon değerlerinin 150 mm TRM şerit bağ uzunluğuna sahip 32, 53 ve 74 numaralı numunelerde, 300 mm TRM şerit bağ uzunluğuna sahip 35, 39, 54 ve 83 numaralı numunelerde, 450 mm TRM şerit bağ uzunluğuna sahip 15, 55 ve 82 numaralı numunelerde elde edildiği belirlenmiştir. Yapılan analizler, TRM şerit bağ uzunluğu arttıkça ortalama maksimum birim deformasyon değerlerinin de arttığını göstermiştir. Bu durum, daha uzun aderans bölgelerinin tekstil donatının daha etkin bir şekilde devreye girmesine olanak sağladığını ortaya koymaktadır.
- Ankraj sayısına (1-6) bağlı olarak birim deformasyon değerleri incelendiğinde, ortalama birim deformasyon değerlerinin, ankraj sayısının artmasıyla birlikte arttığı belirlenmiştir. En düşük ortalama birim deformasyon değerleri tek ankrajlı numunelerde ölçülürken, en yüksek ortalama değerler dört ve altı ankrajlı numunelerde elde edilmiştir. Bu bulgular, ankraj sayısının artırılmasının çekme gerilmelerinin TRM sistemine daha etkin bir şekilde aktarılmasını sağladığını ve göçme öncesinde daha fazla birim deformasyon birikimine olanak tanıdığını göstermektedir.
- Ankrajların konumuna (1 sıra, 2 sıra) bağlı olarak birim deformasyon değerleri incelendiğinde tek sıra ankraj düzenlemesine sahip numunelerin, iki sıra ankraj düzenlemesine sahip olanlara kıyasla daha yüksek ortalama birim deformasyon değerleri sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, düşey doğrultudaki ankraj sayısının azalmasıyla birlikte çekme gerilmesinin daha az sayıda ankraj noktasında yoğunlaştığını ve böylece daha yüksek yerel birim deformasyonların gelişmesine

olanak sağladığını göstermektedir. Dolayısıyla, DIC analizi düşey ankraj yoğunluğu azaldıkça, yükleme doğrultusuna dik yöndeki kısıtlamanın azalmasına bağlı olarak ortalama birim deformasyon değerlerinin arttığını ortaya koymaktadır.

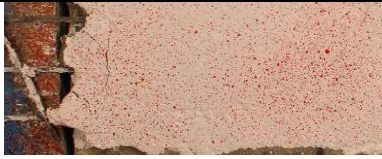












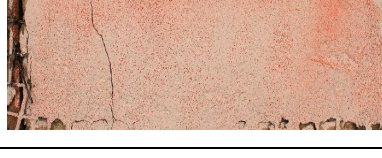
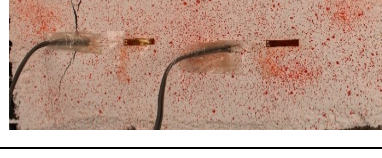



4.3.6. Harç Esaslı Ankrajlı Numunelerin Hasar Dağılımları ve Göçme Modları

Hem DIC sonuçlarına hem de hasar desenlerine ilişkin görsel incelemelere dayanarak, test edilen numunelerde çeşitli göçme modları belirlenmiştir. Deneyler sonrasında numunelerin yüzeylerinde gözlemlenen hasar dağılımları C15 ve C30 beton dayanım sınıfı için sırasıyla Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te gösterilmiştir.

Numune 12, 15, 36, 38, 42, 54, 55, 77, 78, 80, 83 ve 84'te, önemli düzeyde matris çatlağı gözlenmiş, bunu harç tabakasının kademeli olarak ayrılması izlemiş ve süreç nihayetinde göçmeye yol açmıştır (C tipi göçme modu).



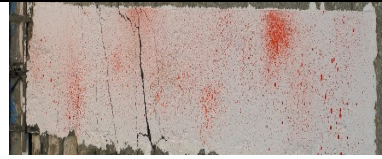
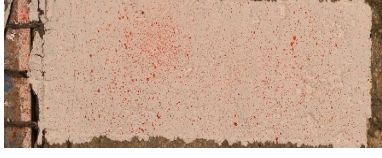


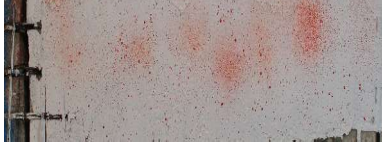




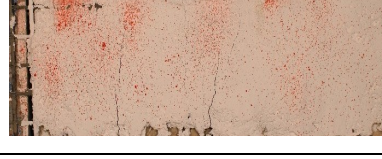




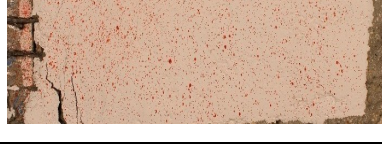
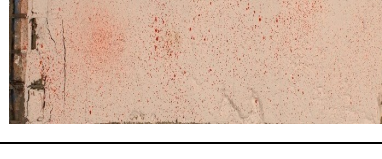
Buna karşılık, kalan numunelerin büyük çoğunluğunda özellikle numune 11, 14, 16, 33, 34, 35, 36, 40, 41, 56, 57, 58, 59, 76, 79 ve 81'de göçme, ağırlıklı olarak tekstilin harç tabakası içerisinde içsel kayması şeklinde meydana gelmiştir (D tipi göçme modu). Bu durumlarda harç yüzeyinde belirgin bir dökülme ya da çatlak oluşumu gözlenmemiş; bunun yerine yerel sürtünmeli kayma veya donatı tekstilinin kademeli olarak çekilip çıkması hâkim mekanizma olarak değerlendirilmiştir.

Matris dışında kalan karbon tekstil ağın kopması şeklinde tanımlanan E-1 tipi göçme yalnızca 17 numaralı numunede gözlemlenmiştir. 32, 37, 39, 53, 74, 75 ve 82 numaralı numunelerde göçme karbon tekstil ağın matris içinde bulunan bölgeden kopması (E-2 tipi göçme modu) şeklinde ortaya çıkmıştır. Bu durumda harç yüzeyinde belirgin bir şekilde pul pul dökülme, harç tabakasında parçalanma ve derin çatlaklar gözlemlenmiştir.

(11) C15-W50-L150-1/1-M	(12) C15-W50-L300-1/1-M	(13) C15-W50-L450-1/1-M
		
(14) C15-W50-L300-2/1-M	(15) C15-W50-L450-2/1-M	(16) C15-W50-L300-3/1-M
		
(17) C15-W50-L450-3/1-M	(32) C15-W100-L150-1/1-M	(33) C15-W100-L300-1/1-M
		
(34) C15-W100-L450-1/1-M	(35) C15-W100-L300-2/1-M	(36) C15-W100-L450-2/1-M
		
(37) C15-W100-L300-3/1-M	(38) C15-W100-L450-3/1-M	(39) C15-W100-L300-2/2-M
		
(40) C15-W100-L450-2/2-M	(41) C15-W100-L300-3/2-M	(42) C15-W100-L450-3/2-M
		

Şekil 4.22. C15-Harç Esaslı Ankrajlı Numunelerin Hasar Dağılımları

Aderansta iyileştirme sağlamak amacıyla kullanılan yüksek dayanımlı harç, her iki beton dayanım türünde beton numune yüzeyi ile mükemmel yapışma göstermiştir. Bu durum göçmenin beton alt tabakaya ilerlemesini engellemiştir. Tüm numunelerde, beton dayanım sınıfından bağımsız olarak, beton altlığın parçalanması (A tipi göçme modu) veya TRM şerit bütünlüğünün korunarak beton arayüzeyinden doğrudan ayrılması (B tipi göçme modu) şeklinde herhangi bir göçme gözlenmemiştir.

(53) C30-W50-L150-1/1-M	(54) C30-W50-L300-1/1-M	(55) C30-W50-L450-1/1-M
		
(56) C30-W50-L300-2/1-M	(57) C30-W50-L450-2/1-M	(58) C30-W50-L300-3/1-M
		
(59) C30-W50-L450-3/1-M	(74) C30-W100-L150-1/1-M	(75) C30-W100-L300-1/1-M
		
(76) C30-W100-L450-1/1-M	(77) C30-W100-L300-2/1-M	(78) C30-W100-L450-2/1-M
		
(79) C30-W100-L300-3/1-M	(80) C30-W100-L450-3/1-M	(81) C30-W100-L300-2/2-M
		
(82) C30-W100-L450-2/2-M	(83) C30-W100-L300-3/2-M	(84) C30-W100-L450-3/2-M
		

Şekil 4.23. C30-Harç Esaslı Ankrajlı Numunelerin Hasar Dağılımları

Beton dayanımının artırılması ya da ankraj kullanımı; yük taşıma kapasitesi, enerji yutma kapasitesi gibi performans indekslerinde belirgin iyileşmelere yol açsa da gözlemlenen hasar dağılımı ve göçme modları temelde değişmemiştir. Hasar esas olarak matris çatlaması (C tipi göçme modu) veya tekstil-harç arayüzündeki aderans kaybı yoluyla sıyrılma (D tipi göçme modu) şeklinde meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, beton dayanımı, şerit uzunluğu, şerit bağ uzunluğu, ankraj kullanımı ve ankraj yerleşim düzeni gibi parametrelerin yapısal performansa olumlu katkı sağlamakla birlikte, hasar dağılımı ve göçme modunu üzerinde belirleyici bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

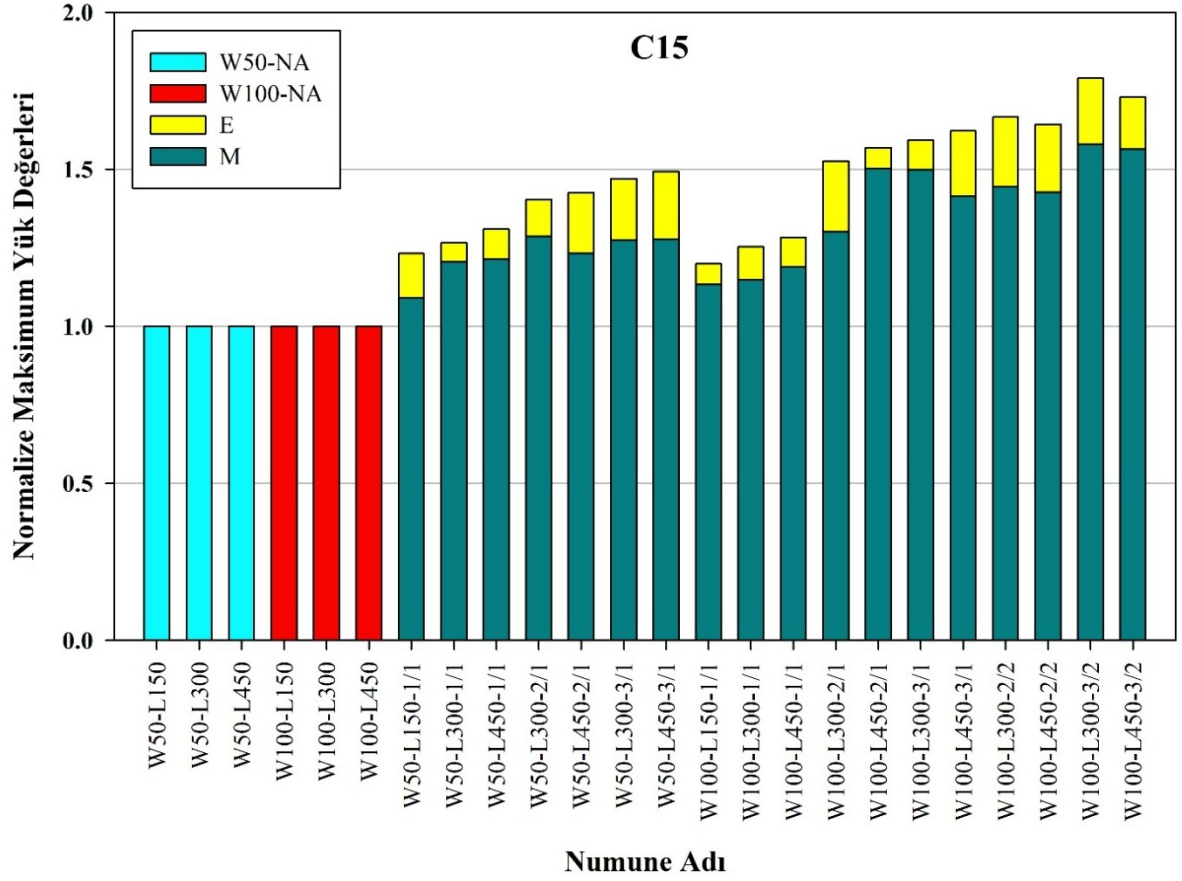
5. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI VE YORUMLANMASI

Bu bölümde çalışmada kullanılan değişkenler (beton basınç dayanımı, TRM şerit genişliği, TRM bağ uzunluğu, ankraj kullanımı, ankraj sabitleme türü ve ankraj yerleşim düzeni) dikkate alınarak deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Deneyssel çalışmada ele alınan beton basınç dayanımı, TRM şerit genişliği, TRM bağ uzunluğu, ankraj kullanımı, ankraj sabitleme türü ve ankraj yerleşim düzeni gibi değişkenlerin; maksimum yük taşıma kapasitesi, maksimum yükteki deplasman, başlangıç rijitliği, maksimum deplasman ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Öncelikle her bir deney değişkeninin ilgili performans indeksleri üzerindeki etkisi kendi içerisinde incelenmiş, ardından tüm değişkenlerin performans parametreleri üzerindeki göreceli etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Böylece, TRM–beton kompozit sistemlerin mekanik davranışını belirleyen temel parametreler ortaya konulmuş ve farklı tasarım değişkenlerinin yapısal performansa katkıları bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir.

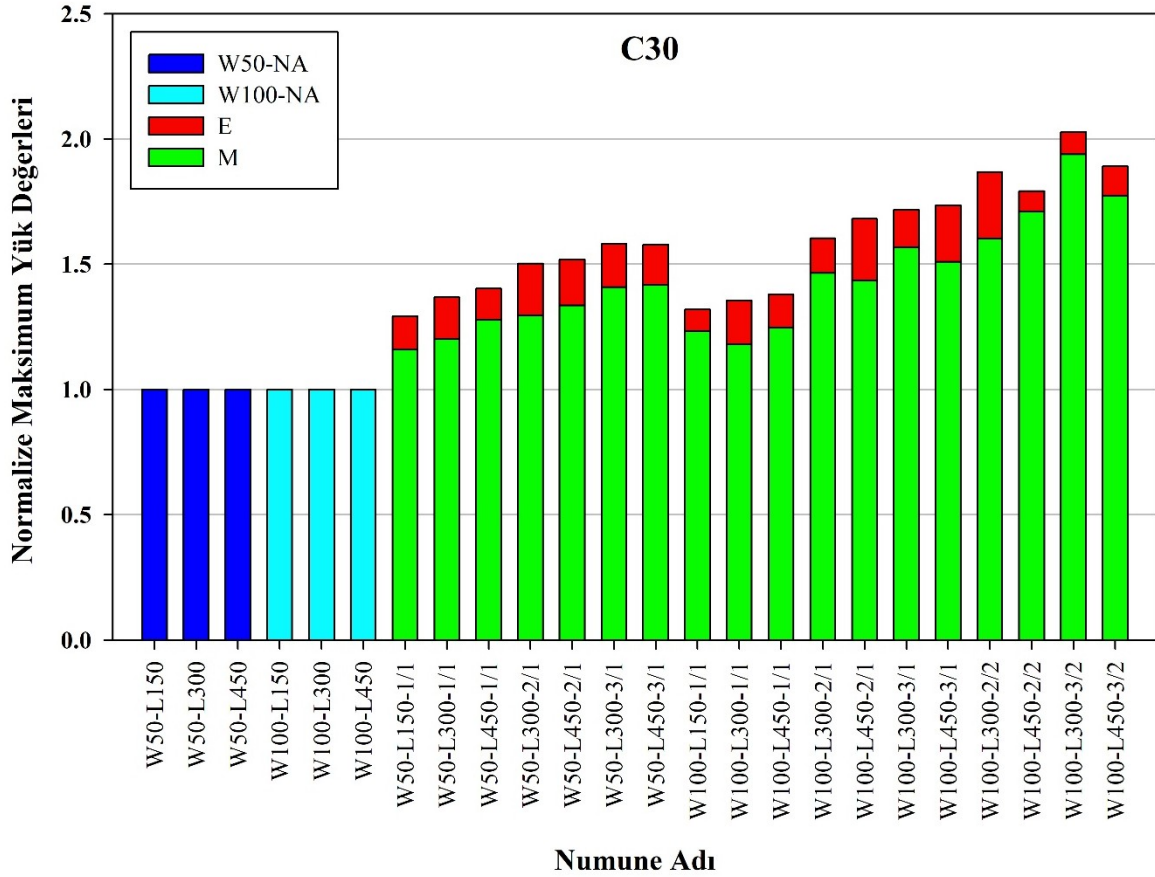
5.1. Maksimum Yük Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilen normalize maksimum yük değerleri, her bir ankrajlı numunenin maksimum yük taşıma kapasitesinin, aynı TRM şerit genişliği ve bağ uzunluğuna sahip referans ankrajsız numunenin maksimum yük değerine bölünmesiyle elde edilmiştir. Böylece, farklı deney değişkenlerinin maksimum yük performansı üzerindeki etkisi boyutsuzlaştırılmış veriler üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Normalize işlemi sonucunda elde edilen değerler grafiklerde boyutsuz olarak ifade edilmiş olup, referans niteliğindeki ankrajsız numunelerin normalize maksimum yük değeri 1.00 olarak kabul edilmiştir. Bu kapsamda, 50 mm TRM şerit genişliğine sahip numuneler için referans değer olarak W50-NA numunesinin maksimum yükü, 100 mm TRM şerit genişliğine sahip numuneler için ise W100-NA numunesinin maksimum yükü esas alınmıştır.



Şekil 5.1. C15- Normalize Maksimum Yük Değerleri

Şekil 5.1’de C15 beton dayanımına sahip numunelerin normalize maksimum yük değerleri, Şekil 5.2’de ise C30 beton dayanımına sahip numunelerin normalize maksimum yük değerleri sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde, ankrajsız referans numunelerin normalize maksimum yük değerlerinin doğal olarak 1.00 seviyesinde kaldığı, ankraj uygulanan tüm numunelerde ise maksimum yük taşıma kapasitesinin belirgin şekilde arttığı görülmüştür. C15 beton dayanımına sahip epoksi ile sabitlenen ankrajlı numunelerde normalize maksimum yük değerleri yaklaşık 1.20–1.80 aralığında değişirken, harç ile sabitlenen numunelerde bu değerlerin yaklaşık 1.10–1.60 aralığında kaldığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, C30 beton dayanımına sahip epoksi ile sabitlenen ankrajlı numunelerde normalize maksimum yük değerleri yaklaşık 1.30–2.00 aralığında değişirken, harç ile sabitlenen numunelerde bu değerlerin yaklaşık 1.20–1.90 aralığına ulaştığı görülmüştür. Bu durum, ankraj kullanımının (harç veya epoksi ile sabitlenen) yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.



Şekil 5.2. C30-Normalize Maksimum Yük Değerleri

Bununla birlikte, C30 beton dayanımına sahip numunelerin normalize maksimum yük değerlerinin genel olarak C15 beton dayanımına sahip numunelerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, beton basınç dayanımındaki artışla birlikte beton-TRM arayüzeyindeki aderans kapasitesinin ve ankraj çevresindeki yerel taşıma dayanımının artmasına bağlanmaktadır. Sonuç olarak, ankraj uygulamasının maksimum yük taşıma kapasitesi üzerindeki olumlu etkisinin, yüksek dayanımlı beton numunelerinde daha belirgin hale geldiği görülmüştür.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de, epoksi ile sabitlenen ankrajlı numunelerin normalize maksimum yük değerlerinin, harç ile sabitlenen ankrajlı numunelere kıyasla tüm deney serilerinde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, epoksi esaslı bağlantının ankraj ile beton/TRM arayüzeyi arasında daha güçlü bir aderans sağlamasından kaynaklanmaktadır. Epoksinin yüksek bağ dayanımı sayesinde yük aktarımının daha etkin gerçekleştiği, buna bağlı olarak ankrajın sıyrılmasının geciktiği ve sistemin daha yüksek maksimum yük seviyelerine ulaşabildiği değerlendirilmektedir. Buna karşılık, harç ile sabitlenen ankrajlı numunelerde aderans kapasitesinin nispeten daha düşük olması nedeniyle yük transfer etkinliği sınırlanmış ve maksimum yük taşıma kapasiteleri daha düşük seviyelerde kalmıştır.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 incelendiğinde, özellikle TRM bağ uzunluğunun artırılmasıyla normalize maksimum yük değerlerinde düzenli bir artış meydana geldiği görülmektedir. 150 mm bağ uzunluğuna sahip numunelerde normalize değerler daha düşük seviyelerde kalırken, 450 mm bağ uzunluğuna sahip numunelerde daha yüksek normalize yük değerleri elde edilmiştir. Bunun nedeni, bağ uzunluğunun artmasıyla birlikte TRM ile beton arasındaki aderans bölgesinin büyümesi ve yük aktarımının daha etkin hale gelmesidir.

Ayrıca, ankraj yerleşim düzeninin değiştirilmesi de normalize maksimum yük değerleri üzerinde etkili olmuştur. Özellikle 3/2 düzenine sahip numunelerde, 1/1 düzenine kıyasla daha yüksek normalize yük değerleri elde edilmiştir. Ankraj yoğunluğunun artırılmasıyla yükün daha dengeli dağıldığı ve sıyrılmaya davranışının geciktirildiği değerlendirilmiştir.

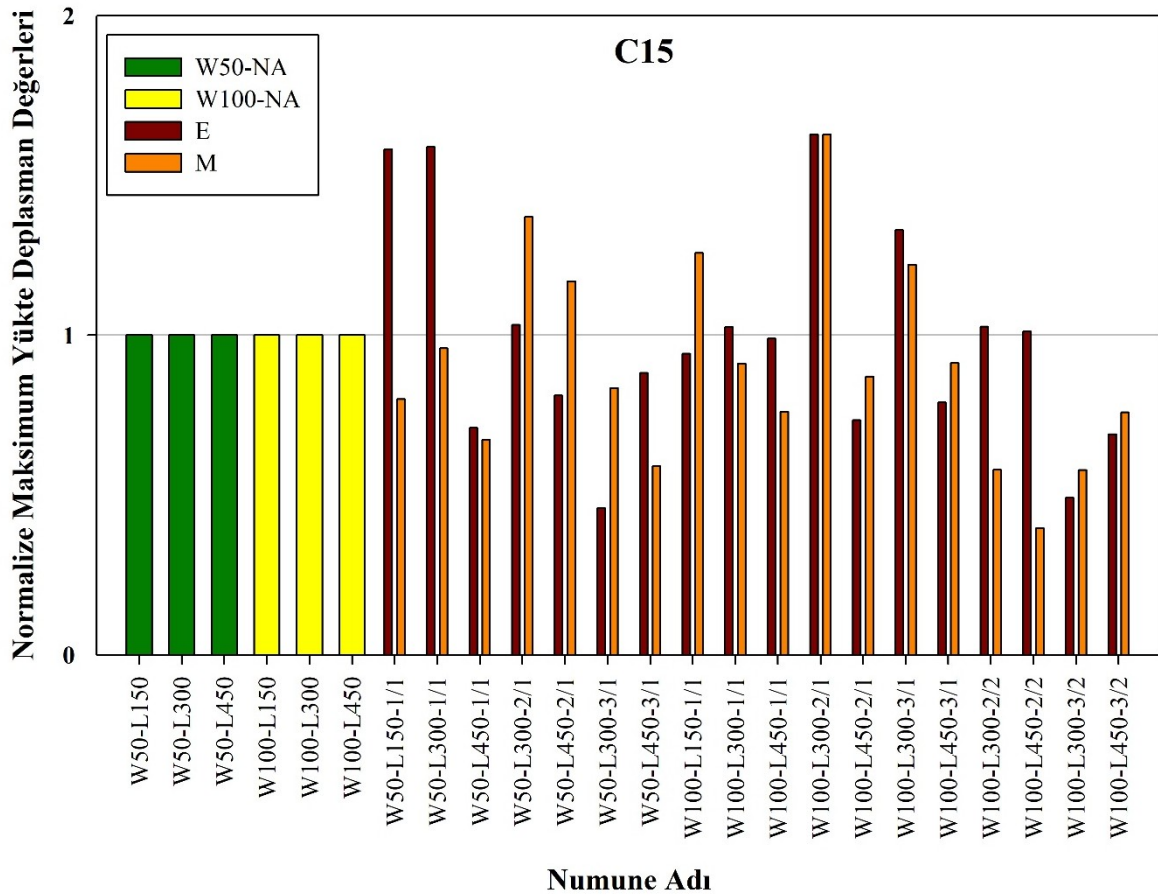
TRM şerit genişliği açısından değerlendirildiğinde ise, 100 mm genişliğe sahip numunelerin genel olarak 50 mm genişliğe sahip numunelerden daha yüksek normalize maksimum yük değerlerine ulaştığı görülmektedir. Daha geniş TRM şeritlerinin daha fazla yük transfer alanı sağlaması nedeniyle sistemin yük taşıma kapasitesinin arttığı düşünülmektedir.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de genel eğilimin aksine, 100 mm TRM şerit genişliğine ve 1/1 ankraj yerleşim düzenine sahip bazı numunelerin normalize maksimum yük değerlerinin, 50 mm TRM şerit genişliğine sahip karşılıklarından daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun, TRM şerit genişliğinin artırılmasına rağmen ankraj sayısının aynı tutulmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Genişleyen TRM yüzey alanına karşın ankraj yoğunluğunun yetersiz kalması nedeniyle yük aktarımı TRM yüzeyi boyunca homojen şekilde dağıtılamamış, bu durum ise ankraj etkinliğinin azalmasına neden olmuştur. Buna bağlı olarak, daha geniş TRM şeritlerinde beklenen kapasite artışı tam olarak sağlanamamış ve bazı serilerde maksimum yük değerleri 50 mm genişliğe sahip numunelerin altında kalmıştır. Bu sonuç, yalnızca TRM şerit genişliğinin artırılmasının yeterli olmadığını, ankraj yerleşim yoğunluğu ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de sunulan normalize maksimum yük sonuçları; ankraj uygulaması, bağ uzunluğu artışı, ankraj yerleşim yoğunluğu ve TRM şerit genişliğinin artırılmasının numunelerin maksimum yük performansını olumlu yönde etkilediğini ortaya koymuştur.

5.2. Maksimum Yükte Deplasman Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verilen normalize maksimum yükteki deplasman değerleri, her bir ankrajlı numunenin maksimum yük altında ölçülen deplasman değerinin, aynı TRM şerit genişliği ve bağ uzunluğuna sahip referans ankrajsız numunenin maksimum yükteki deplasman değerine bölünmesiyle elde edilmiştir. Böylece, farklı deney değişkenlerinin maksimum yük altındaki deformasyon davranışı üzerindeki etkisi boyutsuzlaştırılmış veriler üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Normalize işlemi sonucunda elde edilen değerler grafiklerde boyutsuz olarak ifade edilmiş olup, referans niteliğindeki ankrajsız numunelerin normalize maksimum yükteki deplasman değeri 1.00 olarak kabul edilmiştir. Bu kapsamda, 50 mm TRM şerit genişliğine sahip numuneler için referans değer olarak W50-NA numunesinin maksimum yükteki deplasman değeri, 100 mm TRM şerit genişliğine sahip numuneler için ise W100-NA numunesinin maksimum yükteki deplasman değeri esas alınmıştır.



Şekil 5.3. C15-Normalize Maksimum Yükte Deplasman Değerleri

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 incelendiğinde, maksimum yükteki deplasman davranışının yalnızca tek bir parametrenin etkisiyle açıklanamadığı, TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu,

ankraj yerleşim düzeni ve ankraj tipi parametrelerinin birbirleriyle etkileşim içerisinde davranarak sistem performansını birlikte etkilediği görülmektedir. Bu nedenle, söz konusu parametrelerin etkilerinin bağımsız olarak değerlendirilmesinin yeterli olmayacağı, yapısal davranışın doğru yorumlanabilmesi için birleşik etkilerinin birlikte ele alınması gerektiği anlaşılmaktadır.

Şekil 5.3 detaylı olarak incelendiğinde, maksimum yükteki deplasman davranışının yalnızca tek bir parametreye bağlı olarak değişmediği, TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu ve ankraj yerleşim düzeninin birbirleriyle etkileşim içerisinde davranarak sistem performansını birlikte etkilediği görülmektedir. Örneğin, bağ uzunluğunun 150 mm'den 300 mm ve 450 mm'ye artırılması bazı numunelerde maksimum yükteki deplasman değerlerini artırırken, aynı artışın farklı TRM şerit genişliği veya ankraj yerleşim düzenine sahip numunelerde aynı eğilimi göstermediği belirlenmiştir. Bu durum, bağ uzunluğunun etkisinin tek başına değerlendirilemeyeceğini, TRM şerit genişliği ve ankraj yoğunluğu ile birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

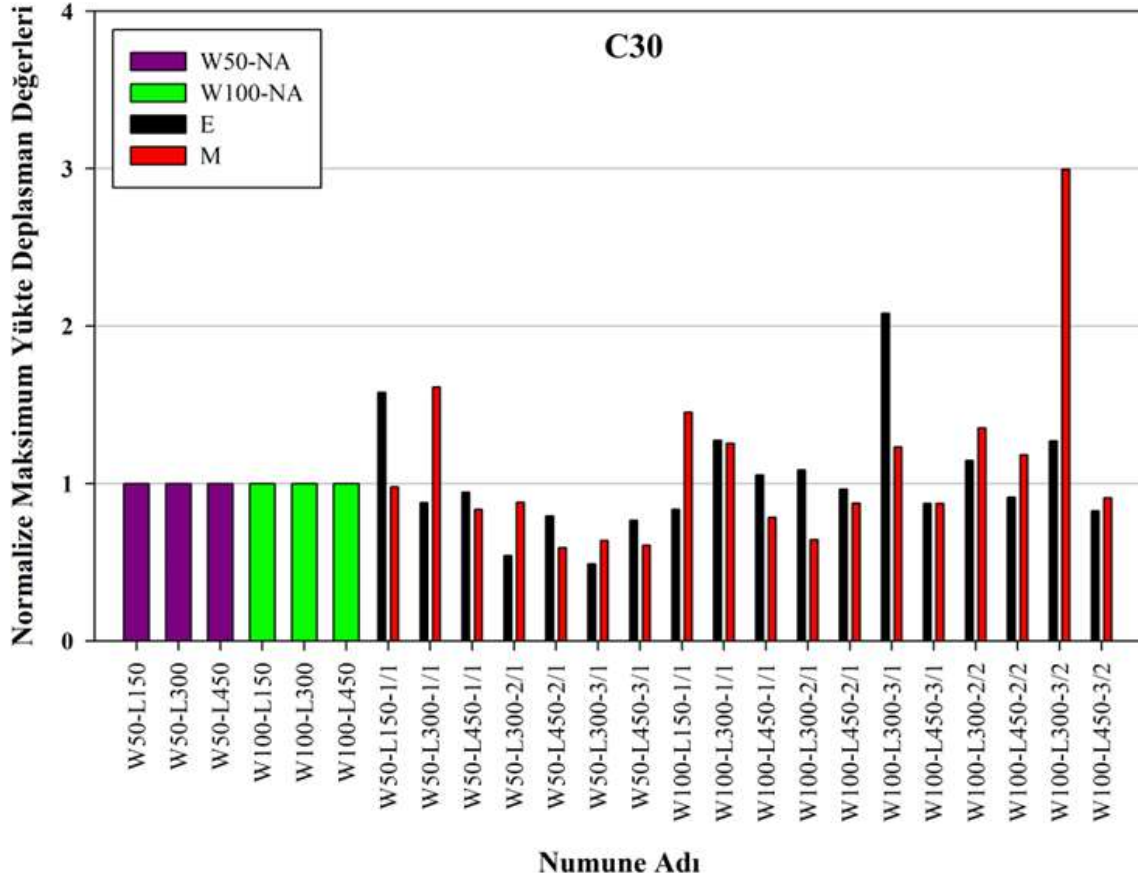
Benzer şekilde, 100 mm TRM şerit genişliğine sahip numunelerin bazı serilerde 50 mm TRM şerit genişliğine sahip numunelere göre daha düşük normalize deplasman değerleri verdiği görülmüştür. Daha geniş TRM şeritlerinin aderans alanını artırmasına rağmen, ankraj yerleşim yoğunluğunun aynı kalması durumunda yük transferinin tüm yüzeye homojen biçimde yayılmadığı ve sistem rijitliğinin arttığı değerlendirilmektedir. Buna karşılık, ankraj yerleşim yoğunluğunun artırıldığı 3/2 düzenine sahip numunelerde yük aktarımının daha dengeli hale geldiği, ancak bu durumun sistem rijitliğini artırarak maksimum yük altındaki deformasyon kapasitesini sınırlandırdığı görülmüştür.

Şekil 5.3'te 1/1 ankraj yerleşimine sahip numunelerde bağ uzunluğunun artırılmasıyla deplasman kapasitesinde belirgin artışlar elde edilirken, 3/2 ankraj yerleşimine sahip numunelerde aynı bağ uzunluğu artışının daha sınırlı etki oluşturduğu belirlenmiştir. Bu durum, ankraj yoğunluğunun artmasıyla sistem davranışının daha rijit hale geldiğini ve bağ uzunluğu etkisinin kısmen baskılandığını göstermektedir. Ayrıca, TRM şerit genişliğinin artırılmasıyla birlikte ankraj sayısının yetersiz kaldığı bazı serilerde deplasman kapasitesinin azaldığı görülmüş olup, TRM genişliği ile ankraj yerleşim düzeni arasındaki uyumun önemli olduğu anlaşılmıştır.

Şekil 5.3'te verilen normalize maksimum yükte deplasman değerleri incelendiğinde, en yüksek değer 1.63 ile hem epoksi hem de harç kullanılarak sabitlenen W100-L300-2/1 numunelerinde elde edildiği görülmüştür. Bu sonuç, 100 mm TRM şerit genişliği ve 300 mm

bağ uzunluğuna sahip numunelerde, 2/1 ankraj yerleşim düzeninin maksimum yük altında deformasyon kapasitesini artırdığını göstermektedir.

Sonuç olarak, maksimum yükteki deplasman davranışının; TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu ve ankraj yerleşim düzeni parametrelerinin ortak etkisi altında şekillendiği, bu parametrelerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmesinin yeterli olmayacağı ve yapısal davranışın doğru yorumlanabilmesi için parametrelerin birleşik etkilerinin birlikte incelenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.4. C30- Normalize Maksimum Yükte Deplasman Değerleri

Şekil 5.4'te TRM şerit genişliği açısından değerlendirildiğinde, 50 mm ve 100 mm genişliğe sahip numuneler arasında düzenli ve tek yönlü bir değişim gözlenmemiştir. Fakat genel olarak 100 mm TRM şerit genişliğine sahip numunelerin genel olarak 50 mm TRM şerit genişliğine sahip numunelere kıyasla daha yüksek normalize maksimum yükteki deplasman değerleri verdiği görülmektedir. Daha geniş TRM şeritlerinin daha büyük aderans yüzeyi sağlaması nedeniyle yük transferinin daha etkin gerçekleştiği ve sistemin maksimum yük seviyesine ulaşmadan önce daha fazla deformasyon yapabildiği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, TRM şerit genişliğinin artmasıyla birlikte yük aktarım bölgesinin genişlediği ve çatlak yayılımının daha kontrollü gerçekleştiği düşünülmektedir.

Bağ uzunluğunun 150 mm'den 300 mm ve 450 mm'ye artırılması bazı numunelerde maksimum yükteki deplasman değerlerini artırırken, aynı artışın farklı TRM şerit genişliği veya ankraj yerleşim düzenine sahip numunelerde aynı eğilimi göstermediği belirlenmiştir. Bu durum, bağ uzunluğunun etkisinin tek başına değerlendirilemeyeceğini, TRM şerit genişliği ve ankraj yoğunluğu ile birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Ankraj yerleşim düzeni açısından değerlendirildiğinde ise, 3/1, 2/2 ve 3/2 gibi daha yoğun ankraj yerleşimine sahip numunelerde bazı serilerde maksimum yükteki deplasman değerlerinin arttığı dikkat çekmektedir. Özellikle 100 mm TRM şerit genişliğine sahip numunelerde, ankraj yoğunluğunun artırılmasıyla birlikte yük transferinin daha homojen hale geldiği ve sistemin daha sünek davranış sergilediği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, bazı serilerde ankraj yoğunluğunun artması sistem rijitliğini artırarak deplasman kapasitesini sınırlandırmıştır. Bu durum, ankraj yerleşim düzeninin etkisinin tek başına değerlendirilemeyeceğini göstermektedir.

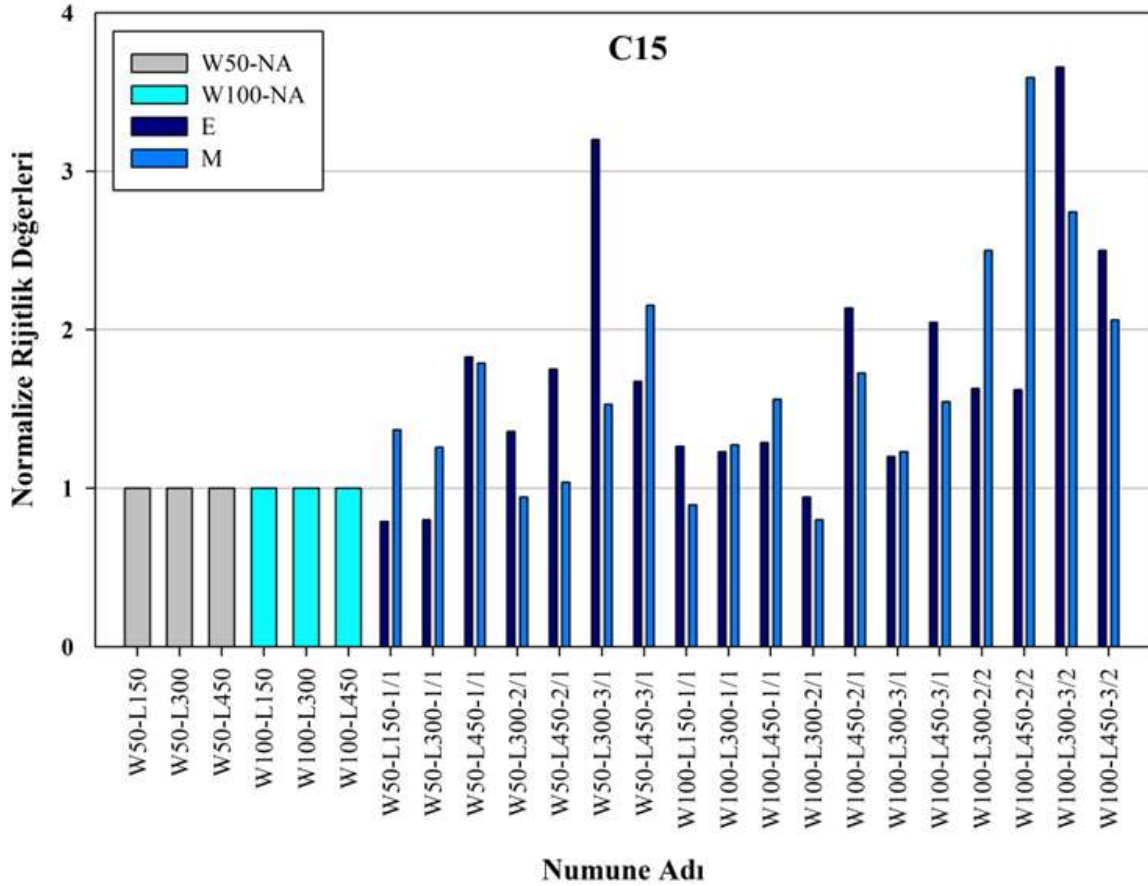
Şekil 5.4'te sunulan normalize maksimum yükte deplasman değerleri değerlendirildiğinde, epoksi ile sabitlenen numuneler arasında en yüksek değer 2.08 ile W100-L300-3/1 numunesinde elde edildiği belirlenmiştir. Harç ile sabitlenen numunelerde ise en yüksek normalize maksimum yükte deplasman değerinin 2.99 ile W100-L300-3/2 numunesinde meydana geldiği görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar, 100 mm TRM şerit genişliği ve 300 mm bağ uzunluğuna sahip numunelerde ankraj yerleşim düzeninin maksimum yük altındaki deformasyon kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle 3/2 ankraj düzenine sahip harç ile sabitlenen numunenin daha yüksek deplasman kapasitesi sergilemesi, ankraj yoğunluğunun ve sabitleme yönteminin sünek davranışı olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Şekil 5.4'te elde edilen bulgular, maksimum yükteki deplasman davranışının yalnızca tek bir parametreye bağlı olmadığını; TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj yerleşim düzeni ve ankraj tipinin birlikte sistem davranışını belirlediğini ortaya koymaktadır. Özellikle TRM şerit genişliğinin artırılmasının, daha etkin yük aktarımı ve daha geniş aderans bölgesi sayesinde maksimum yükteki deplasman kapasitesini olumlu yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.

5.3. Rijitlik Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilen normalize rijitlik değerleri, her bir ankrajlı numunenin rijitlik değerinin, aynı TRM şerit genişliği ve bağ uzunluğuna sahip referans ankrajsız numunenin rijitlik değerine bölünmesiyle elde edilmiştir. Böylece, farklı deney

değişkenlerinin numunelerin rijitlik davranışı üzerindeki etkisi boyutsuzlaştırılmış veriler üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Normalize işlemi sonucunda elde edilen değerler grafiklerde boyutsuz olarak ifade edilmiş olup, referans niteliğindeki ankrajsız numunelerin normalize rijitlik değeri 1.00 olarak kabul edilmiştir. Bu kapsamda, 50 mm TRM şerit genişliğine sahip numuneler için referans değer olarak W50-NA numunesinin rijitlik değeri, 100 mm TRM şerit genişliğine sahip numuneler için ise W100-NA numunesinin rijitlik değeri esas alınmıştır.



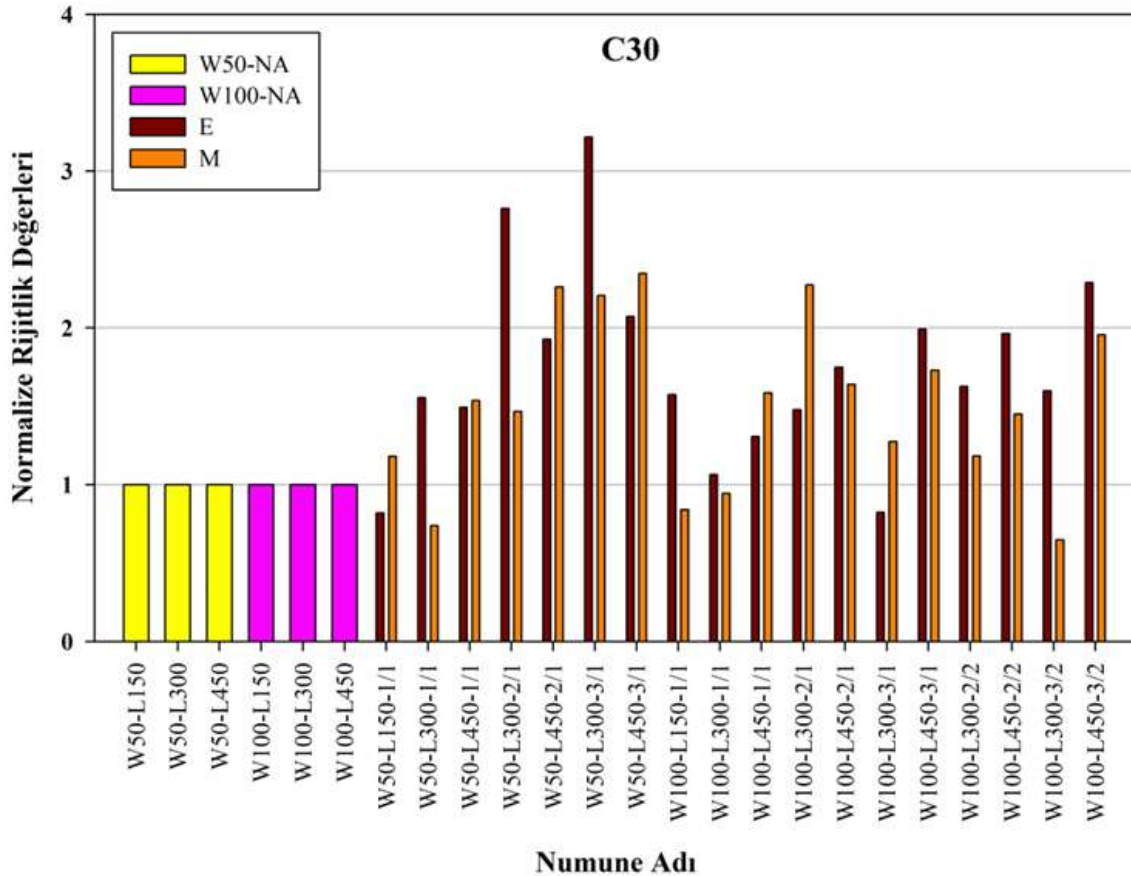
Şekil 5.5. C15- Normalize Rijitlik Değerleri

Şekil 5.5'te C15 beton sınıfına sahip numunelerin normalize rijitlik değerleri sunulmuştur. Grafik genel olarak değerlendirildiğinde, ankraj uygulamasının referans ankrajsız numunelere kıyasla rijitlik davranışını önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Özellikle bazı numunelerde normalize rijitlik değerlerinin 3.00'ın üzerine çıkması, ankraj sisteminin yük aktarım mekanizmasını iyileştirerek başlangıç rijitliğini belirgin şekilde artırdığını göstermektedir. Genel olarak 2/2 ve 3/2 yerleşim düzenine sahip numunelerin, 1/1 ve 2/1 düzenine sahip numunelere kıyasla daha yüksek normalize rijitlik değerleri sergilediği belirlenmiştir. Bu durum ankraj yoğunluğunun artırılmasının TRM sisteminin deformasyona karşı direncini artırdığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık, daha az ankraj içeren veya

düzensiz yük aktarımına neden olabilecek yerleşim düzenlerinde normalize rijitlik değerlerinin daha düşük kaldığı görülmüştür.

TRM şerit bağ uzunluğunun 150 mm'den 450 mm'ye artırılmasının normalize rijitlik değerlerinde genel olarak artış eğilimi oluşturduğu görülmektedir. Bu durum, daha uzun bağ boyunun TRM ile beton arasındaki aderans kapasitesini artırması ve yük aktarımını daha etkin hale getirmesi ile ilişkilendirilebilir.

100 mm TRM şerit genişliğine sahip numunelerde ise normalize rijitlik değerlerinin genel olarak daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Özellikle W100-L300-3/2 numunesinde epoksi ile sabitlenen ankraj uygulamasında 3.66 ile en yüksek normalize rijitlik değeri elde edilmiştir. Benzer şekilde W100-L450-2/2 harç ile sabitlenen numunede de yüksek rijitlik artışı gözlenmiştir. Bu sonuçlar, TRM şerit genişliğinin artırılmasının daha geniş bir yük aktarım alanı sağlayarak sistem rijitliğini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.



Şekil 5.6. C30- Normalize Rijitlik Değerleri

Şekil 5.6'da C30 beton sınıfına sahip numunelerin normalize rijitlik değerleri sunulmuştur. Grafik genel olarak değerlendirildiğinde, ankraj uygulamasının referans ankrajsız numunelere kıyasla rijitlik davranışını önemli ölçüde iyileştirdiği görülmektedir.

Normalize rijitlik değerlerinin çoğu numunede 1.00'ın üzerinde olması, ankraj uygulamasının başlangıç rijitliği üzerinde olumlu bir etki oluşturduğunu göstermektedir.

50 mm TRM şerit genişliğine sahip numuneler incelendiğinde, bağ uzunluğunun artmasıyla birlikte normalize rijitlik değerlerinde genel olarak artış eğilimi meydana geldiği görölmektedir. Özellikle W50-L300-3/1 numunesinde epoksi ile sabitlenen ankraj uygulamasında 3.22 ile en yüksek normalize rijitlik değerlerinden biri elde edilmiştir. Bu durum, bağ uzunluğunun artırılmasıyla TRM ile beton arasındaki aderansın güçlendiğini ve yük aktarım mekanizmasının daha etkin hale geldiğini göstermektedir. Ayrıca aynı bağ uzunluğuna sahip numuneler arasında ankraj yerleşim düzeninin değişmesiyle rijitlik değerlerinde belirgin farklılıklar oluştuğu görölmektedir. Özellikle 2/1 ve 3/1 yerleşim düzenine sahip numunelerde daha yüksek rijitlik değerleri elde edilmesi, ankraj yoğunluğunun ve yerleşim düzeninin sistem davranışı üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

50 mm TRM şerit genişliğine sahip numunelerin birçok durumda 100 mm TRM şerit genişliğine sahip numunelere kıyasla daha yüksek normalize rijitlik değerleri sergilediği görölmektedir.

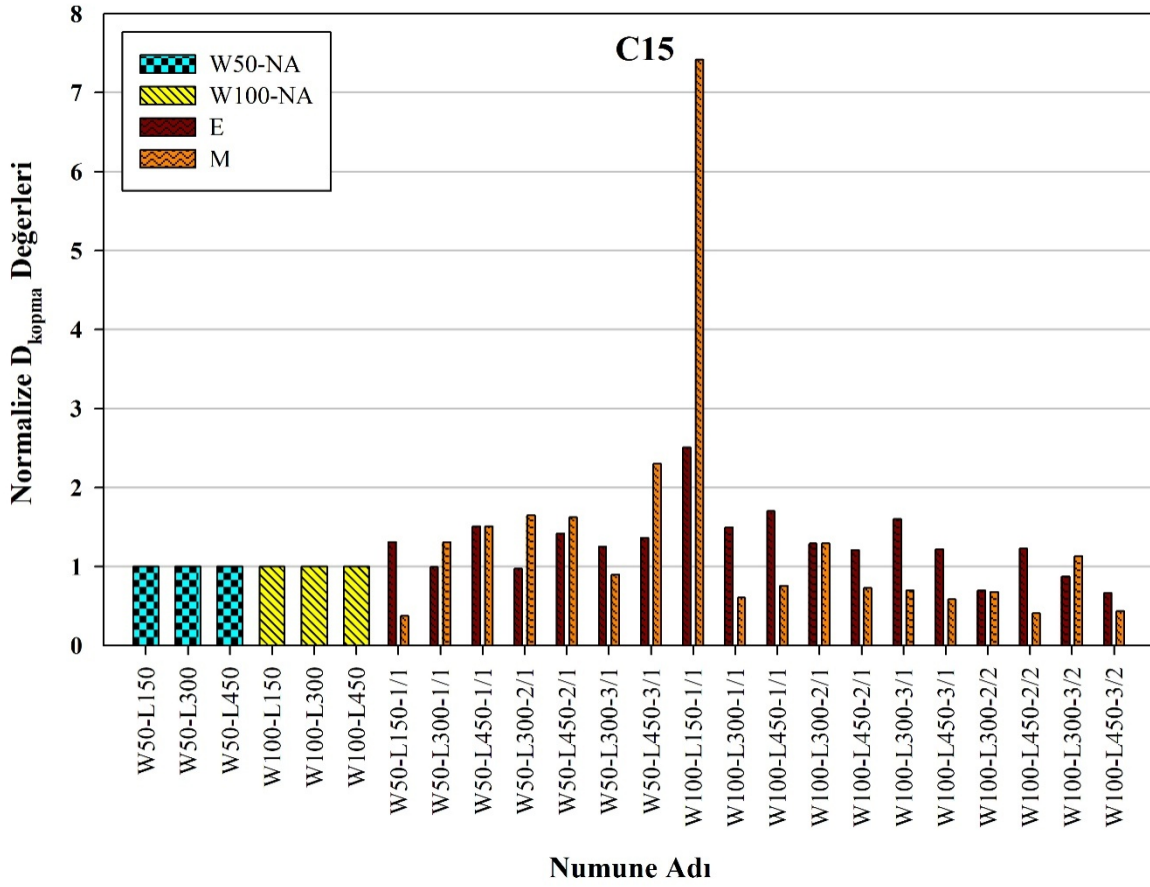
Epoksi ve harç ile sabitlenen numuneler karşılaştırıldığında, bazı numunelerde epoksi ile sabitlenen ankrajların daha yüksek normalize rijitlik değerleri sağladığı, bazı numunelerde ise harç ile sabitlenen ankrajların daha etkin performans gösterdiği görölmektedir. Bu durum, rijitlik davranışının yalnızca sabitleme yöntemine değil; bağ uzunluğu, TRM şerit genişliği ve ankraj yerleşim düzeni gibi parametrelerin birlikte etkisine bağlı olduğunu göstermektedir.

şekil 5.5 ve şekil 5.6 genel olarak değerlendirildiğinde, bağ uzunluğunun, TRM şerit genişliğinin, ankraj varlığının ve ankraj yoğunluğunun artırılmasının normalize rijitlik davranışı üzerinde olumlu ve belirleyici bir etkiye sahip olduğu görölmüştür.

5.4. Maksimum Deplasman Değerlerinin Karşılaştırılması

şekil 5.7 ve şekil 5.8'de verilen normalize maksimum deplasman değerleri, her bir ankrajlı numunenin maksimum deplasman değerinin, aynı TRM şerit genişliği ve bağ uzunluğuna sahip referans ankrajsız numunenin maksimum deplasman değerine bölünmesiyle elde edilmiştir. Böylece, farklı deney değişkenlerinin numunelerin maksimum deformasyon kapasitesi üzerindeki etkisi boyutsuzlaştırılmış veriler üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Normalize işlemi sonucunda elde edilen değerler grafiklerde boyutsuz olarak ifade edilmiş olup, referans niteliğindeki ankrajsız numunelerin normalize maksimum deplasman değeri 1.00 olarak kabul edilmiştir. Bu kapsamda, 50 mm TRM şerit genişliğine sahip numuneler için referans değer olarak W50-NA numunesinin maksimum deplasman

değeri, 100 mm TRM şerit genişliğine sahip numuneler için ise W100-NA numunesinin maksimum deplasman değeri esas alınmıştır.



Şekil 5.7. C15- Normalize Maksimum Deplasman Değerleri

Şekil 5.7’de C15 beton sınıfına sahip numunelerin normalize maksimum deplasman değerleri sunulmuştur. Grafik genel olarak değerlendirildiğinde, ankraj uygulamasının maksimum deplasman davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Referans ankrajsız numunelerin normalize maksimum deplasman değerleri 1.0 olarak kabul edilirken, ankrajlı numunelerde bu değer bazılarında belirgin şekilde arttığı belirlenmiştir. Bu durum, ankraj uygulamasının numunelerin deformasyon kapasitesini artırarak daha sünek bir davranış sergilemesine katkı sağladığını göstermektedir.

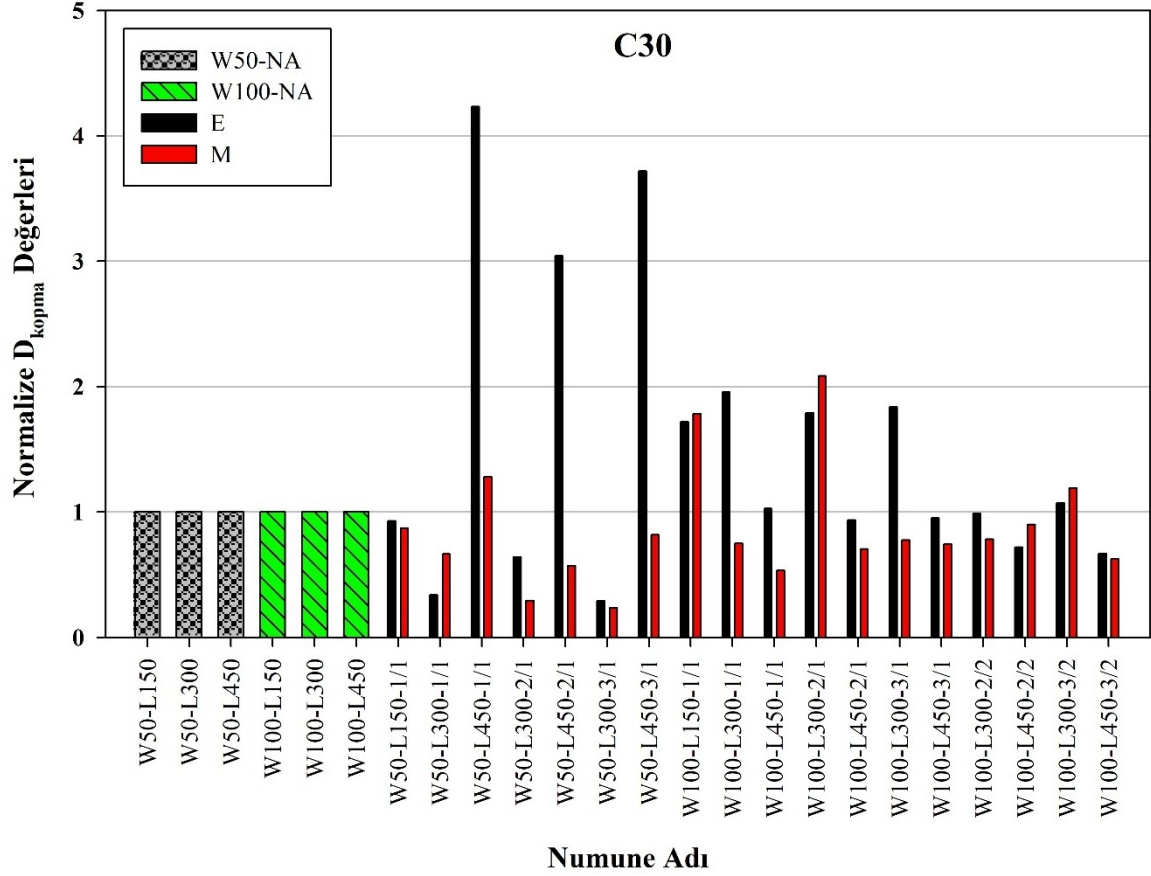
50 mm TRM şerit genişliğine sahip numuneler incelendiğinde, bağ uzunluğunun artmasıyla birlikte normalize maksimum deplasman değerlerinde genel olarak artış eğilimi meydana geldiği görülmektedir. Özellikle W50-L450-3/1 numunesinde harç ile sabitlenen ankraj uygulamasında yaklaşık 2.30 seviyesine ulaşan normalize deplasman değeri dikkat çekmektedir. Benzer şekilde epoksi ile sabitlenen bazı numunelerde de 1.50 seviyesinin üzerinde normalize deplasman değerleri elde edilmiştir. Bu durum, bağ uzunluğunun

artmasıyla birlikte TRM ile beton arasındaki aderans davranışının iyileştiğini ve sistemin daha yüksek deformasyon kapasitesi geliştirdiğini göstermektedir.

100 mm TRM şerit genişliğine sahip numunelerde normalize maksimum deplasman değerlerinin bazı numunelerde yüksek seviyelere ulaştığı görülmektedir. Özellikle W100-L150-1/1 numunesinde harç ile sabitlenen ankraj uygulamasında yaklaşık 7.40 ile grafik üzerindeki en yüksek normalize maksimum deplasman değeri elde edilmiştir. Bu sonuç, ilgili numunenin maksimum yük altında referans ankrajsız numuneye kıyasla oldukça yüksek deformasyon kapasitesi sergilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, aynı seri içerisinde harç ile sabitlenen birçok numunede normalize maksimum deplasman değerlerinin 1.0'ın altında kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, harç ile sabitlenen geniş TRM şeritli numunelerde sistem rijitliğinin artması ve deformasyon kapasitesinin sınırlandırılmasıyla ilişkilendirilebilir. Dolayısıyla, harç ile sabitlenen 100 mm genişliğindeki numunelerin genel olarak maksimum yük altında daha sınırlı deplasman davranışı sergilediği anlaşılmaktadır.

Ankraj yerleşim düzeninin etkisi değerlendirildiğinde, ankraj yoğunluğunun ve yerleşim biçiminin maksimum deplasman davranışı üzerinde belirleyici olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle bazı 3/1 ve 2/2 düzenine sahip numunelerde daha yüksek normalize deplasman değerleri elde edilmesi, ankraj sayısının artmasının ve yük aktarımının daha dengeli hale gelmesinin deformasyon kapasitesini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Buna karşılık, bazı numunelerde ankraj yoğunluğunun artmasına rağmen normalize deplasman değerlerinde sınırlı değişim meydana gelmiştir. Bu durum, maksimum deplasman davranışının yalnızca ankraj sayısına değil; bağ uzunluğu, TRM şerit genişliği, sabitleme yöntemi ve beton dayanımı gibi parametrelerin birlikte etkisine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 5.8'de C30 beton sınıfına sahip numunelerin normalize maksimum deplasman değerleri sunulmuştur. Grafik genel olarak değerlendirildiğinde, ankraj uygulamasının maksimum deplasman davranışı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Referans ankrajsız numunelerin normalize maksimum deplasman değeri 1.00 olarak kabul edilirken, ankrajlı numunelerde bu değer bazılarında önemli ölçüde arttığı, bazı durumlarda ise 1.00'ın altında kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, maksimum deplasman davranışının ankraj uygulamasına ek olarak bağ uzunluğu, TRM şerit genişliği, ankraj yerleşim düzeni ve sabitleme yönteminin birlikte etkisi altında şekillendiğini göstermektedir.



Şekil 5.8. C30- Normalize Maksimum Deplasman Değerleri

50 mm TRM şerit genişliğine sahip numuneler incelendiğinde, epoksi ile sabitlenen bazı numunelerde normalize maksimum deplasman değerlerinin oldukça yüksek seviyelere ulaştığı görülmektedir. Özellikle W50-L450-1/1 numunesinde yaklaşık 4.22 ile grafik üzerindeki en yüksek normalize maksimum deplasman değeri elde edilmiştir. Benzer şekilde W50-L450-2/1 ve W50-L450-3/1 numunelerinde de yüksek normalize deplasman değerleri gözlenmiştir. Bu durum, 450 mm bağ uzunluğunun ve epoksi ile sağlanan güçlü aderansın, maksimum yük altında daha yüksek deformasyon kapasitesi oluşmasına katkı sağladığını göstermektedir. Buna karşılık, aynı seri içerisinde harç ile sabitlenen numunelerde normalize maksimum deplasman değerlerinin genel olarak daha düşük olduğu ve çoğu durumda 1.00 seviyesinin altında kaldığı görülmektedir. Bu sonuç, harç ile sabitlenen sistemlerde rijitlik artışına bağlı olarak maksimum yük altındaki deformasyon kapasitesinin sınırlandığını göstermektedir. Özellikle kısa bağ uzunluğuna sahip bazı numunelerde deformasyon kapasitesinin belirgin şekilde azaldığı dikkat çekmektedir.

100 mm TRM şerit genişliğine sahip numunelerde ise normalize maksimum deplasman değerlerinin genel olarak daha dengeli dağıldığı görülmektedir. Epoksi ile sabitlenen bazı numunelerde normalize maksimum deplasman değerleri 1.50–2.00 aralığına

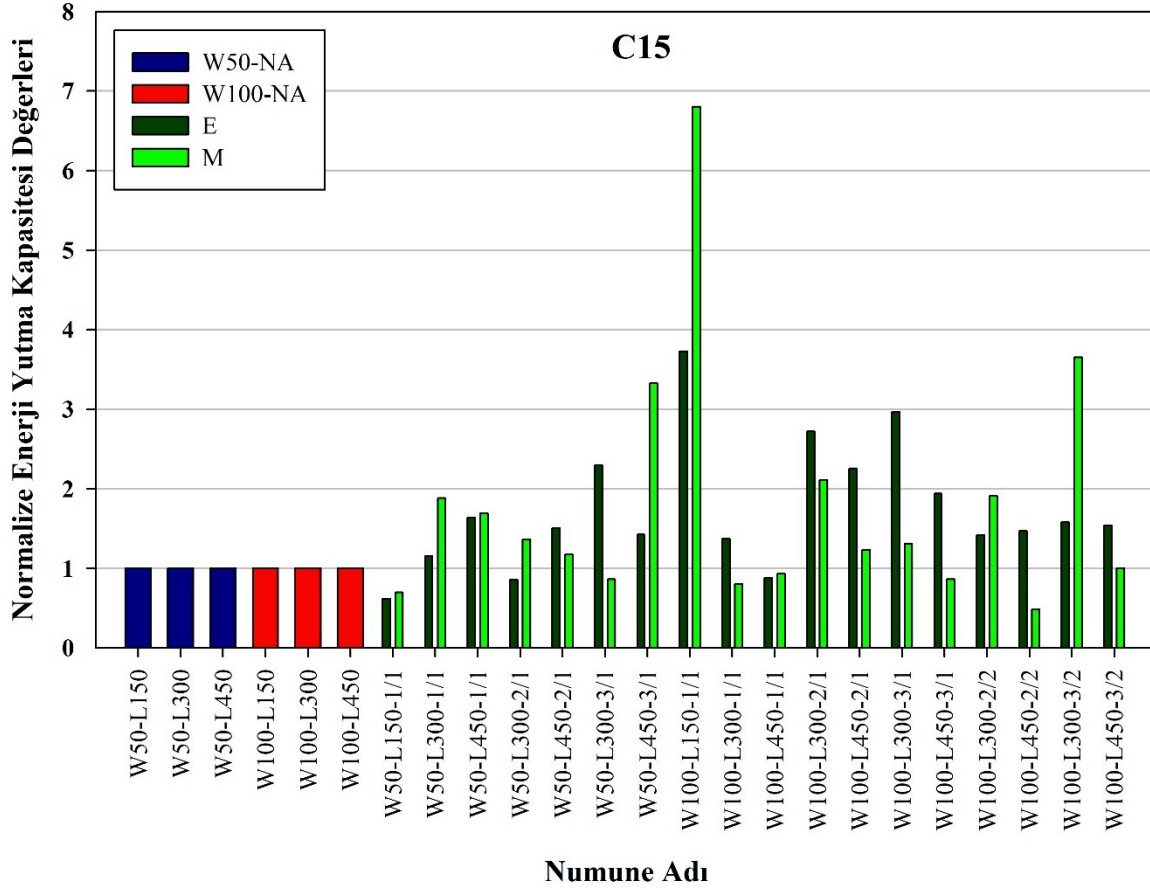
ulaşırken, harç ile sabitlenen numunelerde bu değerlerin çoğunlukla 1.00 civarında veya altında kaldığı belirlenmiştir. Özellikle W100-L300-2/1 numunesinde harç ile sabitlenen ankraj uygulamasında 2.08 ile yüksek bir normalize deplasman değeri elde edilmiş olması, uygun ankraj yerleşim düzeninin deformasyon kapasitesini olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir.

Ankraj yerleşim düzeninin etkisi değerlendirildiğinde, özellikle 2/1 ve 3/1 düzenine sahip epoksi ile sabitlenen numunelerde daha yüksek normalize maksimum deplasman değerleri elde edildiği görülmektedir. Bu durum, ankraj yoğunluğunun artmasıyla yük aktarımının daha kontrollü gerçekleştiğini ve sistemin maksimum yük altında daha sünek bir davranış sergileyebildiğini göstermektedir. Ancak bazı numunelerde ankraj yoğunluğunun artmasına rağmen normalize deplasman değerlerinde belirgin artış meydana gelmemesi, maksimum deformasyon kapasitesinin yalnızca ankraj sayısına değil; aderans davranışı, rijitlik ve çatlak gelişimi gibi parametrelerin ortak etkisine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de elde edilen bulgular, maksimum deplasman davranışının yalnızca tek bir parametreye bağlı olmadığını; TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj yerleşim düzeni ve ankraj tipinin birlikte sistem davranışını belirlediğini ortaya koymaktadır.

5.5. Normalize Enerji Yutma Kapasitelerinin Karşılaştırılması

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da verilen normalize enerji yutma kapasitesi değerleri, her bir ankrajlı numunenin enerji yutma kapasitesi değerinin, aynı TRM şerit genişliği ve bağ uzunluğuna sahip referans ankrajsız numunenin enerji yutma kapasitesi değerine bölünmesiyle elde edilmiştir. Böylece, farklı deney değişkenlerinin numunelerin enerji yutma davranışı üzerindeki etkisi boyutsuzlaştırılmış veriler üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Normalize işlemi sonucunda elde edilen değerler grafiklerde boyutsuz olarak ifade edilmiş olup, referans niteliğindeki ankrajsız numunelerin normalize enerji yutma kapasitesi değeri 1.00 olarak kabul edilmiştir. Bu kapsamda, 50 mm TRM şerit genişliğine sahip numuneler için referans değer olarak W50-NA numunesinin enerji yutma kapasitesi değeri, 100 mm TRM şerit genişliğine sahip numuneler için ise W100-NA numunesinin enerji yutma kapasitesi değeri esas alınmıştır.



Şekil 5.9. C15- Normalize Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri

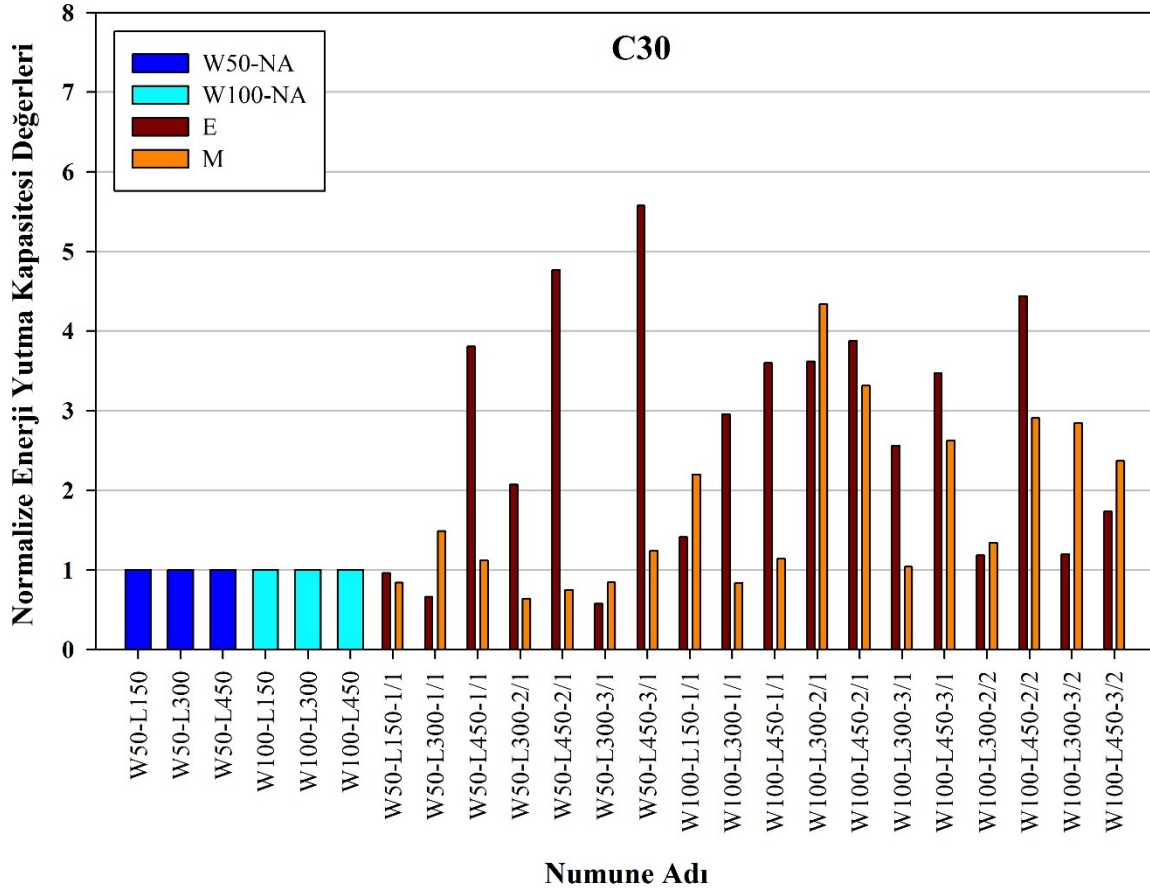
Şekil 5.9’da C15 beton dayanımına sahip numunelerin normalize enerji yutma kapasitesi değerleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde, ankraj uygulamasının enerji yutma kapasitesi üzerinde belirgin bir iyileştirici etkiye sahip olduğu görülmektedir. Referans ankrajsız numuneler normalize değer olarak 1.00 seviyesi kabul edilirken, ankrajlı numunelerin büyük çoğunluğunda bu değer önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, özellikle TRM şerit genişliği 100 mm olan numunelerde normalize enerji yutma kapasitesinin 50 mm şerit genişliğine sahip numunelere kıyasla daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. En yüksek değer 6.80 ile W100-L150-1/1 numunesinde elde edilmiştir. Bu durum TRM şerit genişliği ile uygun bağ uzunluğu ve uygun ankraj yerleşiminin sistemin deformasyon kapasitesini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Yük aktarımının daha etkin gerçekleşmesi ve sıyrılma davranışının gecikmesi enerji yutma kapasitesini artırmıştır.

Grafikte dikkat çeken bir diğer husus ise bazı numunelerde bağ uzunluğunun artmasının enerji yutma kapasitesini sürekli artırmamasıdır. Örneğin bazı L450 numunelerinde değerlerin düşmesi, çok uzun bağ boylarında aderans mekanizmasının tam verimli çalışmaması veya gevrek davranışın artması ile açıklanabilir. Dolayısıyla enerji yutma

kapasitesi yalnızca tek bir parametreye bağlı olmayıp; TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj sayısı ve ankraj yerleşim düzeninin birleşik etkisi altında değişmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, ankraj kullanımının özellikle düşük dayanımlı betonlarda sistem sünekliğini ve enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde geliştirdiği, en etkili performansın ise geniş TRM şeridi ve uygun ankraj düzenine sahip numunelerde elde edildiği söylenebilir.



Şekil 5.10. C30- Normalize Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri

Şekil 5.10'da C30 beton dayanımına sahip numunelerin normalize enerji yutma kapasitesi değerleri verilmiştir. Grafik genel olarak incelendiğinde, ankraj uygulamasının enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Ankrajsız referans numunelerde normalize değer 1.00 seviyesi kabul edilmiş olup, ankrajlı numunelerde bu değerlerin birçok durumda belirgin şekilde yükseldiği belirlenmiştir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde, özellikle epoksi ile sabitlenen ankrajlı numunelerde normalize enerji yutma kapasitesinin oldukça yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. En yüksek değer 5.58 ile W50-L450-3/1 numunesinde elde edilmiştir. Bu durum, yüksek beton dayanımı ile birlikte uygun ankraj düzeninin çatlak ilerlemesini geciktirdiğini ve sistemin daha fazla deformasyon yaparak daha fazla enerji tüketmesini sağladığını göstermektedir.

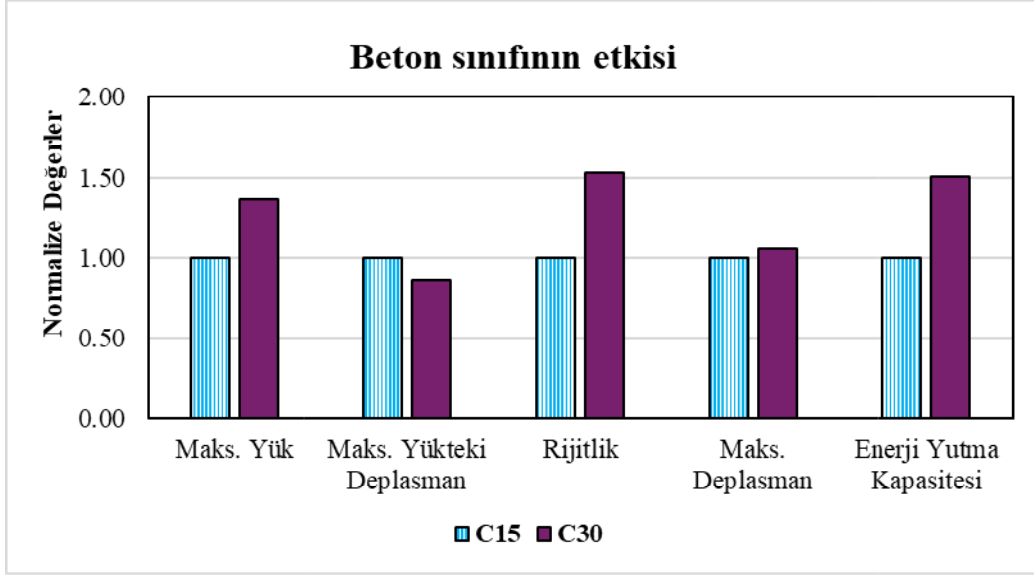
W50 serisi numuneler incelendiğinde, bağ uzunluğunun artmasıyla enerji yutma kapasitesinin genel olarak arttığı görülmektedir. Özellikle L450 bağ uzunluğuna sahip numunelerde yüksek normalize değerler elde edilmiştir. Bunun nedeni, daha uzun bağ boyunun TRM ile beton arasındaki aderans mekanizmasını güçlendirmesi ve yük transferini daha etkin hale getirmesi olarak değerlendirilebilir.

W100 serisinde ise hem epoksi hem de harç ile sabitlenen anakrajlı numunelerde enerji yutma kapasitesinde önemli artış olduğu görülmektedir. Özellikle W100-L450-2/1 ve W100-L450-2/2 numunelerinde yüksek normalize değerler elde edilmiştir. Bununla birlikte bazı numunelerde aynı bağ uzunluğuna rağmen enerji yutma kapasitesinde farklılıklar görülmesi, yalnızca bağ uzunluğunun değil ankraj yerleşim düzeni ve ankraj sayısının da davranış üzerinde önemli rol oynadığını göstermektedir.

Genel değerlendirme olarak, C30 beton dayanımına sahip numunelerde ankraj kullanımının enerji yutma kapasitesini belirgin şekilde artırdığı, özellikle uygun bağ uzunluğu ve etkili ankraj düzeni ile birlikte sistemin daha sünek davranış gösterdiği söylenebilir. Ayrıca yüksek dayanımlı betonun aderans performansını iyileştirmesi sayesinde enerji yutma kapasitesinin birçok numunede önemli ölçüde geliştiği anlaşılmaktadır.

5.6. Beton Sınıfının Etkisi

Şekil 5.11’de verilen normalize performans değerleri, düşük dayanımlı beton (C15) ve normal dayanımlı beton (C30) sınıfları altında gerçekleştirilen tüm deney numunelerine ait sonuçların ortalama değerleri dikkate alınarak elde edilmiştir. Değerlendirme kapsamında diğer deney değişkenlerinden bağımsız olarak beton sınıfının performans parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, C15 beton sınıfına ait ortalama performans değerleri referans kabul edilmiş ve normalize değerleri 1.00 olarak tanımlanmıştır. C30 beton sınıfına ait ortalama performans değerleri ise C15 serisinin ortalama değerlerine bölünerek boyutsuz hale getirilmiştir. Böylece beton basınç dayanımındaki değişimin maksimum yük, maksimum yükteki deplasman, rijitlik, maksimum deplasman ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Normalize işlemi sonucunda elde edilen değerler grafik üzerinde boyutsuz olarak ifade edilmiş olup, referans niteliğindeki C15 beton sınıfının normalize değeri tüm performans parametreleri için 1.00 olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.11. Beton Sınıfının Etkisi

DeneySEL sonuçlar, betonun basınç dayanımının artırılmasının aderans performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini açıkça göstermektedir. Örneğin, C15-W50-L150-NA numunesinde maksimum yük, 4.06 kN iken C30-W50-L150-NA numunesinde 5.28 kN'a yükselmiş, bu da yaklaşık %30'luk bir artışa karşılık gelmiştir. Benzer eğilimler farklı konfigürasyonlarda da gözlemlenmiştir. Örneğin, C15-W100-L450-NA numunesinde maksimum yük 11.17 kN'dan C30-W100-L450-NA numunesinde 14.78 kN'a çıkarak yaklaşık %32'lik bir artış sağlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre, C15 beton sınıfına sahip numunelerde ortalama maksimum yük taşıma kapasitesi 11.92 kN, C30 sınıfı beton numunelerinde ortalama maksimum yük taşıma kapasitesi 16.24 kN olarak belirlenmiş olup, beton dayanımının C15'ten C30'a yükselmesi, ortalama maksimum yük kapasitesinde yaklaşık %36'lık bir artışa neden olmuş ve beton kalitesinin aderans davranışı üzerindeki olumlu etkisini doğrulamıştır.

Beton dayanımı artışının rijitlik değerleri üzerindeki etkisi de oldukça dikkat çekicidir. Daha yüksek beton dayanımları, TRM-beton sisteminin rijitliğini önemli ölçüde artırarak, yük altında oluşan deformasyon miktarını azaltmaktadır. Örneğin, C15-W50-L300-NA numunesinde rijitlik 0.70 kN/mm iken C30-W100-L300-NA numunesinde 1.42 kN/mm'ye çıkarak iki kat gibi bir artış sağlamıştır. Tüm numunelerin ortalaması alındığında rijitlik değeri, C15 beton numuneler için 1.03 kN/mm iken C30 beton numuneler için 1.57 kN/mm olarak bulunmuş olup C15'ten C30'a geçildiğinde rijitlik yaklaşık %52 oranında artmıştır. Bu durum, daha yüksek dayanımlı betonun TRM sistemi ile daha güçlü bir arayüzey etkileşimi sağladığını ve yük aktarım kapasitesini artırdığını göstermektedir. Bu artış, yüksek dayanımlı

beton yüzeylerin yükler karşısında daha küçük deformasyonlara izin verdiğini, sistemin yük aktarımını daha stabil ve kontrollü hale getirdiğini göstermektedir.

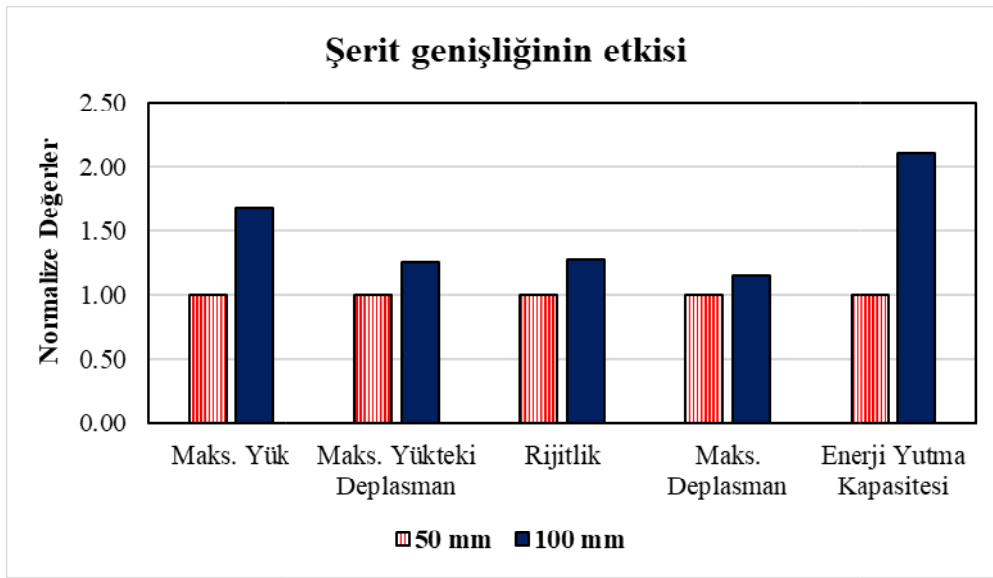
Maksimum yükteki deplasman değerinin C15 beton sınıfında (12.69 mm) C30 beton sınıfına (10.90 mm) kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, düşük dayanımlı betonlarda daha fazla deformasyonun meydana geldiğine işaret etmektedir. Ancak bu davranış her zaman istenen bir durum değildir, çünkü daha zayıf sınırlama etkisi nedeniyle daha dengesiz bir aderans-kayma tepkisine işaret edebilir. Buna karşılık, C30 numuneleri genellikle daha düşük deplasman değerlerinde hasar almış, ancak daha yüksek yükleri daha kararlı bir şekilde taşımıştır. Maksimum deplasman değerinde ise iki beton sınıfı arasında sınırlı bir fark bulunduğu ve beton dayanımının bu parametre üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır.

Beton dayanımının enerji tüketimi üzerindeki etkileri incelendiğinde, özellikle yüksek dayanımlı beton numunelerinin daha fazla enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Yüksek dayanımlı betonların enerji yutma kapasitesinin artmasının sebebi, arayüz bölgesinde oluşan mikro çatlakların gecikmeli ortaya çıkması ve ilerlemesinin daha kontrollü olmasıdır. C15-W100-L450-NA ve C30-W100-L450-NA numuneleri için enerji yutma kapasiteleri sırasıyla 131.91 kN.mm'den 180.61 kN.mm'ye yükselmiştir. Bireysel değerler ankraj düzeni gibi diğer değişkenlerden etkilenebilse de tüm C15 numuneleri genelinde ortalama enerji yutma kapasitesi 166.98 kN.mm, C30 numuneleri için ortalama enerji yutma kapasitesi 252.39 kN.mm olarak hesaplanmış olup yaklaşık %51 oranında artışa neden olmuştur.

Genel olarak, bu çalışma, betonun basınç dayanımının artırılmasının sadece aderans kapasitesini iyileştirmekle kalmayıp, aynı zamanda daha rijit ve daha fazla enerji yutan arayüzler oluşturduğunu doğrulamaktadır. Bu sonuçlar, beton dayanımının artırılmasının arayüz performansına olumlu katkılar sağladığını doğrulamıştır. Düşük dayanımlı betonların bağ performansının daha düşük olması, zayıf beton yüzeylerde yapılacak güçlendirme uygulamaları öncesinde beton yüzey iyileştirme yöntemlerinin ve ilave hazırlık süreçlerinin önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca, zayıf beton yüzeylerde TRM sistemlerinin uygulanmasının sınırlamaları göz önüne alınarak tasarımda daha geniş şerit kullanımı veya farklı ankrajlama yöntemleri gibi alternatif çözümlerin değerlendirilmesi gerektiğini işaret etmektedir.

5.7. TRM Şerit Genişliğinin Etkisi

Şekil 5.12’de verilen normalize performans değerleri, 50 mm ve 100 mm TRM şerit genişlikleri altında gerçekleştirilen tüm deney numunelerine ait sonuçların ortalama değerleri dikkate alınarak elde edilmiştir. Değerlendirme kapsamında diğer deney değişkenlerinden bağımsız olarak TRM şerit genişliğinin performans parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, 50 mm şerit genişliğine sahip numunelere ait ortalama performans değerleri referans kabul edilmiş ve normalize değerleri 1.00 olarak tanımlanmıştır. 100 mm şerit genişliğine sahip numunelerin ortalama performans değerleri ise 50 mm şerit genişliğine sahip serilerin ortalama değerlerine bölünerek boyutsuz hale getirilmiştir. Böylece TRM şerit genişliğindeki değişimin maksimum yük, maksimum yükteki deplasman, rijitlik, maksimum deplasman ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Normalize işlemi sonucunda elde edilen değerler grafik üzerinde boyutsuz olarak ifade edilmiş olup, referans niteliğindeki 50 mm TRM şerit genişliğine sahip numunelerin normalize değeri tüm performans parametreleri için 1.00 olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.12. Şerit Genişliğinin Etkisi

TRM şeridinin genişliği, tekstil–harç–beton arayüzündeki gerilme transferinin verimliliğini doğrudan etkileyen temel bir geometrik faktördür. Daha geniş şeritler, daha büyük bir etkin yapışma yüzeyi sağlayarak tekstil donatısının daha büyük bir kısmının yük transferine katılmasına olanak tanır ve gerilme dağılımını iyileştirir böylece aderans kaybı riskini azaltır.

Elde edilen bulgulara göre, 50 mm genişliğe sahip şeritlerde ortalama maksimum yük taşıma kapasitesi 10.01 kN iken, 100 mm şeritlerde bu değer 16.84 kN olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, şerit genişliğinin iki katına çıkarılması ile taşıma kapasitesinde yaklaşık %68 artış

sağlandığını göstermektedir. Deneysel sonuçlar, TRM şerit genişliğinin artırılmasıyla performansta tutarlı bir iyileşme olduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin, C15-W50-L150-NA numunesinde, maksimum yük 4.06 kN iken C15-W100-L150-NA numunesinde 6.53 kN'a yükselmiş ve yaklaşık %61'lik bir artış sağlamıştır. Benzer bir karşılaştırma C30 beton koşullarında ve 150 mm yapışma uzunluğunda yapıldığında, maksimum yük 5.28 kN'dan 7.30 kN'a çıkararak yaklaşık %38'lik bir iyileşme göstermiştir. Bu artışlar, daha büyük bir yapışma alanının TRM sisteminin yük aktarım kapasitesine önemli ölçüde katkı sağladığını doğrulamaktadır.

Rijitlik açısından da artan genişliğin faydası açıkça görülmektedir. Örneğin, C30 betonlu ve ankrajsız numunelerde 300 mm yapışma boyu için rijitlik, 50 mm genişlikte 0.92 kN/mm iken 100 mm genişlikte 1.42 kN/mm'ye yükselmiş ve %54'lük bir artış ortaya koymuştur. Ortalama olarak, şerit genişliğinin 50 mm'den 100 mm'ye çıkarılması rijitlikte yaklaşık %29'lük bir iyileşmeye neden olmuştur. Bu durum, artan temas alanına bağlı olarak daha rijit bir aderans tepkisine işaret etmektedir. Geniş TRM şeritleri, beton yüzeyle daha güçlü aderans sağlayarak yük aktarım mekanizmasını güçlendirmiştir.

Maksimum yükteki deplasman üzerindeki genişlik etkisi nispeten sınırlı olup, 50 mm genişliğinde 10.20 mm iken, 100 mm genişliğinde 12.88 mm'ye yükselmiştir. Ancak, sistemin sünekliğini ve göçme sürecini yansıtan maksimum deplasman değeri de 29.47 mm'den 33.91 mm'ye artmıştır. Bu durum, daha geniş TRM katmanlarının yalnızca dayanım ve rijitliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda tepe yük sonrası daha kararlı ve kademeli bir davranış sergilenmesine de olanak tanıyabileceğini göstermektedir. Özellikle çatlak yayılımının daha kontrollü gerçekleşmesi ve yükün daha geniş alana dağıtılması, sistemin daha kararlı davranmasına katkı sağlamıştır.

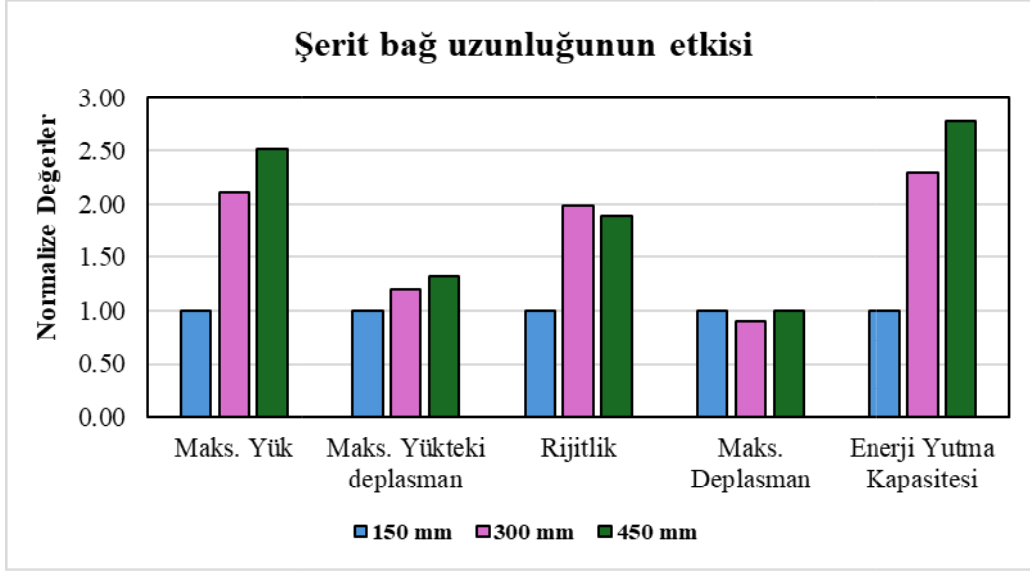
TRM şerit genişliğinin enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkisi, çalışmanın en dikkat çekici bulgularından biri olarak öne çıkmaktadır. C15-W50-L450-NA ve C15-W100-L450-NA numuneleri için enerji yutma kapasitelerinin sırasıyla 91.04 kN.mm'den 180.61 kN.mm'ye yükselmesi, şerit genişliğindeki artışın sistem davranışı üzerindeki belirgin etkisini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, tüm 50 mm genişliğindeki numuneler için ortalama enerji yutma kapasitesi 126.31 kN.mm iken, 100 mm genişliğindeki numunelerde bu değer 266.39 kN.mm'ye ulaştığı ve yaklaşık %110 oranında artış sağlandığı belirlenmiştir. Bu artış, daha geniş tekstil şeritlerinin daha büyük lif kesit alanı ve daha geniş aderans yüzeyi sağlayarak gerilme transferini iyileştirdiğini ve hasarın daha geniş bir bölgeye yayılmasına olanak tanıdığını göstermektedir. Bu durum, TRM genişliğindeki artışın sistemin tokluğunu ve hasar

toleransını önemli ölçüde artırdığını açıkça ortaya koymaktadır. Artan aderans alanı sayesinde sıyrılma davranışının gecikmesi ve yük aktarımının daha uzun süre devam etmesi, enerji yutma kapasitesindeki bu belirgin artışın nedeni olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, TRM şerit genişliğinin artırılması, sadece taşıma kapasitesini değil, aynı zamanda rijitlik ve enerji yutma kapasitesini de olumlu yönde etkilemekte; bu da geniş şeritlerin daha etkin bir aderans performansı sunduğunu göstermektedir. Bu durum, TRM güçlendirme uygulamalarında şerit genişliğinin bir tasarım değişkeni olarak dikkate alınmasının gerekliliğini pekiştirmektedir.

5.8. TRM Şerit Bağ Uzunluğunun Etkisi

Şekil 5.13'te verilen normalize performans değerleri, 150 mm, 300 mm ve 450 mm bağ uzunlukları altında gerçekleştirilen tüm deney numunelerine ait sonuçların ortalama değerleri dikkate alınarak elde edilmiştir. Değerlendirme kapsamında diğer deney değişkenlerinden bağımsız olarak bağ uzunluğunun performans parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, 150 mm bağ uzunluğuna sahip numunelere ait ortalama performans değerleri referans kabul edilmiş ve normalize değerleri 1.00 olarak tanımlanmıştır. 300 mm ve 450 mm bağ uzunluklarına sahip numunelerin ortalama performans değerleri ise 150 mm bağ uzunluğuna sahip serilerin ortalama değerlerine bölünerek boyutsuz hale getirilmiştir. Böylece bağ uzunluğundaki değişimin maksimum yük, maksimum yükteki deplasman, rijitlik, maksimum deplasman ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Normalize işlemi sonucunda elde edilen değerler grafik üzerinde boyutsuz olarak ifade edilmiş olup, referans niteliğindeki 150 mm bağ uzunluğuna sahip numunelerin normalize değeri tüm performans parametreleri için 1.00 olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.13. Şerit Bağ Uzunluğunun Etkisi

TRM şeridinin bağ uzunluğu, arayüzeydeki gerilme aktarım mekanizmalarını ve genel yük–deplasman davranışını etkileyen temel bir parametredir. Daha uzun bağ uzunlukları, gerilmenin daha geniş bir alana dağıtılmasını sağlayarak yerel gerilme yoğunluklarını azaltır ve yük taşıma kapasitesini artırır. Bununla birlikte, belirli bir uzunluktan sonra ilave bağ alanı, dayanım veya enerji yutma kapasitesinde ek bir artışa katkıda bulunmayabilir; bu durum etkin bağ uzunluğu (effective bond length) olarak adlandırılır (Tran vd., 2014).

Sonuçlara göre, bağ uzunluğu arttıkça taşıma kapasitesinde belirgin bir artış meydana gelmiştir. 150 mm bağ uzunluğuna sahip numunelerde ortalama maksimum yük 6.62 kN iken, bu değer 300 mm uzunluğunda 13.99 kN'a çıkmış olup bu %111'lik bir artışa karşılık gelmiştir. Bağ uzunluğunun 450 mm'ye kadar uzatılması ise daha ılımlı bir artışla 16.65 kN değerine ulaşmış ve en kısa uzunluğa göre %151'lik bir artışı yansıtmıştır. Bu durum, TRM şeritlerinin yük taşıma kapasitesinin artan bağ uzunluğuyla doğrusal olmayan ancak belirgin bir şekilde yükseldiğini göstermekte ve özellikle 300 mm bağ uzunluğundan sonra yük artışının daha sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. 300 mm'nin üzerindeki bu görece daha küçük artış, yapışma dayanımının önemli bir kısmının ilk 300 mm içinde geliştiğini göstermektedir ki bu durum, etkin bağ uzunluğunun bu sistemde 300 ile 450 mm arasında olduğunu göstermektedir.

Rijitlik açısından, en düşük değer 150 mm bağ uzunluğuna sahip numunelerde 0.72 kN/mm olarak gözlemlenirken, 300 mm ve 450 mm uzunluklarında bu değer sırasıyla 1.43 ve 1.37 kN/mm olarak ölçülmüştür. Bu durum, elastik yük transfer kapasitesinin büyük ölçüde 300 mm içinde harekete geçtiğini doğrulamakta ve dayanım sonuçlarında gözlemlenen etkin bağ uzunluğu sınırını pekiştirmektedir.

Maksimum yükteki deplasman açısından değerlendirildiğinde, 150 mm bağ uzunluğunda, 9.63 mm iken 300 mm ve 450 mm bağ uzunluklarında sırasıyla 11.55 mm ve 12.76 mm'ye kademeli olarak artmıştır. Bu durum, daha uzun yapışma alanlarının kademeli bir yük gelişimine izin verdiğini göstermektedir. Maksimum deplasman, 150 mm bağ uzunluğundan 450 mm bağ uzunluğuna geçişte 33.49 mm'den 33.51 mm'ye hafifçe artmıştır. Bu değerler bağ uzunluğunun deformasyon kapasitesi üzerinde olumlu ancak sınırlı bir etkisinin bulunduğunu göstermektedir.

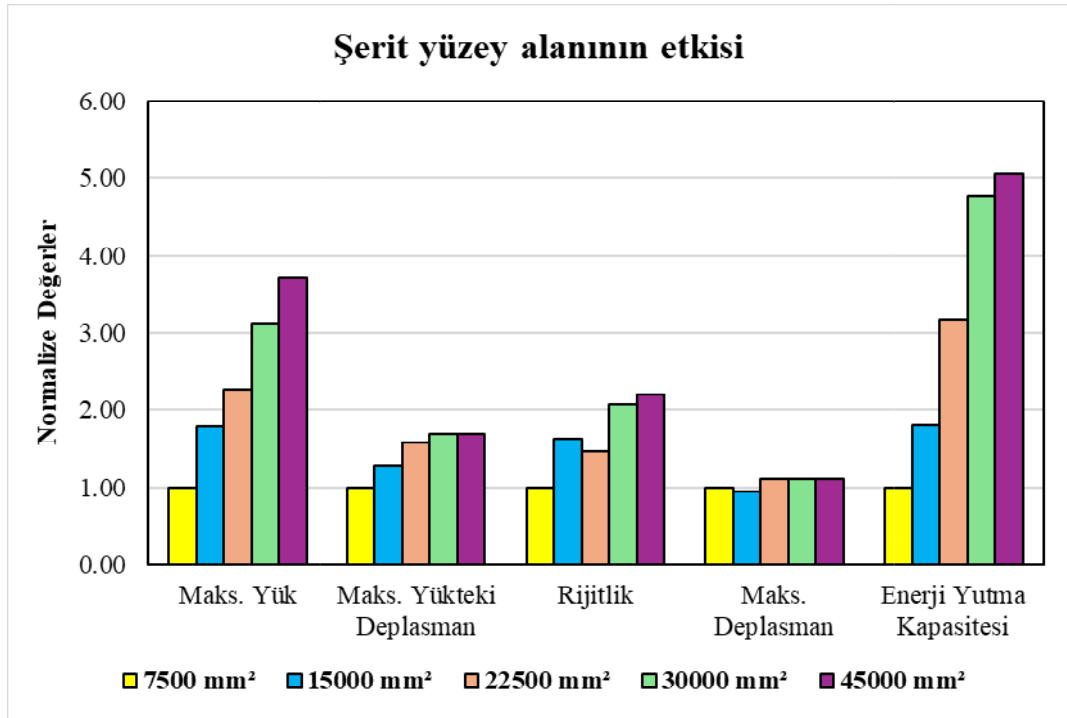
Enerji yutma kapasitesi 150 mm bağ uzunluğunda ortalama 90.59 kN.mm iken, bu değer 300 mm uzunluğunda 207.77 kN.mm, 450 mm uzunluğunda 251.31 kN.mm'ye kadar çıkmıştır. Bu durum, 300 mm'den sonraki yapışma uzunluğunun enerji performansını orantılı olarak artırmadığını ve etkin bağuzunluğununla uyumlu olduğunu göstermektedir.

Bu bulgular, yeterli bağ uzunluğu sağlanmasının TRM sistemlerinde etkin bir gerilme aktarımı açısından zorunlu olduğunu ve hem yük taşıma kapasitesini hem de enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ancak bu çalışmada yaklaşık 300 mm'lik bir yapışma uzunluğunun hem şerit genişlikleri hem de beton sınıfları için neredeyse maksimum kapasiteyi geliştirmek için yeterli olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, TRM yapışma uzunluğunun artırılması, belirli bir noktaya kadar aderans dayanımını ve enerji yutma kapasitesini iyileştirirken, etkin uzunluğun (~300 mm bu çalışmada) ötesine geçmek yapısal olarak verimli olmayabilir. Bu durum, TRM tasarımının hem performans hem de malzeme kullanımı açısından optimize edilmesi için önemli çıkarımlar sağlamaktadır.

5.9. TRM Şerit Bağ Yüzey Alanının Etkisi

Şekil 5.14'te verilen normalize performans değerleri, farklı TRM şerit genişliği ve bağ uzunluğu kombinasyonları altında gerçekleştirilen tüm deney numunelerine ait sonuçların ortalama değerleri dikkate alınarak elde edilmiştir. Değerlendirme kapsamında diğer deney değişkenlerinden bağımsız olarak TRM şeritlerinin toplam yapışma yüzey alanının performans parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, tekstil şeritlerin genişlik ve uzunluk parametreleri birlikte değerlendirilmiş ve beton yüzey ile temas eden toplam alan bileşik bir değişken olarak ele alınmıştır. Çalışma kapsamında 50 mm × 150 mm, 50 mm × 300 mm, 100 mm × 150 mm, 50 mm × 450 mm, 100 mm × 300 mm ve 100 mm × 450 mm boyutlarında TRM şeritler kullanılmış olup, bunlara karşılık gelen yapışma yüzey alanları sırasıyla 7500 mm², 15000 mm², 15000 mm², 22500 mm², 30000 mm² ve 45000 mm² olarak bulunmuştur. Normalize işlemi kapsamında 7500 mm² yapışma yüzey alanına sahip numunelere ait ortalama performans değerleri referans kabul edilmiş ve normalize değerleri

1.00 olarak tanımlanmıştır. Diğer yapışma yüzey alanlarına sahip numunelerin ortalama performans değerleri ise referans serinin ortalama değerlerine bölünerek boyutsuz hale getirilmiştir. Böylece yapışma yüzey alanındaki değişimin maksimum yük, maksimum yükteki deplasman, rijitlik, maksimum deplasman ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Normalize işlemi sonucunda elde edilen değerler grafik üzerinde boyutsuz olarak ifade edilmiş olup, referans niteliğindeki 7500 mm² yapışma yüzey alanına sahip numunelerin normalize değeri tüm performans parametreleri için 1.00 olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.14. Şerit Yüzey Alanının Etkisi

Sonuçlara göre yapışma yüzey alanı arttıkça taşıma kapasitesinde belirgin bir artış meydana gelmiştir. 7500 mm² yapışma yüzey alanına sahip numunelerde ortalama maksimum yük 5.29 kN iken, bu değer 15000 mm² için 9.42 kN, 22500 mm² için 12.00 kN, 30000 mm² için 16.50 kN ve 45000 mm² için 19.61 kN'dur. TRM şeridin en büyük yüzey alanına çıkarılması taşıma kapasitesinde %271'lik bir artış sağlamıştır. Bu durum, TRM şeritlerinin yapışma yüzey alanının artırılmasıyla önemli bir biçimde yük taşıma kapasitesinde artış meydana geldiğini göstermektedir.

Yüzey alanının artmasıyla rijitlik açısından da önemli bir artış kaydedilmiştir. 7500 mm² yapışma yüzey alanına sahip numunelerde ortalama rijitlik 0.72 kN/mm iken, bu değer 15000 mm² için 1.17 kN/mm, 22500 mm² için 1.04 kN/mm, 30000 mm² için 1.48

kN/mm ve 45000 mm² için 1.57 kN/mm'dir. TRM şeridin en büyük yüzey alanına çıkarılması rijitlik açısından %118'lik bir artış sağlamıştır.

TRM yapışma yüzey alanının artırılmasıyla maksimum yükteki deplasmanda doğrusal bir artış meydana gelmiştir. 7500 mm² yapışma yüzey alanına sahip numunelerde ortalama maksimum yükteki deplasman 7.76 mm iken, bu değer 15000 mm² için 9.88 mm, 22500 mm² için 12.26 mm, 30000 mm² için 13.05 mm ve 45000 mm² için 13.08 mm'dir. TRM şeridin en büyük yüzey alanına çıkarılması maksimum yükteki deplasman açısından yaklaşık %69'luk bir artış sağlamıştır.

Maksimum deplasman üzerindeki yüzey alanı etkisi nispeten sınırlı kalmıştır. TRM şeridin en büyük yüzey alanına çıkarılması maksimum deplasman açısından yaklaşık %10'luk bir artış sağlamıştır.

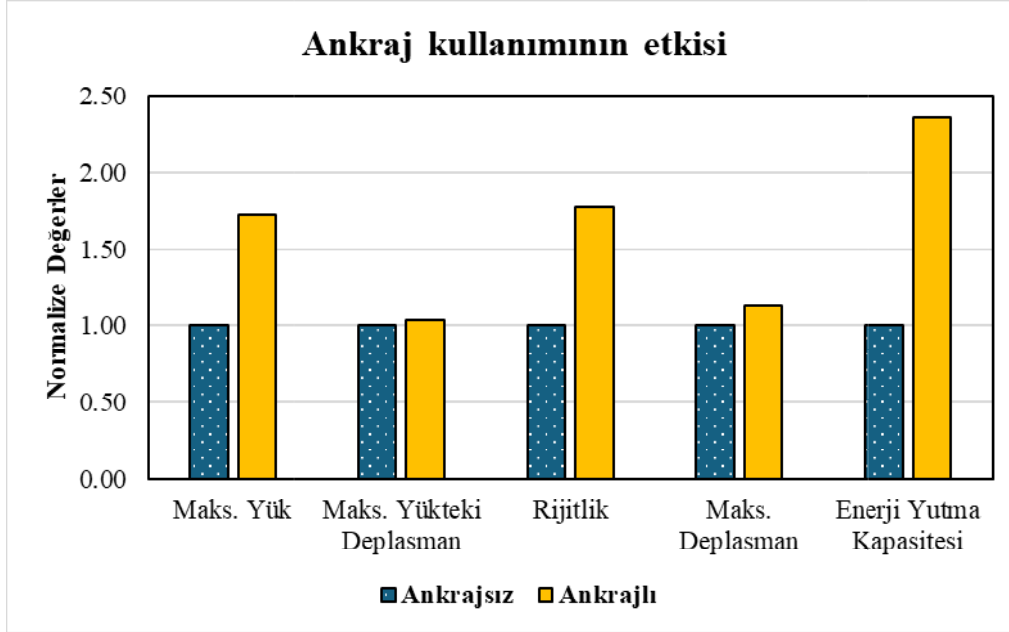
TRM yüzey alanının artırılmasıyla en dikkat çekici artış enerji yutma kapasitesinde meydana gelmiştir. 7500 mm² yapışma yüzey alanına sahip numunelerde ortalama enerji yutma kapasitesi değeri 58.17 kN.mm iken, bu değer 15000 mm² için 105.41 kN.mm, 22500 mm² için 183.94 kN.mm, 30000 mm² için 277.70 kN.mm ve 45000 mm² için 294.18 kN.mm'dir. TRM şeridin en büyük yüzey alanına çıkarılması enerji yutma kapasitesinde %405'lik gibi önemli bir artış sağlamıştır. Bu durum, geniş yapışma alanının yük transferini daha uzun süre sürdürebildiğini, çatlak yayılımını daha kontrollü hale getirdiğini ve sıyrılmaya davranışını geciktirdiğini göstermektedir. Böylece sistem daha fazla deformasyon yaparak daha yüksek enerji tüketebilmiştir.

Grafik genel olarak incelendiğinde, yapışma yüzey alanının artmasıyla birlikte maksimum yük, rijitlik ve özellikle enerji yutma kapasitesi değerlerinde belirgin artışlar meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, beton yüzeyi ile TRM sistemi arasındaki temas alanının büyümesinin aderans performansını iyileştirdiğini ve yük aktarım mekanizmasını güçlendirdiğini göstermektedir.

5.10. Ankraj Kullanımının Etkisi

Şekil 5.15'te verilen normalize performans değerleri, ankrajlı ve ankrajsız tüm deney numunelerine ait sonuçların ortalama değerleri dikkate alınarak elde edilmiştir. Değerlendirme kapsamında diğer deney değişkenlerinden bağımsız olarak ankraj kullanımının performans parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, ankrajsız numunelere ait ortalama performans değerleri referans kabul edilmiş ve normalize değerleri 1.00 olarak tanımlanmıştır. Ankrajlı numunelerin ortalama performans değerleri ise ankrajsız serilerin ortalama değerlerine bölünerek boyutsuz hale getirilmiştir. Böylece ankraj kullanımının

maksimum yük, maksimum yükteki deplasman, rijitlik, maksimum deplasman ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Normalize işlemi sonucunda elde edilen değerler grafik üzerinde boyutsuz olarak ifade edilmiş olup, referans niteliğindeki ankrajsız numunelerin normalize değeri tüm performans parametreleri için 1.00 olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.15. Ankraj Kullanımının Etkisi

TRM ile güçlendirilmiş numunelerde mekanik ankrajın varlığı, yük–deplasman davranışını önemli ölçüde etkilemiştir. Bağ uzunluğu ve şerit genişliği, TRM–beton arayüzündeki potansiyel etkileşim alanını tanımlarken, ankraj uygulaması bu etkileşimin etkinliğini artırarak gerilme aktarımını iyileştirmekte ve erken yüzeyden ayrılmayı geciktirmektedir. Bu çalışmada, çeşitli konfigürasyonlarda CFRP fan tipi ankrajlar kullanılmıştır; ancak bu bölüm, ankraj düzenlerine ilişkin ayrıntılı değerlendirmeyi bir sonraki bölüme bırakarak, ankraj kullanımının ankrajsız numunelerle karşılaştırıldığında genel etkisine odaklanmaktadır.

Elde edilen bulgular, ankraj kullanımının TRM sisteminin taşıma kapasitesini anlamlı düzeyde artırdığını göstermektedir. Örneğin C15-W50-L300-NA numunesinde maksimum yük 7.23 kN iken, 1/1 ankraj uygulanan C15-W50-L300-1/1-E numunesinde maksimum yük 9.15 kN'a yükselmiş ve bu durum yaklaşık %26 'lık bir artış sağlamıştır. Ortalama maksimum yük, ankrajsız numunelerde 8.70 kN iken, ankrajlı numunelerde 15.02 kN'a yükselmiştir. Bu da yaklaşık %73'lük bir artış ifade etmektedir. Bu durum, ankrajın erken arayüzey hasarını

önlemede ve yapıştırılmış uzunluk boyunca gerilmelerin daha iyi dağılmasını sağlamada ne kadar etkili olduğunu doğrulamaktadır.

Ankrajların eklenmesiyle rijitlikte de önemli bir artış meydana gelmiş; ankrajsız numunelerde ortalama rijitlik değeri 0.79 kN/mm'den, ankrajlı numunelerde 1.39 kN/mm'ye yükselerek %76'lık bir artış göstermiştir. Bu artan rijitlik, ankrajların erken deformasyonlara karşı direnç sağlaması ve arayüzün stabilitesini sağlama konusundaki katkısını yansıtmaktadır.

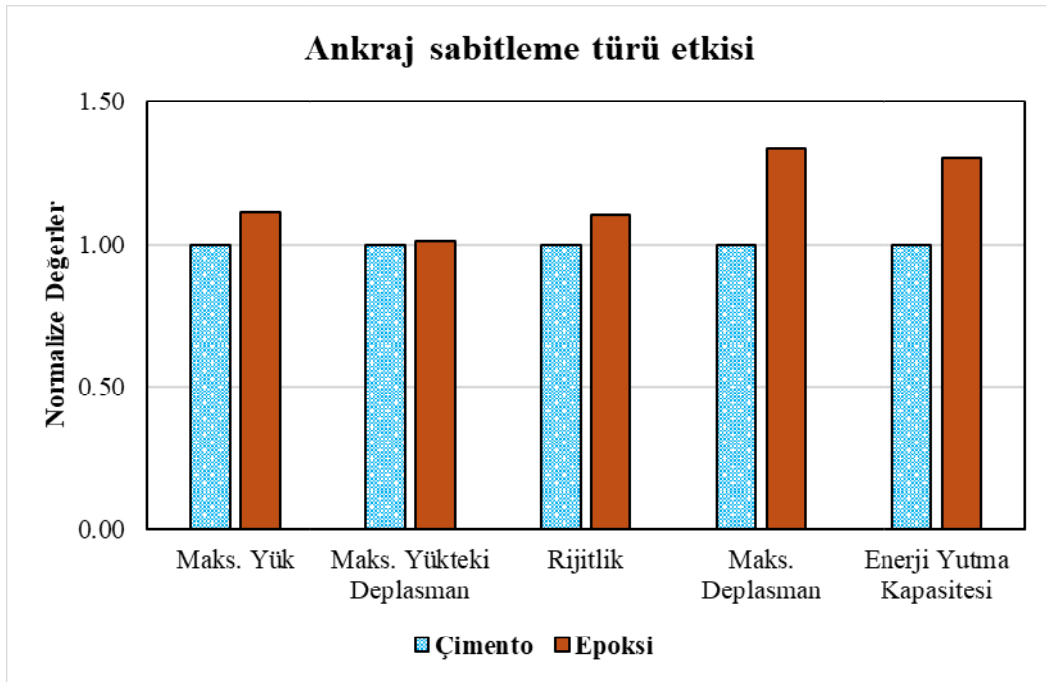
Maksimum yük altındaki deplasman açısından artış nispeten sınırlı kalmış; değer 11.38 mm'den 11.83 mm'ye yükselmiş ve bu durum, deplasman bakımından ankrajın tepe noktası oluşumunu belirgin ölçüde geciktirmediğini göstermiştir. Bununla birlikte, ankrajların varlığı numunenin benzer deformasyon seviyelerinde daha yüksek yükler taşımaya olanak sağladığını göstermiştir. Ortalama maksimum deplasman değeri ankrajsız numunelerde 28.94 mm iken ankrajlı numunelerde 32.72 mm olarak bulunmuştur.

Enerji yutma kapasitesi, ankraj uygulamasının etkisini en belirgin şekilde yansıtan parametrelerden biri olmuştur. Örneğin, C30-W100-L300-NA numunesinde ankrajsız durumda 171 kN.mm olarak belirlenen enerji yutma kapasitesi, 1/1 ankraj uygulanan C30-W100-L300-1/1-E numunesinde 504 kN.mm'ye yükselerek yaklaşık üç kat artış göstermiştir. Benzer şekilde, tüm ankrajsız numuneler için ortalama enerji yutma kapasitesi 97.28 kN.mm iken, ankrajlı numunelerde bu değer 229.81 kN.mm'ye ulaşmış ve yaklaşık %136 oranında artış sağlanmıştır. Bu durum, ankraj uygulamasının aderans kaybını geciktirerek yük aktarım sürecini uzattığını ve hasarın daha kademeli gelişmesine olanak tanıdığını göstermektedir. Sonuç olarak, ankrajın sistemin tokluğunu ve hasar toleransını önemli ölçüde artırdığı, ayrıca daha kontrollü bir deformasyon davranışı sağlayarak sünekliğe olumlu katkıda bulunduğu değerlendirilmektedir.

Bu bulgular, TRM performansının artırılmasında ankrajın kritik rolünü açıkça ortaya koymaktadır. Bağ uzunluğu ve şerit genişliği esas olarak arayüzün içsel dayanımını etkilerken, ankraj daha yüksek yükleme durumlarında sistemi destekleyen ve tepe sonrası davranışın daha kararlı gerçekleşmesini sağlayan dışsal bir güçlendirme mekanizması olarak görev yapmaktadır. Bununla birlikte, sağlanan iyileşmenin derecesi ankraj sabitleme tipi ve ankrajların konfigürasyonuna bağlı olarak değişmektedir.

5.11. Ankraj Sabitleme Türünün Etkisi

Şekil 5.16’da verilen normalize performans değerleri, epoksi esaslı yapıştırıcı ve çimento esaslı harç ile sabitlenen ankrajlı tüm deney numunelerine ait sonuçların ortalama değerleri dikkate alınarak elde edilmiştir. Değerlendirme kapsamında diğer deney değişkenlerinden bağımsız olarak ankraj sabitleme türünün performans parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, çimento esaslı harç ile sabitlenen ankrajlı numunelere ait ortalama performans değerleri referans kabul edilmiş ve normalize değerleri 1.00 olarak tanımlanmıştır. Epoksi esaslı yapıştırıcı ile sabitlenen ankrajlı numunelerin ortalama performans değerleri ise çimento esaslı harç ile sabitlenen serilerin ortalama değerlerine bölünerek boyutsuz hale getirilmiştir. Böylece ankraj sabitleme türündeki değişimin maksimum yük, maksimum yükteki deplasman, rijitlik, maksimum deplasman ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Normalize işlemi sonucunda elde edilen değerler grafik üzerinde boyutsuz olarak ifade edilmiş olup, referans niteliğindeki çimento esaslı harç ile sabitlenen ankrajlı numunelerin normalize değeri tüm performans parametreleri için 1.00 olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.16. Ankraj Sabitleme Türü Etkisi

Elde edilen bulgulara göre, çimento esaslı ankrajlarla güçlendirilen numunelerde ortalama maksimum yük 14.19 kN iken, epoksi esaslı ankraj kullanılan numunelerde bu değer 15.76 kN olarak hesaplanmıştır. Yani epoksi sistemler, taşıma kapasitesinde yaklaşık %11 oranında daha yüksek performans sergilemiştir. Rijitlik açısından da benzer bir üstünlük

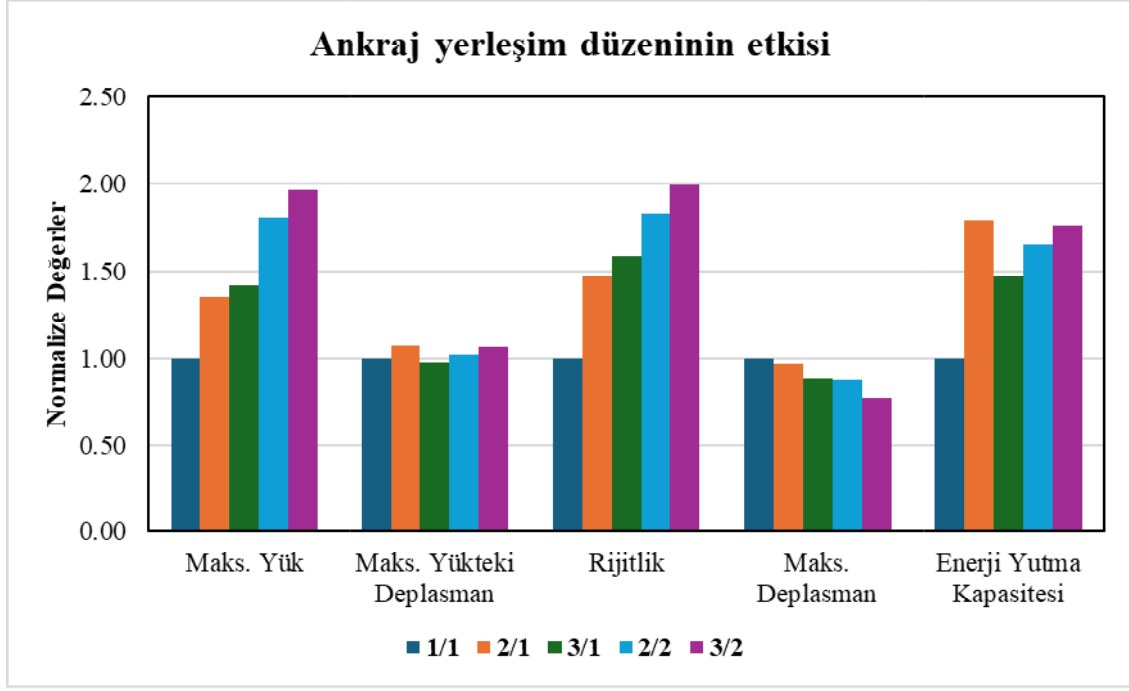
gözlemlenmiş; çimento esaslı ankrajlarda ortalama rijitlik 1.32 kN/mm, epoksi esaslı sistemlerde ise 1.45 kN/mm'dir. Bu sonuçlar, epoksi esaslı yapıştırıcının ankraj ile beton yüzeyi arasında daha güçlü ve rijit bir bağ oluşturduğunu ve yük transferinin daha etkin gerçekleşmesini sağladığını göstermektedir.

En dikkat çekici fark ise maksimum deplasman ve enerji yutma kapasitesinde ortaya çıkmıştır. Çimento esaslı ankrajlı sistemlerde maksimum deplasman ortalama 27.95 mm iken, epoksi esaslı ankrajlı sistemlerde ortalama 37.33 mm'dir. Çimento esaslı ankrajlı sistemlerde ortalama enerji yutma kapasitesi 198.72 kN.mm iken, epoksi esaslı ankrajlı sistemlere bu değer 258.12 kN.mm'ye çıkmıştır. Epoksi esaslı ankrajlı sistemler; çimento esaslı ankrajlı sistemlere kıyasla yaklaşık %30 daha fazla süneklik ve enerji yutma kapasitesi sunmuştur. Bununla birlikte, çimento esaslı sistemlerin de maliyet ve uygulama kolaylığı açısından bazı avantajlar sunduğu unutulmamalıdır.

Sonuç olarak, epoksi esaslı ankraj sistemleri daha yüksek taşıma kapasitesi ve enerji sönümlenme kabiliyeti ile öne çıkarken; çimento esaslı harç sistemler de etkin performans göstermekle birlikte özellikle ekonomik ve yapıya uyumlu çözümler için alternatif olarak değerlendirilebilir.

5.12. Ankraj Yerleşim Düzeninin Etkisi

Genel olarak ankrajın varlığından kaynaklanan faydaların ötesinde, ankrajların yerleşim düzeni, TRM sistemlerinin yük-deplasman davranışını düzenlemede kritik bir rol oynamıştır. Şekil 5.17'de verilen normalize performans değerleri, 1/1, 2/1, 3/1, 2/2 ve 3/2 ankraj yerleşim düzenleri altında gerçekleştirilen tüm deney numunelerine ait sonuçların ortalama değerleri dikkate alınarak elde edilmiştir. Değerlendirme kapsamında diğer deney değişkenlerinden bağımsız olarak ankraj sayısı ve yerleşim düzeninin performans parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, 1/1 ankraj yerleşim düzenine sahip numunelere ait ortalama performans değerleri referans kabul edilmiş ve normalize değerleri 1.00 olarak tanımlanmıştır. 2/1, 3/1, 2/2 ve 3/2 ankraj yerleşim düzenlerine sahip numunelerin ortalama performans değerleri ise 1/1 ankraj yerleşim düzenine sahip serilerin ortalama değerlerine bölünerek boyutsuz hale getirilmiştir. Böylece ankraj sayısı ve yerleşim düzenindeki değişimin maksimum yük, maksimum yükteki deplasman, rijitlik, maksimum deplasman ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Normalize işlemi sonucunda elde edilen değerler grafik üzerinde boyutsuz olarak ifade edilmiş olup, referans niteliğindeki 1/1 ankraj yerleşim düzenine sahip numunelerin normalize değeri tüm performans parametreleri için 1.00 olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.17. Ankraj Yerleşim Düzeninin Etkisi

Ankraj yoğunluğunun artması ile yük taşıma kapasitesinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre ortalama maksimum yük taşıma kapasitesi; 1/1 ankraj yerleşiminde 10.95 kN, 2/1 ankraj yerleşiminde 14.83 kN, 3/1 ankraj yerleşiminde 15.52 kN, 2/2 ankraj yerleşiminde 19.78 kN ve 3/2 ankraj yerleşiminde 21.46 kN'dur. Ankraj yerleşiminin 1/1 düzeninden, 3/2 düzenine geçmesiyle yük taşıma kapasitesinde %96'lık bir artış yaşanmıştır. Bu durum, ankraj yoğunluğunun artırılmasıyla önemli bir biçimde yük taşıma kapasitesinde artış meydana geldiğini göstermektedir. Özellikle 2/2 ve 3/2 yerleşim düzenlerinde normalize maksimum yük değerlerinde önemli artış yaşanmıştır. Bu durum, ankrajların yüzeye daha dengeli dağıtılması sayesinde gerilmenin daha homojen yayıldığını ve TRM sisteminin beton yüzeyden ayrılmasının geciktiğini göstermektedir.

Ankraj yerleşiminin etkisi rijitlik değerlerinde de belirgin şekilde görülmüştür. Elde edilen bulgulara göre ortalama rijitlik değeri; 1/1 ankraj yerleşiminde 0.96 kN/mm, 2/1 ankraj yerleşiminde 1.42 kN/mm, 3/1 ankraj yerleşiminde 1.59 kN/mm, 2/2 ankraj yerleşiminde 1.83 kN/mm ve 3/2 ankraj yerleşiminde 1.99 kN/mm'dir. Böylece en basit ankrajlı konfigürasyona kıyasla %99 oranında dikkat çekici bir artış elde edilmiştir. Bu durum çoklu ankraj kullanımının sistemin başlangıç rijitliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ankrajların daha düzenli dağılımı sayesinde yük transfer mekanizmasının daha kararlı hale geldiği değerlendirilmektedir.

Enerji yutma kapasitesi değerleri incelendiğinde ortalama değerler; 1/1 ankraj yerleşiminde 158.66 kN.mm, 2/1 ankraj yerleşiminde 284.89 kN.mm, 3/1 ankraj yerleşiminde 233.50 kN.mm, 2/2 ankraj yerleşiminde 262.86 kN.mm ve 3/2 ankraj yerleşiminde 280.19 kN.mm olarak ölçülmüştür. İlginç bir şekilde, 2/1 yerleşimi en yüksek enerji kapasitesine ulaşırken, 2/2 ve 3/2 ankraj yerleşimine sahip numuneler belirgin biçimde daha düşük enerji değerleri sergilemiştir. Bu durum muhtemelen, her iki ucun aşırı kısıtlanmasından kaynaklanan gerilme yığılmaları nedeniyle ankraj bölgelerinde daha erken aderans kaybı veya gevrek kırılma oluşmasından kaynaklanmaktadır. 3/1 ankraj yerleşim düzenine sahip numunelerde ise üç ankraj bulunmasına rağmen daha yüksek enerji sönümlenme sağlamamıştır; bu da belirli bir noktadan sonra tek sıra ankraj sayısının artırılmasının orantılı bir kazanç sağlamadığını ve düzensiz gerilme dağılımına yol açabileceğini göstermektedir.

Maksimum yük altındaki deplasman açısından artış nispeten sınırlı kalmış; ankraj yerleşiminin 1/1 düzeninden, 3/2 düzenine geçmesiyle yük taşıma kapasitesinde %6'lık bir artış yaşanmıştır. Bu durum, deplasman bakımından ankraj yoğunluğunun artırılmasının tepe noktası oluşumunu belirgin ölçüde geciktirmediğini göstermiştir.

Maksimum deplasman incelendiğinde, ankraj yoğunluğunun artırılmasıyla beraber ortalama maksimum deplasman değerinin düştüğü gözlenmiştir. Bu durum muhtemelen, TRM uç bölgelerinde kısıtlamadan kaynaklanan gerilme yığılmaları nedeniyle ankraj bölgelerinde daha erken aderans kaybı veya sistemin daha rijit davranması nedeniyle nihai deformasyon kapasitesinin bir miktar azalmasından kaynaklanmaktadır.

Bu sonuçlar, ankraj yerleşiminin optimize edilmesinin önemini vurgulamakta olup hem ankraj sayısının hem de dağılımının dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Genel olarak, tek bir sırada ankraj sayısının artırılması kapasite ve rijitliği belirli bir noktaya kadar iyileştirmektedir; ancak uygun ankraj aralığı ve gömülme derinliğiyle desteklenmediği sürece, simetrik konfigürasyonlar erken hasar türlerinin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, tasarım uygulamalarında yalnızca ankraj kullanımı değil, ankrajların yerleşim düzeni de beklenen yükleme durumu ve malzeme uyumluluğuna göre özelleştirilmelidir.

Genel olarak, veriler ankraj yerleşim düzeninin TRM sisteminin verimliliğinde belirleyici bir rol oynadığını; daha yoğun ve daha düzgün dağıtılmış ankrajların daha iyi yapısal performansa yol açtığını doğrulamaktadır.

5.13. Deneysel Parametrelerin Görelî Etkisi

TRM ile güçlendirilmiş 84 adet numuneden elde edilen deneysel bulgular, beton dayanımı, TRM şerit genişliği, TRM bağ uzunluğu, ankraj kullanımı ve ankraj yerleşimi gibi her bir değişkenin yük–deplasman davranışına farklı şekillerde katkıda bulunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak bu etkilerin düzeyleri eşit değildir; yapılan karşılaştırmalı değerlendirme, yapı güçlendirme uygulamalarında etkili TRM tasarımı için parametrelerin öncelik sırasının belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

Deneysel parametrelerin görelî etkisini değerlendirmek amacıyla parametreler ve artış oranları için tablo oluşturulmuştur. Tablo 5.1’de verilen yüzdesel performans değişimleri, deneysel program kapsamında incelenen tüm numunelere ait ortalama performans değerleri dikkate alınarak elde edilmiştir. Değerlendirme kapsamında beton sınıfı, TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu, ankraj kullanımı, ankraj sabitleme türü ve ankraj yerleşim düzeni gibi deneysel parametrelerin maksimum yük, maksimum yükteki deplasman, rijitlik, maksimum deplasman ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki görelî etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, her bir deneysel parametre için belirlenen referans serilere ait ortalama performans değerleri esas alınmış ve normalize değerleri 1.00 olarak kabul edilmiştir. Diğer deney gruplarına ait ortalama performans değerleri ise ilgili referans serinin ortalama değerlerine bölünerek boyutsuz hale getirilmiştir. Elde edilen normalize değerler daha sonra yüzdesel değişimlere dönüştürülerek değerlendirilmiştir.

Beton sınıfı etkisinin belirlenmesinde C15 beton sınıfı referans alınmış ve C30 beton sınıfına ait ortalama değerler C15 serisinin ortalama değerlerine bölünmüştür. TRM şerit genişliği etkisinin değerlendirilmesinde 50 mm şerit genişliğine sahip numuneler referans kabul edilmiş, 100 mm şerit genişliğine sahip numunelerin ortalama performans değerleri bu seriye göre normalize edilmiştir. Bağ uzunluğu etkisinin belirlenmesinde ise 150 mm bağ uzunluğuna sahip numuneler referans alınmış, 300 mm ve 450 mm bağ uzunluğuna sahip numunelerin ortalama değerleri referans seriye bölünerek değerlendirilmiştir. Tabloda karşılaştırma için 450 mm bağ uzunluğu esas alınmıştır. Ankraj kullanımının etkisinin incelenmesinde ankrajsız numuneler referans kabul edilmiş, ankrajlı numunelerin ortalama performans değerleri ankrajsız serilere göre normalize edilmiştir. Ankraj sabitleme türünün etkisinin değerlendirilmesinde çimento esaslı harç ile sabitlenen ankrajlı numuneler referans alınmış, epoksi esaslı yapıştırıcı ile sabitlenen ankrajlı numunelerin ortalama performans değerleri bu serilere bölünmüştür. Ankraj yerleşim düzeninin etkisinin belirlenmesinde ise 1/1 ankraj yerleşim düzenine sahip numuneler referans kabul edilmiş, diğer ankraj düzenlerine ait

ortalama performans değerleri bu seriye göre normalize edilmiştir. Tabloda karşılaştırma için 3/2 ankraj yerleşim düzeni esas alınmıştır. Böylece deneysel parametrelerde meydana gelen değişimlerin mekanik performans üzerindeki göreli etkileri boyutsuz ve karşılaştırılabilir veriler üzerinden değerlendirilmiştir. Tablo 5.1'de verilen yüzdesel değişimler, referans serilere göre meydana gelen artış veya azalış oranlarını ifade etmektedir.

Tablo 5.1. Deneysel Parametrelerin Greli Etkisi

Parametre	Maks. Yük	Maks. Yükteki Deplasman	Rijitlik	Maks. Deplasman	Enerji Yutma Kapasitesi
Beton sınıfı (C30/C15)	%36 artış	%16 azalma	%52 artış	%5 artış	%51 artış
TRM şerit genişliği (100 mm/50 mm)	%68 artış	%26 artış	%29 artış	%15 artış	%109 artış
Bağ uzunluğu (450 mm/150 mm)	%152 artış	%33 artış	%90 artış	%0 değişim	%177 artış
Ankraj kullanımı (Ankrajlı/Ankrajlısız)	%73 artış	%4 artış	%76 artış	%13 artış	%136 artış
Ankraj sabitleme türü (Epoksi/imento)	%11 artış	%1 artış	%10 artış	%34 artış	%30 artış
Ankraj yerleşim düzeni (3/2 – 1/1)	%96 artış	%6 artış	%100 artış	%23 azalma	%77 artış

Tablo genel olarak değerlendirildiğinde, deneysel parametrelerin TRM ile güçlendirilmiş beton numunelerin mekanik davranışı üzerinde farklı seviyelerde etkili olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, özellikle TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu ve ankraj kullanımının maksimum yük taşıma kapasitesi ile enerji yutma kapasitesi üzerinde belirgin iyileşmeler sağladığını göstermektedir.

İncelenen deneysel parametreler arasında, ankraj kullanımıtm performans indekslerinde önemli bir artış sağlayarak aderans performansını etkileyen en önemli parametre olarak ortaya çıkmıştır. Özellikle, CFRP fan ankrajlarının sayısı ve yerleşimi tüm performans göstergeleri üzerinde belirgin bir etki göstermiştir. Örneğin, ankrajlısız numuneler ile ankrajlı numuneler karşılaştırıldığında; C30-W100-L300-NA numunesinde enerji yutma kapasitesi ankrajlısız durumda 171 kN.mm iken, 1/1 ankraj uygulanan C30-W100-L300-1/1-Enumunesinde enerji yutma kapasitesi 504 kN.mm'ye yükselmiş ve neredeyse üç katına çıkmıştır. Ankraj kullanımının etkisi genel olarak değerlendirildiğinde, ankrajlı numunelerde maksimum yük kapasitesinde %73, rijitlikte %76 ve enerji yutma kapasitesinde %136

oranında önemli ölçüde artış meydana geldiği belirlenmiş olup, bu durum ankrajın arayüzeydeki gerilme aktarım mekanizmasını kontrol etmedeki kritik rolünü vurgulamaktadır.

Ankraj sabitleme türü açısından değerlendirildiğinde, epoksi esaslı yapıştırıcı ile sabitlenen ankrajların çimento esaslı harç ile sabitlenen ankrajlara göre daha yüksek performans gösterdiği görülmüştür. Özellikle maksimum deplasman ve enerji yutma kapasitesinde sırasıyla %34 ve %30 oranında artış meydana gelmiştir. Bu durum, epoksi esaslı bağlantının daha güçlü aderans sağlaması ile ilişkilendirilebilir.

Ankraj yerleşim düzeni incelendiğinde ise ankraj sayısının ve yüzey üzerindeki dağılımının artırılmasıyla maksimum yük ve rijitlik değerlerinde sırasıyla %96 ve %100 seviyelerine ulaşan artışlar elde edilmiştir. Buna karşılık maksimum deplasman değerinde %23 oranında azalma meydana gelmiştir. Bu durum, çoklu ankraj kullanımının sistemi daha rijit hale getirmesi ve nihai deformasyon kapasitesini sınırlandırmasıyla açıklanabilir. Ancak ankrajların yük aktarımını iyileştirmesi ve daha yüksek yük seviyelerinde kararlı davranış sağlaması nedeniyle enerji yutma kapasitesinde %77 oranında artış meydana gelmiştir.

Beton sınıfı etkisi incelendiğinde C15 betonundan C30 betonuna geçildiğinde, ortalama değerlere göre maksimum yükte %36, rijitlikte %52 ve enerji yutma kapasitesinde %51'lik bir artış gözlenmiştir. Daha yüksek beton dayanımı, aderans arayüzeyinin bütünlüğünü ve kalitesini artırarak TRM şeridinden zemine daha verimli yük aktarımına imkân tanımaktadır. Ayrıca, yüksek dayanımlı beton, maksimum yük altındaki deformasyonu azaltarak TRM–beton kompozit sisteminin hem rijitliğini hem de dayanıklılığını iyileştirmiştir.

En etkili parametrelerden ikisi TRM şerit genişliği ve bağ uzunluğudur. TRM şerit genişliği ile TRM bağ uzunluğu ayrı parametreler olarak incelenmiştir. Ancak bu iki parametre birlikte, etkin şerit yüzey alanını belirlediğinden, yük–deplasman davranışı üzerinde önemli bir etki oluşturmuştur. Yapışma yüzey alanının artması ile maksimum yük ve enerji yutma kapasitesinde dört kata yakın artışlar gözlenmiştir.

TRM Şerit genişliğinin 50 mm'den 100 mm'ye çıkarılması, maksimum yükte %70'lere varan artış sağlamış ve etkin gerilme dağılım alanının genişlemesi sayesinde enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Şerit genişliğinin etkisi, yüksek dayanımlı betonlarda ve daha uzun yapışma uzunluklarında daha belirgin hâle gelmiş, böylece şerit genişliği ile diğer parametreler arasında karşılıklı bir etkileşim bulunduğunu ortaya koymuştur. Dikkat çekici bir şekilde, daha geniş şeritler daha kararlı bir davranış sergilemiş ve sıyrılma gecikmiştir.

Bağ uzunluğu etkisi incelendiğinde, en belirgin iyileşmelerin maksimum yük ve enerji yutma kapasitesinde meydana geldiği görülmektedir. 450 mm bağ uzunluğuna sahip numunelerde maksimum yük kapasitesi %152, enerji yutma kapasitesi ise %177 oranında artmıştır. Ancak özellikle ankrajsız numunelerde 300 mm'den sonra azalan kazançlar gözlenmiştir. Bu etki, önceki çalışmalarda bildirilen etkin yapışma uzunluğu kavramıyla uyumludur; yani belirli bir uzunluğun ötesinde ek uzunluk yük aktarımına anlamlı katkı sağlamamaktadır. Ankrajlı numunelerde, daha uzun yapışma uzunlukları ankraj yerleşim düzenine de bağlı olarak daha iyi performans göstermiştir.

Bu bulgular, önceki çalışmaları doğrulamakla birlikte, TRM tabanlı güçlendirme tasarımlarında optimizasyon stratejilerinin niceliksel olarak belirlenmesine imkân sağlamaktadır. Ankraj detaylandırmasının titizlikle yapılması, yüksek kaliteli beton yüzeylerinin sağlanması ve şerit geometrilerinin uygun şekilde tasarlanması, yük-deplasman davranışını ve kompozit sistemin yapısal güvenilirliğini iyileştiren kritik tasarım parametreleri olarak öne çıkmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında tekstil ile takviye edilmiş harç şeritler ile beton yüzeyi arasındaki yük–deplasman arayüzey bağ davranışının incelenmesine yönelik deneysel bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Toplamda 84 adet beton numunesi hazırlanmış ve çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Beton basınç dayanım sınıfı, TRM şerit genişliği, TRM bağ uzunluğu, ankraj sabitleme tipi ve ankraj yerleşim düzeni gibi değişkenlerin bağ performansına etkileri deneysel olarak ortaya konmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Deneysel sonuçları, TRM sistemlerinin beton elemanların maksimum yük taşıma kapasitesini, rijitliğini ve enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir.
- Beton dayanımının artışı, TRM sisteminin performansını anlamlı ölçüde iyileştirmiştir. C15 beton sınıfında ortalama maksimum yük 11.92 kN, enerji kapasitesi 166.98 kN.mm iken; C30 beton sınıfında bu değerler sırasıyla 16.24 kN ve 252.39 kN.mm'ye yükselmiştir. Beton dayanım sınıfının artırılması ile rijitlikte %52, enerji yutma kapasitesinde %51'lik bir artış sağlanmıştır.
- TRM şerit genişliği 50 mm'den 100 mm'ye çıkarıldığında ortalama yük taşıma kapasitesi %68 artarak 10.01 kN'dan 16.84 kN'a ulaşmış, enerji yutma kapasitesi ise 126.31 kN.mm'den 266.39 kN.mm'ye çıkarak %109'luk bir artış sağlanmıştır. Rijitlik parametresinde %21'lik bir artış meydana gelmiştir.
- TRM bağ uzunluğu 150 mm'den 450 mm'ye artırıldığında yük taşıma kapasitesi 6.62 kN'dan 16.65 kN'a yükselmiş, enerji yutma kapasitesi 90.59 kN.mm'den 251.31 kN.mm'ye ulaşmıştır.
- Ankraj kullanımı, yük taşıma kapasitesini ortalama 8.70 kN'dan 15.02 kN'a, enerji yutma kapasitesini ise 97.28 kN.mm'den 229.81 kN.mm'ye çıkararak sistemin rijitliğini ve sünekliğini belirgin biçimde iyileştirmiştir.
- Epoksi ile sabitlenen ankrajların, çimento ile sabitlenen ankrajlara göre ortalama yük taşıma kapasitesinde yaklaşık %11 ve enerji yutma kapasitesinde yaklaşık %30 artış sağladığı görülmüştür. Epoksi ile sabitlenen ankrajlarda yük taşıma kapasitesi 15.76 kN iken harç ile sabitlenen ankrajlarda 14.19 kN, enerji yutma kapasitesi ise epoksi ile sabitlenen ankrajlarda 258.12 kN.mm, harç ile sabitlenen ankrajlarda 198.72 kN.mm olarak bulunmuştur.
- Daha fazla ankraj sayısına ve iki sıralı düzenlemelere (örneğin 3/2) sahip ankraj yerleşim düzenlerinde, daha yüksekyük taşıma kapasitesi ve enerji yutma kapasitesi değerlerine

ulaşmıştır. Ortalama maksimum yük taşıma kapasitesi; 1/1 ankraj yerleşiminde 10.95 kN iken 3/2 ankraj yerleşiminde 21.46 kN'dur. Enerji yutma kapasitesi değerleri incelendiğinde ortalama değerler; 1/1 ankraj yerleşiminde 158.66 kN.mm, 3/2 ankraj yerleşiminde 280.19 kN.mm olarak ölçülmüştür.

- Ankraj yerleşim düzeninin ve ankraj sayısının artırılmasıyla yük dağılımının daha homojen hale geldiği ve maksimum yük taşıma kapasitesinin yükseldiği belirlenmiştir. Çoklu ankraj kullanımının sistem rijitliğini artırdığı, ancak 2/2 ve 3/2 ankraj yerleşimine sahip numunelerde ankraj bölgelerinde oluşan gerilme yığılmalarına bağlı olarak maksimum deplasman kapasitesini sınırladığı görülmüştür.
- Maksimum yükteki deplasman ve maksimum deplasman davranışının; TRM şerit genişliği, bağ uzunluğu ve ankraj yerleşim düzeni parametrelerinin ortak etkisi altında şekillendiği, bu parametrelerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmesinin yeterli olmayacağı ve yapısal davranışın doğru yorumlanabilmesi için parametrelerin birleşik etkilerinin birlikte incelenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Deneysel programda yer alan değişkenlerin (beton basınç dayanım sınıfı, TRM şerit genişliği, TRM bağ uzunluğu, ankraj sabitleme tipi ve ankraj yerleşim düzeni) tüm deney elemanlarında yük taşıma kapasitesinin artışında doğrudan etkili olduğu görülmüştür.
- DIC analizlerindeki birim deformasyon dağılımları incelendiğinde deney elemanlarında maksimum birim deformasyon değerlerinin yoğunlaştığı bölgeler; beton sınıfı, TRM şerit genişliği, TRM bağ uzunluğu, ankraj sabitleme tipi ve ankraj yerleşim düzenine göre değişkenlik göstermekte olup genellikle hidrolik sisteme en yakın kenarda (yüklemenin yapıldığı kenar) ve ankraj çevresinde gözlemlenmiştir. Yüklemenin yapıldığı kenardan uzaklaştıkça birim deformasyon değerlerinde azalışlar gözlenmiştir.
- Beton dayanımının artırılması ya da ankraj kullanımı; yük taşıma kapasitesi, enerji yutma kapasitesi gibi yapısal performanslarda belirgin iyileşmelere yol açsa da gözlemlenen hasar dağılımı ve göçme modları temelde değişmemiştir. Hasar esas olarak matris çatlama (C tipi göçme modu) veya tekstil-harç arayüzündeki aderans kaybı yoluyla sıyrılmaya (D tipi göçme modu) şeklinde meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, beton basınç dayanım sınıfı, TRM şerit uzunluğu, TRM bağ uzunluğu, ankraj kullanımı ve yerleşim düzeni gibi parametrelerin yapısal performansa olumlu katkı sağlamakla birlikte, hasar dağılımı ve göçme modunu önemli ölçüde etkilemediğini göstermektedir.

- Deneyleer ile elde edilen bulgular sonucunda TRM ile beton yüzey arasındaki etkileşimin doğru bir şekilde tanımlanabilmesi için nümerik analizler ve arayüzey davranış modelleri oluşturulabilir.
- Dijital görüntü korelasyonu yöntemi ile ölçülen deplasman değerlerinin tekstilde meydana gelen uzama, tekstil-harç arayüzeyindeki bağ kaybına bağlı yer değiştirme ve TRM-beton arayüzündeki bağ kaybına bağlı yer değiştirme bileşenlerine ayrıştırılması ve bunlarla ilgili analitik modelleme ve nümerik analizlerin yapılması ileriki çalışmalar için önerilmektedir.
- Ankraj yerleşim düzenlerinin optimizasyonuna yönelik parametrik çalışmalar gerçekleştirilebilir.
- Daha düşük maliyetli farklı harç malzemeleri kullanılarak tez çalışmasında yararlanılan güçlendirme yönteminin alternatifleri oluşturulabilir.
- Bu alışma, güçlendirme uygulamalarında kullanılacak tasarım modellerinin geliştirilmesine yönelik temel bir aşama olarak değerlendirilmekte olup, elde edilen bulguların güçlendirme projelerinde uygulanabilirlik ve mühendislik açısından fayda sağlama konusunda katkı sunması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

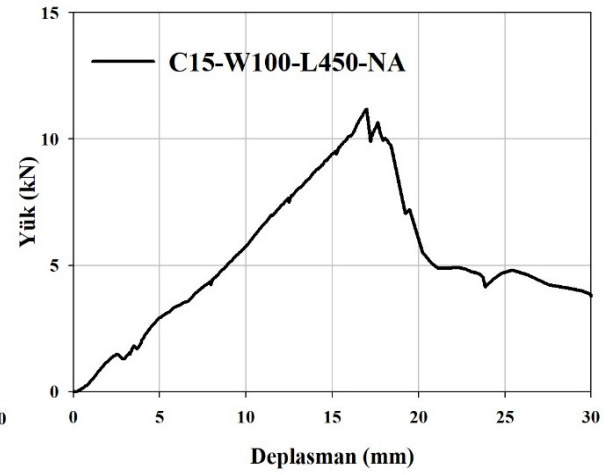
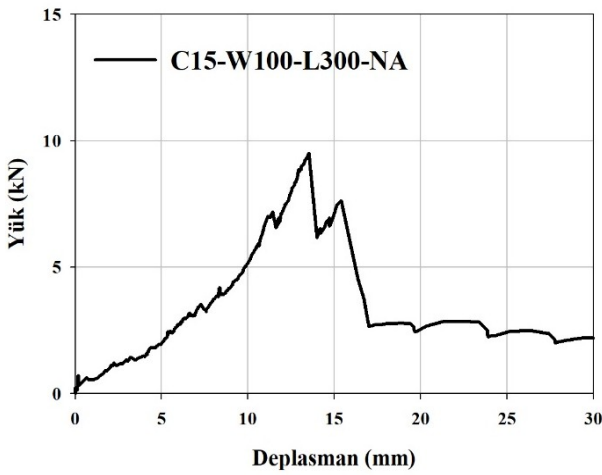
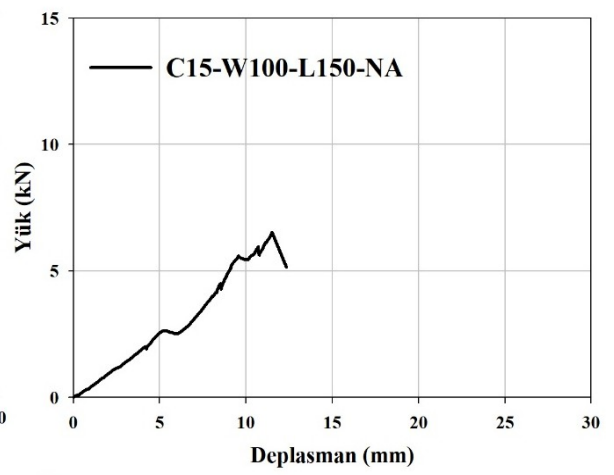
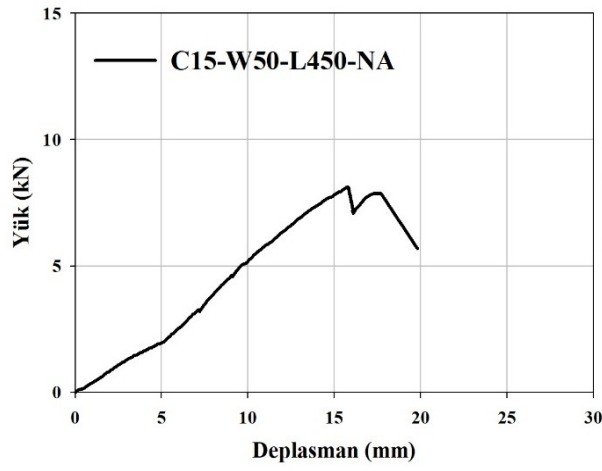
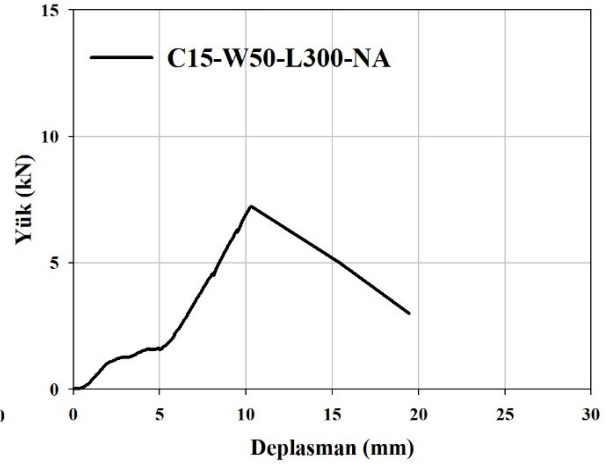
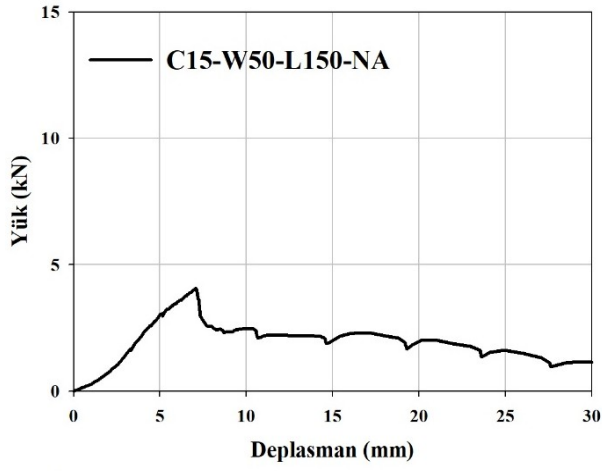
- ACI, American Concrete Institute. *Guide to Design and Construction of Externally Bonded FRCM Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures*. Amerika Birleşik Devletleri: ACI Committee 549, December 2013, ACI 549.4R-13.
- Azimi, N., Dalalbashi, A., Oliveira, D., V., Ghiassi, B., & Lourenço, P., B. (2022). Tensile behavior of textile-reinforced mortar: influence of the number of layers and their arrangement. *Engineering Materials*, 916(1), 91-97.
- Awani, O., El Refai, A., & El-Maaddawy, T. (2015). Bond characteristics of carbon fabric-reinforced cementitious matrix in double shear tests. *Construction and Building Materials*, 101(1), 39-49.
- Blaber, J., Adair, B., & Antoniou, A. (2015). Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software. *Experimental Mechanics*, 55, 1105-11022.
- Bournas, D. A., Lontou, P. V., Papanicolaou, C. G., & Triantafillou, T. C. (2007). Textile-reinforced mortar versus fiber-reinforced polymer confinement in reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal*, 104(6), 740-748.
- Cagegi, C., Sciuto, D., & Cuomo, M. (2018). Experimental study on effective bond length of basalt textile reinforced mortar strengthening system: Contributions of digital image correlation. *Measurement*, 129(1), 119-127.
- Cao, P., Cao, L., Chen, G., Zhi, Z., Wang, J., Yuan, Z., & Tan, Z. (2024). Numerical modelling of flexural performance of textile reinforced mortar strengthened concrete beams. *Materials and Design*, 244, 1-15.
- Çelik, A., Mercimek, Ö., Akkaya, S. T., Bıçakçioğlu, K., & Anıl, Ö. (2025). A novel bond-slip model between TRM strips and different types of masonry walls: experimental approach. *Construction and Building Materials*, 458, 1-21.
- Codispoti, R., Oliveira, D. V., Olivito, R. S., Lourenço, P. B., & Figueiro, R. (2015). Mechanical performance of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry. *Composites Part B*, 77, 74-83.
- D'Antino, T., Sneed, L. H., Carloni, C., & Pellegrino, C. (2015). Influence of the substrate characteristics on the bond behavior of PBO FRCM-concrete joints. *Construction and Building Materials*, 101(1), 838-850.
- D'Ambrisi, A., Feo, L., & Focacci, F. (2013). Experimental analysis on bond between PBO FRCM strengthening materials and concrete. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 524-532.
- Dalalbashi, A., Freitas, A., Ghiassi, A., & Oliveira, D. (2018). Fiber-to-mortar bond behavior in TRM composites: effect of embedded length and fiber configuration. *Composites Part B: Engineering*, 152(1), 43-57.
- De Felice, G., Aiello, M. A., Cagegi, C., Ceroni, F., De Santis, S., Garbin, E., Gattesco, N., Hojdis, L., Krajewski, P., Kwecien, A., Leone, M., Lignola, G., P., Mazzotti, C., Daniel, O., Corina, P., Poggi, C., Triantafillou, T., Valluzzi, M.R., & Viskovic, A. (2018). Recommendation of RILEM Technical Committee 250-CSM: Test method for Textile Reinforced Mortar to substrate bond characterization. *Materials and Structures*, 51(95), 1-9.
- Dong, Z., Dai, J., Deng, M., & Wu, Z. (2022). Experimental study on the mechanical properties of textile reinforced mortar (TRM) composites with different yarn shapes subjected to uniaxial tension. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22(185), 1-16.
- Erbaş, Y. (2025). Yükleme hızının dört noktalı eğilme etkisi altındaki AAC lentoların eğilme performansına etkisi. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 8(5), 1313-1319.

- Escobar, K.I., Delso, J.M., & Oller, E. (2024). Bond and tensile behaviour of textile reinforced mortars with traditional and alternative matrices. *Procedia Structural Integrity*, 64(1), 1476-1483.
- Güneş, M. E. (2022). *Tekstil Donatılı Harçlar ile Yığma Yapıların Güçlendirilmesi*. (Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Haitham, J. M., & Kaish, A., (2020). Behaviour of circular RC column confined with textile reinforced mortar under compression load. *Earth and Environmental Science*, 498(1), 1-6.
- Heins, K., Kimm, M., Olbrueck, L., May, M., Gries, T., Kolkmann, A., Ryu, G.S., Ahn, G., H., & Kim, H., Y. (2020). Long-term bonding and tensile strengths of carbon textile reinforced mortar. *Materials*, 13(20), 4485-4504.
- Hillerborg, A. (1985). RILEM Technical Committee 50: The Theoretical Basis of Method to Determine The Fracture Energy of Concrete. *Matériaux et Constructions*, 18(106), 25-48.
- Kashfuddoja, M., Prasath, R. G. R., & Ramji, M. (2014). Study on experimental characterization of carbon fiber reinforced polymer panel using digital image correlation: A sensitivity analysis. *Optics and Lasers in Engineering*, 62, 17-30.
- Koutas, L. N. & Bournas, D. A., (2017). Flexural strengthening of two-way RC slabs with textile-reinforced mortar: experimental investigation and design equations. *Journal of Composites for Construction*, 21(1), 1943-1955.
- Koutas, L. N., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Triantafillou, T. C. (2019). Strengthening of concrete structures with textile reinforced mortars: state-of-the-art review. *Journal of Composites for Construction*, 23(1), 1-20.
- Larrinaga, P., Garmendia, L., Chastre, C., & San-Jose, J. T. (2022). Low-grade RC beams strengthened with TRM composite based on basalt, carbon and steel textiles: Experimental and analytical study. *Construction Materials*, 16, 1-20.
- Mazzoleni P., Matta, F., Zappa, E., Sutton, M. A., & Cigada A. (2015). Gaussian pre-filtering for uncertainty minimization in digital image correlation using numerically-designed speckle patterns. *Optics and Lasers in Engineering*, 66, 19-33.
- Mercimek, Ö., Ghoroubi, R., Anıl, Ö., & Baran, M. (2021). Birden fazla boşluklu çift doğrultulu betonarme döşemelerin zımbalama performansının iyileştirilmesi için tekstil ile güçlendirilmiş sıva şeritler ile güçlendirilmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 13(2), 573-582.
- Mercimek, Ö., Ghoroubi, R., Özdemir, A., & Anıl, Ö. (2022). Strengthening of columns with different innovative composite materials for RC buildings without sufficient earthquake resistance. *Journal of Polytechnic*, 25(4), 1463-1473.
- Mercimek, Ö., Akkaya, S. T., Türer, A., Erbaş, Y., Bıçakçioğlu, K., & Anıl, Ö. (2024). Experimental investigation of the effectiveness of strengthening methods in reinforced concrete flats labs with multiple openings under punching load. *Structures*, 63, 1-18.
- Mercimek, Ö., Çalışkan, Ö., Yüncüler, M., Anıl, Ö. & Erdem, R.,T. (2026). TRM-to-concrete interface bond without anchors: combined experimental, analytical and numerical modeling approach. *Structural Concrete*, 1-29.
- Ombres, L. (2015). Analysis of the bond between fabric reinforced cementitious mortar (FRCM) strengthening systems and concrete. *Composites Part B: Engineering*, 28(69), 418-426.
- Raouf, S. M., Koutas, L. N., & Bournas, D. A. (2016). Bond between textile-reinforced mortar (TRM) and concrete substrates: experimental investigation. *Composites Part B*, 98, 350-361.

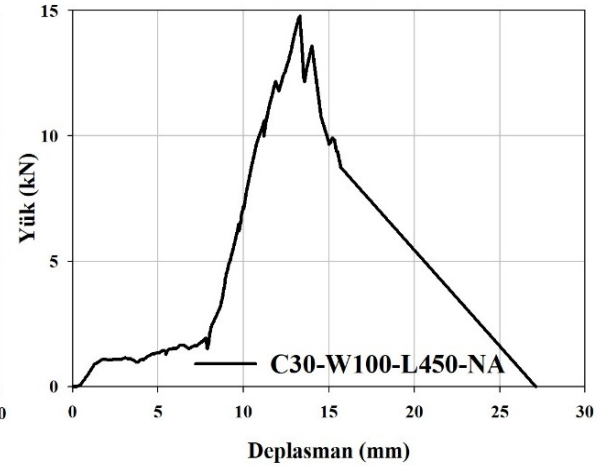
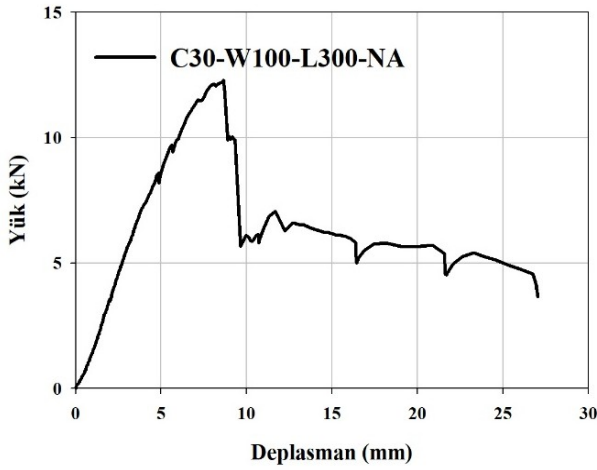
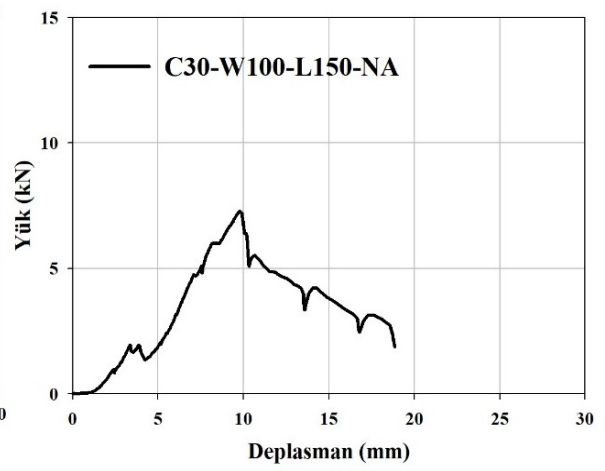
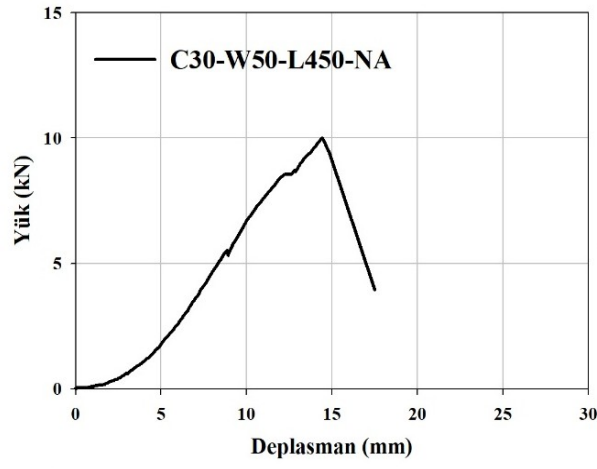
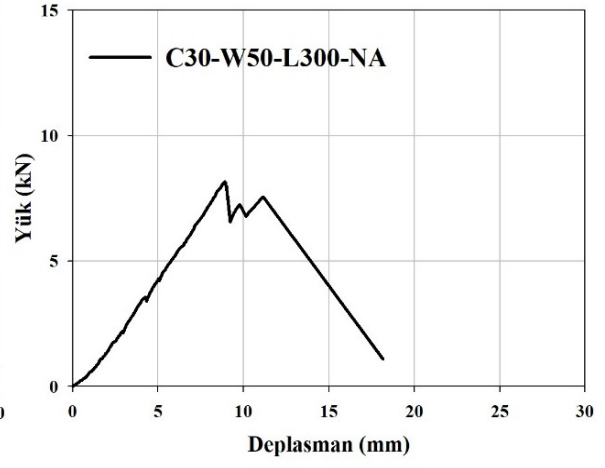
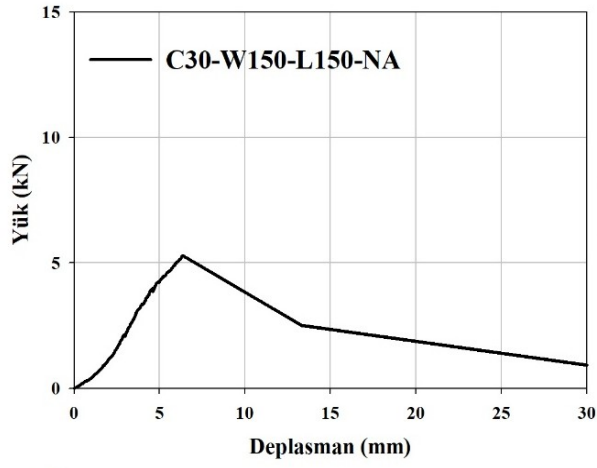
- Raof, S.M., & Bournas, D. A. (2017). TRM versus FRP in flexural strengthening of RC beams: behaviour at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 154, 424-437.
- Raof, S. M., Koutas, L. N., & Bournas, D. A. (2017). Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams. *Construction and Building Materials*, 151, 279-291.
- Sneed, L. H., D'Antino, T., & Carloni, C. (2014). Investigation of bond behavior of PBO fiber-reinforced cementitious matrix composite-concrete interface. *ACI Mater J*, 111(5), 569-580.
- Spinteks (2022). *Grid (Mesh) Kumaşlar*. [Erişim: 10.10.2025, <https://spinteks.com/p/grid-mesh-kumaslar/>].
- Sui, Z. A., Dong, K., Jiang, J., Yang, S., & Hu, K. (2020). Flexural behavior of fire-damaged prefabricated RC hollow slabs strengthened with CFRP versus TRM. *Materials*, 13, 1-18.
- Tetta, Z. C., Triantafillou, T. C., & Bournas, D. A. (2018). On the design of shear-strengthened RC members through the use of textile reinforced mortar overlays. *Composites Part B*, 147, 178-196.
- Tran, C. T. M., Stitmannathum, B., & Ueda, T. (2014). Investigation of the bond behaviour between PBO-FRCM strengthening material and concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(12), 545-557.
- Triantafillou, T. C. (2016). *Textile fibre composites in civil engineering*. Elsevier Woodhead Publishing, UK.
- Younis, A., Ebead, U., & Shrestha, K. C. (2017). Tensile characterization of textile reinforced mortar. *Resilient Structures and Sustainable Construction*, 1-6.
- Zhang, M., Luo, Q., Du, Y., Deng, M., & Zhao, S. (2024). Bond performance of carbon textile reinforced mortar with short fibers for strengthening concrete elements. *Case Studies in Construction Materials*, 21, 1-22.

EKLER

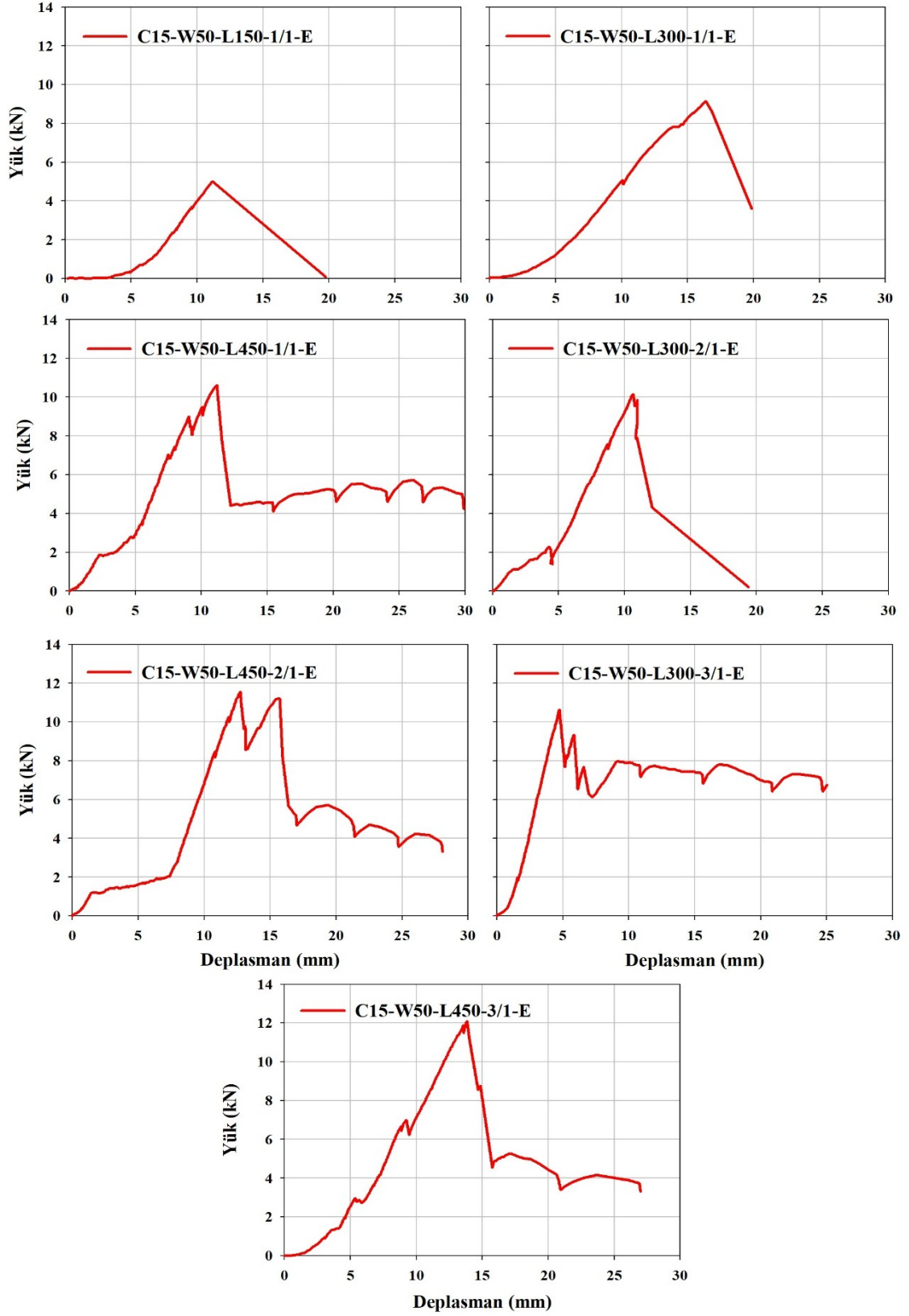
EK-1: C15-NA YÜK-DEPLASMAN EĞRİLERİ



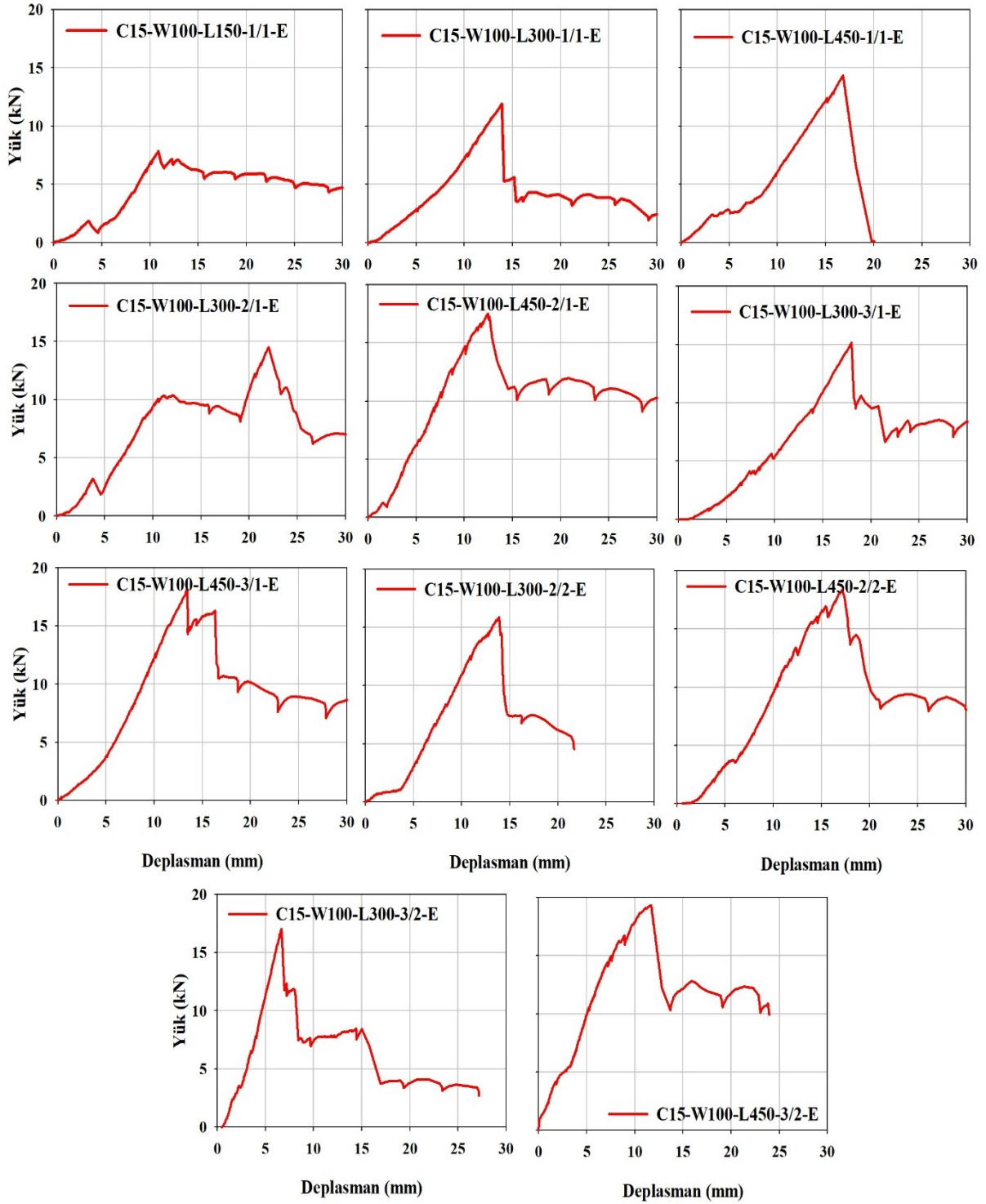
EK-2: C30-NA YÜK-DEPLASMAN EĞRİLERİ



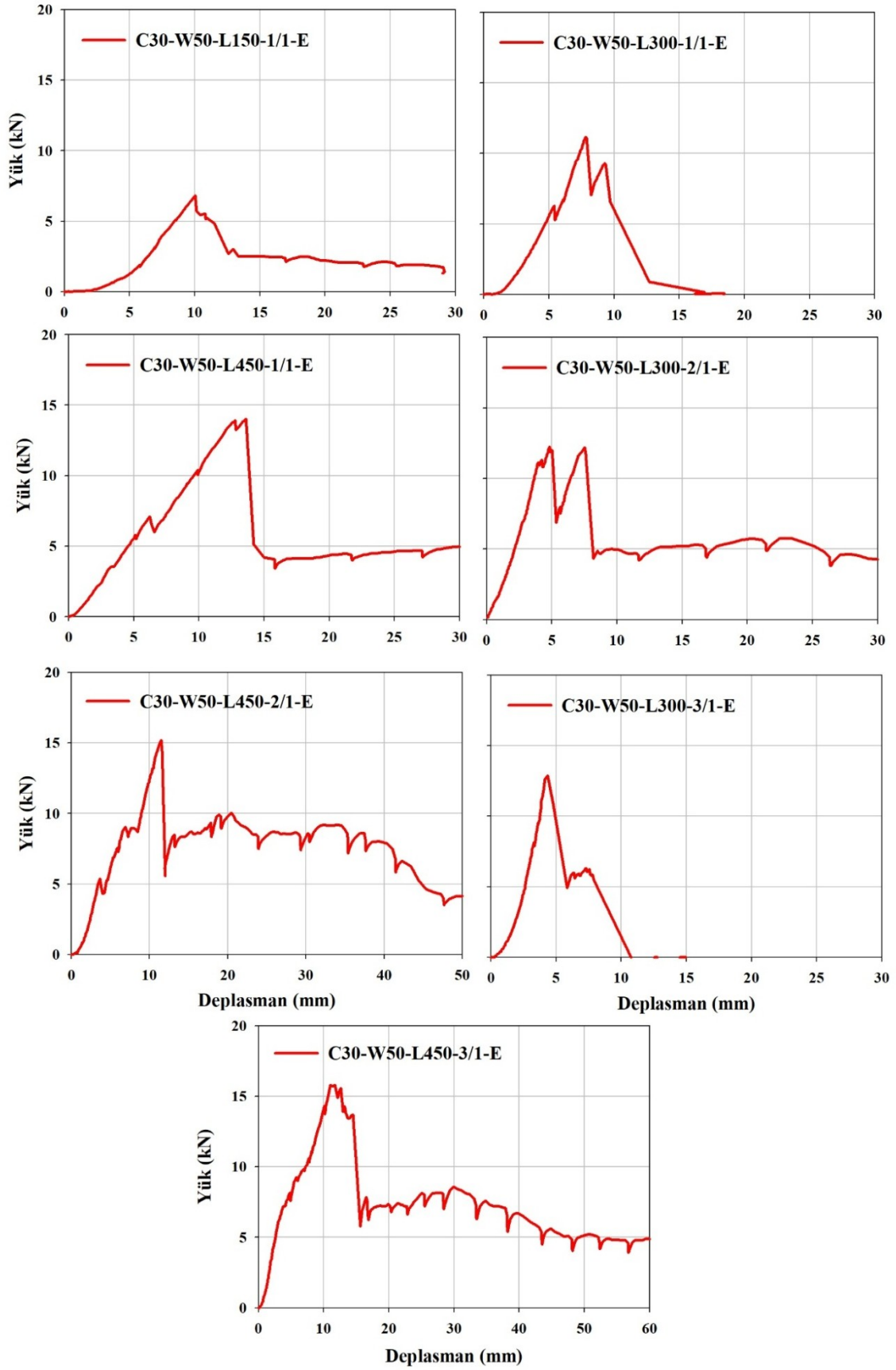
EK-3: C15-W50-E YÜK-DEPLASMAN EĞRİLERİ



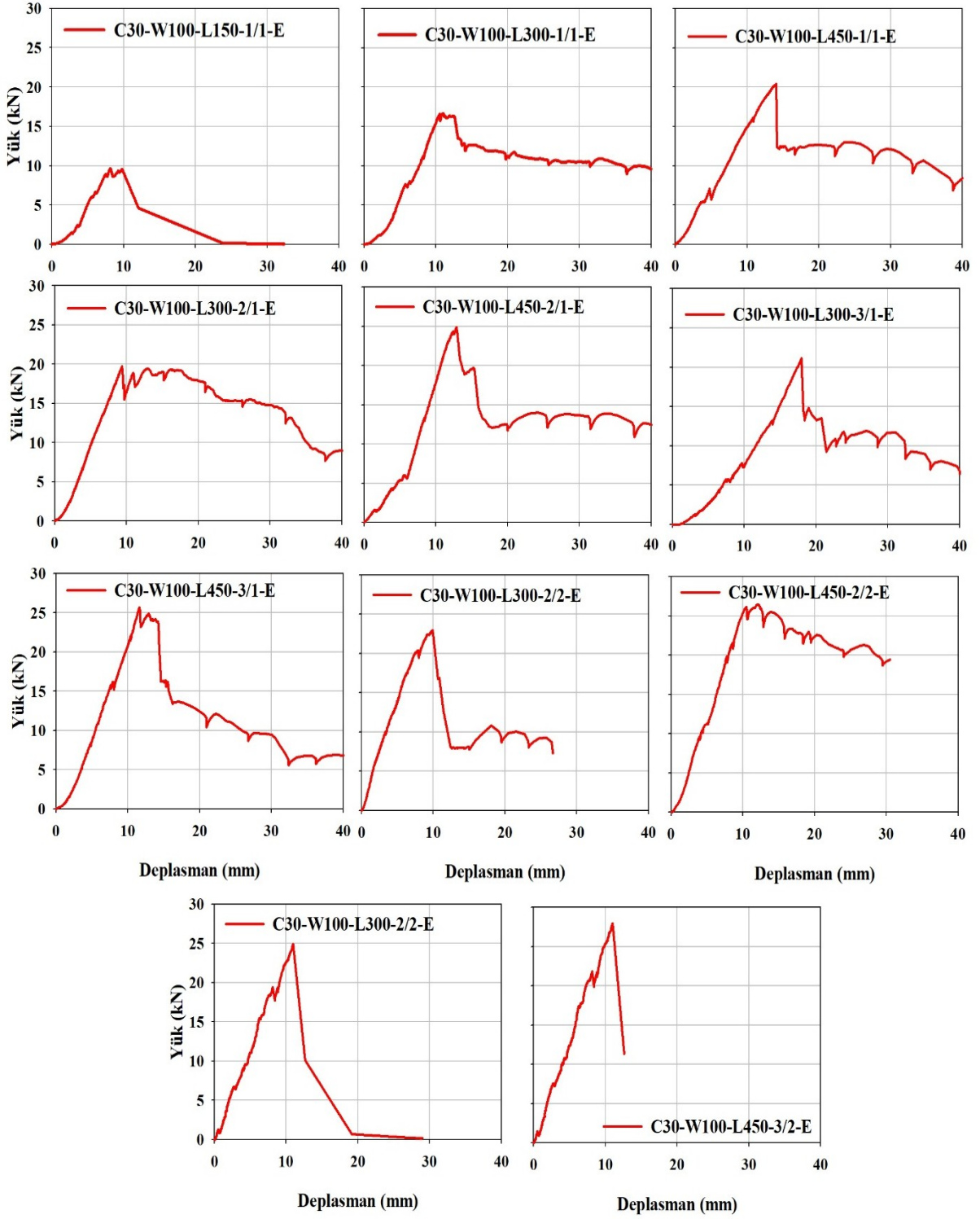
EK-4: C15-W100-E YÜK-DEPLASMAN EĞRİLERİ



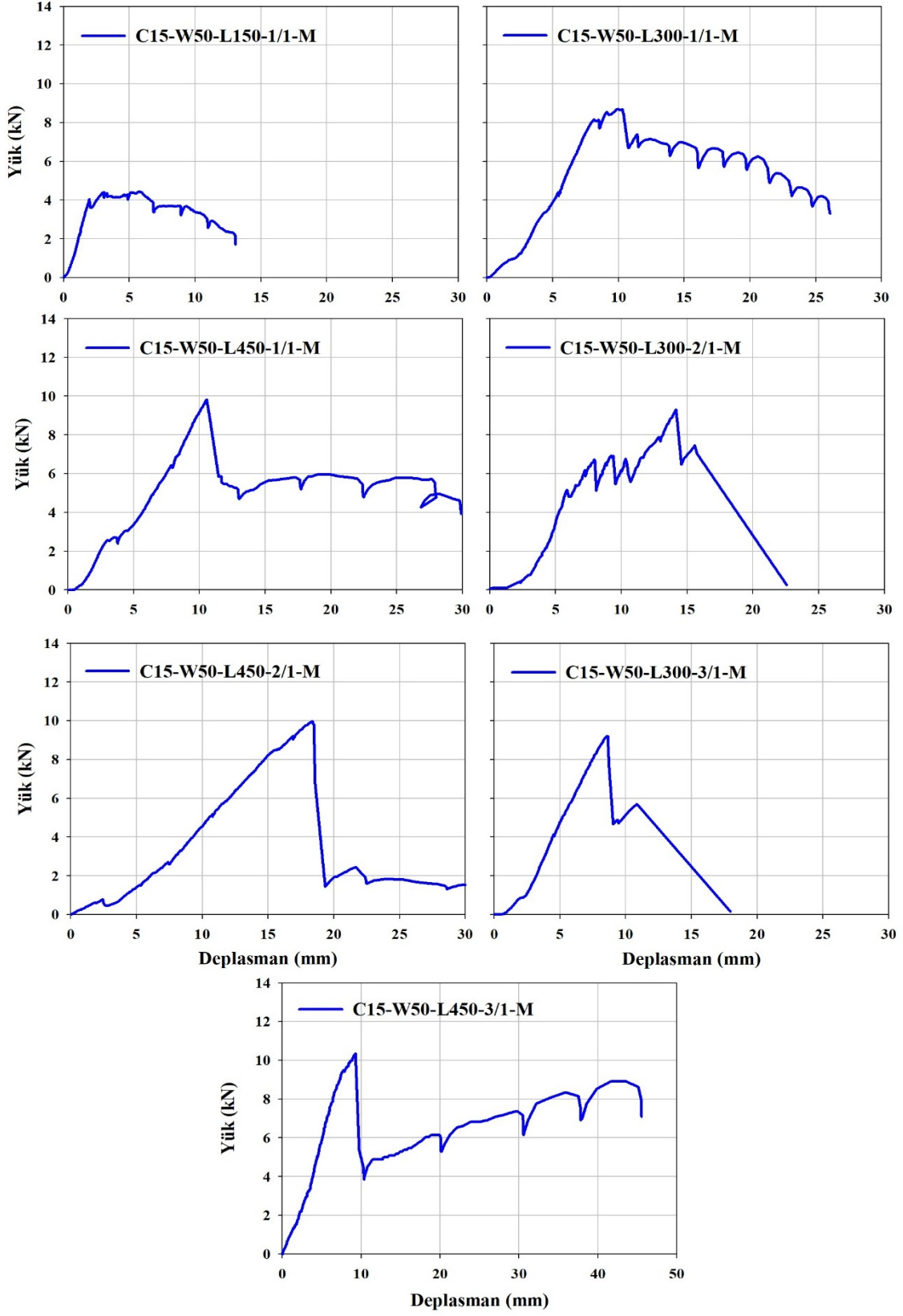
EK-5: C30-W50-E YÜK-DEPLASMAN EĞRİLERİ



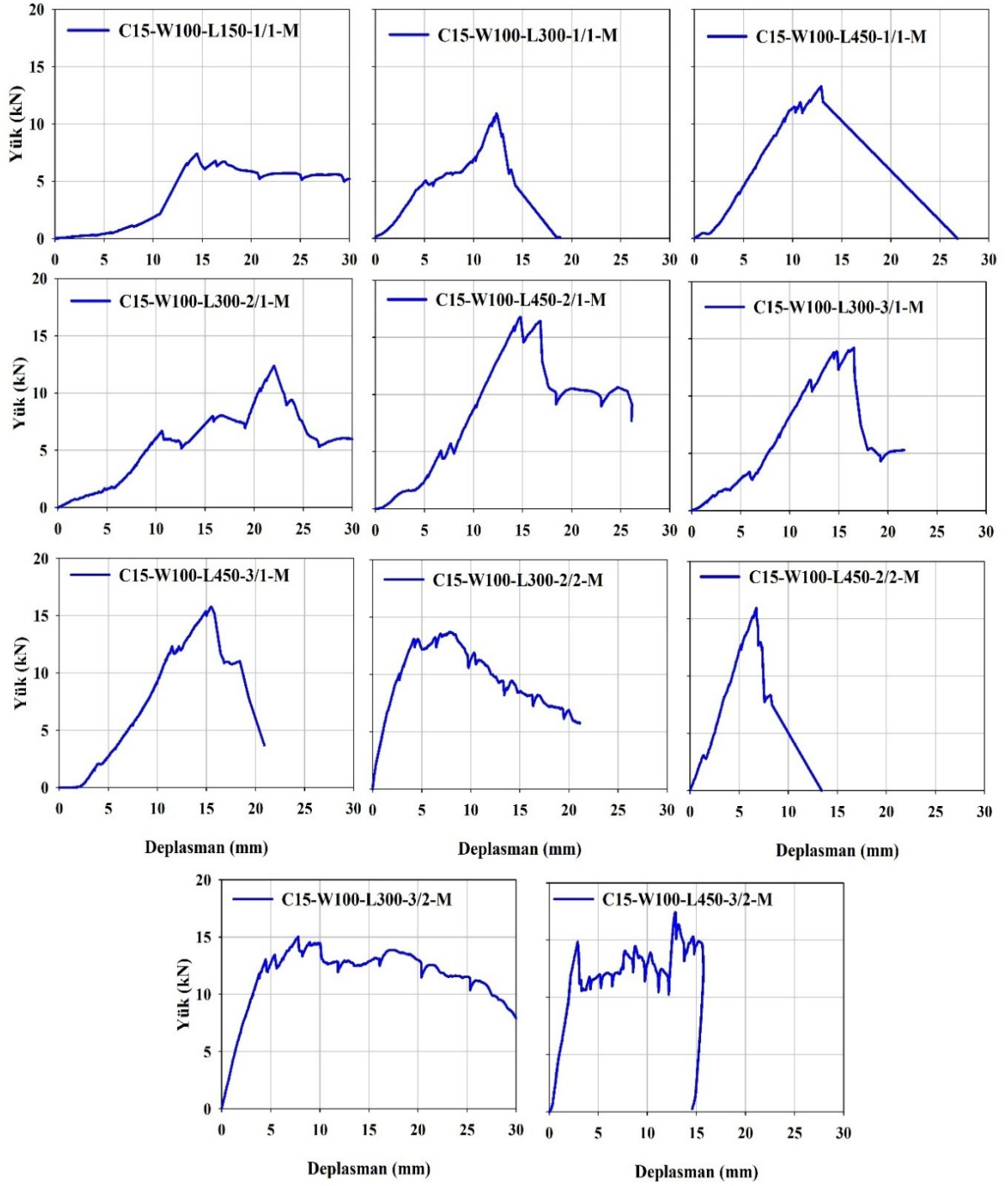
EK-6: C30-W100-E YÜK-DEPLASMAN EĞRİLERİ



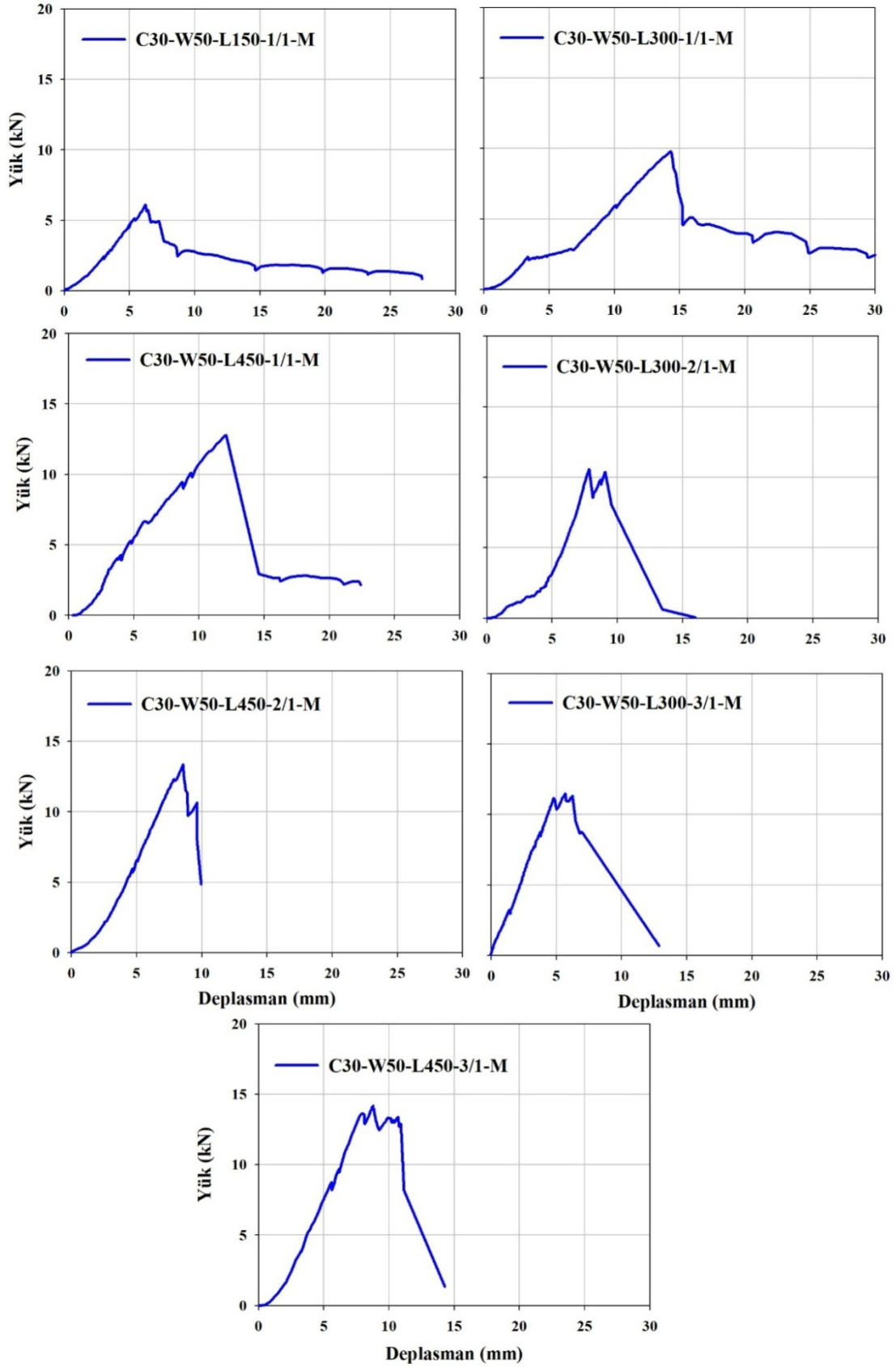
EK-7: C15-W50-M YÜK-DEPLASMAN EĞRİLERİ



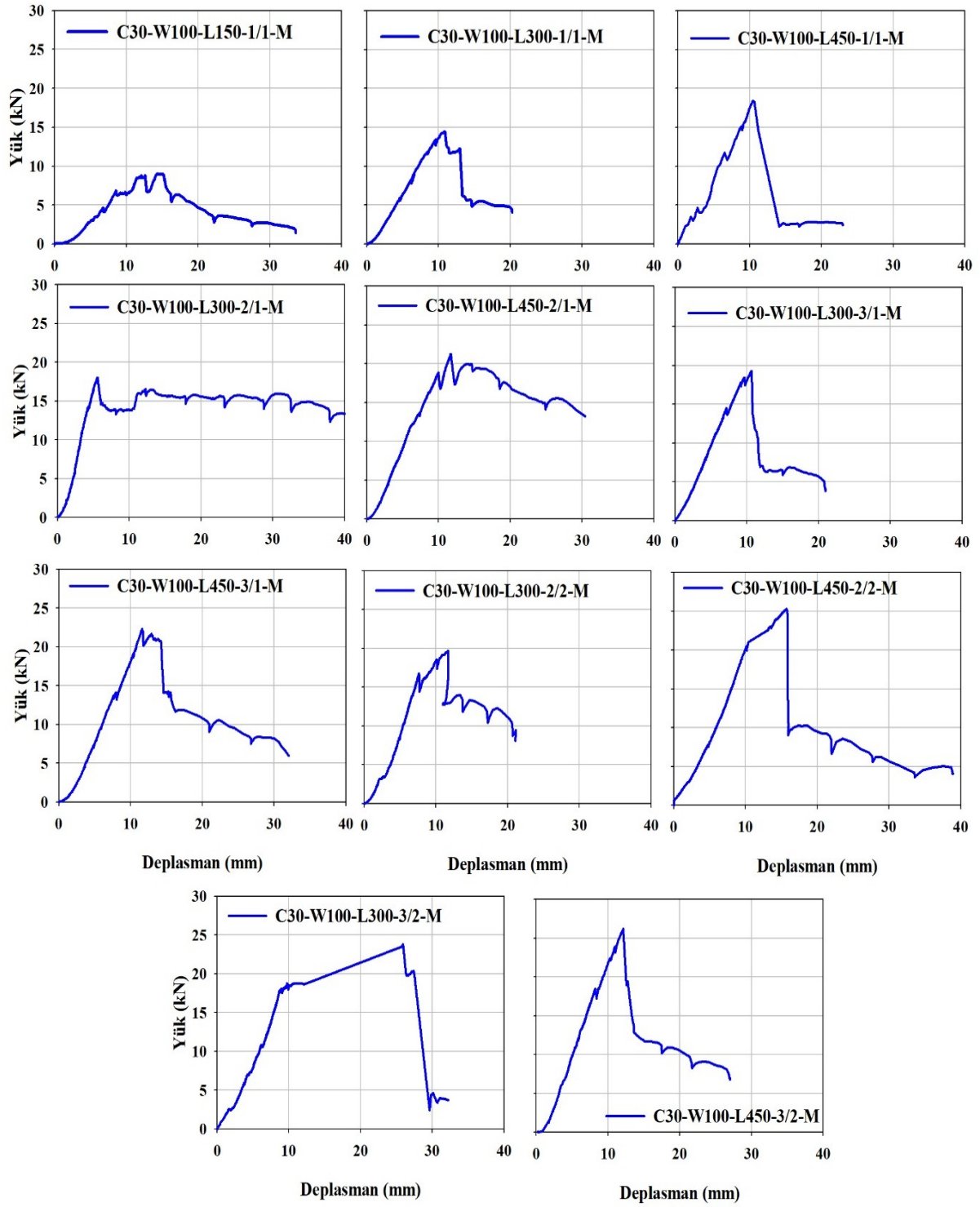
EK-8: C15-W100-M YÜK-DEPLASMAN EĞRİLERİ



EK-9: C30-W50-M YÜK-DEPLASMAN EĞRİLERİ



EK-10: C30-W100-M YÜK-DEPLASMAN EĞRİLERİ



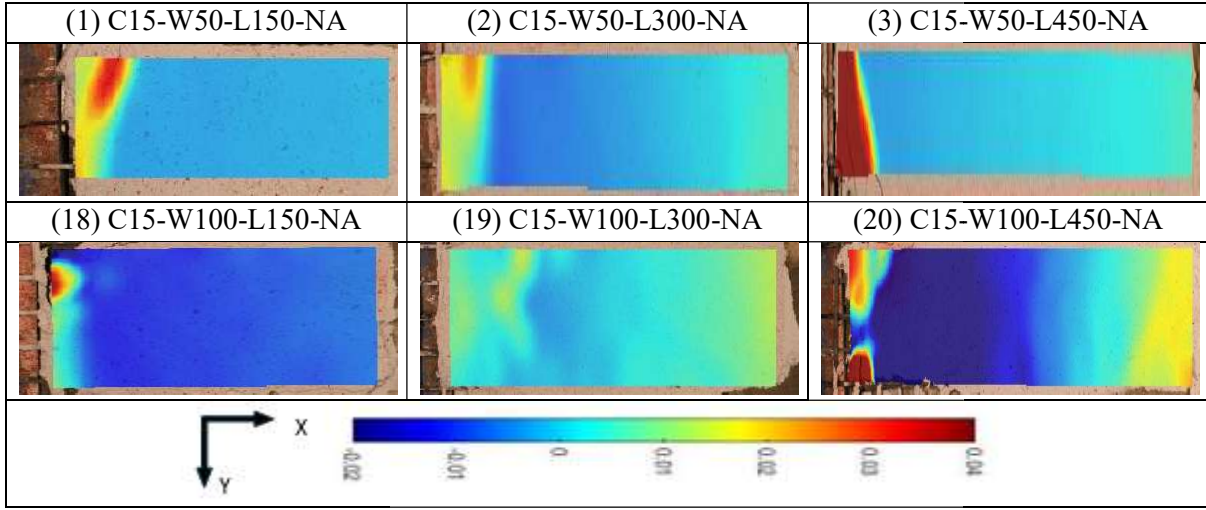
EK-11: C15 PERFORMANS İNDEKSLERİ

Numune No	Numune Adı	Maks. Yük $P_{maks.}$ (kN)	Maks. Yükteki Deplasman $D_{maks.}$ (mm)	Rijitlik K (kN/mm)	Maks. Deplasman D_{kopma} (mm)	Enerji Yutma Kapasitesi (kN.mm)
1	C15-W50-L150-NA	4.06	7.07	0.57	35.03	63.08
2	C15-W50-L300-NA	7.23	10.32	0.70	20.00	74.58
3	C15-W50-L450-NA	8.11	15.70	0.52	19.82	91.04
4	C15-W50-L150-1/1-E	5.00	11.18	0.45	45.87	38.86
5	C15-W50-L300-1/1-E	9.15	16.40	0.56	19.86	85.74
6	C15-W50-L450-1/1-E	10.62	11.16	0.95	29.90	148.87
7	C15-W50-L300-2/1-E	10.15	10.66	0.95	19.43	63.66
8	C15-W50-L450-2/1-E	11.56	12.74	0.91	28.08	137.06
9	C15-W50-L300-3/1-E	10.63	4.74	2.24	25.04	171.25
10	C15-W50-L450-3/1-E	12.10	13.84	0.87	27.01	129.64
11	C15-W50-L150-1/1-M	4.43	5.69	0.78	13.09	43.81
12	C15-W50-L300-1/1-M	8.71	9.90	0.88	26.08	140.40
13	C15-W50-L450-1/1-M	9.84	10.57	0.93	29.90	153.65
14	C15-W50-L300-2/1-M	9.30	14.14	0.66	32.99	101.39
15	C15-W50-L450-2/1-M	9.99	18.35	0.54	32.17	106.84
16	C15-W50-L300-3/1-M	9.21	8.62	1.07	17.97	64.18
17	C15-W50-L450-3/1-M	10.36	9.27	1.12	45.54	302.64
18	C15-W100-L150-NA	6.53	11.51	0.57	12.35	38.31
19	C15-W100-L300-NA	9.51	13.54	0.70	31.13	105.74
20	C15-W100-L450-NA	11.17	16.97	0.66	35.98	180.61
21	C15-W100-L150-1/1-E	7.83	10.85	0.72	30.96	142.80
22	C15-W100-L300-1/1-E	11.92	13.89	0.86	46.50	144.87
23	C15-W100-L450-1/1-E	14.32	16.81	0.85	61.11	158.19
24	C15-W100-L300-2/1-E	14.51	22.04	0.66	40.19	287.80
25	C15-W100-L450-2/1-E	17.52	12.46	1.41	43.42	407.24
26	C15-W100-L300-3/1-E	15.14	17.99	0.84	49.70	313.69
27	C15-W100-L450-3/1-E	18.12	13.41	1.35	43.91	349.90
28	C15-W100-L300-2/2-E	15.85	13.90	1.14	21.66	149.79
29	C15-W100-L450-2/2-E	18.35	17.17	1.07	44.15	265.10
30	C15-W100-L300-3/2-E	17.02	6.65	2.56	27.19	166.60
31	C15-W100-L450-3/2-E	19.32	11.70	1.65	23.94	277.74
32	C15-W100-L150-1/1-M	7.40	14.47	0.51	91.61	260.63
33	C15-W100-L300-1/1-M	10.92	12.34	0.89	18.82	84.54
34	C15-W100-L450-1/1-M	13.29	12.90	1.03	27.20	167.68
35	C15-W100-L300-2/1-M	12.37	22.04	0.56	40.19	222.91
36	C15-W100-L450-2/1-M	16.78	14.78	1.14	26.14	221.95
37	C15-W100-L300-3/1-M	14.25	16.52	0.86	21.65	138.38
38	C15-W100-L450-3/1-M	15.79	15.49	1.02	20.88	155.71
39	C15-W100-L300-2/2-M	13.73	7.84	1.75	21.14	201.68
40	C15-W100-L450-2/2-M	15.94	6.73	2.37	14.67	87.77
41	C15-W100-L300-3/2-M	15.03	7.82	1.92	35.25	386.04
42	C15-W100-L450-3/2-M	17.47	12.88	1.36	15.71	180.91

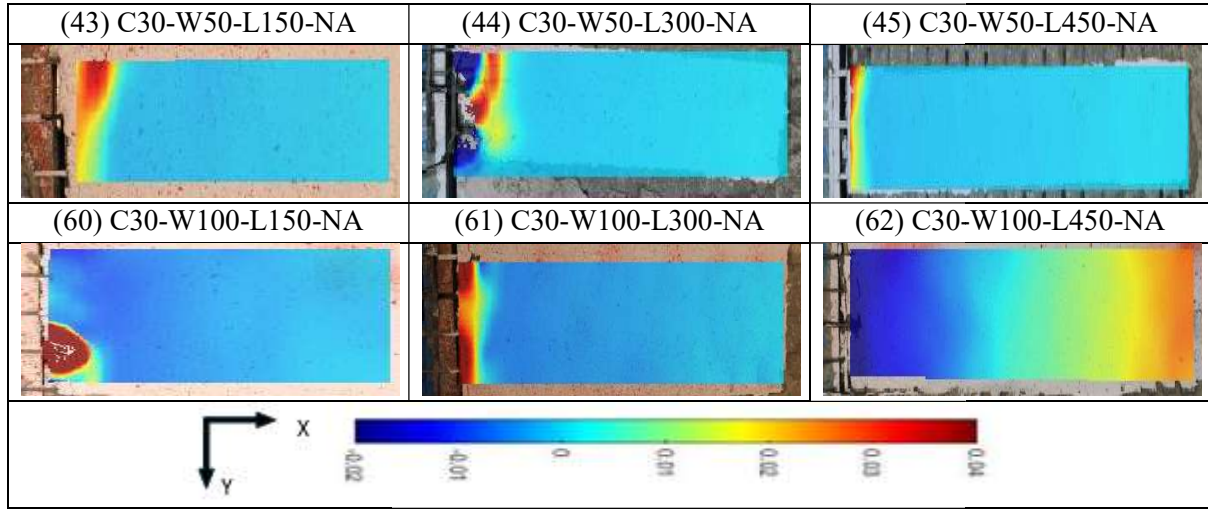
EK-12: C30 PERFORMANS İNDEKSLERİ

Numune No	Numune Adı	Maks. yük $P_{maks.}$ (kN)	Maks. Yükteki Deplasman $D_{maks.}$ (mm)	Rijitlik K (kN/mm)	Maks. Deplasman D_{kopma} (mm)	Enerji Yutma Kapasitesi (kN.mm)
43	C30-W50-L150-NA	5.28	6.36	0.83	31.50	72.63
44	C30-W50-L300-NA	8.16	8.90	0.92	54.86	91.99
45	C30-W50-L450-NA	10.01	14.44	0.69	17.49	82.48
46	C30-W50-L150-1/1-E	6.82	10.04	0.68	29.18	69.72
47	C30-W50-L300-1/1-E	11.16	7.82	1.43	18.49	60.84
48	C30-W50-L450-1/1-E	14.03	13.63	1.03	74.02	313.67
49	C30-W50-L300-2/1-E	12.26	4.83	2.54	35.15	190.44
50	C30-W50-L450-2/1-E	15.20	11.45	1.33	53.21	393.24
51	C30-W50-L300-3/1-E	12.90	4.35	2.96	15.94	53.14
52	C30-W50-L450-3/1-E	15.80	11.04	1.43	64.99	459.98
53	C30-W50-L150-1/1-M	6.12	6.22	0.98	27.44	60.94
54	C30-W50-L300-1/1-M	9.80	14.35	0.68	36.41	136.76
55	C30-W50-L450-1/1-M	12.79	12.08	1.06	22.40	92.29
56	C30-W50-L300-2/1-M	10.57	7.84	1.35	16.00	58.52
57	C30-W50-L450-2/1-M	13.36	8.57	1.56	9.95	61.75
58	C30-W50-L300-3/1-M	11.49	5.67	2.03	12.89	77.34
59	C30-W50-L450-3/1-M	14.18	8.78	1.62	14.29	102.00
60	C30-W100-L150-NA	7.30	9.78	0.75	18.87	64.31
61	C30-W100-L300-NA	12.28	8.65	1.42	27.05	170.67
62	C30-W100-L450-NA	14.78	13.31	1.11	43.24	131.91
63	C30-W100-L150-1/1-E	9.63	8.17	1.18	32.40	90.62
64	C30-W100-L300-1/1-E	16.64	11.02	1.51	52.90	504.18
65	C30-W100-L450-1/1-E	20.37	14.03	1.45	44.40	474.64
66	C30-W100-L300-2/1-E	19.69	9.39	2.10	48.48	617.47
67	C30-W100-L450-2/1-E	24.85	12.83	1.94	40.34	511.38
68	C30-W100-L300-3/1-E	21.09	17.99	1.17	49.70	436.84
69	C30-W100-L450-3/1-E	25.64	11.61	2.21	41.13	457.82
70	C30-W100-L300-2/2-E	22.93	9.91	2.31	26.65	201.54
71	C30-W100-L450-2/2-E	26.47	12.15	2.18	31.09	585.36
72	C30-W100-L300-3/2-E	24.90	10.99	2.27	28.96	203.92
73	C30-W100-L450-3/2-E	27.93	10.99	2.54	28.96	228.71
74	C30-W100-L150-1/1-M	9.00	14.20	0.63	33.63	141.35
75	C30-W100-L300-1/1-M	14.50	10.85	1.34	20.26	142.21
76	C30-W100-L450-1/1-M	18.41	10.45	1.76	22.95	150.50
77	C30-W100-L300-2/1-M	17.98	5.57	3.23	56.37	739.69
78	C30-W100-L450-2/1-M	21.22	11.66	1.82	30.40	436.86
79	C30-W100-L300-3/1-M	19.26	10.66	1.81	20.96	177.33
80	C30-W100-L450-3/1-M	22.31	11.61	1.92	32.06	346.24
81	C30-W100-L300-2/2-M	19.67	11.69	1.68	21.13	228.31
82	C30-W100-L450-2/2-M	25.26	15.72	1.61	38.90	383.31
83	C30-W100-L300-3/2-M	23.81	25.90	0.92	32.23	485.21
84	C30-W100-L450-3/2-M	26.22	12.11	2.17	26.99	312.37

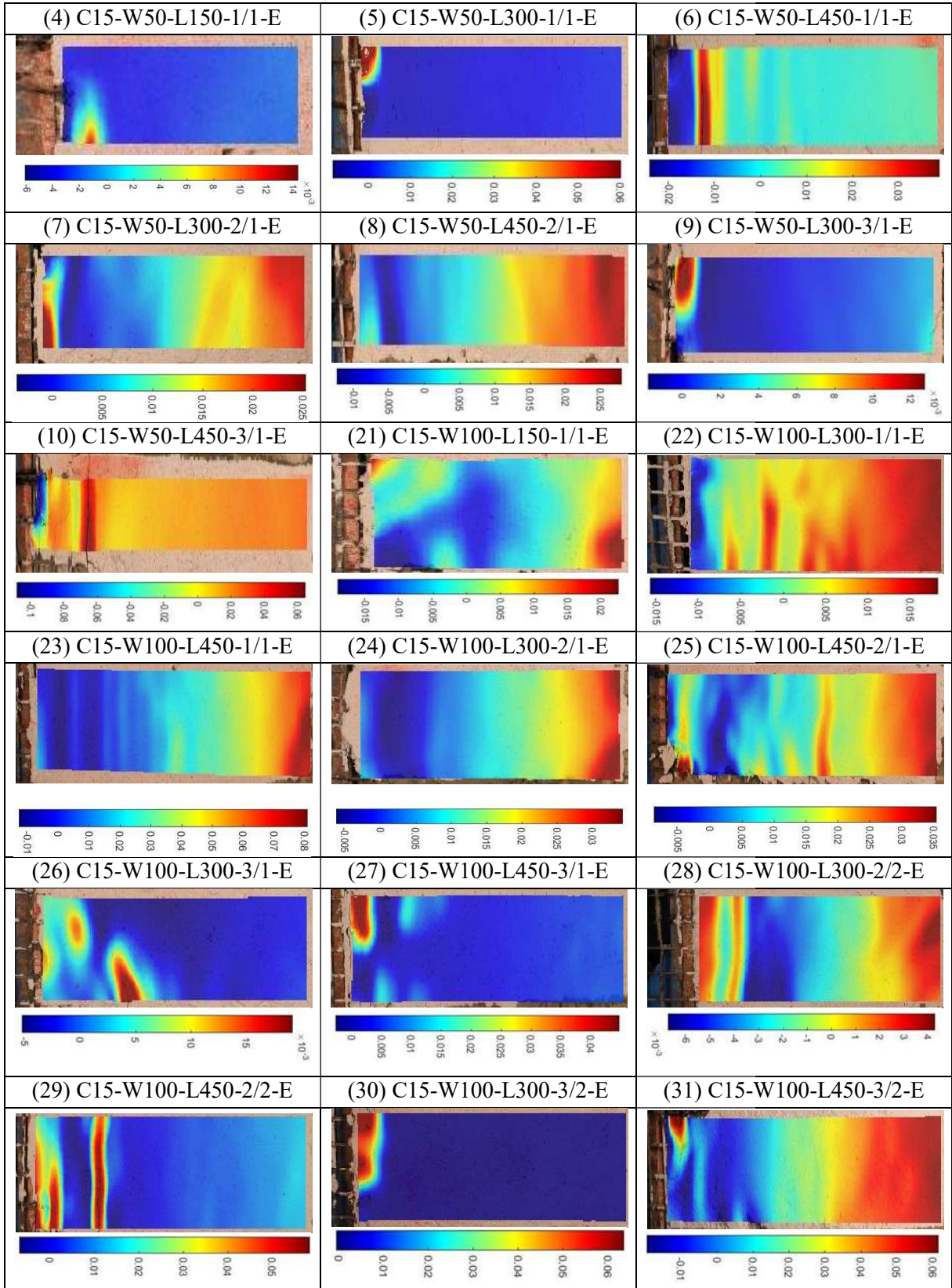
EK-13: C15-NA ORTAK BİRİM DEFORMASYON DAĞILIMLARI (ϵ_{xx})



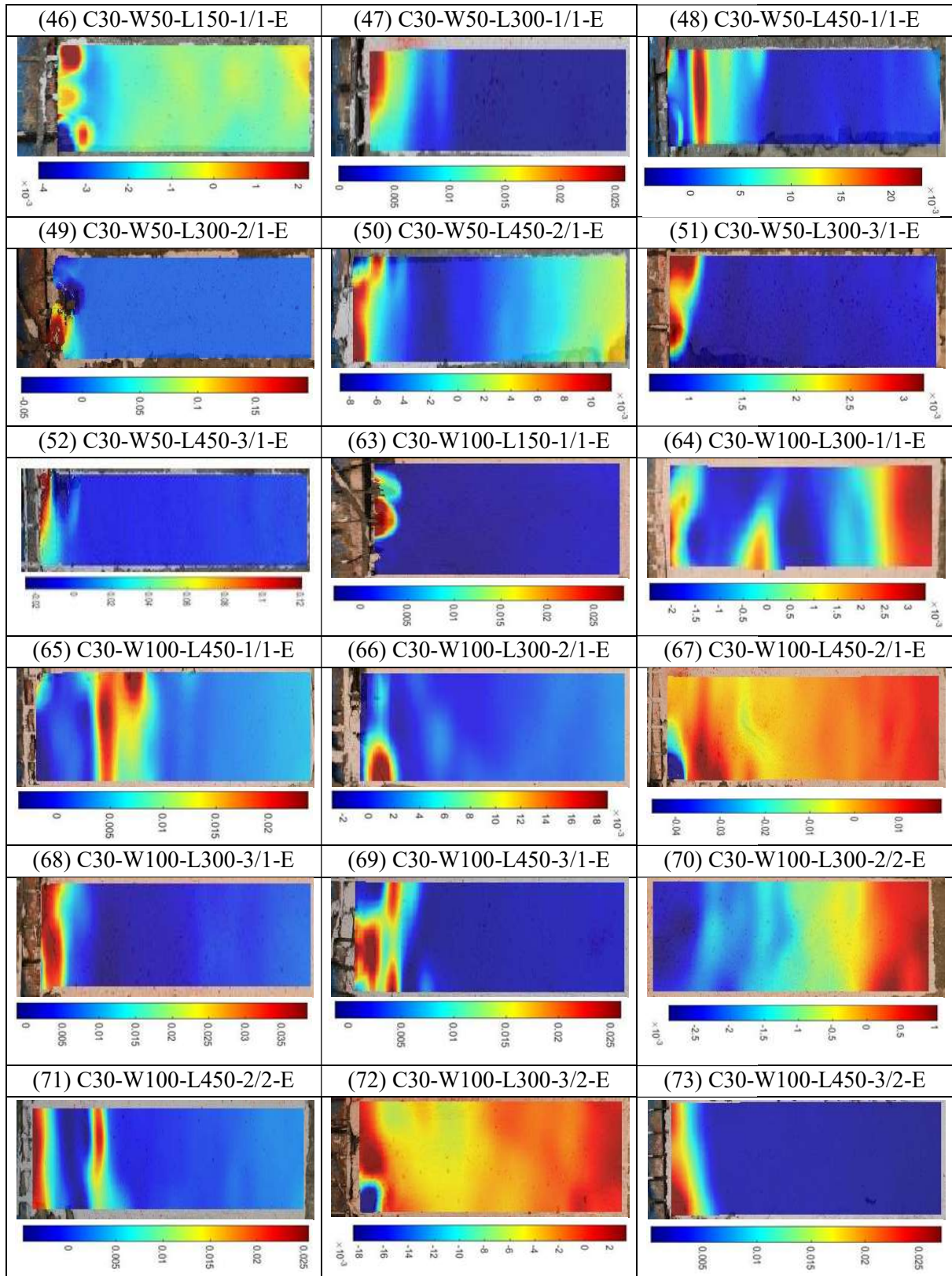
EK-14: C30-NA ORTAK BİRİM DEFORMASYON DAĞILIMLARI (ϵ_{xx})



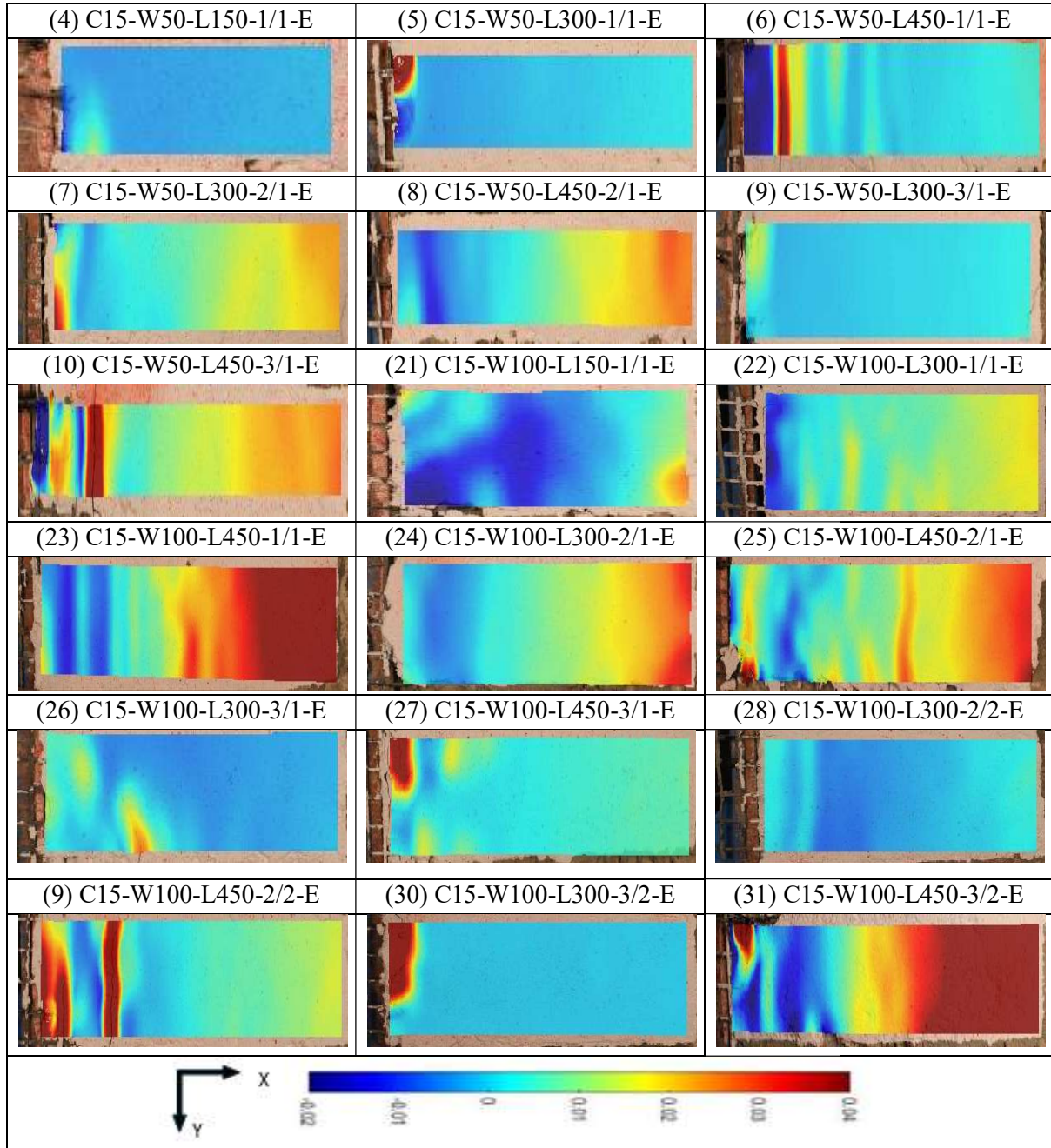
EK-15: C15-E BİRİM DEFORMASYON DAĞILIMLARI



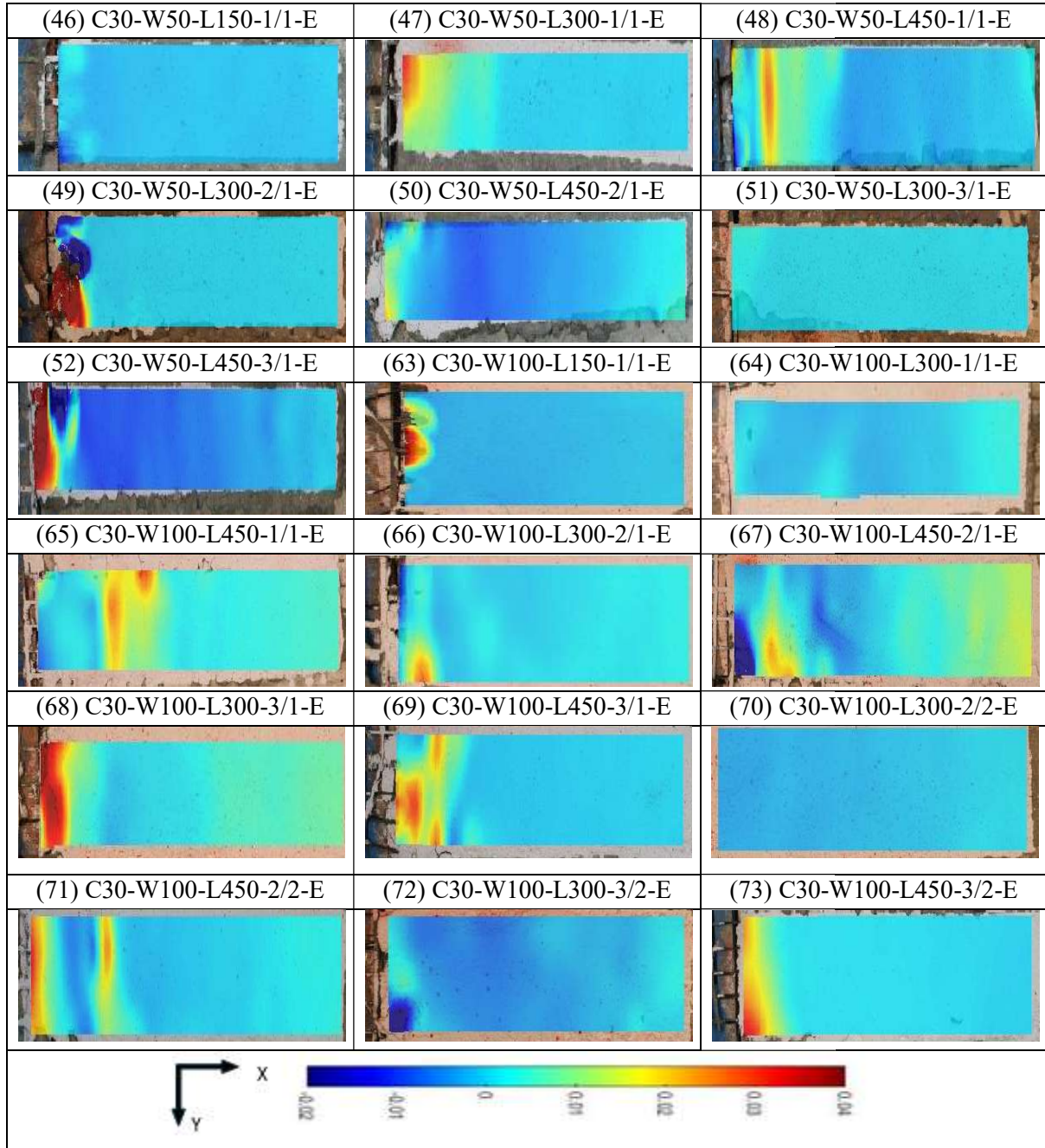
EK-16: C30-E BİRİM DEFORMASYON DAĞILIMLARI



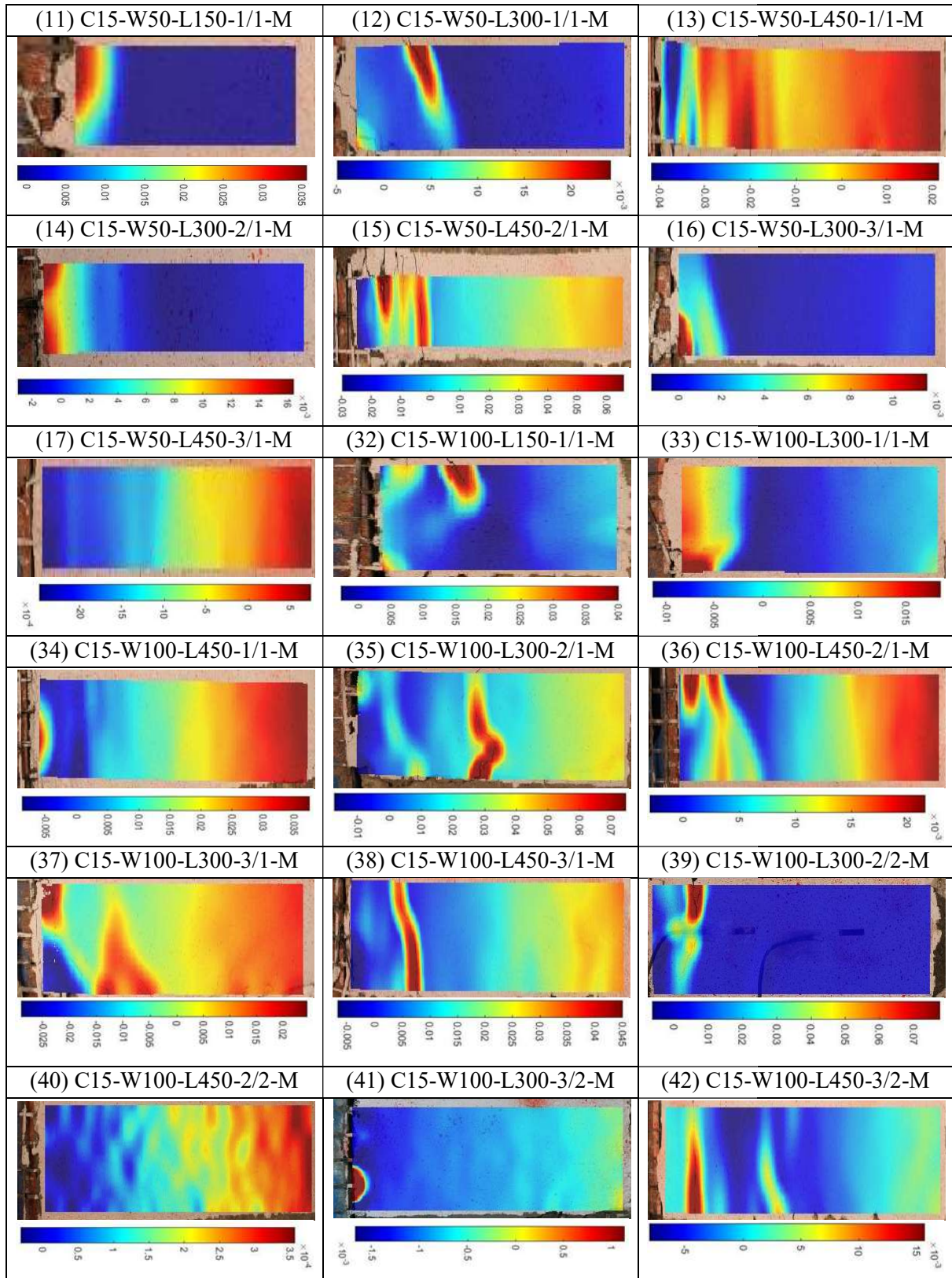
EK-17: C15-E ORTAK BİRİM DEFORMASYON DAĞILIMLARI (ϵ_{xx})



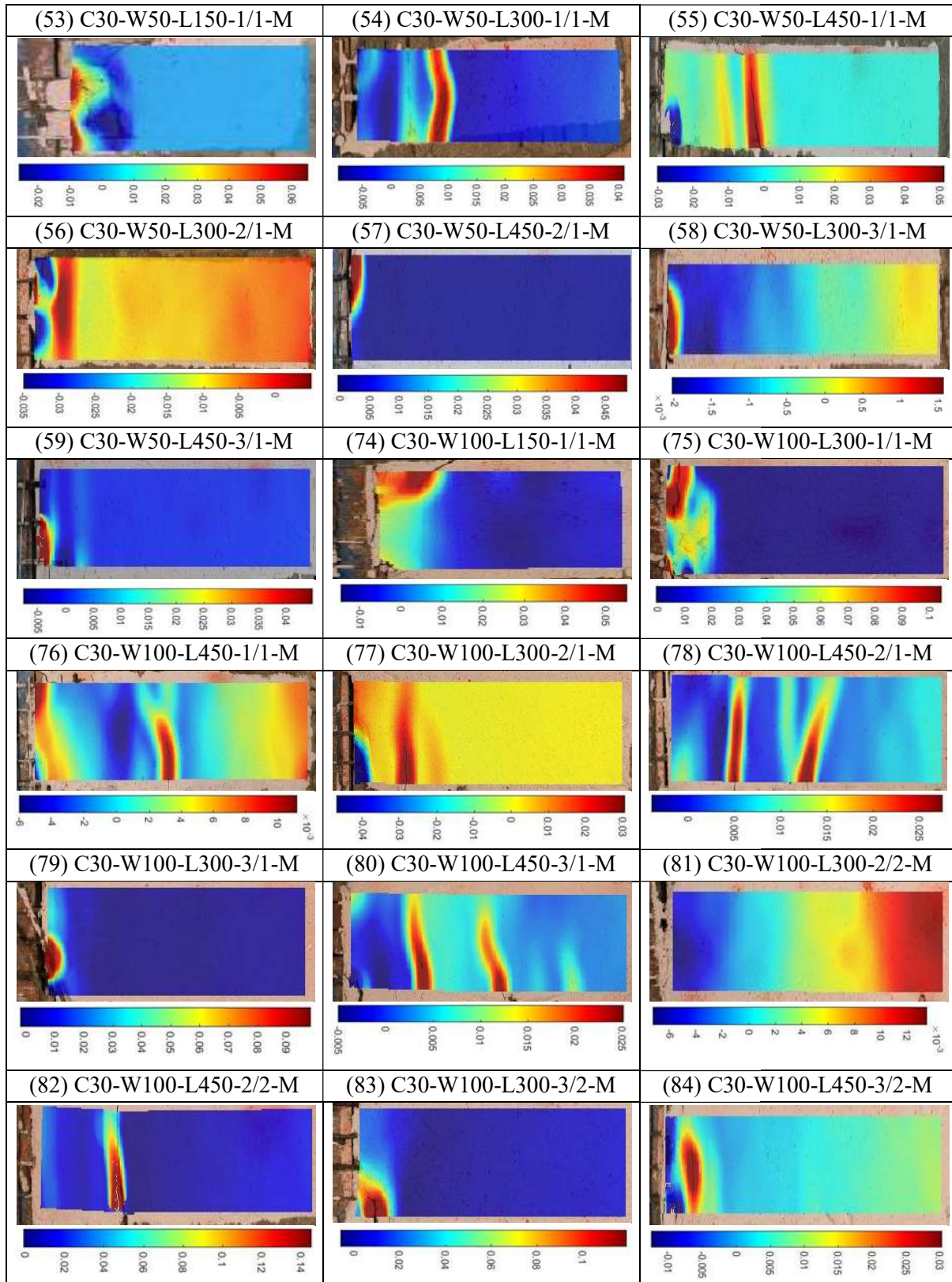
EK-18: C30-E ORTAK BİRİM DEFORMASYON DAĞILIMLARI (ϵ_{xx})



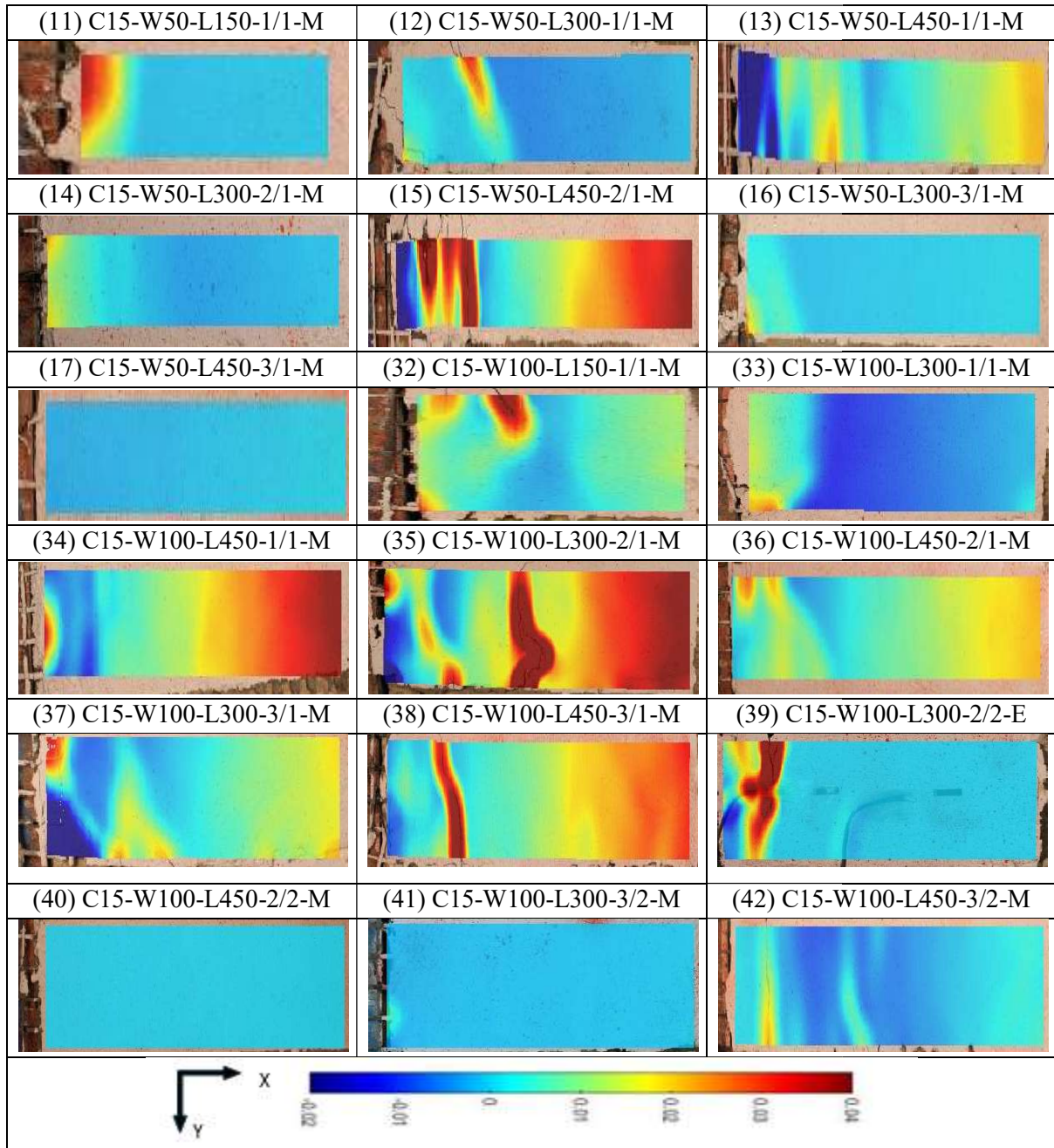
EK-19: C15-M BİRİM DEFORMASYON DAĞILIMLARI



EK-20: C30-M BİRİM DEFORMASYON DAĞILIMLARI



EK-21: C15-M ORTAK BİRİM DEFORMASYON DAĞILIMLARI (ϵ_{xx})



EK-22: C30-MORTAK BİRİM DEFORMASYON DAĞILIMLARI (ϵ_{xx})

