



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

LİFLİ POLİMER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME ELEMANLARIN
KAPASİTE TAHMİNİNE YÖNELİK AKILLI SİSTEM UYGULAMASI

Hüsna AÇIKEL ALTUNKARA

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hüsna AÇIKEL ALTUNKARA tarafından hazırlanan “Lifli Polimer ile Güçlendirilmiş Betonarme Elemanların Kapasite Tahminine Yönelik Akıllı Sistem Uygulaması” adlı tez çalışması 13/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Murat ÖZTÜRK
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Lokman GEMİ
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr.Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr.Üyesi Gamze DOĞAN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Hüsna AÇIKEL ALTUNKARA

Tarih:13.06.2024

ÖZET**DOKTORA TEZİ****LİFLİ POLİMER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME ELEMANLARIN
KAPASİTE TAHMİNİNE YÖNELİK AKILLI SİSTEM UYGULAMASI****Hüsna AÇIKEL ALTUNKARA****Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN****2024, 222 Sayfa****Jüri****Prof. Dr. Murat ÖZTÜRK
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Doç. Dr. Lokman GEMİ
Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ
Dr. Öğr. Üyesi Gamze DOĞAN**

Bir asırdır beton ve betonarme donatısının bir arada kullanılmasıyla kompozit bir malzeme olarak kullanılan betonarme, üstün özellikleri ile günümüzde çağdaş inşaat mühendisliği yaklaşımlarında da vazgeçilmez bir yapı malzemesi türüdür. Taşıyıcı sistem elemanlarında iç ve dış yükler etkisi altında zaman bağlı nedenlerin de etkisiyle ortaya çıkan tüm kesit zorları ve deformasyon talepleri için betonarmenin yeterli dayanım, süneklik ve rijitlikte olması bir yapı tasarımının olmazsa olmazıdır. Özellikle Türkiye gibi aktif deprem kuşağında bulunan bir ülke için bu zorunluluk yapı mühendisleri için daha da önemli bir hale gelmektedir. Günümüzde üretilen betonarme yapılarda; mimari kaygılardan, hesaplarda yapılan hatalardan, uygulama sırasında ortaya çıkan hatalardan, standarda aykırı malzemelerden, kullanıcı hatalarından ve zamana bağlı deformasyonlardan dolayı, taşıdığı yükler altında ve deprem durumunda ortaya çıkan kesit tesirleri altında (kesme, eğilme, burulma ve bunların kombinasyonları) hasar görmekte ya da toptan göçmektedirler. Bu gibi yapılar incelemeye alındığında çoğunlukla elemanların kesme açısından kritik bölgelerinde (kolon-kiriş bağlantı noktalarına yakın bölgelerde) kapasite açısından büyük sorun olduğu görülmektedir. Bu noktalardaki tam olarak alınamamış mühendislik hizmetlerinden ortaya çıkan yetersiz kesitler nedeniyle, deprem ve benzeri yükler altında hasarlar yapının bütününe olumsuz etkilemekte ve çoğunlukla böylesi yapıların güçlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde betonarme yapıların ve bileşenleri olan betonarme taşıyıcı elemanların yetersiz kapasiteleri için pek çok güçlendirme metodundan, son dönemlerde yaygın olarak teknik elemanlar tarafından tercih edilen “Lifli Polimerlerle Güçlendirme” metodudur. Zaten karmaşık bir yapıda olan beton ve betonarme davranışı ile ilgili birçok kabuller yapılmakta iken betonarmenin üzerine genellikle epoksi ile yapıştırılarak ve bazı durumlarda mekanik ankrajlarla sabitlenen lifli polimerlerin kesit kapasitesine yapacağı katkı günümüzde bilinmezliğini korumaktadır. Bu motivasyondan hareketle bu çalışmada, lifli polimerlerle güçlendirilmiş her türlü betonarme elemanın kapasite değerlerini büyük oranda tahmin edebilen akıllı sistem tabanlı bir yazılım uygulaması için son yirmi yılda yapılmış güncel tüm makaleler taranarak bir veri havuzu oluşturulmuştur. Bu bağlamda literatürdeki değişik amaçlar için yapılmış çok sayıda deney verisi derlenmiş ve gruplara

ayrılmış, her bir veri için farklı algoritmalar ile eleman kapasitelerinin tahminiyle ilgili fikir sahibi olunmuştur. Bu veri havuzunda; kesme, eğilme, burulma etkisi altındaki kirişlerin; kolon moment ve eksenel yük etkisi altındaki kolonların; eğilme ve zımbalama etkisi altındaki döşemelerin, eksenel yük etkisi altındaki perdelerin taşıma kapasiteleri ÇLR, Karar Ağacı, BaggingDt., Rassal Orman, SVR, XGBoost, AdaBoost, GradientBoost makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Kiriş kesme, döşeme eğilme, döşeme zımbalama mukavemeti çalışmasında en iyi tahmin sonucunu XG-Boost algoritması vermiştir. Kiriş burulma mukavemeti, kolon moment taşıma gücü, kolon yük taşıma gücü çalışmasında en iyi tahmin sonucunu Bagging-DT algoritması verirken, perde yük taşıma gücünde AdaBoost algoritması, kiriş eğilme kapasitesinin tahmininde ise DVR algoritması diğerlerine göre daha başarılı olmuştur. Elde edilen sonuçlar çalışılan elemanın tipi ve elde edilmek istenen dayanım özelliğine göre algoritmaların başarılarında değişkenlik olduğunu, incelenen çıkış verisine, veri grubunda ele alınan parametrelere, verilerin sayısına ve veri aralığına bağlı algoritma performansının değiştiğini de göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme Elemanlar, Güçlendirme, Lifli Polimer, Makine Öğrenmesi, Makine Öğrenmesi Algoritmaları.



ABSTRACT**PhD THESIS****SMART SYSTEM APPLICATION FOR CAPACITY ESTIMATION OF
REINFORCED CONCRETE ELEMENTS REINFORCED WITH FIBROUS
POLYMER****Hüsna AÇIKEL ALTUNKARA****Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering****Advisor: Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN****2024, 222 Pages****Jury****Prof. Dr. Murat ÖZTÜRK
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Assoc. Prof. Dr. Lokman GEMİ
Asst. Prof. Dr. Ali Serdar ECEMİŞ
Asst. Prof. Dr. Gamze DOĞAN**

Reinforced concrete, which has been used as a composite material by using concrete and reinforced concrete reinforcement together for a century, is now an indispensable type of building material in contemporary civil engineering approaches with its superior properties. It is essential for a building design that the reinforced concrete has sufficient strength, ductility and rigidity for all section forces and deformation demands that arise due to time-dependent reasons under the influence of internal and external loads in the load-bearing system elements. This obligation becomes even more important for structural engineers, especially for a country like Turkey, which is in an active earthquake zone. In reinforced concrete structures produced today, They are damaged or collapse altogether under their loads and under the cross-sectional effects that occur in the event of an earthquake (shearing, bending, torsion and their combinations) due to architectural concerns, mistakes made in calculations, errors occurring during application, non-standard materials, user errors and time-related deformation. When such structures are examined, it is seen that there is a major problem in terms of capacity in the critical areas of the elements in terms of shear (areas close to the column-beam connection points). Due to insufficient sections resulting from incomplete engineering services at these points, damages under earthquakes and similar loads negatively affect the entire structure and such structures often need to be strengthened. Today, among the many strengthening methods for the insufficient capacities of reinforced concrete structures and their components, the "Strengthening with Fibrous Polymers" method has been widely preferred by technical staff in recent years. While many assumptions are made regarding the behavior of concrete and reinforced concrete, which already have a complex structure, the contribution of fibrous polymers, which are generally bonded to reinforced concrete with epoxy and in some cases fixed with fibrous polymers or mechanical anchors, to the cross-section capacity remains unknown today. Based on this motivation, in this study, a data pool was created by scanning all current articles published in the last twenty years for an intelligent system-based software application that can largely predict the capacity values of all kinds of reinforced concrete elements reinforced with fibrous polymers. In this context, a large number of experimental data made for

different purposes in the literature were compiled and divided into groups, and an idea was obtained about the estimation of element capacities with different algorithms for each data. In this data pool, beams under the influence of shear, bending and torsion, Columns under the influence of column moment and axial load, The bearing capacities of slabs under the influence of bending and punching and of walls under the influence of axial load were estimated using MLR, Decision Tree, Bagging-Dt., Random Forest, SVR, XGBoost, AdaBoost, GradientBoost machine learning methods. The XG-Boost algorithm gave the best prediction results in beam shear, slab bending, and slab punching strength studies. While the Bagging-DT algorithm gave the best prediction result in the study of beam torsional strength, column moment carrying capacity and column load carrying capacity, the AdaBoost algorithm was more successful than the others in estimating the wall load carrying capacity and the DVR algorithm was more successful than the others in estimating the beam bending capacity. The results obtained also show that there is variability in the success of the algorithms depending on the type of element studied and the strength feature desired to be obtained, and that the performance of the algorithm varies depending on the output data examined, the parameters considered in the data group, the number of data and the data range.

Keywords: Reinforced Concrete Elements, Reinforcement, Fibrous Polymer, Machine Learning, Machine Learning Algorithms.



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında ve uygulanmasında değerli bilgilerini ve zamanını benden esirgemedi, sabırla verdiği sonsuz destekle bana her konuda yol gösteren, güler yüzünü ve samimiyetini benden esirgemeyen, sayesinde çalışmanın ve araştırmanın zevkine vardığım, kendisini her konuda kendime örnek aldığım saygı değer hocam Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN'a ve çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübelerini paylaşan, yol gösteren, her konuda yardımlarını esirgemeyen saygı değer hocam Dr. Öğr. Üyesi Gamze DOĞAN'a, tez konusunun belirlenmesi aşamasında, kompozit ile güçlendirme konusunda ve çalışma sürecindeki katkıları için sayın hocam Doç. Dr. Lokman GEMİ'ye teşekkür ederim. Hayatın her aşamasında olduğu gibi tez çalışmamda da en büyük destekçim aileme, en çok da annem Hicran AÇIKEL, babam Durmuş Ali AÇIKEL, ağabeyim Burak AÇIKEL'e sonsuz teşekkür ederim. Bedenen yanlarındayken ruhen hep çalıştığım süreçte, sabırla ve sevgiyle bana güç veren, her konuda destek olan sevgili eşim İsa ALTUNKARA ve çalışma sürecimde bize katılan sevgili oğlum Alp ALTUNKARA'ya çok teşekkür ederim.

Hüsna AÇIKEL ALTUNKARA
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	1
ABSTRACT.....	3
ÖNSÖZ	5
İÇİNDEKİLER.....	6
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	9
1. GİRİŞ.....	11
1.1. Çalışmanın Önemi	12
1.2. Çalışmanın Amacı.....	13
1.3. Çalışmanın Kapsamı	14
1.4. Çalışmanın Hipotezleri ve Araştırma Sorusu	15
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	16
2.1. Kirişlerde Lifli Polimer Malzemelerle Kesme Etkisine Karşı Güçlendirme Yapılması ile İlgili Kaynak Araştırması	16
2.2. Kirişlerde Lifli Polimer Malzemelerle Eğilme Etkisine Karşı Güçlendirme Yapılması İle İlgili Kaynak Araştırması	20
2.3. Kirişlerde Lifli Polimer malzemelerle Burulma Etkisine Karşı Güçlendirme Yapılması ile İlgili Kaynak Araştırması	23
2.4. Kolonlarda Lifli Polimer Malzemelerle Güçlendirme Yapılması İle İlgili Kaynak Araştırması	24
2.5. Perdelerde Lifli Polimer Malzemelerle Güçlendirme Yapılması İle İlgili Kaynak Araştırması	26
2.6. Döşemelerde Lifli Polimer malzemelerle Eğilme Etkisine Karşı Güçlendirme Yapılması ile İlgili Kaynak Araştırması	27
2.7. Döşemelerde Lifli Polimer malzemelerle Zımbalama Etkisine Karşı Güçlendirme Yapılması ile İlgili Kaynak Araştırması	27
2.8. Yapay Zekâ ile ilgili Yapılan Çalışmalar	28
3. LİFLİ POLİMERLERİN BETONARME ELEMANLARIN GÜÇLENDİRİLMESİNDE KULLANIMI	38
3.1. Lifli Polimer Nedir?.....	38
3.2. Lifli Polimer Malzemelerin Türleri ve Mekanik Özellikleri	40
3.3. Lifli Polimer Malzemelerin Uygulama Şekilleri	46
3.1.1. Kirişlerin lifli polimerlerle güçlendirilmesi	52
3.1.2. Kolonların ve perdelerin lifli polimerlerle güçlendirilmesi	52
3.1.3. Döşemelerin lifli polimerlerle güçlendirilmesi	53

4. LİFLİ POLİMERLER İLE BETONARME ELEMANLARIN GÜÇLENDİRİLMESİ İLE İLGİLİ YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMA ENVANTERİ	54
4.1. Kirişlerin Kesme Davranışı ile İlgili Yapılan Çalışma Özeti	54
4.2. Kirişlerin Eğilme Davranışı ile İlgili Yapılan Çalışma Özeti.....	57
4.3. Kirişlerin Burulma Davranışı ile İlgili Yapılan Çalışma Özeti	60
4.4. Kolonlar ile İlgili Yapılan Çalışma Özeti	62
4.5. Perdeler ile İlgili Yapılan Çalışma Özeti	65
4.6. Döşemelerin Zımbalama Davranışı ile İlgili Yapılan Çalışma Özeti	67
4.7. Döşemelerin Eğilme Davranışı ile İlgili Yapılan Çalışma Özeti.....	69
5. MAKİNE ÖĞRENMESİ TANIMI VE GELİŞİMİ.....	71
5.1. Makine Öğrenmesi Teknikleri	73
5.2. Makine Öğrenmesinde Tahmin Yöntemleri	74
5.2.1. Doğrusal Regresyon.....	75
5.2.2. Karar Ağacı Regresyonu.....	76
5.2.3. Destek Vektör Regresyonu (SVR).....	77
5.2.4. Rastgele Orman Algoritması	78
5.2.5. Torbalama (Bootstrap Toplama, Bagging)	79
5.2.6. Arttırma, Geliştirme (Boosting).....	80
5.2.6.1. Adaptive Boosting (AdaBoost).....	81
5.2.6.2. Gradient Boosting	81
5.2.6.3. Extreme Gradient Boosting (XGBoost).....	82
5.3. Algoritma Performans Değerlendirme Yöntemleri	82
6. MAKİNE ÖĞRENMESİ KULLANILARAK LİFLİ POLİMERLER İLE BETONARME ELEMANLARIN GÜÇLENDİRİLMESİ İLE İLGİLİ YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARININ TAHMİNİ	84
6.1. Makine Öğrenmesi Kullanılarak Lifli Polimerler (LP) ile Kirişlerin Kesme Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini	85
6.2. Makine Öğrenmesi Kullanılarak LP ile Kirişlerin Eğilme Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini.....	98
6.3. Makine Öğrenmesi Kullanılarak LP ile Kirişlerin Burulma Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini....	109
6.4. Makine Öğrenmesi Kullanılarak LP ile Döşemelerin Eğilme Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini....	119
6.5. Makine Öğrenmesi Kullanılarak Lifli Polimerler ile Döşemelerin Zımbalama Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini	129
6.6. Makine Öğrenmesi Kullanılarak LP ile Kolonların Moment Taşıma Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini	139
6.7. Makine Öğrenmesi Kullanılarak Lifli Polimerler ile Kolonların Normal Kuvvet Taşıma Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini	150

6.8. Makine Öğrenmesi Kullanılarak Lifli Polimerler ile Perdelerin Normal Kuvvet Taşıma Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini	161
6.9. Elde Edilen Analiz Sonuçlarının Yorumlanması ve Tartışma.....	171
7. SONUÇLAR.....	174
8. ÖNERİLER VE GELECEK ÇALIŞMALAR	177
9. KAYNAKLAR	178
10. EKLER	196



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

b	: Kesit genişliği
d	: Kesit yüksekliği
E_f	: Lifli polimer elastisite modülü
f_1	: Lifli polimer sargısından kaynaklanan etkili yanıl basınç
f_c	: Beton basınç dayanımı
f_{cc}	: Sargılı betonun basınç dayanımı
f_{cm}	: Sarılmamış betonun mevcut basınç dayanımı
f_y	: Donatı çekme dayanımı
L	: Eleman uzunluğu
H	: Perde yüksekliği
K_a	: Kesit şekil etkinlik katsayısı
M_r	: Moment taşıma gücü
n	: Veri örneklerinin sayısı
N/N_0	: Eksenel yük seviyesi
t_f	: Lifli polimer sargı kalınlığı
P	: Yük taşıma kapasitesi
r	: Kolon köşesi yuvarlama yarıçapı
s_f	: Lifli polimer sargılar arası uzaklık
β	: Kiriş köşesi yuvarlama açısı
V	: Kesme taşıma yükü
w_f	: Lifli polimer sargı genişliği
y	: Gerçek değer
y'	: Tahmin edilen değer
y_{ort}	: Gerçek ortalama değer
ρ_l	: Boyuna donatı oranı
ρ_s	: Enine donatı oranı
ρ_f	: Lifli polimer hacimsel oranı
ε_f	: Lifli polimer çekme dayanımı

Kısaltmalar

ABYYHY	: Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
AFRP	: Aramid Elyaf Takviyeli Polimer
ACI 440.2R-17	: Amerikan Beton Enstitüsü.
BFRP	: Bazalt Elyaf Takviyeli Polimer
CANN	: Birleşik Yapay Sinir Ağları
CFRP	: Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
ÇLR	: Çoklu Lineer Regresyon
FFNN	: İleri Beslemeli Sinir Ağları
FRCM	: Çimento Takviyeli Matris
FRP	: Elyaf Takviyeli Polimer (Lifli Polimer)
DT	: Karar Ağacı
GFRP	: Cam Elyaf Takviyeli Polimer
GP	: Genetik Proglamlama
MAE	: Ortalama Mutlak Hata
MATLAB	: Matris Laboratuvarı
NF	: Nöro-Bulanık
PSO	: Parçacık Sürüşü Optimizasyonu
RF	: Rastgele Orman
R2	: R-Kare Puanı
RMSE	: Ortalama Karesel Hatanın Kökü
SVR	: Destek Vektör Regresyonu
SR	: Aşamalı Regresyon
TBDY-2018	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
XGBoost	: Ekstrem Gradyan Artırma
YSA	: Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

Bir asırdır beton ve betonarme donatısının bir arada kullanılmasıyla kompozit bir malzeme olarak kullanılan betonarme, üstün özellikleri ile günümüzde çağdaş inşaat mühendisliği yaklaşımlarında da vazgeçilmez bir yapı malzemesi türüdür.

Taşıyıcı sistem elemanlarında iç ve dış yükler etkisi altında zaman bağlı nedenlerinde etkisiyle ortaya çıkan tüm kesit zorları ve deformasyon talepleri için betonarmenin yeterli dayanım, süneklik ve rijitlikte olması bir yapı tasarımının olmazsa olmazlarındadır. Özellikle Türkiye gibi aktif deprem kuşağında bulunan bir ülke için bu zorunluluk yapı mühendisleri için daha da önemli bir hale gelmektedir.

Betonarme yapılar kompakt yapılardır ve genellikle bir döküm olarak üretilirler. Bu sebeple betonarme yapıyı meydana getiren taşıyıcı elemanlarında birçok kesit tesiri (Normal Kuvvet, Kesme Kuvveti, Eğilme Momenti, Burulma Momenti vs.) bir arada bulunur. Kesit tesirlerinin kombine etki ettiği betonarme elemanların hesaplanması da oldukça zahmetli bir süreç gerektirmektedir. Bununla beraber zaten yapı malzemesi olarak kompozit bir malzeme olmasından dolayı oldukça fazla kabul ile davranışın tespit edilmeye çalışıldığı betonarme elemanlarda kesit zorlarının da karmaşık olması bu durumu çoğu zaman mühendislik açısından zor bir problem haline getirmektedir.

Günümüzde üretilen betonarme yapılarda; mimari kaygılardan, hesaplarda yapılan hatalardan, uygulama sırasında ortaya çıkan hatalardan, standarda aykırı malzemelerden, kullanıcı hatalarından ve zamana bağlı deformasyondan dolayı yükleri altında ve deprem durumunda ortaya çıkan kesit tesirleri altında (kesme, eğilme, burulma ve bunların kombinasyonları) hasar görmekte ya da toptan göçmektedirler. Bu gibi yapılar incelemeye alındığında çoğunlukla elemanların kesme açısından kritik bölgelerinde (kolon-kiriş bağlantı noktalarına yakın bölgelerde) kapasite açısından büyük sorun olduğu görülmektedir. Bu noktalardaki tam olarak alınamamış mühendislik hizmetlerinden ortaya çıkan yetersiz kesitler nedeniyle, deprem ve benzeri yükler altında hasarlar yapının bütününe olumsuz etkilemekte ve çoğunlukla böylesi yapıların güçlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Günümüzde betonarme yapıların ve bileşenleri olan betonarme taşıyıcı elemanların yetersiz kapasiteleri için pek çok güçlendirme metodu vardır. Bunlardan biri de son dönemlerde yaygın olarak teknik elemanlar tarafından tercih edilen “Lifli Polimerlerle Güçlendirme” metodudur. Zaten karmaşık bir yapıda olan beton ve

betonarme davranışı ile ilgili birçok kabuller yapılmakta iken betonarmenin üzerine genellikle epoksi ile yapıştırılarak ve bazı durumlarda da lifli polimer ya da mekanik ankrajlarla sabitlenen lifli polimerlerin kesit kapasitesine yapacağı katkı günümüzde bilinmezliğini korumaktadır. Bu bilinmezlikten kaynaklı yönetmeliklerdeki çok tutucu yaklaşımlar çoğu zaman bu malzemelerin kullanım ve uygulama maliyetlerini de artırmaktadır. Burada tasarım mühendisinin yorum yapmasını kolaylaştıracak, deneylere bağlı elde edilmiş, sürekli kalibre edilebilen hızlı çözüme ulaşan, ekonomik ve rasyonel bir çözüm önerilmesi günümüz şartlarında ekonomik tasarım ilkeleri bağlamında oldukça önemli bir konudur. Mühendislik problemlerin çözümünde sıklıkla tercih edilen akıllı sistemlerin bu probleme uygulanması ve bununla ilgili bir yazılımın geliştirilebilmesi bu tez kapsamında asıl merak edilen husus olmaktadır.

Bu motivasyondan hareketle bu çalışmada lifli polimerlerle güçlendirilmiş her türlü betonarme elemanın kapasite değerlerini büyük oranda tahmin edebilen akıllı sistem tabanlı bir yazılım uygulaması yapılmak istenmektedir. Bu bağlamda literatürdeki değişik amaçlar için yapılmış çok sayıda deney verisi derlenmiş ve gruplara ayrılmış, her bir veri için farklı algoritmalar ile eleman kapasitelerinin tahmininde bulunulmuştur.

1.1. Çalışmanın Önemi

Türkiye’de özellikle 1998 deprem yönetmeliği (ABYYHY-1998) ve 1999 Büyük Marmara depreminden (M_w 7.2) önce yapılmış yeterli mühendislik hizmeti alamamış betonarme binaların güçlendirilebilecek olanlarının ayıklanarak bunların içlerinden lifli polimerle güçlendirilebilecek olanların tespit edilmesi, özellikle gelecekte yaşanılacak olan depremlere daha hızlı hazırlanabilmek için oldukça önemlidir.

Türkiye’de beş yılda bir ortalama bir ya da iki kez olan 6 ve üzeri büyüklüğünde depremlerle binaların yıkılması ancak yapılacak olası güçlendirmelerle önlenerek can ve mal kayıplarının önüne geçilebilir. Ayrıca yapıların inşaatı aşamasında yapılacak bölgesel hataların yine lifli polimerlerle doğru şekilde güçlendirilmesi sağlanarak inşaat sektörüne katkı sağlanabilir.

6 Şubat 2023 tarihinde Pazarcık ve Elbistan merkezli M_w 7.7 ve M_w 7.6 büyüklüğündeki depremler 11 ilde büyük felakete yol açmış ve çok büyük can ve mal kaybına neden olmuştur. Eski tarihli tasarlanmış ve imal edilmiş yapı stokunun yoğun olduğu Hatay’da en çok etkilenen illerden olmuştur. 2008 yılında Antakya’da bulunan bir

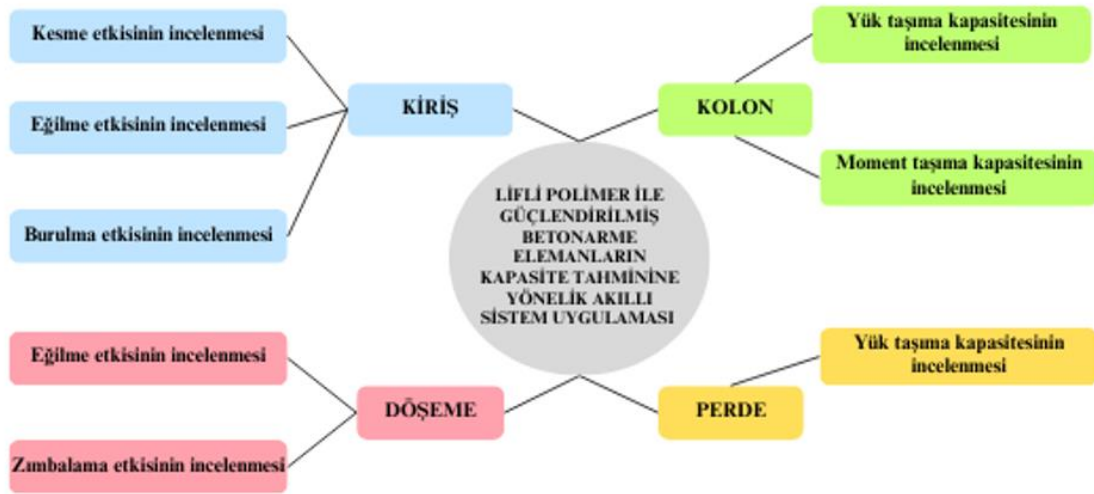
betonarme binanın duvarlarının karbon lifli polimer kullanılarak güçlendirmesi ve bu binaya özdeş komşu blokları depremde yıkılırken bu binanın ayakta kalması, lifli polimerin doğru uygulanması durumunda yapısal performansı önemli ölçüde artıracağının da bir kanıtı olmuştur.

Son depremlerde görülmüştür ki, ülkemizde yeni yapıların depreme dayanıklı tasarlanması ve üretilmesinin yanında, mevcut riskli yapıların da deprem güvenliğinin sağlanması oldukça önemlidir. Ancak riskli binaların yıkılarak yeniden yapılması; zaman, yapıyı kullanan insanlar, ekonomik durum açısından pek elverişli değildir. Bu nedenle kompozit malzemeler ve farklı teknikler kullanılarak yapılan bina güçlendirmeleri yaygınlık kazanmıştır. İnsanların evlerini boşaltmalarına gerek kalmadan güvenli, kolay ve hızlı güçlendirme uygulamalarının gerçekleştirilmesi için yeni teknolojilerden yararlanma gereği ortaya çıkmıştır.

Özellikle lifli polimer uygulamaları ile kabul görmüş deneysel çalışmalara ait veri havuzundan çeşitli akıllı sistem uygulamaları en uygun taşıma gücü tahminini veren algoritmalar bulunup araştırmacılara yol gösterici bir çalışma olması açısından büyük önem taşımaktadır.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, lifli polimerlerle güçlendirilmiş her türlü betonarme elemanın kapasite değerlerini büyük oranda tahmin edebilen akıllı sistem tabanlı bir yazılım uygulaması yapılmak istenmektedir. Bunun için son yirmi yılda yapılmış güncel tüm makaleler bu tez kapsamında taranarak çok geniş bir veri havuzu oluşturulacaktır. Bu veri havuzunda kiriş, kolon, perde, döşeme gibi tüm taşıyıcı sistem elemanlarının lifli polimerler ile güçlendirilmesi ile ilgili yapılmış kesme, bileşik eğilme, eğilme, burulma, zımbalama vs. gibi veriler bulunacaktır (Şekil 1.1). Bu veriler gruplandırılacak ve sistematik bir şekilde ayrıştırılarak veri setleri oluşturulacaktır. Yapılan literatür taraması ve veri setinin oluşturulmasına müteakip çeşitli akıllı sistem uygulamaları bu veriler üzerinde test edilecek ve en iyi sonucu veren algoritmalar kullanılarak, tasarımcıların kullanabileceği en iyi algoritma tahmin modeli belirlenmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 1.1. Yapılan çalışmanın genel gösterimi

1.3. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada öncelikle kapsamlı bir literatür taraması yapılmış lifli polimerlerle güçlendirilmiş her türlü betonarme elemanın verilere göre parametreleri ayarlanarak ardından farklı makine öğrenmesi tekniğinde ilgili algoritmalar kullanılarak taşıyıcı elemanların mukavemet değerlerine göre tahminde bulunulacaktır. Bu tez çalışmasında Basit-Çoklu Doğrusal Regresyon, Karar Ağacı, Rastgele Orman ve Destek Vektör Regresyon, Extreme Gradient Boosting (XGBoost), ADABOOST, BaggingDT modelleri ele alınacaktır (Şekil 1.2). Algoritmalar arasında en iyi tahmin sonuçlarını verenler üzerinde durularak en iyi tahmin yöntemi ortaya çıkarılacaktır.



Şekil 1.2. Kapasite tahmininde kullanılan algoritmalar

1.4. Çalışmanın Hipotezleri ve Araştırma Sorusu

Çalışmanın temel hipotezi makine öğrenmesi tekniklerinin her türlü lifli polimer güçlendirmesinde ortaya çıkan yeni kapasiteyi doğru olarak tahmin edebileceği üzerine kurulmuştur. Ayrıca bir diğer hipotez ise her bir problem için farklı makine öğrenmesinin üstün olabileceğidir. Bu hipotezlerin gerçekleştirilmesi için literatürde sıklıkla kullanılan pek çok makine öğrenmesi problemler üzerinde test edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Betonarme elemanların oldukça farklı kesit zorları altında lifli polimer (FRP) ile güçlendirmesi ile ilgili literatürde pek çok deneysel çalışma yapılmıştır. Bu bölümde ilgili araştırmalar gruplandırılarak verilmiştir. Ayrıca literatürde bu konu üzerinde yapay zekâ kullanımını içeren çalışmalar için de ayrı bir alt başlık açılmıştır.

2.1. Kirişlerde Lifli Polimer Malzemelerle Kesme Etkisine Karşı Güçlendirme Yapılması ile İlgili Kaynak Araştırması

Zhang ve diğ. (2005) tarafından, kayma donatısı olmadan hazırlanan; 5 tanesi 1,22 m uzunluğunda, 6 tanesi 1,83 m uzunluğunda 11 tane kiriş 28 gün kür odasında bekletildikten sonra karbon fiber şeritler ile takviyesi yapılmıştır. Testler sonucunda CFRP (Karbon lifli polimer) sistemi, bir beton kirişin servis verilebilirliğini, sünekliğini ve nihai kayma gücünü önemli ölçüde artırabilir. Bu nedenle, CFRP kullanarak kiriş kayma dayanımını eski haline getirmek oldukça etkili bir tekniktir sonucuna varılmıştır.

Al-Amery ve Al-Mahaidi (2006), tarafından yapılan çalışmada, betonarme kirişlerin bileşik kesme-eğilme güçlendirilmesini araştırılmıştır. Araştırma sonucuna göre, kesme dayanımını geliştirmek için kullanılan kesme bağlarının eğilme karşı güçlendirme için kullanılan CFRP kumaşların sıyrılarak atmasını geciktiren bir etkisi olduğu görülmüştür. Çalışmada farklı kombinasyonlarda CFRP kumaş ve bağlara sahip altı betonarme kiriş test edilmiştir. Test sonuçları ve gözlemler, CFRP bağların ve kumaşların bileşimine bağlı olarak kiriş dayanımında önemli ölçülerde artış yaşandığını göstermiştir. CFRP bağların kullanılması beton kirişin kesme dayanımını geliştirmiş ve çelik etriyelerle birleşik bir tutum sergileyerek kesme dayanımına katkıda bulunmuştur. CFRP bağların kullanımı; CFRP kumaşlar ekstra bir ankraj sistemi sağlayarak sıyrılarak kopma kusurunun meydana gelmesini engellemiştir, ayrıca beton ile CFRP kumaşlar arasındaki ara yüzey kaymasını önemli ölçüde azaltmıştır. CFRP kumaşları ankrajlamak için CFRP bağların kullanıldığı durumda eğilme dayanımında %95'e varan bir artış yaşanmıştır. Buna rağmen CFRP kumaşların yalnız başına kullanımında ancak %15 düzeyinde bir artış elde edilebilmiştir.

Mosallam ve Banerjee (2007), gerçekleştirdikleri çalışmada, FRP kompozitlerle haricen güçlendirilen betonarme kirişlerin kesme dayanımı gelişimini incelemişlerdir.

Çalışma sonuçları, onarılan ve güçlendirilen kirişlerin, olduğu şekilde kullanılan kirişlere ve ön çatlak oluşturulmuş kirişlere göre nihai dayanımlarında önemli derecede bir artış olduğunu göstermiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda; kesme açıklığı/derinlik (a/d) oranının, kirişin kesme göçme modunu ve kesme dayanımı gelişimini aktif olarak kontrol eden önemli bir faktör olduğu sonucuna varılmıştır.

Jayaprakash ve diğ. (2008), yaptıkları uygulamada dikdörtgen kesitli kesme kirişlerinin çift yönlü CFRP kompozitlerle kesme güçlendirme kapasitelerini ve göçme modlarını çalışmışlardır. Kontrol kirişine nazaran CFRP ile güçlendirilen kirişlerdeki kesme gelişiminde %11'den %139'a varan iyileşmeler elde etmişlerdir. Yapılan çalışma CFRP şerit tekniğinin, betonarme kesme kirişlerinin kesme kapasitelerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Deneysel incelemeden, çalışmada uygulanan CFRP şerit yaklaşımının yalnızca ön çatlakla sahip onarılmış veya önceden güçlendirilmiş kirişlerin dayanımını artırmadığı, buna ilaveten şeritlerin beton katmanından sıyrılmasını da kontrol ettiği sonucu çıkarılmıştır. Çalışmada CFRP şerit tekniğinin betonarme kirişlerin onarımında daha etkin ve ekonomik olduğuna dikkat çekilmiştir. Bu tekniğin, dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin kesme kapasitelerine katkı sağladığı görülmüştür. CFRP şeritlerin dâhili çelik etriyelere benzer şekilde kesme güçlendirmesinde bulunduğu gözlenmiştir. Dikey ekseninde $45/135^\circ$ eğimli CFRP şeritlere (L-şeritler) sahip numunelerin $0/90^\circ$ eğimli CFRP şeritlere (U-şerit) sahip numunelere nazaran daha düşük bir çatlak dağılımına ve yayılımına sahip olduğu bulunmuştur. Yine bu ekseninde $45/135^\circ$ eğimli CFRP şeritlere (L şeritler) sahip numunelerin, kesme kapasitesinin $0/90^\circ$ eğimli CFRP şeritlere (U-şerit) sahip numunelere göre, maksimum %42 daha büyük olduğu belirtilmiştir. CFRP şeritlerin ara mesafesindeki azalmayla birlikte CFRP ile güçlendirilmiş numunelerin rijitliğinde artış yaşanmıştır.

Sundarraja ve Rajamohan (2009) tarafından epoksi ile kirişin etrafına yapıştırılmış eğimli GFRP (Cam lifli polimer) şeritlerin betonarme kirişlerin kesme dayanımının güçlendirilmesindeki rolü araştırılmıştır. GFRP şeritlerin kesmeye karşı yetersiz kirişlerde kullanılmasıyla birlikte ilk çatlak yükleri kontrol kirişlerine göre daha büyük yüklerde gerçekleşmiştir. Bu durumda yapıların kesmeye karşı güçlendirilmesinde GFRP şeritlerin kullanılmasının daha etkili olacağını göstermiştir. Kirişlerin nihai dayanımının da eğimli GFRP şeritlerin kullanılmasıyla artırılabilceği saptanmıştır. Eğimli GFRP şeritlerin varlığı kirişte meydana gelebilecek diyagonal çatlakların gelişimini engellemiştir. Güçlendirilmiş kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin kontrol numunelerine

göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Böylece haricen yapıştırılan FRP'lerin daha çok yük almaya yardımcı olacağı belirtilmiştir. Araştırmaya göre; eğimli FRP şeritler kullanılarak kirişlerin kesme dayanımlarının restore edilmesi veya yükseltilmesi, kesme dayanımı ve rijitlikte yükselişe neden olurken, kesme çatlaklarında önemli bir azalmaya neden olmaktadır. GFRP ile kirişlerin kesme dayanımının restore edilmesinin oldukça etkin bir teknik olduğu vurgulanmıştır.

İbrahim M. ve diğ. (2009) tarafından yapılan çalışmada, yüzeye yakın monte edilmiş (hibrit karbon / cam FRP şeritlerin betonarme dikdörtgen derin kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinin etkinliğini araştırılmıştır. Spesifik bir odak noktası, FRP'nin, farklı konfigürasyonlarda düzenlenmiş çelik donatılar ile etkileşimiydi. Beş güçlendirilmemiş referans kiriş ve yedi güçlendirilmiş kiriş test edilmiştir. NSM-FRP, kiriş kesme dayanımını %55.8'e kadar artırdı, beton ile güçlendirici malzeme arasındaki bağ açmayı azaltmıştır ve güçlendirilmiş kirişlerin deformasyon özelliklerini geliştirmiştir. FRP/çelik donatı etkileşimi ayrıca NSM FRP'nin kirişlerin kesme dayanımına katkısını da etkilemiştir. Sonuç olarak FRP'nin betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde etkili olduğu görülmüştür.

Baggio ve diğ. (2014) betonarme kirişlerin, kesme kapasitelerindeki artış üzerindeki FRP uygulamalarının etkisini çalışmıştır. Bu amaçla kesme yetersizliği olan narin betonarme kiriş numuneleri hazırlanarak deneye tabi tutulmuştur. Güçlendirme işlemlerinde üç farklı FRP malzemesi (CFRP, GFRP ve FRCM (çimento takviyeli matris)) ile iki farklı ankraj malzemesi (CFRP ve GFRP) kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, FRP güçlendirme uygulamasının kesme kapasitesinde yükselmeye sebep olduğu görülmüştür. Kiriş yüksekliğinin tamamının etkin olarak kullanıldığı (350 mm) numunelerdeki kesme kapasitesi artışının. (%50), kiriş yüksekliğinin belli bir oranına kadar kullanıldığı (300 mm) numunelere göre (%36) daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca FRP ankraj sistemi uygulamasının; hem kesme kapasitesini (%67), hem de göçme durumundaki düktiliteyi artırdığı ve FRP'nin beton yüzeyinden ayrılışını geciktirdiği gözlemlenmiştir. U-şeklinde FRP uygulamasının kesme bölgesinde göçme şeklindeki göçme davranışını eğilmede göçme davranışına çevirdiği belirlenmiştir. Akroush ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada; CFRP tabakaları ile güçlendirilmiş 8 sürekli betonarme kiriş, kesme gerilmesi açısından test edildi. Bu testlerin sonucu, CFRP levhaların kullanılmasının, gerilmemiş kirişe kıyasla kesme mukavemetini %21-47 oranında artırdığını göstermiştir.

Arabacı (2018) tarafından yapılan çalışmada betonarme kirişler çelik levhalarla güçlendirilmiş, kirişlerin dayanımındaki değişim incelenmiştir. Bir referans, 4 tanesi 3 mm, 4 tanesi 6 mm kalınlıktaki çelik plakalar kullanılmak üzere toplamda 9 adet kiriş üretilmiştir. Çelik plakalar bu iki grup numuneden birer tanesine epoksi ile kiriş açıklığına uygulanmıştır. Birer tanesine U şeklinde uygulama yapılmış ve diğer kirişlerde uygulamaya ek olarak uç kısımlara bulon yerleştirilmiştir. Levha uçlarında kayma gerilmeleri olduğundan uygulanan yükün artışıyla çelik levha ve kiriş arasındaki bağlantı kopmaktadır. Bulon uygulaması bu gerilmeler için kirişin yük taşıma kapasitesini ve rijitliğini artırmıştır. Numunelere yer değiştirme kontrollü yükleme yapılmış, deplasmanlar kaydedilmiştir. Levha kalınlığındaki artış ve uygulamanın bulonlarla desteklenmesi kirişin sünekliğine ve yük taşıma kapasitesine önemli ölçüde katkı sağlamıştır.

Oruç (2019) tarafından yapılan çalışmadan kesmeye karşı yetersiz 2 adet referans olmak üzere toplam 6 tane betonarme kiriş imal edilmiş, hazırlanan numuneler yarı statik yükleme ve dinamik ölçüm olmak üzere iki aşamada test edilmiştir. Numunelerde CFRP uygulamasında 50 mm, 100 mm, 150 mm 200 mm olmak üzere 4 farklı şerit aralığı tayin edilmiştir. Deneysel çalışmanın sonucuna göre şerit aralıklarının, güçlendirme yapılan kirişlerde kesme dayanımı ve sünekliğe katkısını oldukça etkilediği gözlemlenmiştir. Şerit aralığı değeri azaldıkça kiriş numunelerin dinamik özelliklerinin olumlu etkilendiği görülmüştür.

Aksoylu (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, kesmeye karşı yetersiz 11 adet kiriş hazırlanmış, kirişlerin kesme açıklığında delik çapı/kiriş yüksekliği oranı 0.30, 0.44, 0.64 olan delikler oluşturulmuştur. Hazırlanan kirişler düşey yükle test edilmiştir. Bu numunelerden 0.30 oranında boşlukla hazırlanan kirişin yük taşıma kapasitesinde azalma olmuş ve kirişin sünekliği artmıştır. Delik çapının artışıyla yük taşıma kapasiteleri önemli ölçüde azalmıştır. CFRP ile bu kirişlerin yük taşıma kapasitesi ve sünekliği büyük oranda iyileştirilmiştir. Deney sonunda güçlendirme yöntemi ve oluşturulan delik çaplarının, güçlendirme üzerinde önemli parametreler olduğu görülmüştür. d/h oranı 0.64 olan kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan yöntemlerin hiçbiri başarılı sonuç vermemiştir.

Aksoylu (2022) çalışmasında kesme yönünden yetersiz 12 adet 100x150x1000mm boyutlarındaki ön hasarsız betonarme kirişleri CFRP ve GFRP şeritlerle farklı konfigürasyonlarla güçlendirmiştir. Çalışmada, literatür açısından 11 minimum olan CFRP ve GFRP şerit genişliği (30mm) dikkate alınarak deneyler

gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, minimum CFRP ve GFRP şerit genişliğinin, tam sarma, U-sarma ve U-sarma + boyuna şerit yapıştırma ile güçlendirilmiş betonarme kesme kirişlerin davranışları üzerindeki etkisine odaklanmaktadır. Kesme kırılmasına karşı uygulanan tam sarma şeritler, numunelerin yük taşıma kapasitesini %53-%63 aralık oranında artırmıştır. Tam sarma en iyi güçlendirme seçimi olmasına rağmen hem CFRP hem de GFRP yapıştırmanın U-sargısı ve U-sargısı+boyuna şeritleri, referans kesme numunesine kıyasla kesme kapasitesini %53~75 oranında artırmıştır. Süneklik açısından en iyi sonuç, kirişinin tamamen GFRP sarılı olduğu (S5 numunesi) güçlendirme tipi ile elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ayrıca ACI440.2R-17, TBEC-2019 ve FIB-2001 tarafından analitik olarak verilen formüllerle karşılaştırılmıştır. Özellikle U-sargılı kirişlerde FIB tahmini %81 olarak belirlenmiştir. Diğer kodların tahminleri deneysel sonuçları karşılamaktan uzak olduğundan, özellikle CFRP ve GFRP deformasyonu ve uzunlamasına şerit bağlantıları için yaklaşımlarla ilgili olarak kodlara önemli iyileştirmeler uygulanması gerektiği belirtilmiştir. Test sonuçlarına göre, güçlendirme uygulamalarında en az CFRP kadar etkili ancak daha ucuz olan GFRP'nin tercih edilebileceği önerilmiştir.

2.2. Kirişlerde Lifli Polimer Malzemelerle Eğilme Etkisine Karşı Güçlendirme Yapılması İle İlgili Kaynak Araştırması

Islam ve diğ. (2005), yapısal olarak kusurlu derin kirişlerin haricen FRP yapıştırılarak güçlendirilmesini araştırmışlardır. Bu amaçla altı özdeş kiriş üretilerek göçme seviyesine kadar teste tabi tutulmuşlardır. Bir kiriş kontrol için referans kabul edilmiş, diğer beş kiriş ise karbon fiber; sargı, şerit veya örgü sistemi ile güçlendirildikten sonra test tabi tutulmuştur. Test sonuçları; yapıştırılarak uygulanan bir FRP sistemin kullanılmasının, kritik diyagonal çatlakların gelişme hızını yavaşlattığını ve kirişin yük taşıma kapasitesini. pratikteki güçlendirme gereksinimlerini karşılayacak yeterlilikte geliştirdiğini göstermiştir.

Li ve diğ. (2006) tarafından CFRP kompozitlerle güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitelerini kestirmek için deneysel ve nümerik analizler gerçekleştirmiştir. CFRP kalınlığının ve uzunluğunun kırılma yükü ve süneklik üzerindeki etkisi çalışılmıştır. Test sonuçları göstermiştir ki; kontrol kirişi ile karşılaştırıldığında, güçlendirilmiş. kirişlerin ilk çatlak yüklerinde belli belirsiz bir artış

yaşanırken, rijitlik ve süneklikte daha fazla bir artış gerçekleşmiş ve nihai yükler önemli miktarda yükselmiştir. Karbon fiberlerdeki gerilmeler, fiber kumaşın kalınlığının artmasıyla birlikte azalmıştır. Çalışmanın sonucunda lif sıyrılması durumunun dizayn aşamasında dikkate alınmadıkça güçlendirmenin etkisini önemli ölçüde azaltacağı vurgulanmıştır. Eğer bu durum normal nihai yükten önce gerçekleşirse CFRP'nin yüksek dayanım kazandırma özelliğinden tam manasıyla faydalanılamaz. Aynı yüke maruz referans kiriş ile karşılaştırıldığında, güçlendirilmiş bütün kirişlerin sehimleri azalmıştır, bu da CFRP'nin güçlendirilmiş betonarme kirişlerin rijitliğini önemli ölçüde güçlendireceği sonucunu doğurur. Test sonuçları CFRP'nin uzunluğunun ve kalınlığının kirişlerin çatlak yapısını ve nihai kırılma modlarını etkilediğini göstermiştir.

Akbarzadeh ve Maghsoudi (2010), tarafından yapılan çalışmada, CFRP ve GFRP kumaşlarla güçlendirilmiş yüksek dayanımlı betonarme sürekli kirişlerin eğilme davranışı ve momentin yeniden dağılımı araştırılmıştır. Sonuçlar, CFRP kumaş katlarının sayısının artması ile birlikte nihai dayanımda artış yaşandığını, bunun yanında sünekliğin, moment yeniden dağılımının ve CFRP kumaşın nihai gerinimin azaldığını göstermiştir. Bunun yanında ile güçlendirme için GFRP kumaş kullanılan sürekli kirişlerde; süneklik ve moment yeniden dağılımdaki kayıplarda azalma yaşanırken kirişin nihai dayanımında önemli ölçüde artış olmadığı belirtilmiştir. CFRP katların sayısının artırılması, çekme donatılarının akması sonrası güçlendirilmiş kirişlerin rijitliklerindeki kaybı azaltmıştır. Çekme donatılarının akması sonrası, GFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin rijitliği, CFRP ile güçlendirilenlere göre daha düşük seviyelerde kalmıştır. Uygulanan aynı yük seviyesinde, GFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin beton gerinimi, CFRP ile güçlendirilen kirişlerden daha yüksek çıkmıştır. CFRP katlarının sayısını artırılması nihai yük kapasitesinde artışa neden olmuş, ancak akma yükünde önemli bir artışa neden olmamıştır.

Ceroni ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada; eğilme testlerini NSM (Yüzeye yakın montaj yapılması sistemi) çubukları ve CFRP plakalarının bir kombinasyonu ile güçlendirilmiş 21 betonarme kiriş üzerinde gerçekleştirmiştir. CFRP saclarla güçlendirilen kirişlerde, kırılma yükündeki artış çelik donatı oranına bağlı olarak %17 ile %50 arasında değişirken maalesef bu artışa karşılık süneklikte gözle görülür bir azalma eşlik etmiştir. Öte yandan, NSM sistemi kullanmak hem nihai yük kapasitesini hem de sünekliği geliştirdiği görülmüştür. (%46-72 oranında).

Hawileh ve diğ. (2014) GFRP ve CFRP'nin farklı kombinasyonları ile eğilmeye karşı güçlendirilen betonarme kirişlerin davranışı üzerinde çalışmalar yapmıştır.

Deneylerde, betonarme kirişlerin çekme bölgesine sırasıyla; tek kat CFRP, tek kat GFRP, tek kat GFRP'ye ilave olarak tek kat CFRP ve son numunede de tek kat GFRP üzerine tek kat CFRP'ye ilave olarak tek kat GFRP uygulamıştır. Hazırlanan betonarme kiriş numuneleri dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda; GFRP ve CFRP'nin kombinasyonlarına bağlı olarak, betonarme kiriş numunelerinin yük taşıma kapasitelerinde %30 ile %98 arasında artış gözlemlenmiştir. Ayrıca GFRP ve CFRP'nin birlikte uygulandığı numunelerin göçme yükü esnasındaki duktilite değerinin, tek kat CFRP uygulanan numunenin duktilite değerinden yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında; GFRP'nin düşük rijitliği ve CFRP'nin yüksek dayanımı bu numunelerde birlikte davranarak dayanım ve duktilite değerlerinin artışına sebep olmuştur.

Al-Bayati ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada; NSM şeritleri tarafından kirişlerin dört yüzüne (tam sarma) ve diğer dört kirişin sadece üç yüzüne (U sarma) ile elde edilecek mukavemet artışını değerlendirmek için 8 adet betonarme kiriş test edilmiştir. Test sonuçları, tamamen sarılmış kirişlerin, kısmen güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş kirişlere göre daha iyi performans elde edildiğini göstermiştir.

Fu ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada; Toplam 8 adet FRP kaplı betonarme kiriş, FRP U sargılı veya sargısız olarak test edilmiştir. Test gözlemleri, FRP alt yüzey plakasını sabitlemek için yatay FRP levhalarının kullanılmasının, hata yükünde %10 artışa yol açtığını göstermiştir. Sonuçlar ayrıca, yüksek moment bölgesinde eğimli FRP U sargılarının kullanılması, FRP alt yüzey plakasının gerilme mukavemetinde önemli bir artışa yol açabildiğini, düşük moment bölgesine takıla benzer sargıların hem bağ açmayı önleyebileceğini hem de hem nihai yükü hem de önemli ölçüde artırılabileceğini göstermiştir.

Chennareddy ve Taha (2017) tarafından yapılan çalışmaya göre; betonarme kirişlerde NSM ve U sargısının birleştirilmesinin kesme ve eğilme kapasitesini önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir. El-Gamal ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada; 10 tam ölçekli betonarme kiriş hazırlanmıştır ve farklı FRP malzemeleriyle ile güçlendirilmiştir. Tüm güçlendirilmiş kirişler eğilme kapasitesinde yaklaşık %31-133 artış göstermiştir. CFRP güçlendirilmiş kirişler, GFRP levhalarla güçlendirilenlere göre daha yüksek nihai yükler elde ederken, GFRP güçlendirilmiş kirişler daha sünek bir davranış göstermiştir.

2.3. Kirişlerde Lifli Polimer malzemelerle Burulma Etkisine Karşı Güçlendirme Yapılması ile İlgili Kaynak Araştırması

Raviteja A. ve Vinod K. (2019) tarafından yapılan çalışmada, T-kirişlerin burulmaya karşı güçlendirme davranışını daha iyi anlamak için bir betonarme T-kirişi analiz edilerek deneysel çalışma yapılmıştır. İncelenen diğer parametreler, güçlendirme konfigürasyonları ve fiber yönelimleridir. Elyaf takviyeli polimerler, düşük ağırlık, yüksek mukavemet ve dayanıklılık gibi nedenlerle bu tür birçok uygulamada başarıyla kullanılmaktadır. Burulma güçlendirme ile ilgili önceki birçok araştırma çalışması, farklı şerit düzenleri ve farklı lif türlerine sahip betonarme kirişlere odaklanmıştır. Güçlendirilmiş dikdörtgen kirişlerin burulma davranışını tahmin etmek için çeşitli analitik modeller geliştirilmiş ve deneysel çalışmaların doğrulanması için başarıyla kullanılmıştır. Ancak betonarme T-kirişinin burulma kuvvetlendirmesine ilişkin literatür sınırlıdır. Bu çalışmanın amacı, burulmaya maruz kalan betonarme kirişlere (T-kiriş) dış enine güçlendirilmiş olarak epoksi bağlı GFRP kumaşların kullanımının etkinliğini değerlendirmektir. Güçlendirilmiş kirişlerin burulma sonuçları, FRP uygulaması olmayan kontrol kirişlerinin deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışma, tüm GFRP güçlendirilmiş kirişlerin burulma davranışında dikkate değer bir gelişme olduğunu göstermektedir.

Meyyada Y. ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmanın amacı, harici bağlanan kompozitleri kullanarak betonarme kirişlerin burulma mukavemetinin kapsamlı bir incelemesini ve değerlendirmesini sunmaktır. Bunu için, ayrıntılı bir literatür taraması yapılmış ve deneysel testlerin veri tabanı geliştirilmiştir. Veri tabanı, harici bağlanan FRP ve FRCM kompozitlerle güçlendirilmiş kirişleri içermektedir. Güçlendirme sisteminin etkinliği, betonarme kirişin geometrik ve mekanik özellikleri, kompozit tipi ve kompozit kaplama konfigürasyonu açısından incelenmiştir. Güçlendirilmiş kirişlerin farklı hata modları da tartışılmıştır. Ek olarak, harici bağlanan kompozitlerle güçlendirilmiş RC kirişlerinin burulma tepkisini tahmin etmek için geliştirilen analitik ve sayısal yöntemler özetlenmiş ve tartışılmıştır. Son olarak, bu çalışmadan elde edilen bilgilere dayanarak tasarım hükümleri incelenmiştir.

Literatürde CFRP'nin levha ve şerit olarak uygulanması burulma kapasitesini arttırmada ve burulma davranışını iyileştirmede etkili olmuştur. Yapılan deneylerde (Ghobarah ve diğ. (2002), Deifalla ve diğ. (2013), Chai ve diğ. (2014), Elwan (2016),

Saad Khalaf Mohaisen (2019), Hii ve Al-Mahaidi (2007), Jing ve diğ. (2007), İlkhani ve diğ. (2021), Mohaisen (2019), Ma ve diğ. (2020), Abduljalil ve Sarsam, (2012), Tibhe ve Rathi, (2015), Salom ve diğ. (2004), Hii ve diğ. (2006) Ameli ve diğ. (2007), Obaidat ve diğ. (2019), Chalioris ve diğ. (2008), Chalioris (2008), Muttalib I. Said ve Al-Shemmari (2020)) yeterli miktarda ve yüzeye tam yapılmış olan yapıştırmanın kirişin burulma mukavemetinde artışa neden olduğu görülmüştür. Özellikle 45° şerit sargı uygulamasının burulma direncini yükseltmede dikey olarak uygulanan şeritlerden çok daha etkili olduğu ((Ghobarah ve diğ. (2002), Askandar ve diğ. (2020)) görülmüştür. Ayrıca tam sarma ile güçlendirilmiş dikdörtgen kirişlerin, şeritlerle güçlendirilmiş kirişlerden daha iyi burulma davranışı ve daha yüksek kapasite sergilediği de görülmüştür. (Chalioris (2008). Mohammadizadeh ve diğ. (2009)'nın çalışma sonucu, CFRP'nin burulma dayanımına katkısını %91'e kadar artırdığını ancak iki CFRP katlı güçlendirilmiş kirişler için %111'e kadar artırdığını göstermiştir.

GFRP levha ve şerit uygulamalarından (Panchacharam ve diğ. (2002), Singh ve Sharma ve diğ. (2020), Tibhe ve Rathi (2015)) çatlama mukavemetini ve nihai burulma kapasitesini önemli ölçüde artırabildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca GFRP bar ile yapılan güçlendirme de Hadhood ve diğ. (2020) nihai burulma kapasitesini geliştirmiştir. Kandekar ve Talikoti (2018) tarafından AFRP şeritlerle yapılan deneysel çalışmada Güçlendirilmiş kirişlerin burulma momenti taşıma kapasitesi, kontrollü kirişe göre arttığı görülmüştür.

2.4. Kolonlarda Lifli Polimer Malzemelerle Güçlendirme Yapılması İle İlgili

Kaynak Araştırması

Lifli polimer malzemelerle güçlendirilen kolonların yük taşıma kapasitesinde meydana gelen değişimi incelemek için çalışmalar yapılmıştır. Karbon elyaf takviyeli malzeme kullanılarak kumaş şeklinde tam sarma şeklinde uygulama ile, Kabashi ve diğ. (2014), Özcan ve diğ. (2010), Colomb ve diğ. (2008), Lieping Ye ve diğ. (2002), Lacobucci ve diğ. (2003), Ana de Diego ve diğ. (2019), Ana de Diego ve diğ. (2019), Zeng ve diğ. (2018), Eid ve Paultre (2017), Ozcan ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmalarda yanal olarak kolonlarda sınırlandırma yapılmıştır. Bu çalışma sonuçları, kolonlarda yük taşıma kapasitesinin ve sünekliğin arttığını göstermiştir. Colomb ve diğ. (2008) ve Worajak Janwaen ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada karbon elyaf takviyeli

malzemeyi şerit olarak güçlendirmede kullanmıştır. Şeritlerle güçlendirme, tamamen sarılmış kolonlara göre daha avantajlı bir enerji tüketen davranış sağladığı ve yük taşıma kapasitesinin arttığı görülmüştür. Ana de Diego ve diğ. (2019) ve Zeng ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada farklı bir noktaya dikkat çekmiştir: Kolonların davranışı üzerinde köşelerin yuvarlanma yarıçapının büyük bir etkisi olduğunu görülmüştür. Köşe yarıçap oranının artmasıyla hem basınç dayanımında artış olduğu gözlenmiştir. Memon ve Sheikh (2005), Herwig ve Motavalli (2012), De Luca ve diğ. (2011) tarafından cam elyaf takviyeli lifli polimer malzemelerle sarma şeklinde yapılan güçlendirme çalışmalarında; kolonun eksenel yük taşıma kapasitesinin, yanal şekil değiştirme kapasitesinin ve enerji yutma kapasitesinin arttığı görülmüştür.

Shehata M. ve diğ. (2001) tarafından yapılan çalışmada 54 kısa kolon numunesinde testler içeren deneysel bir araştırma programı, harici olarak CFRP ile sınırlandırılmış beton kolonların mukavemet ve süneklikteki kazanımlarını araştırmak için gerçekleştirilmiştir. İncelenen değişkenler sütun kesit şekli (dairesel, kare ve dikdörtgen) ve modellere uygulanan CFRP tabaka katmanlarının sayısında ifade edilen sınırlama miktarıdır (bir veya iki tabaka). Elde edilen sonuçlara dayanarak sınır beton dayanımı ve son nihai gerilmesini hesaplamak amacıyla kullanılan kesit kesit geometrisinin her biri için, dairesel, kare ve dikdörtgen şeklinde kapalı yanal gerilmenin bir fonksiyonu olarak denklemler önerilmiştir. Bu denklemler ve literatürde karşılaşılan formüllerden elde edilen tahminler, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve genel sonuçlara ulaşılmıştır.

Lacobucci R. ve diğ. (2003) tarafından yapılan çalışmada yeterli etriye donatısına sahip olmayan hasar görmüş kare betonarme kolonların CFRP ceketlerle onarılmasını araştırmaktadır. 1971'den önce inşa edilen bina ve köprülerdeki üyeleri temsil eden sekiz örnek hazırlanmıştır. Her örnek, yükleme çerçevesinde sabit bir eksenel yük altında yatay olarak test edilmiş ve deprem kuvvetlerini simüle ederek uygulanan yanal döngüsel yer değiştirmeler uygulanmıştır. Sonuçlar, kritik yerlerde CFRP ile sınırlandırılmasının, sünekliği, enerji yarma kapasitesini ve tüm standart altı üyelerin gücünü arttırdığını göstermektedir. Olumlu davranış ile donatı katmanlarının artması arasında olumlu bir ilişki kurulurken, CFRP onarımı ile yapılan iyileştirmeler, güçlendirme öncesi hasar seviyesi arttıkça azalmıştır.

Sato ve Ko (2007) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kolonlarda kullanılan kesme donatısının ve LP malzeme sargısının kolon boyuna donatısının burkulma

davranışına olan etkisi tersinir tekrarlanan yatay yükler altında incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada, LP sargılama yapılmayan betonarme kolonlarda, boyuna donatıların basınç taşıma kapasitesinin burkulmada normal eksen merkezinden sapma mesafesinin 0.30 mm'den az olduğu durumlarda azalmaya başladığı görülmüştür. Boyuna donatının yüklemenin yarısına gelindiğinde en fazla basınç gerilmesine ulaştığı ve burkulmada normal eksen merkezinden sapma mesafesinin 0.60 mm'den fazla olduğu durumlarda sabitlendiği ve artmadığı görülmüştür. Bu yüzden, boyuna donatıların burkulma boyu ve burkulma şeklinin burkulmada normal eksen merkezinden sapma mesafesinin 0.30 mm ile 0.60 mm arasında olduğu durumlarda daha dengeli olduğu görülmüştür. CFRP sargılı betonarme kolonlarda, boyuna donatıların basınç gerilmelerinin çok daha büyük burkulmada normal eksen merkezinden sapma mesafelerinde bile artmaya devam ettiği gözlenmiştir. Kesme donatılarının rijitliğini veya yüksek elastisiteli LP malzemenin sınır gerilmesini arttırarak burkulmada normal eksen merkezinden sapma hareketini sınırlandırabileceği görülmüştür. Bu deneyde kullanılan numuneler için, boyuna donatının burkulması sırasında kesme donatısının (etriyelerin) uzayarak akmaya başladığı bölgenin uzunluğunun burkulma boyuna oranının 0.45 ile 0.76 aralığında olduğu görülmüştür.

Sokkary ve Galal (2009) yaptıkları çalışmalarda, farklı özellikteki 2 tip betonarme çerçeveyi, 3 durum için (çıplak, zayıf dolgu duvarlı, güçlü dolgu duvarlı) farklı yer hareketlerine maruz bırakmışlardır. Daha sonra bu betonarme çerçevelerin, dolgu duvarlı olması hali, çelik çaprazlı olması hali, dolgu duvarlarının CFRP şeritler ile güçlendirilmesi hali ve kolon ve kiriş elemanların CFRP ile sargılanmış durumları için güçlendirme uygulanmıştır. Güçlendirilen çerçeveleri dinamik analizleri yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

2.5. Perdelerde Lifli Polimer Malzemelerle Güçlendirme Yapılması İle İlgili Kaynak Araştırması

Betonarme perdelerin karbon elyaf takviyeli lifli polimerlerle güçlendirilmesi ile ilgili Omid Habibi ve diğ. (2020), C. A. Cruz-Noguez ve diğ. (2014), S. Hiotakis ve diğ. (2004), Lombard Josh ve diğ. (1999), M. Vojdan ve R. Aghayari (2016), Mohamed Husain ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmalarda uygulama kumaş olarak sarma şeklinde yapılmıştır. Sinan Altin ve diğ. (2013), A.Delnavaz ve M. Hamidnia (2016) ise

karbon elyaf takviyeli lifli polimeri şerit olarak uygulanması durumunda perde davranışını araştırmıştır. Sonuçlara göre; perde duvarların nihai yük taşıma kapasitesinin ve yanal deformasyon kapasitesinin arttığı görülmüştür. Dejian Shen ve diğ. (2019) tarafından yapılan bazalt elyaf takviyeli lifli polimer malzemelerle yapılan güçlendirme çalışmalarında yine yük taşıma kapasitesinde iyileşme olduğu görülmüştür.

2.6. Döşemelerde Lifli Polimer malzemelerle Eğilme Etkisine Karşı Güçlendirme Yapılması ile İlgili Kaynak Araştırması

Literatürde karbon elyaf takviyeli lifli polimerin levha ve şerit olarak uygulanmasıyla döşemelerin eğilme kapasitesini arttırmaya yönelik güçlendirilme yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda (Renata Kotynia ve diğ. (2014), H.S. Mahmoud ve diğ. (2021), Omar Al-Ghazawi ve Rajai Z. Al-Rousan (2020), Sina Yazdani ve diğ. (2021), Niloufar Moshiri ve diğ. (2020)) yeterli miktarda ve uygun şekilde yapılmış olan güçlendirmenin döşemenin nihai eğilme kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Liang Fang ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada bazalt elyaf takviyeli laminant ile güçlendirme yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda döşemenin eğilme kapasitesinin büyük oranda arttığı görülmüştür. Ayrıca döşemenin sehim durumu da azalmıştır. Nehal M. Ayash ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada cam elyaf takviyeli laminant levha ile güçlendirme uygulanmıştır. Bu çalışma sonucunda da sehim değeri düşük, yük taşıma kapasitesinin de fazla olduğu sonucuna varılmıştır.

2.7. Döşemelerde Lifli Polimer malzemelerle Zımbalama Etkisine Karşı Güçlendirme Yapılması ile İlgili Kaynak Araştırması

Literatürde elyaf takviyeli lifli polimerlerin levha, şerit veya sarma olarak uygulanmasıyla döşemelerin zımbalama kapasitesine olan etkileri incelenmiştir. Karbon elyaf takviyeli polimerlerle yapılan şerit güçlendirmelerinde; (Soudki, El-sayed ve Vanzwol (2012), Sharaf, Soudki, ve Van Dusen (2006), Abdullah, Bailey ve Wu (2013), Binici ve Bayrak (2003), Erdogan ve diğ. (2013)) döşemenin zımbalama kapasitesinde artış olduğu görülmüştür. Sissakis ve Sheikh (2007), Harajli ve Soudki (2003), Erdogan ve diğ. (2010 ve 2011) tarafından yapılan karbon elyaf takviyeli polimerlerin levha ve sarma olarak ve Navid Jafarian, Davood Mostofinejad, Ali Naderi (2020) tarafından grid

olarak yapılan güçlendirme çalışmalarında kontrol numunelerine kıyasla zımbalama direncinde artış görülmüştür. Cam elyaf takviyeli polimer malzemenin sarma olarak uygulanmasıyla ilgili El-salakawy, S oudki ve Polak (2004) tarafından yapılan çalışmada da zımbalama kapasitesinde önemli oranda artış gözlenmiştir.

2.8. Yapay Zekâ ile ilgili Yapılan Çalışmalar

Makine öğrenmesi, yapay zekâ ile öğrenme gerçekleştirilmesine ve tahmin üretmeye çalışan algoritmalarından oluşan bir sistemdir. Bu algoritmalar, bilinen klasik algoritmaların aksine, kuralları önceden belirlenmiş ve yapılacak işlemleri sabit olan algoritmalar değildir. Bu algoritmalar veri girişlerinden öğrenme gerçekleştirebilmek için tahminler ve kararlar üretmek üzere programlanmıştır.

Yapay sinir ağları (YSA), son zamanlardaki en başarılı buluşlardan biri sayılabilir (Suzuki, 2011). İnsan beyninin en temel özelliklerinden biri olan öğrenme fonksiyonunu taklit eden bir bilgisayar sistemi olan yapay sinir ağları, birbirine bağlı ve her biri münferit olarak belirli bir ağırlığa sahip olan bağlantılardan oluşur (Öztemel, 2003). YSA'lar karmaşık, matematiksel olarak iyi tanımlanmamış, doğrusal olmayan problemleri çözmek için çok basit hesap operasyonlarını kullanmaya izin verir (Drew ve Monson, 2000).

Ülker ve Civalek (2002), YSA'yı kullanarak çeşitli mesnet koşulu için eksenel yüklü kolonların burkulma analizini yapmışlardır. Çalışmalarında buldukları sonuçları gerekli hesaplayıcı ihtiyacı ve süre açısından değerlendirdiklerinde bir hayli başarılı bulmuşlardır.

Ülker ve Civalek (2004), dikdörtgen plakların doğrusal olmayan analizinde yapay zekâ tekniği ile lineer ve lineer olmayan analizi sunulmuştur. Ağ, geri-yayılma sinir ağı olarak modellenmiş, plak kalınlığı bulanık üçgen üyelik fonksiyonu ile normalize edilmiştir. Sonuçlar, yapay zekâ tekniğinin yapı mühendisliğinde kullanılabilecek alternatif bir metot olduğu gösterilmiştir.

Keleşoğlu (2006) çalışmasında YSA ile betonarme kiriş kesitlerinin analizi ele almıştır. Sayısal uygulamalarda ankastre kiriş ve tablalı kiriş kesitleri kullanmış ve bu kesitlerin donatı alanları ile taşıma gücü ve tasarım momentleri analiz etmiştir. Ağ yapısı olarak geri yayımlı YSA tercih edilmiş ve veriler normalize edilerek ağa sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, sayısal sonuçlarla karşılaştırılmış ve YSA'nın mühendislik sistemlerinin analizi için alternatif bir metot olabileceği belirtilmiştir.

İnel (2007), betonarme kolonların nihai deformasyon kapasitelerini tahmin etmek için YSA'yı kullanmış ve bu konu üzerine YSA'nın uygulanabilirliğini araştırmıştır. Literatürden elden edilen 237 adet dikdörtgen kolon verisi kullanılarak 9 girişe ve tek çıkışa sahip çok katmanlı bir YSA modellenerek eğitilmiştir. İnel, elde ettiği model sonuçlarının deneysel verilerle uyum içinde olduğunu görmüş ve YSA'nın betonarme kolonların deformasyon kapasitelerini tahmin etmek için, kullanılabilecek alternatif bir metot olduğunu göstermiştir.

Arslan ve diğ. (2007) çalışmalarında, 1999 Marmara Depremi sonrası ağır hasar görmüş prefabrike betonarme sanayi yapıların hesaplarında kabul edilen yapı davranış katsayısının tespitine yönelik YSA tabanlı bir analitik çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda bu tür yapıların davranış katsayılarının yönetmelik de öngörülen 5 yerine 2.2 ile 3.5 arasında değişmesi gerektiği bulgulanmıştır.

Alshihri ve diğ. (2009) çalışmalarında 3, 7, 14 ve 28 günlük kür koşullarına maruz bırakılmış hafif betonların basınç dayanımlarının yapay sinir ağları ile tahmini üzerine bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada basınç dayanımı sekiz farklı parametreye göre modellenmiştir. Bunlar kum, su/çimento oranı, hafif ince agregası, hafif iri agregası, süper akışkanlaştırıcı, silis dumanı, silis dumanı ilaveli çimento ve kür periyodudur. Çalışmadan elde edilen sonuca göre YSA modelleri ile basınç dayanımı tahmini mümkün kılınabilmektedir.

Arslan (2010) çalışmasında betonarme yapıların deprem performansına etki eden parametrelerin etki oranlarını YSA kullanarak belirli doğrulukta tespit etmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular daha önceki depremlerde belirlenen hasarlarla eşleştirilerek taşıyıcı sistem ve malzeme tartışılmıştır. Bu çalışmada test edilen her bir parametrenin etkisi yapının deprem performansı üzerinde farklı etki oranlarına sahiptir. Perde oranı ve kısa kolon oluşumunun performansı etkileyen en önemli yapısal bileşenler olduğu tespit edilmiştir. Betonun basınç dayanımı ve enine donatı en az önemli parametreler olarak belirlenmiştir. Ayrıca YSA yapısal performansı oldukça tatmin edici bir oranda tespit etmiştir. Seçilen YSA algoritmalarının deprem performans tahmin yüzdeleri, algoritma türüne ve YSA modellemenin diğer parametrelerine bağlı olarak %91,68 ile %98,47 arasında değişmektedir.

Garip (2011), çalışmasında mevcut betonarme binaların deprem performanslarının belirlenmesinde güvenilir ve daha hızlı bir yöntemin geliştirilmesi ve bu konuda YSA yaklaşımının uygunluğunun gösterilmesini amaçlamıştır. YSA modelini

eğitim ve testi için veri seti mevcut bina planlarından üretilen modellerden oluşturulmuştur. Eğitim için 9150 adet farklı bina örneği kullanılmış ve test için 600 adet farklı bina örneği hazırlanarak oluşturulan YSA tabanlı performans değerlendirme modeli 27 adet binadan oluşan referans seti ile değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, YSA tabanlı performans değerlendirme modellerinin hızlı ve güvenilir sonuçlar verdiği ve binaların deprem performanslarının belirlenmesinde alternatif bir metot olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Çevik (2011) tarafından yapılan çalışmada FRP (fiber takviyeli polimer) ile çevrelenmiş beton silindirlerin mukavemet artırımının modellenmesi için genetik programlama (GP) ve aşamalı regresyon (SR), nöro-bulanık (NF) ve sinir ağları (NN) gibi yumuşak hesaplama tekniklerinin uygulanmasını sunmaktadır. Önerilen yazılımsal hesaplama modelleri, literatürden toplanan deneysel sonuçlara dayanmaktadır. Önerilen yazılımsal hesaplama modellerinin doğruluğu, deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında oldukça tatmin edicidir. Dahası, önerilen yumuşak hesaplama formülasyonlarının sonuçları, şimdiye kadar çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen literatürde bulunan 10 modelle karşılaştırılmış ve çok daha doğru olduğu bulunmuştur.

Arslan (2012) çalışmasında, 4 ile 10 katlı olarak tasarlanan 66 tane betonarme yapının TDY-2007 (Türk Deprem Yönetmeliği 2007)'ye göre performans seviyeleri yapay sinir ağı yöntemi kullanarak tahmin etmişlerdir. %80 gibi bir başarı oranıyla binaların deprem performans seviyelerini hızlı ve ekonomik bir şekilde belirlenebileceğini göstermiştir.

Başıyigit ve diğ. (2012) yaptıkları çalışmalarında beton sınıflarını görüntü işleme tekniği kullanarak tahmin etmişlerdir. Üç farklı su/çimento oranı kullanarak farklı dayanım sınıflarında beton üretmişler, elde edilen numuneler üzerinde, özgül ağırlık, su emme ve boşluk oranı, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Görüntü işleme yöntemi kullanılarak elde edilen dayanım değerleri ile üretilen betonların basınç dayanım değerleri ilişkileri irdelemişlerdir. Sonuç olarak kullanılan görüntü işleme tekniği ile beton içerisindeki agrega ve çimento matrisi yüzdelерinin elde edilebildiği ve bu değerler kullanılarak beton basınç dayanımlarının $R^2=0.9845$ düzeyinde yüksek bir ilişkililik ile tahmin edilebildiği sonucuna varıldı. Bu çalışmanın, betonların görüntü işleme tekniği kullanılarak basınç dayanımlarının tahmin edilmesinde yardımcı olacağı düşünülmüştür.

Çankaya (2012) çalışmasında görüntü işleme yönteminin betonun basınç dayanımının belirlenmesindeki performansını görebilmek amacıyla görüntünün sayısallaştırılması uygulaması ile bir dizi analitik modelleme gerçekleştirmiş, analitik modellemenin başarısı deneysel verilerle kıyaslayarak irdelenmiştir. Çalışma 15x15x15 cm boyutlarında 23 adet beton küp numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Beton basınç dayanımı tayini, dijital görüntüden özellik çıkarma ve YSA kullanılarak tahminde bulunma olarak iki fazda gerçekleştirilmektedir. Numunelerin yüzey görüntüleri alınarak MATLAB programında görüntünün sayısallaştırılması işlemi yapılmıştır. Sayısallaşan görüntüden elde edilen veriler (matris formları) yapay sinir ağlarında işlenmiştir. Fotoğraflama işleminden sonra her bir numune hidrolik pres aletinde kırılarak numunelere ait beton basınç dayanımı değerleri not edilmiştir. YSA metodu ve deneysel sonuçların doğruluk oranı yaklaşık %98.88 olarak bulunmuştur.

Köroğlu ve diğ. (2012); Kombine yapay sinir ağı kullanılarak dörtgen FRP ile sarılmış betonarme kolonların eğilme kapasitesinin tahmini için çalışmışlardır. Bunun için 48 adet betonarme kolon dikkate alınmıştır. Önerilen yöntemin doğruluğunu tespit için ayrıca 13 adet betonarme kolon kullanılmıştır. Literatürdeki deneysel çalışmalardan aksel yük ve momente maruz kalan dörtgen FRP sargılı betonarme kolonları hakkında bir veri tabanı elde edilmiştir; CANN (birleşik yapay sinir ağları) modelleri oluşturulup test edilmiştir. Daha sonra dörtgen FRP ile çevrili betonarme kolonlarının eğilme kapasiteleri, geliştirilen CANN modeli kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışma ile, literatürde ilk kez dairesel olmayan FRP ile çevrelenmiş betonarme kolonların eğilme kapasitelerinin tahmini için tek ve birleşik yapay sinir ağları kullanılmıştır. Önerilen YSA ve CANN modellerinin doğrulukları, literatürdeki geleneksel yaklaşımlara göre daha tatmin edici bulunmuştur. Dahası, önerilen CANN modellerinin sonuçları, tek YSA modeline göre daha düşük tahmin hatasına sahiptir.

Dantas ve diğ. (2013) çalışmalarında inşaat ve yıkıntı atıklarından oluşan betonların 3,7, 28 ve 91 günlük basınç dayanımlarını yapay sinir ağları ile tahmin etmek için birtakım deneyler yapmışlardır. Test ve eğitim seti için uygun YSA modeli oluşturmuşlar ve bu YSA modeli ile belirlenen günlerdeki betonun basınç dayanımı yüksek oranla tahmin edildiğini gözlemlemişlerdir

Çankaya ve diğ. (2013) çalışmasında beton basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan geleneksel deney yöntemlerini irdelerek bu kapsamda alternatif yeni bir deney yöntemi olarak görüntü işleme tekniğinin betonun basınç dayanımının

belirlenmesindeki performansını görebilmek amacıyla bir dizi uygulama sonucu yüksek bir doğruluk oranı elde edildiğini görmüştür. Çalışmada görüntü işlemenin malzeme ve yapı mühendisliğinde kullanımında kısıtlar ve yöntemin avantajları tartışmıştır.

Anıl ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmada; 12 tek yönlü FRP ile güçlendirilmiş betonarme döşeme dört noktalı yükleme kurulumu altında test edilmiştir. Bu testlerin sonucu, yük taşıma kapasitesindeki ve sertlikteki ortalama artışın, güçlendirilmemiş levhanın sırasıyla 1.16-1.48 ve 1.05-1.22 aralığında olduğunu göstermiştir. Ayrıca, CFRP malzemesinin yüksek esnekliği nedeniyle, güçlendirilmiş plakaların enerji dağıtma kapasitesi ve süneklik oranlarında yüksek düşüşler görülmüştür.

Pham ve diğ. (2014) Yapay sinir ağları kullanarak FRP ile sarılmış kare ve dikdörtgen kolonların yük ve gerilme durumunu tahmin etmişlerdir.

Lee ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada yapay sinir ağları kullanılarak etriye olmadan FRP ile güçlendirilmiş betonarme elemanlarının kayma mukavemetinin hakkında tahminde bulunmuşlardır.

Doran ve diğ. (2015); CFRP ile sarılmış betonarme kolonlar için yanal olarak sınırlandırma katsayısının tahmininde bulanık mantık yaklaşımının uygulanması üzerine çalışmışlardır.

Hâkim ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada; I-kiriş yapıları gibi bir yapıdaki hasarın uzamasını ve yerini tahmin etmek için daha hızlı ve daha doğru YSA tabanlı yöntemler geliştirmiştir.

Cha ve diğ. (2015) çeşitli 3 boyutlu çelik yapılarda görülen küçük hasarların tam konumlarını ve kapsamalarını tespit etmek için hibrit çok amaçlı GA optimizasyon algoritmalarına ve Modal Gerinim Enerjisine (MSE) dayalı yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Hasara bağlı yapı ile dinamik olarak değiştirilen hasar simülasyonu yapısı arasındaki MSE indeksindeki farklılıklar olarak ifade edilmiştir.

Asteris ve diğ. (2016) betonarme çerçeve yapıların dinamik özelliklerini yapay sinir ağlarını kullanarak tahmin etmek üzerine bir çalışma yürütmüştür.

Giovanis ve diğ. (2016) yaptıkları çalışma sonucunda hızla büyük bir artımlı dinamik analiz eğrileri örneği oluşturmak ve çelik moment dirençli çerçevenin kullanışlı sismik tepki istatistiklerini ve kırılabilirlik eğrilerini kolayca hesaplamak için çok katmanlı bir FFNN önerilmiştir (İleri Beslemeli Sinir Ağları (FFNN-Feed Forward Neural Networks)).

Greco ve diğ. (2016) yaptıkları çalışma ile; NSGA-II'nin bir duvar-çerçeve sisteminde doğrusal bir enerji tüketen bağlantı ile gerçekleştirilen pasif bir sismik kontrol stratejisi için aynı anda birden fazla çakışan hedefi optimize etmek için doğru bir metot olduğuna karar vermiştir (Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması-Non-dominated Sorting Genetic Algorithm).

Sertkaya (2017) tarafından yapılan çalışmada; betonarme ve öngerilmeli betonarme kirişlerin kesme kapasiteleri ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar derlenerek deneyler hakkında açıklamalar ve deneylerin gruplandırılmaları yapılmıştır. Mevcut deneysel verilere göre kesme kapasitesinin her bir parametreye göre nasıl değiştiğinin irdelenmesi yapılmıştır. Akıllı bir sistem türü olan yapay sinir ağları (YSA) hakkında bilgi verilerek analiz yöntemi tanıtılmış ve derlenen deneysel veri setinde yer alan betonarme ve öngerilmeli beton kirişlerin MATLAB paket programında YSA modellemeleri yapılmıştır. Modellemelerde kullanılan kirişlere ait parametreler doğrultusunda mevcut yönetmeliklere göre kiriş kesme kapasiteleri de ayrıca belirlenmiştir. Oluşturulan YSA modelleri ile mevcut yönetmeliklerin kiriş kesme kapasitesinin belirlenmesindeki performansları karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda YSA'nın her bir durumda yönetmelik yaklaşımlara göre oldukça yüksek bir tahmin oranına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca öngermeli betonarme kirişlerin tahminde YSA'nın başarısı yönetmelik normlarına göre daha fazla olmaktadır.

Chatterjee ve diğ. (2017) YSA sınıflandırıcılarını kullanarak, yapısal hasarların tahmininde %90- %94,74 arasında değişen doğruluk oranları elde etmişlerdir.

Ilkhani ve diğ. (2017) betonarme kirişlerdeki burulma kapasitesini YSA kullanarak belirlemişlerdir. Yapılan çalışma betonarme kirişlerin burulma kapasitesinin yapay sinir ağı kullanılarak hesaplanmasına yönelik bir model sunmaktadır. Betonarme kirişlerin burulma momentleri altındaki karmaşık tepkisi göz önüne alındığında, bu kirişlerin burulma dayanımı farklı parametrelere bağlıdır. Dolayısıyla yapay sinir ağını kullanmak kirişlerin burulma kapasitesini tahmin etmek için uygun bir yöntemdir. Sunulan modelde kirişin boyutları, beton basınç dayanımı, boyuna ve enine donatı özellikleri girdi verileri, betonarme kirişin burulma kapasitesi ise modelin çıktısıdır. Ayrıca sinir ağı sonuçları da dikkate alınarak ağ katmanlarının ağırlığı üzerinde hassasiyet analizi yapılarak, farklı parametrelerin betonarme kirişlerin burulma

dayanımına etkisi değerlendirilmektedir. Duyarlılık analizine göre kirişlerin burulma kapasitesine en fazla enine donatının özellikleri etki etmektedir.

Suryanita ve diğ. (2017) çalışmalarında deprem sebebiyle binalarda oluşan hasar seviyesini YSA ile tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Endonezya'nın 34 ilinden yer ivme parametreleri, zemin durumu ve bina geometrisi girdi parametreleri olarak seçilirken, YSA için çıkış parametreleri olarak ivme, hız ve yer değiştirmeden (kat kayması) oluşan yapısal tepkiler seçilmiştir. YSA'yı eğitmek için 6345'e kadar veri seti kullanılmıştır. Genel veri setlerinden 4590 veri seti (%72) eğitim süreci için, 877 veri seti (%14) doğrulama süreci için ve 878 veri seti (%14) test için kullanılmıştır. Eğitilen YSA, (%96) tahmin oranıyla yer ivmesine ve düşük hesaplanan Ortalama Karesel Hatalara (MSE) dayalı yapısal tepkileri tahmin etme kapasitesine sahiptir. Yapısal tepki tahmininin yüksek doğruluğu, mühendisin bina durumunu hızlı bir şekilde belirlemesine ve bina bakımını rutin olarak planlamasına büyük ölçüde yardımcı olabilir, sonucuna varılmıştır.

Zomorodian ve diğ. (2017) FRP ile güçlendirilmiş betonarme elemanlarının kesme davranışını tahmin etmek için membran modelini değiştirerek bir FE modeli geliştirmiştir. Geliştirilen model, saf kesme gerilimlerine maruz kalan 10 FRP ile güçlendirilmiş betonarme levhanın monotonik tepkilerinin tahmin edilmesiyle doğrulanmıştır. Deneysel ve analitik sonuçlar arasında iyi bir uyum sağlanmıştır.

Chou ve diğ. (2017) Betonarme elemanlardaki donatıların paslanma sonucu korozyon riskini YSA kullanımı yardımıyla tahmin etmek için çalışma yürütmüştür.

Chatterjee ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada, çok katlı betonarme binaların yapısal hata olasılığını tespit ederek tahmin etmek için PSO eğitilmiş bir Sinir Ağı (NN-PSO) önerilmiştir. Özellikle, PSO'nun rolü, NN sınıflandırıcısı için minimum kök-ortalama-kare hatası ile bir optimal ağırlık vektörü bulmak olmuştur. Deneysel sonuçlar, sinir ağlarına dayalı geleneksel olarak iyi bilinen modellere kıyasla hibrit algoritmanın üstünlüğünü ortaya koymuştur.

Zhang S.S. ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmayı şu şekilde özetleyebiliriz, NSM FRP güçlendirme tekniği betonarme kirişler için geçerli bir güçlendirme yöntemi haline gelmiştir. NSM FRP şeritlerinin erken bağ açma kusuru, yaygın bir hata modudur. NSM şeritlerinin uçlarına yakın FRP U-çeketlerinin uygulanması, bağ çözme sorununa potansiyel bir çözüm sunar. Bu çalışma, gergin yüzlü NSM FRP şeritleri ile eğilmeye yönelik güçlendirilmiş betonarme kirişlerinde bağ çözme kusurunu geciktirmek veya önlemek için FRP U ceketlerinin kullanımına ilişkin ilk sistematik deneysel araştırmayı

sunmaktadır. Araştırılan parametrelerle birlikte toplam 11 büyük ölçekli betonarme kiriş test edilmiştir. NSM (CFRP) şeritlerinin düzenlenmesi, U-kılıf malzeme tipi, FRP U ceketlerinin düzeni, genişliği ve eğim açısı parametrelerine göre çalışma yapılmıştır. Test edilen tüm kirişlerin başarısızlık modları, yük sapması ve gerinim dağılımı yanıtları kaydedilmiştir. Test sonuçları, test edilen parametrelere netlik ve anlayış getirmiştir ve ayrıca U ceket müdahalesinin etkinliğini göstermektedir.

Morfidis ve Kostinakis (2018) çalışmalarında farklı yapısal karaktere sahip 30 betonarme binanın deprem hasar seviyelerini YSA ile tahmin etmeye çalışmıştır. Seçilen binalara gerçekte yaşanmış deprem kuvveti uygulanarak deprem hasarı oluşturulmuş ve YSA deprem hasar seviyelerini gerçeğe yakın olarak tahmin edebilmiştir.

Pathirage ve diğ. (2018) tarafından; otomatik bir kodlayıcı derin sinir ağının, geleneksel YSA yöntemlerine kıyasla, girdi olarak alınan doğal frekanslar ile çelik çerçeve yapısının titreşim özellikleri ile yapısal hasar arasındaki eşlemeyi öğrenme yeteneğini geliştirmek için önerilmiştir.

Ye ve diğ. (2018) maksimum enerji dağılımını elde etmek için geometrik ve malzeme oldukça doğrusal olmayan burkulma sonrası davranışlarını optimize ederek soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların sismik performansını iyileştirmek amacıyla sonlu eleman analizlerine bağlı PSO algoritması kullanılarak bir optimizasyon çerçevesi sunmuştur.

Zhou Y. ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, farklı FRP uygulamaları ile kesmeye karşı güçlendirilmiş betonarme kirişler için tasarım analizi yapmıştır. Varılan sonuçlar şu şekildedir; kesme kırılmasına karşı güçlendirme eğilmeye karşı yapılan ile karşılaştırıldığında daha özen gerektirmektedir. Yapısal güvenlik için kiriş güvenliği de oldukça önemlidir. Farklı FRP konfigürasyonları (U-mantolama, yan bağlama ve tam sarma) gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan veri tabanına göre FRP kesme kapasitesinin birkaç tahmin modelin değerlendirilmiştir. U-mantolama ve yan yapıştırma tipi için FRP kesme kapasitesi tahmininde en yüksek doğruluğu gösterirken, tam sargı tipi en doğru olanıdır.

Saribiyik A. ve diğ. (2020) betonarme kirişlerin bazalt elyaf takviyeli polimer (BFRP) kompozitler ile kesme dayanımı üzerine deneysel ve analitik çalışmalar yapmıştır. BFRP kompozit ve sarma yöntemlerinin betonarme kirişlerin kesme dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca deneysel çalışmanın sonuçları mevcut hesaplama yöntemleri ile karşılaştırılarak bu güçlendirme yöntemlerine uygun hesaplama yöntemleri

araştırılmıştır. Dikdörtgen kesitli kirişler çelik donatı ve düşük mukavemetli beton ile üretilmiş olup, yeterli eğilme moment kapasitesine sahip ancak yetersiz kesme kapasitesine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bununla birlikte, iki kesme bölgesine sahip kirişler bir tarafı yeterli, diğer tarafı yetersiz olacak şekilde tasarlanmıştır. Betonarme kirişlerin kayma yetersiz bölgeleri tam sarma, yan yapıştırma ve şeritler yöntemlerle BFRP kompozitleri ile güçlendirilmiştir. Örnekler, monotonik yükleme altında dört noktalı eğilme testi ile test edilmiştir. Kayma dayanımı, sapmalar, kayma çatlağı açılmaları ve kayma deformasyonlarındaki değişim deney sonuçlarından incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, BFRP kompozitleri ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme kapasitesi %43 ile %100 arasında artmıştır.

Slaitas, J. ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışma genel hatları ile şöyle açıklanabilir; fiberle güçlendirilmiş polimer (FRP) takviyeleri (laminatlar, levhalar, şeritler, çubuklar) betonarme yapılarının güçlendirilmesi için dünya çapında düşünülmektedir. Bu tür takviyeler hafiftir, montajı kolaydır, korozyona dayanıklıdır, estetik ve tasarım gerekliliklerini karşılar. FRP'nin tam potansiyelini kullanmak için ön gerdirilmesi gerekir, bu şekilde çatlak genişliklerini ve sapmaları azaltılabilir. Özdeş 14 betonarme kiriş, hazırlanmış ve test edilmiştir: 2 kontrol betonarme kiriş, öngerilmeli CFRP plaklar ile güçlendirilmiş 6 kiriş, harici yük hareketi olmadan, 6 kirişe harici yük etkisi altında olarak test yapılmıştır. Her iki durumda da farklı ön gerilim seviyeleri kullanılmıştır. Sonuçlara göre hesaplama için teorik modeller değerlendirilmek üzere sunulmuştur.

Ramesh B. ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmada temel amaç, cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) laminatlarla güçlendirilmiş hibrit elyaf takviyeli beton kirişlerin yapısal davranışını incelemektir. Bunun için üç farklı kiriş elemanı grubu hazırlanmıştır. Betonarme ve katmanlı betonarme kirişlerden oluşan A grubu, elyaf takviyeli betonarme (FRC) ve katmanlı FRC kirişlerden oluşan B grubu ve hibrit elyaf takviyeli beton (HFRC) ve lamine HFRC kirişlerden oluşan C grubu. B grubu kirişlerde bazalt lifleri toplam hacim fraksiyonu %1, grup C kirişlerde ise 30:70 oranında poliolefin ve bazalt lifleri toplam hacim fraksiyonu %1 ile birleştirilmiştir. Laminasyon için tüm lamine kirişlerin alt yüzeyinde 5 mm kalınlığında GFRP levha kullanılmıştır. Tüm kirişler, başarısız olana kadar dört noktalı eğilme altında test edilmiştir. Çalışma parametreleri, ilk çatlak yükünün, akma yükünün ve nihai yükün ve bunlara karşılık gelen sapmaların, süneklik ve kırılma modlarının değerlendirilmesini içermektedir. Sonuçlardan, lamine HFRC

kirişlerin diğer kirişlere göre daha yüksek yük taşıma kapasitesi ve daha büyük deformasyon sergilediği görülmüştür. Lamine RC kirişinin nihai yükü, kontrol kirişlerinininkinden yaklaşık %33,44 daha yüksektir. Lamine HFRC'nin nihai yükü, kontrol ve lamine RC kirişten sırasıyla yaklaşık %83.04 ve %37,16 oranında artmıştır. Ayrıca, kiriş elemanlarının performansını simüle etmek için bir 3-D sonlu eleman (FE) tekniği benimsenmiştir. Deneysel ve FE modeli sonuçlarının bulguları arasında oldukça benzer bir anlaşmaya varılmıştır.

Doğan ve Arslan (2022) yaptıkları çalışmada, kapsamlı bir literatür taraması yapılmış, CFRP çubuklar ve geleneksel betonarme çelik çubuklarla üretilen ve zımbalama sonucu hasar gören 141 adet döşemeye ait deneysel veriler toplanmıştır. Toplanan verilere göre parametreler ayarlanmış ve beş farklı makine öğrenmesi tekniğinde (Çoklu Doğrusal Regresyon, Bagging-Karar Ağacı Regresyonu, Rastgele Orman Regresyonu, Destek Vektörü) ilgili algoritmalar kullanılarak levhaların zımbalama mukavemeti için tahmin modelleri geliştirilmiştir. Beş farklı algoritma arasında en iyi sonuçları SVR (destek vektör regresyonu) elde etmiştir. SVR, GFRP çubuklarla üretilen levhaların mukavemeti açısından tahmin edilen başarıyı elde etmiştir.

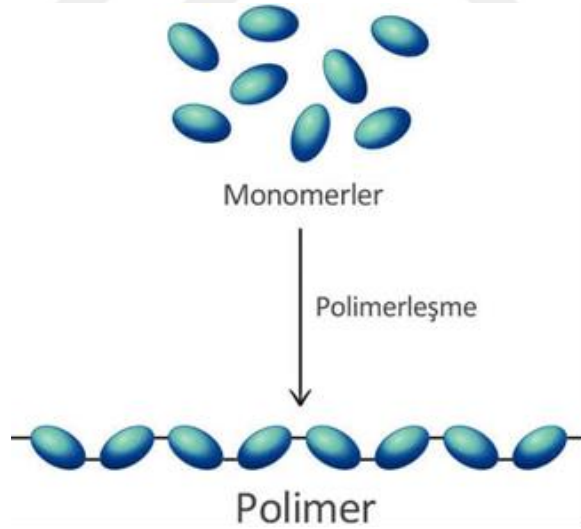
Doğan (2024) yaptığı çalışmada betonarme yapıların dış kolon-kiriş birleşimlerindeki kesme dayanımını tahmin etmek için makine öğrenimini kullanan yeni bir yöntem geliştirmiştir. İlk olarak mevcut literatürden 270 adet kesme hasarlı dış bağlantı deneysel veri seti toplandı. Kullanılan algoritmalarından en başarılı tahmini Gradient Boosting modeli sağlamıştır. Ayrıca makine öğrenmesi modellerinin, kolon-kiriş birleşimlerinin kesme kapasitesi için verilen geleneksel bina ve sismik yönetmelik yaklaşımlarından daha fazla tahmin gücüne sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

3. LİFLİ POLİMERLERİN BETONARME ELEMANLARIN GÜÇLENDİRİLMESİNDE KULLANIMI

Bu bölümde betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılan lifli polimerle ilgili mekanik özellikler anlatılmış, lifli polimerlerin çeşitlerine göre değişen özelliklerden bahsedilmiş ve güçlendirme aşamasındaki uygulama sınırlarına değinilmiştir.

3.1. Lifli Polimer Nedir?

Polimer, monomer olarak adlandırılan basit moleküllerin kimyasal bağlarla bağlanması sonucu oluşan yüksek molekül ağırlıklı maddelerdir (Şekil 3.1). En az iki farklı malzemenin makro seviyede (birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde) birleştirilmesiyle oluşturulan yeni malzemelere kompozit malzemeler denir. Amaç ise bileşenlerde tek başına iken mevcut olmayan bazı özelliklerin (hafiflik, dayanım, esneklik vb.) geliştirilmesi ve bir araya getirilmesidir.



Şekil 3.1. Polimerleşme (Anonim)

Lifli polimer kompozitler 1960'lı yıllardan beri oldukça geniş alanda kullanılmaktadır. Endüstride kullanılan polimerik malzemeler fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı olarak üç ana sınıfa ayrılırlar;

- Plastikler

- Kauçuklar
- Fiberler

Günümüzde polimerik malzemeler çok yaygın bir kullanım alanına sahiptir. PVC, naylon ve teflon polimerik malzemelere verilebilecek en basit örneklerdir (Şekil 3.2). Plastik ve kauçuk malzemelerin tümü polimer esastır. Polimerlerin yaygın olarak kullanılmasını sağlayan özellikler:

- Hafif olmaları.
- Kolay şekillendirilebilir ve kolay tasarlanabilirler.
- Kimyasal etkilere karşı dayanıklı olmaları.
- Atmosferik koşullara karşı dayanıklıdırlar.
- Mekanik dayanımları yüksektir.
- Yalıtıcıdırlar, elektrik, ısı ve sesi iletmezler.
- Hijyeniktirler.
- Özellikleri istekler doğrultusunda değiştirilebilir.
- Optik özellikler (Şeffaflık, Matlık).
- Düşük maliyetlidirler (Ham madde ve İmalat) (Anonim)



Şekil 3.2. Polimerik malzemelerin günlük hayatta kullanımı (Öncel, 2016)

Yapı malzemeleri olarak da polimerlerin çok büyük bir önemi vardır. Bugün dünyada üretilen polimerlerin yaklaşık %30'u her sene inşaat mühendisliği ve yapı endüstrisinde kullanılmaktadır.

Genelde polimerlerde kristal ve amorf bölgeler bir arada bulunmaktadır. Kristal bölgeler malzemeye sertlik ve kırılmalık, buna karşılık amorf bölgeler malzemeye tokluk verir. Dolayısıyla malzemenin kristalinite (katı maddelerde yapısal düzenin derecesi) derecesi mekanik özelliklerinde çok önemlidir. Düzenli yapılar ya da lineer zincirler

kristal oluşumunu kolaylaştırır. Moleküller arası çekim kuvvetleri de kristaliniteyi arttırmaktadır. Polimerlerin termal özellikleri onların erime ve camsı geçiş sıcaklıkları ile tanımlanır. Polimer zincirleri camsı geçiş sıcaklığının (T_g) altında donmuş bir yapıda geçiş sıcaklığının üzerinde ise kauçuksu durumdadır. Bu sıcaklıkları yan gruplar ya da zincirin sertliği belirlemektedir. Polimerlerin mekanik özellikleri ise çekme-uzama testleri ile belirlenir. Mekanik özelliklerine göre polimerler; elyaflar, sert plastikler, yumuşak plastikler ve elastomerler olarak gruplandırılmaktadır.

3.2. Lifli Polimer Malzemelerin Türleri ve Mekanik Özellikleri

Lifli polimerler, oluşum mekanizmalarına göre iki gruba ayrılmaktadır:

- 1) Katılma (zincir) polimerleri: monomerlerin ard arda bağlanması ile oluşurlar.
- 2) Kondensasyon polimerleri: monomerlerin bağlanması sırasında küçük moleküller (örneğin su ya da metanol) açığa çıkar. (Okay, 2003)

Kompozit aslında karışım anlamına gelmekle birlikte çözünen ve çözen bileşenlerden oluşmaz, bileşenler arasında atom alışverişi bulunmamaktadır. Kompozit bileşenleri kimyasal olarak birbirlerini etkilemezler. Malzemeler birbiri içerisinde çözünürse ve atom seviyesinde bir karışım söz konusu olursa, bu tür malzemeler kompozit değil alaşım olur.

Kompozitler genel olarak “matris” ismi verilen bir ana malzeme ve takviye elemanı “fiber, elyaf” ismi verilen daha mukavim bir malzemedan oluşturulur. Bu iki malzeme grubundan, takviye malzemesi kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matrisin diğer görevi liflerin korunması ve liflerin burkulmasının önlenmesidir. Yaygın olarak kullanılan lifler; cam, karbon, bazalt ve aramid lifleridir. Yaygın kullanıma sahip matrisler ise; epoksi, polyster, vinyl ester ve fenoliklerdir (ACI 440.1R., 2006). Lif katkılı polimerin verimine liflerin yönü, uzunluğu, şekli ve kompozisyonu etki etmektedir. Lifler, istenilen özellikleri elde etmek için farklı doğrultularda yerleştirilebilmektedir.

Kompozit malzeme teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, kompozitler sanayi ve teknoloji uygulamalarında gittikçe artan oranlarda kullanılmaya başlanmıştır. Kompozitler; uzay teknolojisi, denizcilik sektörü, tıp alanında (tıbbi cihazların imalatı),

robot teknolojisi, kimya sanayisi, elektrik-elektronik teknolojisi, müzik aletleri endüstrisi, inşaat ve yapı sektörü, otomotiv sektörü, savunma sanayi ve havacılık sektörü, gıda ve tarım sektörü, spor malzemeleri imalatı (yüksek atlama sırkaları, tenis raketleri, sörf, yarış tekneleri, kayak vs.) gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

İnşaat ve yapı sektöründeki uygulama alanları; dış ve iç cephe kaplamaları, dekoratif uygulamalar, çatı kaplama levhaları ve çatı detay profilleri, taşıyıcı profiller, yağmur suyu taşıma sistemleri, muhtelif amaçlı izolasyon işleri, beton kalıpları, prefabrik binalar, köprüler, su tankları, mazgal olukları, yeraltı boruları, gıda reyonu kaplamaları, rasathane kubbeleri, açık saha dolapları, ilan panoları, vb.

Fiber takviyeli polimerler; yüksek mukavemetli fiberler ile plastik esaslı bağlayıcı reçine matrisinin ve çeşitli katkı maddelerinin bir araya gelmesiyle oluşan ve dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaya başlanan yeni nesil güçlendirme malzemesidir. Bu malzemelerin, sıklıkla kullanılmakta olan çelik lama-plak takviyesine karşı en büyük üstünlüğü korozyona dayanıklı olmalarıdır. Ayrıca bunun dışında birçok dış etkene metallere daha çok dayanıklıdırlar. Hafif, ince, uygulaması hızlı ve pratik olan uzun ömürlü bu malzemeler, liflerin dizilim yönleri değiştirilerek mukavemeti ayarlanabildiğinden ve beton ile çeliğin giremeyeceği yerlere girebildiğinden güçlendirmede büyük bir avantaj sağlamaktadır. Başlıca elyaf malzemeler: cam elyafı, karbon (graphite) elyafı, aramid (keklar) elyafı, bor elyafı, oksit elyafı, yüksek yoğunluklu polietilen elyafı, poliamid elyafı, polyester elyafı ve doğal organik elyaflar.

Kolon, kiriş, döşeme, perde gibi taşıyıcı elemanları güçlendirmek amacı ile eleman yüzeylerine yapıştırılan çelik levhaların çelik yapılarda kullanılan çelik profillerden değişik bir özelliği yoktur. Çelik levhalar epoksi türünden bir yapıştırıcı ile beton yüzeye uygulanmaktadır. Burada önemli olan çelik levhayı betona yapıştıran malzemenin özellikleridir. Betonarme yüzeylere çelik levha yapıştırarak güçlendirmenin iki ana sorunu vardır. Bunlardan birincisi, hava koşullarına açık olan çelik levhalarda kısa bir süre içinde paslanma olması, diğeri ise ağır çelik levhanın, yapıştırmada kullanılan malzeme sertleşinceye kadar özel iskele sistemleri ile desteklenmesidir. Bu olumsuzlukları gidermek için çelik levhalar yerine yüksek çekme dayanımlı liflerden dokunmuş ve epoksi bir ortam içine alınmış özel sentetik dokumalar kullanılmaktadır.

Sentetik dokumalar yüksek dayanımlı liflerin oluşturduğu bir malzemedir. Bu dokular polimer, epoksi vb. emdirilerek betonarme elemanlara yapıştırılmaktadır. Dokumalar ince oluşları nedeniyle mevcut betonarme elemanlara sarılabilmekte ve

betonarme elemana sürekli olarak yapıştırılabilmektedir. Kısacası, betonarme elemanların (kolon, kiriş, döşeme) basınç ve/veya eğilme dayanımlarının arttırılmasında etkili bir şekilde kullanılabilen bu malzemelerle yapılacak olan güçlendirme işlemleri, ülkemizdeki mevcut deprem yönetmeliğinde de uygulanabilir güçlendirme yöntemleri arasında gösterilmekte ve yönetime ait hesap yöntemleri sunulmaktadır.

Elyaf malzemeleri arasından en çok cam, karbon, bazalt ve aramid lifleri kullanılmaktadır. Güçlendirmede kullanılan bu tür sargı malzemelerinde esas yük taşıyıcı bileşen, liflerdir. Lif halindeki bu malzemeler büyük hacimli konumlarına kıyasla daha yüksek dayanıma sahiptirler. Cam lifleri, büyük hacimli konumlarında olduğu gibi yüzey kusurları içermediğinden dayanımları yüksektir. Karbon liflerinde tüm bağlar kovalen türdür ve büyük hacimli hallerindeki tabakalanma, bu durumlarında söz konusu değildir. Aramid liflerinde ise moleküllerin yönlenmiş olması ve kristalleşme gibi nedenler malzemenin nedeniyle mekanik özelliğini uzatmaktadır.

Cam elyafı; silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda gibi maddelerden üretilmektedir. Cam elyaf takviyeli kompozit üretiminde en çok kullanılan elyaf türüdür. Cam elyafı; eritilmiş camın, özel tasarlanmış, tabanında küçük delikler bulunan özel bir fırından basınç altında geçirilmesiyle üretilir. Biçimlendirildikten sonra yıpranmaya karşı dayanımın artması için kaplama işlemi yapılır. Elyaf kaplama malzemesi olarak genellikle kompozit üretiminden önce (suyla) kolaylıkla çözülebilen polimerler kullanılır. Elyaf ile reçinenin birbirine iyi yapışması çok önemlidir. Aksi halde, kompozit malzemenin sertliği ve mukavemeti düşük olur. Bu durumun engellenmesi için elyaf kimyasallarla kaplanır. Cam lifler karbon ve aramid liflerden daha ucuzdur. Bu nedenle cam lif uygulaması tekne yapımı gibi çeşitli sektörlerde çok yaygın bir uygulama olmuştur. Cam liflerin çeşitli türleri vardır. E-glass (Elektrik geçirmez), S-glass (çok güçlü) ve AR-glass (alkali geçirmez). Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi, lif çeşidine göre modülü 70–85 GPa arasında ve en yüksek uzama miktarı da %2–%5 arasında değişir. Bunların arasında en çok kullanılan E-glass cam lifleridir (Şekil 3.3).

Çizelge 3.1. Cam lif takviyeli polimer malzeme özellikleri

GFRP	E-glass	S-glass	AR-glass
Çekme Dayanımı (MPa)	3500-3600	4100	1800-3500
Elastisite Modülü (GPa)	74-75	85	70-76
Uzama Miktarı (%)	4,8	4,2-5,4	2-3
Yoğunluk (kg/m ³)	2600	2500	2270
Çap (µm)	8-12	8-12	8-12



Şekil 3.3. Cam elyaf demeti ve kırılmış cam elyaftan üretilmiş keçe

Karbon Elyafı (Carbon Fiber); 1965'ten sonra geliştirilen özellikle uçak ve uzay sanayinde geniş uygulama alanı bulan karbon elyafı, kompozit teknolojisinde büyük öneme sahiptir (Şekil 3.4). Cam elyaf, günümüzde en çok kullanılan takviye malzemesi olmasına rağmen, gelişmiş kompozit malzemelerde yaygın olarak karbon elyafı kullanılmaktadır.

Karbon elyafı cam elyafına göre daha hafif ve mekanik özellikleri daha iyidir. Ancak üretim maliyetleri yüksektir. Karbon elyafı yüksek ısı işlem uygulandığında karbonlaşır. Bu yeni elyafa grafit elyafı denir. Günümüzde karbon elyafı ve grafit elyafı aynı malzemeyi tanımlamaktadır.

Karbon elyafının üstün özellikleri; yüksek elastisite modülü, düşük yoğunluğu, yüksek sıcaklık dayanımının, korozyon dayanımı, yüksek sertlik, yüksek mukavemet ve yorulma dayanımı ve bütün reçinelerle kompozit oluşturabilme. Diğer FRP türlerine kıyasla CFRP'ler güç, dayanım, esneklik, yorulma gibi yönlerden daha uygundur. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans gösterir. Karbon lifler en yüksek elastisite

modülüne sahiptir (Çizelge 3.2). En yüksek uzama değeri %0.4-%2.5 arasındadır. Uzama oranı gevreklikle ters orantılıdır (Carolin, 2001).

Çizelge 3.2. Karbon lif takviyeli polimer malzeme özellikleri

CFRP	
Çekme Dayanımı (MPa)	780-3500
Elastisite Modülü (GPa)	200-800
Uzama Miktarı (%)	0.4-2.5
Yoğunluk (kg/m ³)	1600-2100
Çap (μm)	9-18



Şekil 3.4. Karbon elyaf kumaşlar

Aramid (Kevlar) Elyafı; polimerler, matris olarak kullanılmalarının yanı sıra elyaf olarak da kullanılırlar. Kevlar bir polimer elyafı olup kompozit malzemeye yüksek mukavemet ve sertlik kazandıran, hafif bir malzemedir (Şekil 3.5). Aramid, bir çeşit naylon olan aromatik poliamid'dir. Farklı özelliklere sahip aramid elyafı üretilmektedir ve farklı uygulamalar için kullanılmaktadır. Genellikle doğal rengi sarıdır. Aramid elyafların farklı türleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Aramid elyafın bazı üstün özellikleri; düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve yorulma dayanımı, yüksek darbe dayanımı ve aşınma dayanımı, Yüksek kimyasal dayanımdır.

Aramid elyafın bazı dezavantajları; bazı aramid elyaf türleri ultra viole ışınlarına hassastırlar ve ışığa duyarlı olduklarından karanlıkta saklanmaları gerekir. Matrisle iyi birleşmeyebilirler; bu durumda reçinede mikroskobik çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklar, malzeme yorulduğunda su emişine yol açabilir (Zor, 2018).

Çizelge 3.3. Aramid lif takviyeli polimer malzeme özellikleri

	Kevlar 49 ve Twaron	Technora	Rus Aramid SVM
Çekme Dayanımı (MPa)	2800	3500	2500-3800
Elastisite Modülü (GPa)	130	74	130
Uzama Miktarı (%)	2,3	4,6	3,5
Yoğunluk (kg/m ³)	1450	1390	1430
Çap (µm)	12	12	15

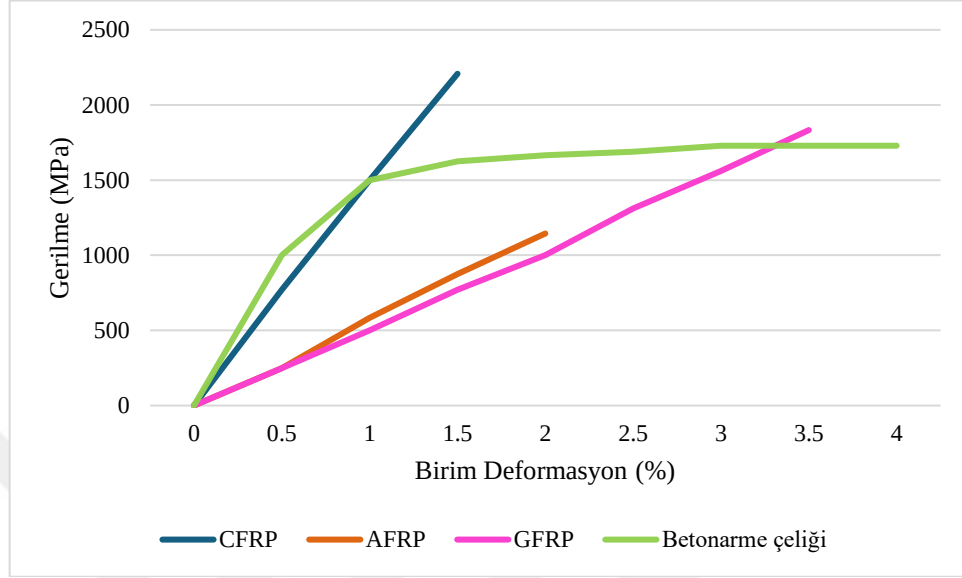


Şekil 3.5. Aramid elyafı ve kumaş

Bor Elyafı; Bor, oda sıcaklığında katı halde olan ikinci hafif elementtir. Çekirdek (tungsten/wolfram) olarak ince bir telin üzerine bor kaplanarak imal edilmektedir. Bu nedenle bor elyafı kendi başına bile kompozit olarak adlandırılabilir. Bor elyafı değişik çaplarda üretilmektedir. Mekanik özellikleri yüksek olduğundan özellikle havacılık sanayinde tercih edilmektedir. Maliyetinin çok yüksek olması son yıllarda karbon elyafının tercih edilmesine sebep olmuştur.

Bazalt Elyafı; Bazaltın savunma sanayi gibi uygulamalarda kullanımı çalışmaları 1980’li yıllara dayanmaktadır. İlk dönemlerde düzensiz erime ve kademeli kristalleşme sebebiyle bazalttan lif üretimi başarılı olmamıştır. 1980 yılların sonunda Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği bu problemleri de çözerek bazalt fiberleri üretmeyi başarmıştır. Bazaltlar çevre dostudur. Çevre bilincinin gün geçtikçe artmasıyla, bazalta olan talep artmıştır. Yüksek sertliğe sahiptir. Bu durum bazalta yüksek aşınma direnci performansı sağlamaktadır. Bazalt liflerinin konsantre mineral asitlerden çok az etkilenmesi ve alkalilere karşı dayanıklı olduğundan genellikle sıcak gaz filtrelerinde destek kumaş veya sargı materyallerinde kuvvetlendirici elyaf olarak, yüksek alkali dayanıklılığı nedeniyle de çimento ve betonlarda kullanılır.

Üç değişik FRP türü ve öngerilmeli çeliğe ait gerilme-birim deformasyon eğrileri Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



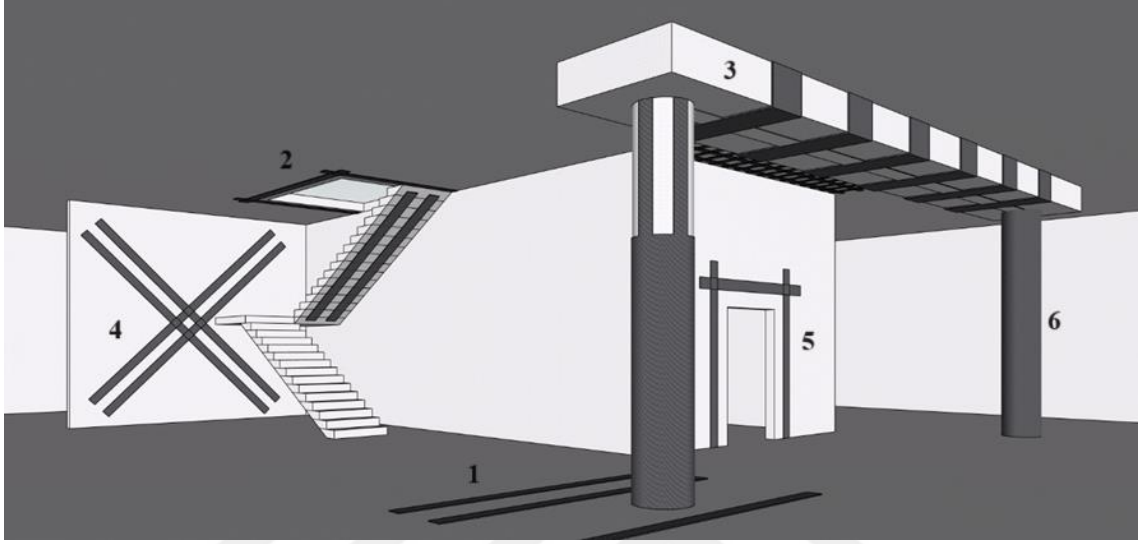
Şekil 3.6. Lifli polimer malzemelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği

3.3. Lifli Polimer Malzemelerin Uygulama Şekilleri

Kompozit malzemelerin, kolay ve hızlı uygulanabilmesi, yüksek dayanım sonuçları vermesi, yapı ağırlığını arttırmaması sebebiyle mühendislik yapılarının güçlendirilmesinde kullanımı son zamanlarda artmıştır (Şekil 3.7).

Betonarme yapılarda veya yapı elemanlarında deprem sonrası veya kullanım sırasında zamanla güçlendirme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.7'de; 1 numaralı işaretleme ve kiriş yanı döşemede, döşemenin eğilmeye karşı güçlendirilme uygulaması, 2 numaralı işaretlemede döşeme üzerinde havalandırma bacası boşluğu, merdiven boşluğu, duman bacası boşluğu gibi projede yer alan zorunlu olarak bırakılan açıklık çevresinin güçlendirilme uygulaması görülmektedir. 3 numaralı işaretlemede, kirişin eğilme etkisine karşı tabandan ve kesme etkisine karşı U şeklinde etriye formatında güçlendirme uygulaması görülmektedir. Ayrıca ankrajlar ile sıyrılma işlemine tedbir alınması ve dayanımın arttırılması durumu da örneklenmiştir. 4 numaralı işaretlemede duvarların eğilme, kesme ve çekemeye karşı takviye uygulaması; 5 numaralı işaretleme ise perde duvarlarda boşluk çevresinde takviye yapılması görülmektedir. 6 numaralı işaretleme kolonlarda yapılan güçlendirme uygulamasını göstermektedir. Tüm kolonun

sarılması ya da aralarda boşluk bırakarak parça parça etriye mantığı ile sargılama yapılmasında amaç; normal kuvvet ve moment etkileri sonucu oluşan burulma ve göçmeye karşı güçlendirmektir. Yapılan güçlendirme işlemleri büyük oranda yetersiz donatı durumunu telafi etmeye yönelik yapılan uygulamalardır.



Şekil 3.7. Betonarme yapı elemanlarının LP kompozit malzemeler ile güçlendirilmesi

Kompozitlerin bir yapıştırıcı yardımı ile yapı elemanlarının yüzeylerine uygulanması gerekmektedir. En çok kullanılan yapıştırıcılar epoksi, poliester, poliüretan ve akriliklerdir. Yapıştırma işlemi şantiyede gerçekleştirilmektedir. Yapıştırma sırasında özen gösterilmeli, kompozit yapı elemanının yüzeyine, yabancı maddeler ve nem içermeyecek şekilde hazırlanarak ve çevreden etkilenmeyecek şekilde yapıştırılmalıdır. FRP malzemeler ile güçlendirmede, FRP malzemeler kirişe sargılanabilir veya kiriş eksenine paralel olarak yapıştırılıp boyuna donatı olarak kullanılabilir. Bunun için yüzey hazırlığı çok önemlidir. Kirişlerde FRP'nin uygulanmasındaki en önemli sorun malzemenin sıyrılması veya betonun pas payı tabakasını alarak ayrılmasıdır. Bu gibi sorunların yaşanmaması için uygulanacak yerdeki beton parçaları temizlenir varsa kırık olanlar uzaklaştırılmalıdır. Oluşan boşluklar epoksi veya tamir harcı ile doldurulmalıdır. Köşeler ve keskin kenarlar sürekliliği sağlamak için törpülenerek yuvarlanmalıdır. Dış köşeler çapı 1-3 cm olacak şekilde yuvarlatılmaktadır. İç açılar ise epoksi ile doldurularak yuvarlatılmaktadır. FRP uygulaması köşelere paralel ise düzeltmeye gerek yoktur. Yüzeydeki yapışmayı engelleyici toz, yağ, kir gibi maddeler kumlama veya yüksek basınçlı su veya hava püskürtme ile uzaklaştırılmalıdır. FRP uygulanırken sıcaklık 5°

C'nin altında ve 30 °C'nin üstünde olmamalıdır. En uygun sıcaklık 20 °C'dir. Uygulama esnasında nem %4'ten fazla olmamalıdır. Eğer nem oranı düşürülemiyorsa neme dayanıklı astar kullanılmalıdır. Temiz yüzeye fırça veya rulo ile epoksi astar sürülmelidir. Astar kuruduktan sonra hafif çukurluklar epoksi ile doldurulmalıdır. Epoksi de kuruduktan sonra yüzey reçinesinin sürülmesine ve FRP'nin uygulanmasına hazır olmaktadır. Karlı ve yağmurlu havalarda kesinlikle uygulanmamalıdır. Özel koşullar sağlanırsa uygulanabilmektedir (Celep ve Kumbasar, 2000).

Özellikle kolon tipi elemanların takviyesinde, önceden prefabrike olarak hazırlanmış ve elemanın boyutlarına uygun olan kompozitler iki ya da tek parçalı olarak elemanın üzerine yerleştirilmekte veya yapıştırma işlemi uygulanmakta ya da kompozit ile yapı elemanı arası bir döküm harcı (grout) ile doldurulmaktadır. Bu işleme gömlek ya da ceket giydirme adı verilmektedir.

FRP uygulanmasındaki avantajlar (Aytaç,2011);

- Tasarımı kolay ve etkindir.
- Amerikan ve Avrupa tasarım normlarında standart hesap yöntemleri mevcuttur.
- Farklı fiziksel değerler için farklı kompozit malzeme kullanma imkânı vardır.
- Yapılarda mevcut kullanımı engellemeden veya durdurmadan uygulama olanağı vardır.
- Paslanmaz ve manyetik alan oluşturmamaları ve hafif olmaları.
- Uygulama ve kullanım kolaylığı vardır.
- Rulolar halinde saklanabilir.
- Maliyeti yüksek makine ve ekipman gerektirmez.
- İstenilen her çeşit yapı elemanı ve malzemesini güçlendirebilir.
- Bakım gerektirmez.
- Kalite kontrol ve güvence sistemleri mevcuttur.
- Eksenel yük taşıma kapasitesini, eğilme ve kesme dayanımlarını, durabilite seviyesini, sünekliliği artırır.
- Dinamik yükten gelen malzeme yorulması direncini güçlendirir.
- Mevcut sehimleri tamamen ortadan kaldırır veya artmasını önler.

Fiber takviyeli polimerlerin (FRP) dezavantajları: (Celep ve Kumbasar, 2000)

- Bu malzemelerin en büyük dezavantajı yüksek maliyetli olmalarıdır.

- Enine dayanımı düşüktür. UV ışınlarından ve radyasyondan etkilenmektedir. Yüksek ısıya karşı dayanıklılıkları son derece düşük olmasıdır.
- Malzemenin kalitesi üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır, standartlaşmış bir kalite olmamasıdır.
- Özel sıvalar veya kaplamalarla korunmalarının gerekliliğidir.
- Polimerlerin uzun süreli sabit yükler altında sünme deformasyonlarının yüksek olmasıdır.

FRP'ler sadece lif eksenine paralel çekme kuvvetlerini karşılayabildikleri için uygulama yönü önemlidir. İki yönlü tabakalar halinde uygulandığında kirişlerde eğilme ve kesme dayanımının, kolonlarda eğilme ve sargılama etkisiyle basınç dayanımının artırılması mümkündür. Ancak bu tür bir uygulama için onarılacak veya güçlendirilecek elemanın beton kalitesinin çok düşük olmaması gereklidir. Çünkü karbon liflere yük transferi, yapışma yüzeyinin beton dayanımına bağlıdır. Belli bir dayanımın altındaki kiriş ve kolonlarda uygulanması uçlarda beton yüzeyinin kopmasına sebep olmaktadır. Bu durumun oluşmaması için beton sınıfı C16 ve üzerinde olmalıdır (Aytaç, 2011).

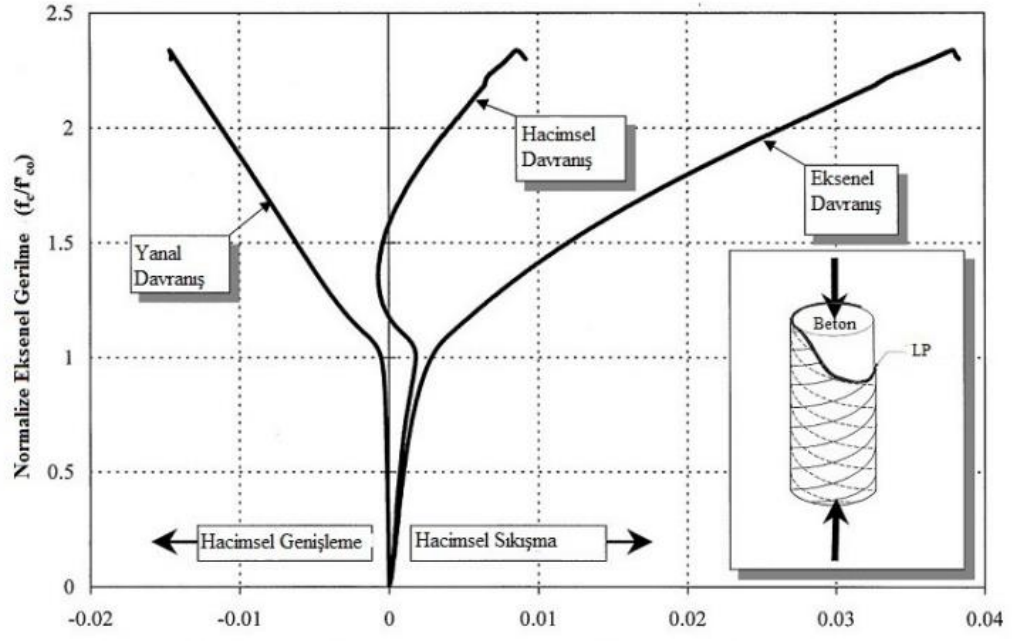
CFRP'ler tam ve U sargılama ile güçlendirmede taşıma kapasitesine katkısı, süneklik ve enerji tüketimi değerleri düşük beton sınıfları için oldukça yüksek çıkarken, yüksek sınıflı betonlarda sonuçlarda daha az katkı sağladığı görülmüştür. Yüksek dayanımlı beton ile hazırlanan numunelerde her iki gramajda CFRP kullanımının, taşıma kapasitesine katkısı oransal olarak yakın seyrettiği ve U sargılamanın, tam sargılamadan daha iyi sonuçlar verdiği için uygulama kolaylığı bakımından U sargılamanın tercih edilebileceği düşünülmüştür. Beton hazırlık aşamasında yeteri kadar homojen yerleştirememesi gibi üretim kaynaklı hatalardan dolayı bazı numunelerde beklenenden daha düşük taşıma kapasitesinin elde edildiği düşünülmüştür (Alav, 2022).

FRP güçlendirme malzemesi kullanılarak köprü kolonları, köprü kirişleri, limanlar, kolon-kiriş birleşim yerleri, su depoları, döşemeler, merdiven altları ve ahşap kirişler gibi birçok yapı elemanında kullanılabilmektedir (Şekil 3.8) (White ve Busel, 2003; Kasimzade ve Tuhta, 2005).



Şekil 3.8.Yapı elemanlarında karbon elyaf ile güçlendirme örnekleri (Anonim)

Lifli polimer sargılı kolonların tipik gerilme-eksenel/hacimsel şekil değiştirme ilişkisi Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Eksenel gerilme ve eksenel/yanal şekil değiştirme ilişkisi lineer davranış göstermektedir. Her iki davranışta ilk kol sargısız beton dayanımına erişene kadar devam eder. Bu bölgede henüz lifli polimer etkin değildir ve davranış sargısız betonun davranışına benzerdir. Lifli polimerin aktif hale gelmesiyle birlikte oluşan ikinci kol ise lifli polimer malzemenin rijitliğine bağlı olarak şekillenir. Sargı malzemesi ve beton arasında tam aderansın sağlanması şartıyla sargılanmış kolon elemanın eksenel yük taşıma kapasitesine ulaşmasıyla birlikte sargı malzemesi de dayanımına ulaşmış olur. LP’de yırtılmalar başlar ve sistem güç tükenmesi durumuna erişir. Lifli polimerde oluşacak çekme gerilmeleri betonun yanal şekil değiştirmesi ile ilişkilidir. Beton en büyük yanal şekil değiştirmeyi eksenel dayanımına eriştiği anda yapmaktadır.



Şekil 3.9. Lifli polimer sargılı betonun tipik davranışı (Mirmiran ve diğ, 2000)

3.1.1. Kirişlerin lifli polimerlerle güçlendirilmesi

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, FRP kompozit malzemelerle sonradan güçlendirilen kirişler oldukça sünek davranış sergileyerek, deprem sırasında yüksek enerji yutma kapasitesi özelliği göstermektedir (Maraş, 2021). Betonarme kirişler CFRP kumaşlarla, şerit bantlar şeklinde farklı açılarda sarılarak yapılan güçlendirme çalışmaları sonucunda, dayanım değerlerinde %70 oranında artış gözlenmiştir. Ancak kirişler boyunca sabitleme olmaması nedeniyle, kiriş alt bölgelerinde bazı açılmalar meydana gelmiştir (Daniel ve diğ., 2019). Kirişler Şekil 3.10'da görüldüğü gibi kesmeye, burulmaya ve eğilmeye karşı çeşitli şekillerde güçlendirilebilir.



Şekil 3.10. Kirişlerin güçlendirilme şekilleri (Alabdulhady ve Sneed, 2019- Anonim)

3.1.2. Kolonların ve perdelerin lifli polimerlerle güçlendirilmesi

Düşey taşıyıcı elemanlar olan kolonların güçlendirilmesi için, FRP'ler dış yüzeye yapıştırılarak uygulanmaktadır. FRP kompozit kullanılarak, taşıyıcı elemanların aksenal yük altında daha sünek ve yüksek şekil değiştirme özelliği gösteren kolonlar elde edilmiştir. FRP malzemeler kolonlarda ve perdelerde etriye yerine geçecek şekilde

güçlendirme amacıyla kullanılmaktadır. Tam sargı şeklinde ya da aralıklı olarak uygulanabilir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Kolonlarda ve perdelerde Lifli polimerle güçlendirme uygulaması (Anonim)

3.1.3. Döşemelerin lifli polimerlerle güçlendirilmesi

Döşemelerde oluşan aşırı sehimlerde, merdiven çevresinde, büyük döşeme boşluklarının etrafında ya da kolon, perde birleşimlerinde dayanım zayıflığı FRP mazlzemelerle güçlendirilerek ortadan kaldırılabilir. Döşemelerde eğilme ve zımbalama etkilerine karşı, alt ve üst donatı olarak güçlendirme amacıyla kullanılmaktadır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Döşemelerde lifli polimerle güçlendirme uygulaması (Anonim)

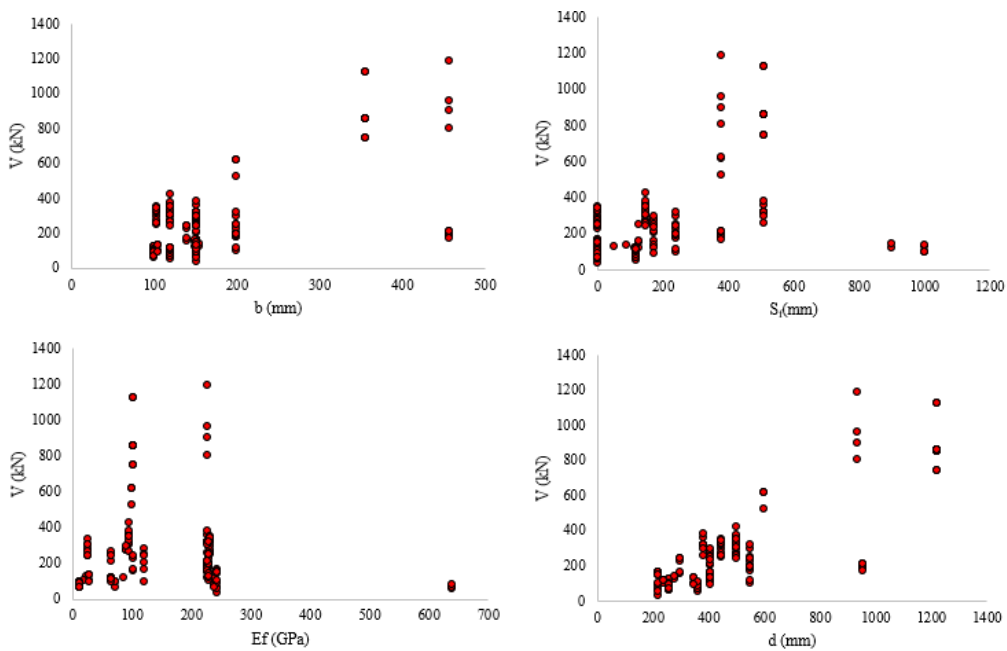
4. LİFLİ POLİMERLER İLE BETONARME ELEMANLARIN GÜÇLENDİRİLMESİ İLE İLGİLİ YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMA ENVANTERİ

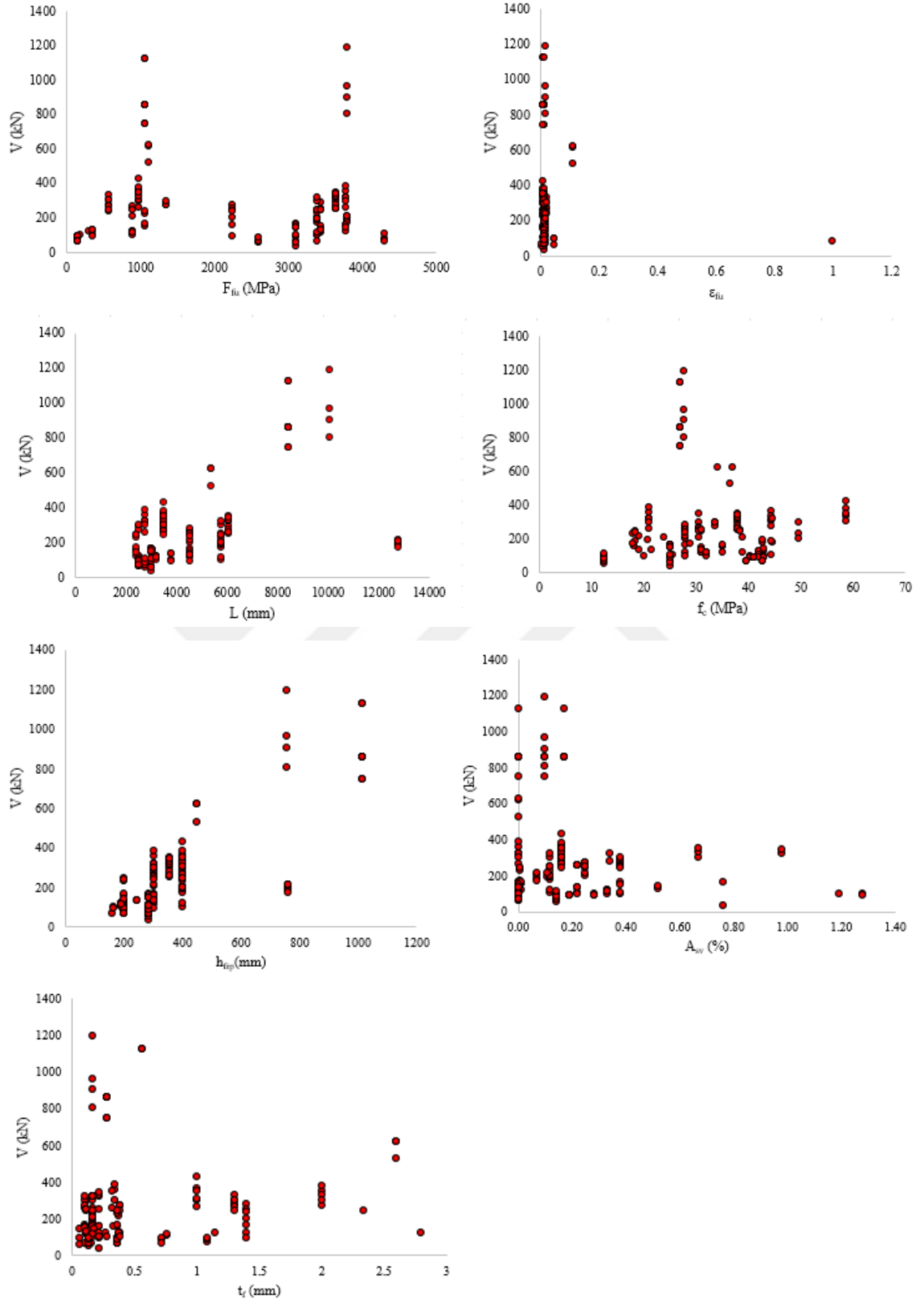
Lifli polimerlerin günümüzde farklı alanlarda bize sağladığı avantajlar, tahmin edilenden de çok fazla olduğu yapılan araştırmalardan görülmüştür. Lifli polimerlerin betonarme yapı alanında güçlendirmeye ihtiyaç duyulan durumlarda, taşıyıcı elemanların güçlendirme işlerinde kullanıldığı ve hala kullanılmayan malzeme ve yöntemlerin olabileceği yapılan çalışmaları incelerken görülmüştür. Bu bölümde betonarme taşıyıcı elemanların lifli polimer malzemelerle güçlendirilerek yapılan deney ve farklı alanlardaki çalışmalardan bu teze katkısı olacak şekilde derleme yapıp faydalanılmıştır. Bu bölümde derleme çalışmasının kısa özeti sunulmuştur.

4.1. Kirişlerin Kesme Davranışı ile İlgili Yapılan Çalışma Özeti

Literatürde CFRP'nin levha ve şerit olarak uygulanması ya da ikisinin aynı anda uygulanmasıyla kesme kapasitesi yetersiz olan kirişlerin güçlendirilmesi sağlanmıştır. Yapılan deneylerde (Bousselham ve diğ. (2005), Oller ve diğ. (2018), Nguyen ve diğ. (2017), Godat ve diğ. (2013), Lee ve diğ. (2011), Mofidi ve diğ. (2014), Mofidi ve chaallal (2014), Dirar ve diğ. (2019), Farghal ve diğ. (2012), Khalifa ve Nanni (2000), Norris ve diğ. (1997), Cao ve diğ. (2005), Zhang ve diğ. (2004), Abdel-Jaber ve diğ. (2003), Azate ve diğ. (2011), Micelli ve diğ. (2002), Tanarlan ve diğ. (2008), Chen ve diğ. (2016), Adhikary ve diğ. (2004), Al-Amery ve diğ. (2006), Jayaprakash ve diğ. (2008), Nadeem ve diğ. (2009), Bukhari ve diğ. (2010) Randl ve diğ. (2017)) yeterli miktarda ve yüzeye tam yapılmış olan yapıştırmanın kirişin kesme kapasitesinde önemli artışa neden olduğu görülmüştür. Özellikle ankraj uygulamasının sonuçlara pozitif etki yaptığı yani kesme mukavemetini ek olarak yükselttiği, kırılma sünekliğini arttırdığı da pek çok araştırmacı tarafından (Foster ve diğ. (2017), Belarbi ve diğ. (2012), Frederick ve diğ. (2015), Kim ve diğ. (2015), Galal ve Mofidi (2010), Ozden ve diğ. (2014), Bae ve diğ. (2013), Baggio ve diğ. (2014), Altin ve diğ. (2010), El-Maaddawy ve Chekfeh (2012), Gamino ve diğ. (2010), El-Saikaly ve diğ. (2017) Koutas ve diğ. (2013)) işaret edilmiştir. Bu çalışmalardan farklı olarak El-Saikaly ve diğ. (2015)'nın yaptığı çalışmada; CFRP halatlarla ankrajlanan kirişlerin, CFRP levhalı ve halatsız L-şeritli kirişlere kıyasla

kesme direncine daha fazla katkı sağladığını ortaya koyulmuştur. Ek olarak bu yöntem, CFRP'nin ayrılmasını ortadan kaldırmıştır. CFRP ve GFRP levhaların hibrit olarak uygulamalarında;(El-Maaddawy ve diğ. (2013), Koutas ve diğ. (2013), Deniaud ve diğ. (2003) kiriş kesme mukavemetinin arttığı tespit edilmiştir. Deniaud ve diğ. (2003) tarafından yapılan çalışmada cam elyaf takviyeli kirişlerin daha fazla sünek kırılma sergilediği görülmüştür. Yine, GFRP'nin levha ve şerit olarak uygulanması ya da ikisinin aynı anda uygulanmasıyla (Panda ve diğ. (2011), Nguyen ve diğ. (2017), Cao ve diğ. (2005), Baggio ve diğ. (2014), Panigrahi ve diğ. (2014-2015), Panda ve diğ. (2013) kesme kapasitesi yetersiz olan kirişlerin güçlendirilmesi sağlanmıştır. Şekil 4.1'de kiriş kesme etkisi ile kaynak taraması sonucu derlenen verilerden çalışmada kullanılan veri setindeki giriş parametreleri arasındaki ilişki görülmektedir. Şekildeki grafikler incelendiğinde kiriş boyutlarındaki artış ile kesme kuvvetindeki artışın doğru orantılı olduğu görülmektedir. Kiriş yüksekliği boyunca yapılan FRP uygulaması kesme kuvvetini de arttırmıştır. Çeşitli kalınlıklarda uygulanan FRP her kalınlıkta belirli bir kesme kuvvetini karşılamıştır. Burada bir genelleme yapılamamaktadır. FRP sargıları arası uzaklık etkisi için de aynı yorum yapılabilir. Yani farklı uzaklıklarda yapılan uygulama belirli bir kesme kuvvetini karşılamıştır. Bunun sebepleri; FRP'nin uygulama şekillerinden, FRP çeşitinden, uygulama şartlarından dolayı olduğu düşünülmüştür. FRP elastisite modülünün 100-300 GPa aralığındaki değerlerde olduğu durumlarda en büyük kesme kuvvetleri karşılanmıştır.





Şekil 4.1. Kesme etkisi ile giriş parametreleri arasındaki ilişki

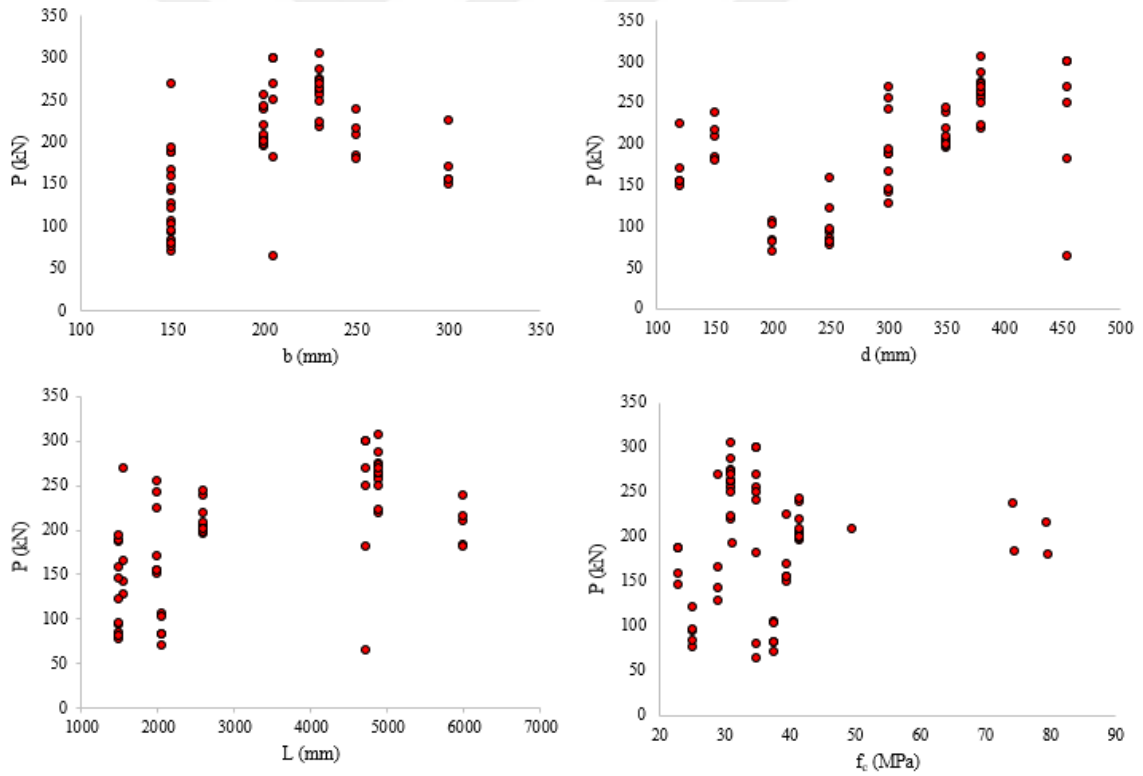
4.2. Kirişlerin Eğilme Davranışı ile İlgili Yapılan Çalışma Özeti

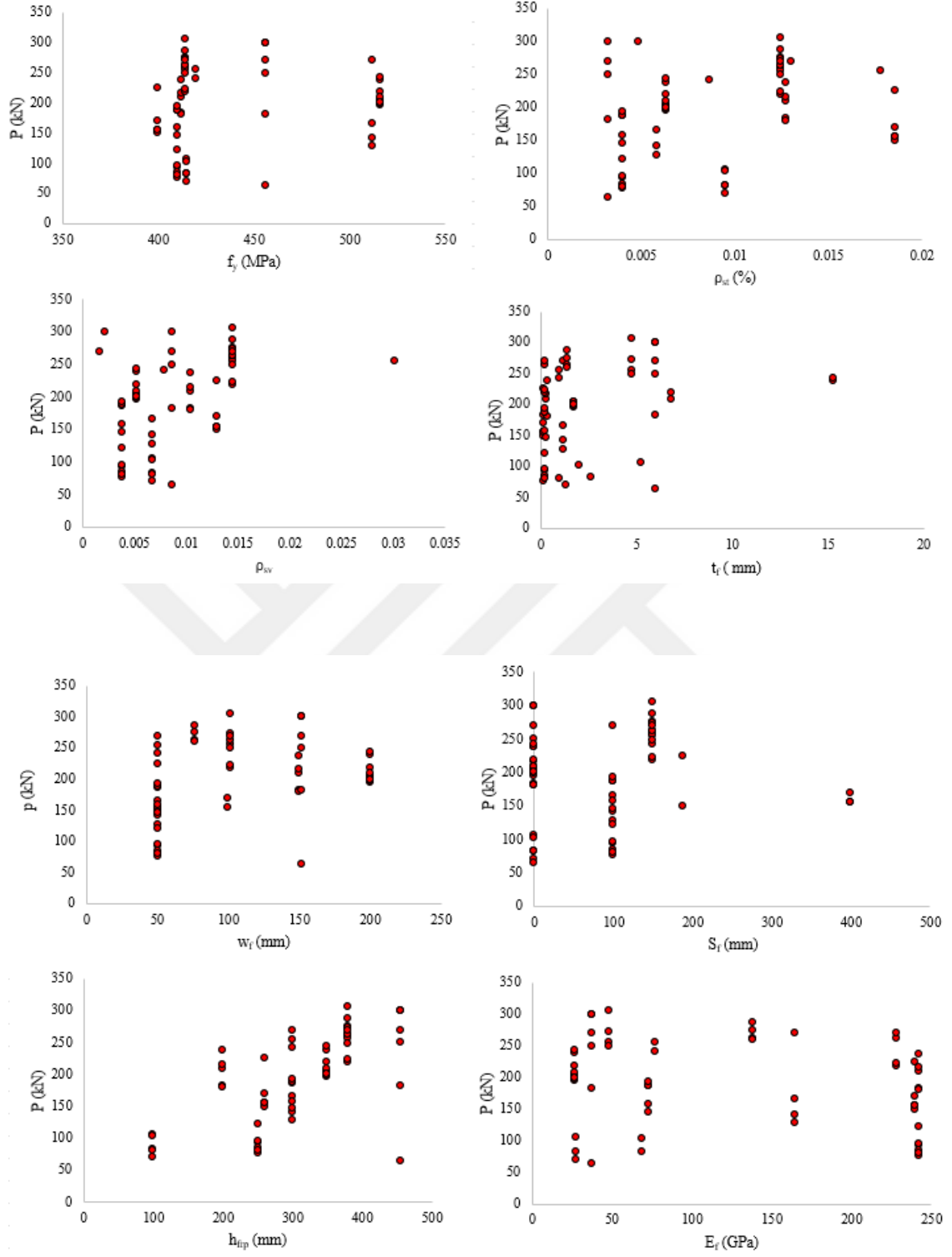
CFRP levhaları ile güçlendirilen kirişlerin eğilme kapasitesinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Güçlendirme işleminin yalnızca kirişlerin eğilme mukavemetini ve rijitliğini arttırmakla kalmayıp, aynı zamanda çatlakların gelişimini kontrol ettiğini ve kirişlerin sünekliğini arttırdığını sonucuna ulaşılmıştır (Jiangfeng Dong ve diğ. (2012), Tarek ve Al-Salloum (2001), A.F. Ashour ve diğ. (2004), Esfahani ve diğ. (2007), El-Ghandour (2011), Alagusundaramoorthy.P ve diğ., 2003), Yasmeen ve diğ. (2011), Grace ve diğ. (1999), Guowei Ni ve diğ. (2011), Alagusundaramoorthy ve diğ. (2003)). Islak-kuru ortam koşullarına tabi tutulan numunelerde eğilme mukavemetinde artış görülmüştür. Ancak sonuçlar oda sıcaklığındaki numunelerde daha olumludur. Bu numunelerde hasar daha çok beton arayüzü ile karbon lifli polimer levha arasındaki bağda görülmüştür. Lifli polimer güçlendirme tekniğinde epoksi seçiminin önemi, özellikle deniz ortamında daha fazla görülmüştür (Houssam A. Toutanji ve William Gomez, 1997).

Ayrıca Tarek ve Al-Salloum (2001) tarafından yapılan çalışmada varılan diğer bir sonuç ise; güçlendirme sonucunda yeterli süneklik elde edebilmek için CFRP laminat kalınlığının maksimum 4.76 mm, minimum 0.73 mm olabileceği sonucuna varılmıştır. Çelik levha ve CFRP levha ile güçlendirme yapılan kirişlerle deneysel çalışma yapılmıştır (Jumatt ve Alam (2015)). Bu çalışma sonucuna göre; CFRP levha ile güçlendirilmiş kiriş, çelik plaka ile güçlendirilmiş kirişe kıyasla daha yüksek kırılma yüküne sahiptir. Ancak çelik levhanın kirişte daha az sehim sağladığı, daha yüksek çatlama yükü ve daha az çatlak genişliği görülmüştür. Heshmi ve Al-Mahaidi, (2012) tarafından yapılan çalışmada, güçlendirme ile eğilme performansının artmasının yanında çimento esaslı FRP yapıştırıcısının epoksi esaslı FRP yapıştırıcısına kıyasla ısıya daha dayanıklı olduğu görülmüştür.

Yapılan deneysel çalışmalarda GFRP ile güçlendirme kirişin eğilme kapasitesini ve sertliğini önemli ölçüde arttırmıştır. Ayrıca çatlak kontrolünde başarılı olmuştur. Numunelerde GFRP kopması nedeniyle başarısızlık görülmemiştir. GFRP levha ile beton arayüzü arasındaki bağın ne kadar kuvvetli olduğu (yani levha ile betonun yekpare şekilde bir bütün olarak yapışmasının sağlanması), yapıştırma yapılacak beton yüzeyin dikkatli bir şekilde hazırlanması ve yapıştırıcı seçiminin, güçlendirme başarısı oldukça önemli olduğu görülmüştür. Ayrıca Tarek ve Al-Salloum (2001) tarafından yapılan çalışmada varılan diğer bir sonuç ise; güçlendirme sonucunda yeterli süneklik elde edebilmek için

GFRP laminat kalınlığının maksimum 11.91 mm, minimum 0.72 mm olabileceği sonucuna varılmıştır (Houssam A. Toutanji ve William Gomez (1997), Tarek ve Al-Salloum (2001), Hamid ve Mohammad (1991), Jiangfeng Dong ve diğ. (2012), Chiew ve diğ. (2007)). Şekil 4.2’de kiriş eğilme etkisi ile kaynak taraması sonucu derlenen verilerden çalışmada kullanılan veri setindeki giriş parametreleri arasındaki ilişki görülmektedir. Şekildeki grafikler incelendiğinde kiriş boyutlarındaki artış ile eğilme kuvvetindeki artışın doğru orantılı olduğu görülmektedir. Kiriş yüksekliği boyunca yapılan FRP uygulamasının yüksekliğinin artması eğilme kuvvetini de arttırmıştır. 1-6 mm aralığında çeşitli kalınlılarda uygulanan FRP hatırı sayılır değerlerde eğilme kuvvetini karşılamıştır. FRP sargı genişliğinin artması eğilme kuvveti değerini arttırmıştır. FRP sargılar arası uzaklığın az olduğu 0-150 mm aralığında eğilme kuvveti en fazla değerini almıştır. FRP elastisite modülünün her değerinde eğilme kuvveti yüksek ve düşük değerler almıştır.





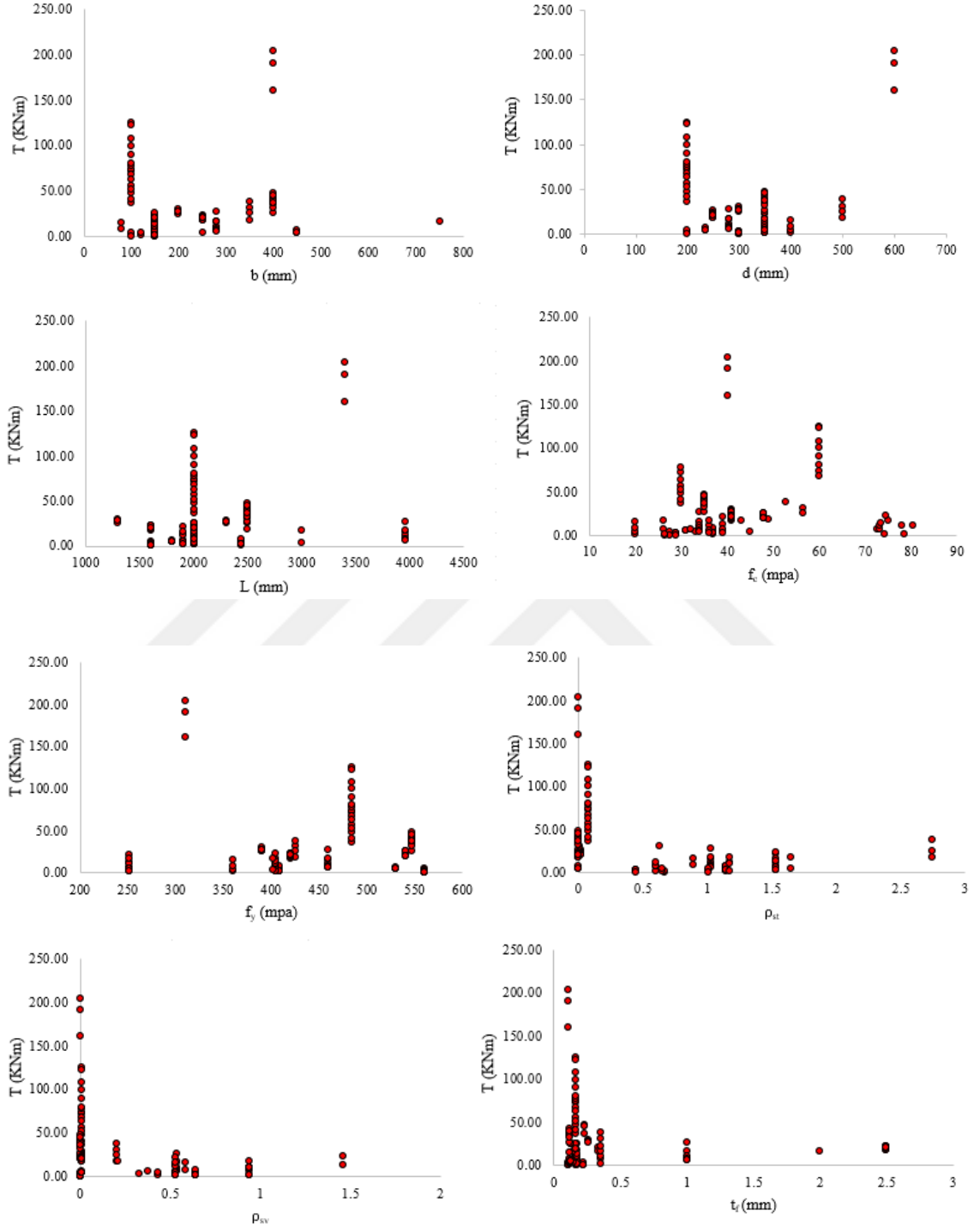
Şekil 4.2. Eğilme etkisi ile giriş parametreleri arasındaki ilişki

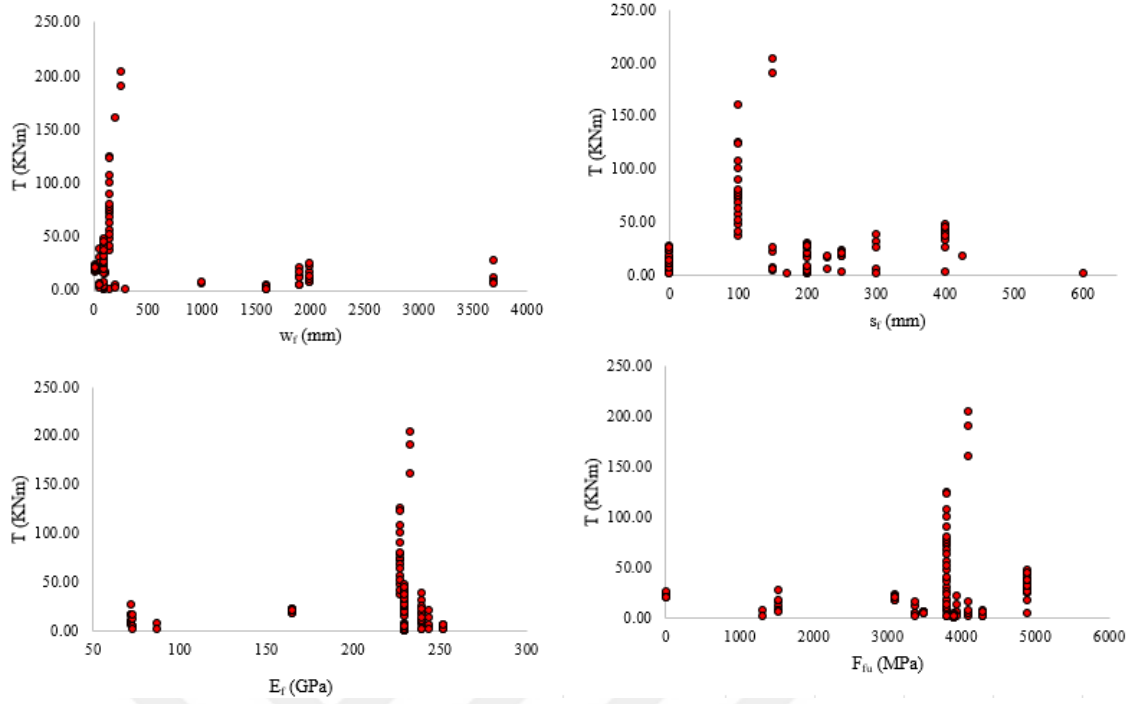
4.3. Kirişlerin Burulma Davranışı ile İlgili Yapılan Çalışma Özeti

Literatürde CFRP'nin levha ve şerit olarak uygulanması burulma kapasitesini arttırmada ve burulma davranışını iyileştirmede etkili olmuştur. Yapılan deneylerde (Ghobarah ve diğ. (2002), Deifalla ve diğ. (2013), Chai ve diğ. (2014), Elwan (2016), Saad Khalaf Mohaisen (2019), Hii ve Al-Mahaidi (2007), Jing ve diğ. (2007), İlkhani ve diğ. (2021), Mohaisen (2019), Ma ve diğ. (2020), Abduljalil ve Sarsam, (2012), Tibhe ve Rath, (2015), Salom ve diğ. (2004), Hii ve diğ. (2006) Ameli ve diğ. (2007), Obaidat ve diğ. (2019), Chalioris ve diğ. (2008), Muttalib I. Said ve Al-Shemmari (2020)) yeterli miktarda ve yüzeye tam yapılmış olan yapıştırmanın kirişin burulma mukavemetinde artışa neden olduğu görülmüştür. Özellikle 45° şerit sargı uygulamasının burulma direncini yükseltmede dikey olarak uygulanan şeritlerden çok daha etkili olduğu görülmüştür (Ghobarah ve diğ. (2002), Askandar ve diğ. (2020)). Ayrıca tam sarma ile güçlendirilmiş dikdörtgen kirişlerin, şeritlerle güçlendirilmiş kirişlerden daha iyi burulma davranışı ve daha yüksek kapasite sergilediği de görülmüştür (Chalioris (2008). Mohammadizadeh ve diğ. (2009)'nin çalışma sonucu; CFRP'nin burulma dayanımına katkısını %91'e kadar artırdığını ancak iki CFRP katlı güçlendirilmiş kirişler için %111'e kadar artırdığını göstermiştir.

GFRP levha ve şerit uygulamaları, (Panchacharam ve diğ. (2002), Singh ve Sharma ve diğ. (2020), Tibhe ve Rath (2015)) çatlama mukavemetini ve nihai burulma kapasitesini önemli ölçüde artırabildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca GFRP bar ile yapılan güçlendirme de Hadhood ve diğ. (2020) nihai burulma kapasitesini geliştirmiştir. Kandekar and Talikoti (2018) tarafından AFRP şeritlerle yapılan deneysel çalışmada Güçlendirilmiş kirişlerin burulma momenti taşıma kapasitesi, kontrollü kirişe göre arttığı görülmüştür. Şekil 4.3'te kiriş burulma etkisi ile kaynak taraması sonucu derlenen verilerden çalışmada kullanılan veri setindeki giriş parametreleri arasındaki ilişki görülmektedir. Şekildeki grafikler incelendiğinde kiriş boyutlarındaki artış karşılaman burulma kuvvetinde artışı sağlamıştır. FRP çekme dayanımının yüksek olduğu değerlerde burulma kuvveti en yüksek ve en düşük değerleri almıştır. Uygulanan FRP kalınlığının düşük olduğu değerlerde burulma kuvveti değeri daha yüksektir. FRP sargı genişliği ve sargılar arasındaki uzaklığın artması burulma kuvveti değerinde doğru orantılı ya da tam tersi bir etki yapmıştır gibi net bir yoruma izin vermemektedir. Ancak sargılar arası mesafenin en yüksek olduğu 600 mm değerinde burulma kuvveti en düşüktür. FRP

elastisite modülünün 220-250 GPa değerlerinde burulma kuvveti en yüksek ve en düşük değerlerini görmüştür.



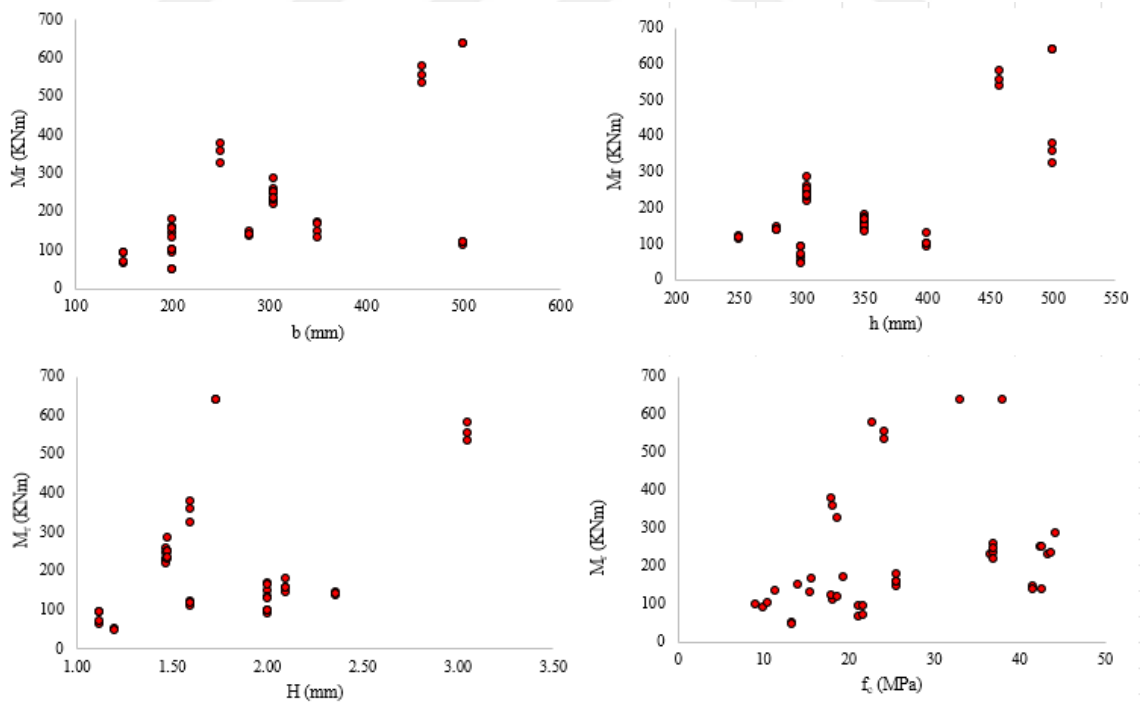


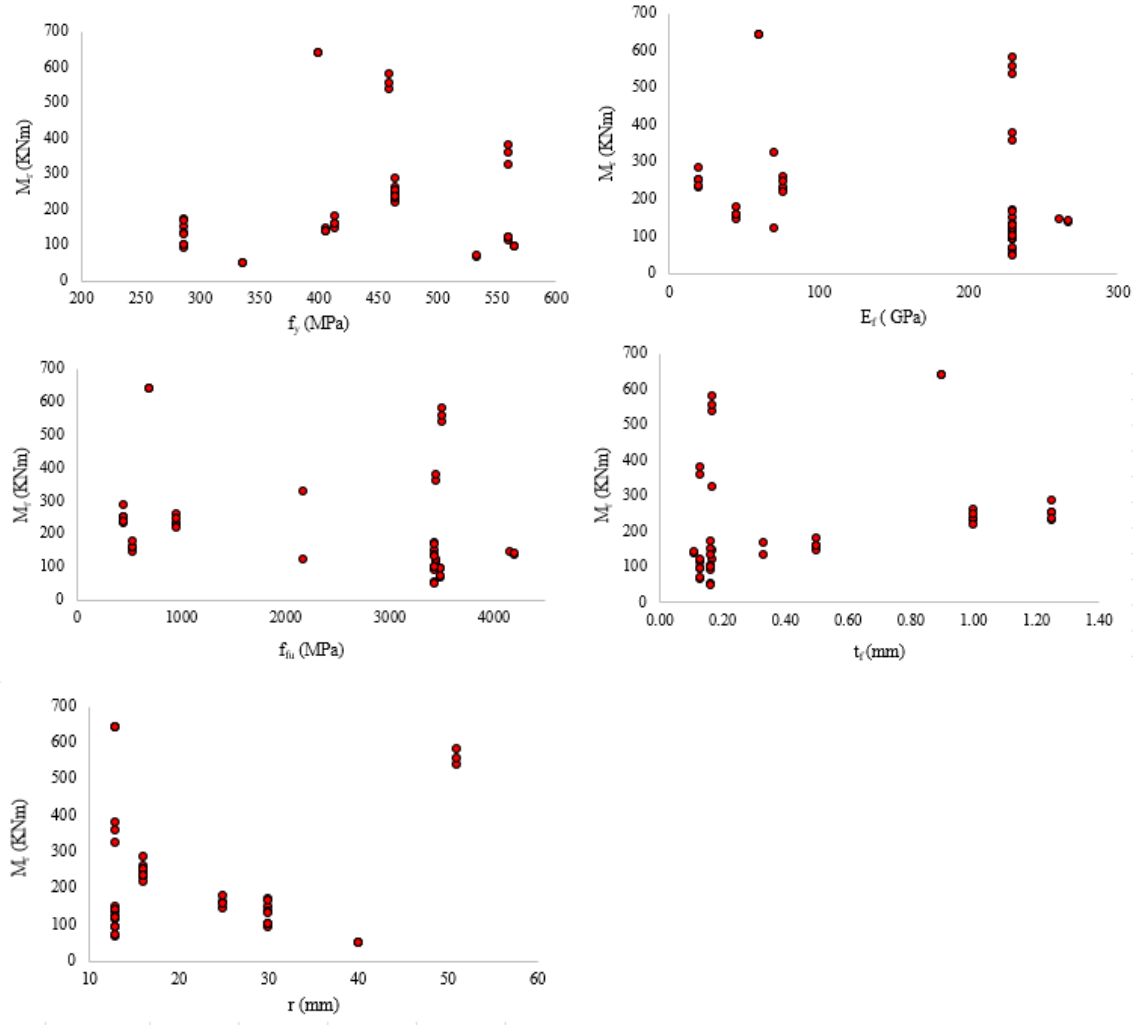
Şekil 4.3. Burulma etkisi ile giriş parametreleri arasındaki ilişki

4.4. Kolonlar ile İlgili Yapılan Çalışma Özeti

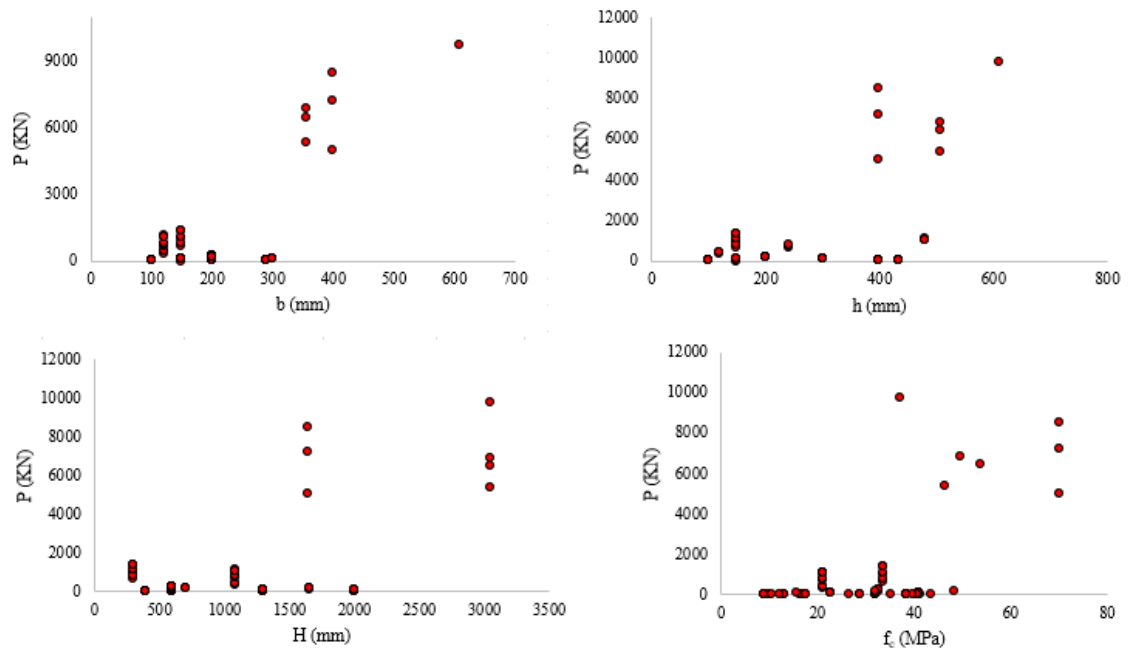
Lifli polimer malzemelerle güçlendirilen kolonların yük taşıma kapasitesinde meydana gelen değişimi incelemek için çalışmalar yapılmıştır. Karbon elyaf takviyeli malzeme kullanılarak kumaş şeklinde tam sarma şeklinde uygulama ile, Kabashi ve diğ. (2014), Özcan ve diğ. (2010), Colomb ve diğ. (2008), Lieping Ye ve diğ. (2002), Lacobucci ve diğ. (2003), Ana de Diegoa ve diğ. (2019), Zeng ve diğ. (2018), Eid ve Paultre (2017), Ozcan ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmalarda yanıl olarak kolonlarda sınırlandırma yapılmıştır. Bu çalışma sonuçları, kolonlarda yük taşıma kapasitesinin ve sünekliğin arttığını göstermiştir. Colomb ve diğ. (2008) ve Worajak Janwaen ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada karbon elyaf takviyeli malzemeyi şerit olarak güçlendirmede kullanmıştır. Şeritlerle güçlendirme, tamamen sarılmış kolonlara göre daha avantajlı bir enerji tüketen davranış sağladığı ve yük taşıma kapasitesinin arttığı görülmüştür. Ana de Diegoa ve diğ. (2019) ve Zeng ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada farklı bir noktaya dikkat çekmiştir; Kolonların davranışı üzerinde köşelerin yuvarlanma yarıçapının büyük bir etkisi olduğunu görülmüştür. Köşe yarıçap oranının artmasıyla hem basınç dayanımında artış olduğu gözlenmiştir. Memon ve Sheikh (2005), Herwig ve Motavalli (2012), De Luca ve diğ. (2011) tarafından cam elyaf takviyeli lifli polimer

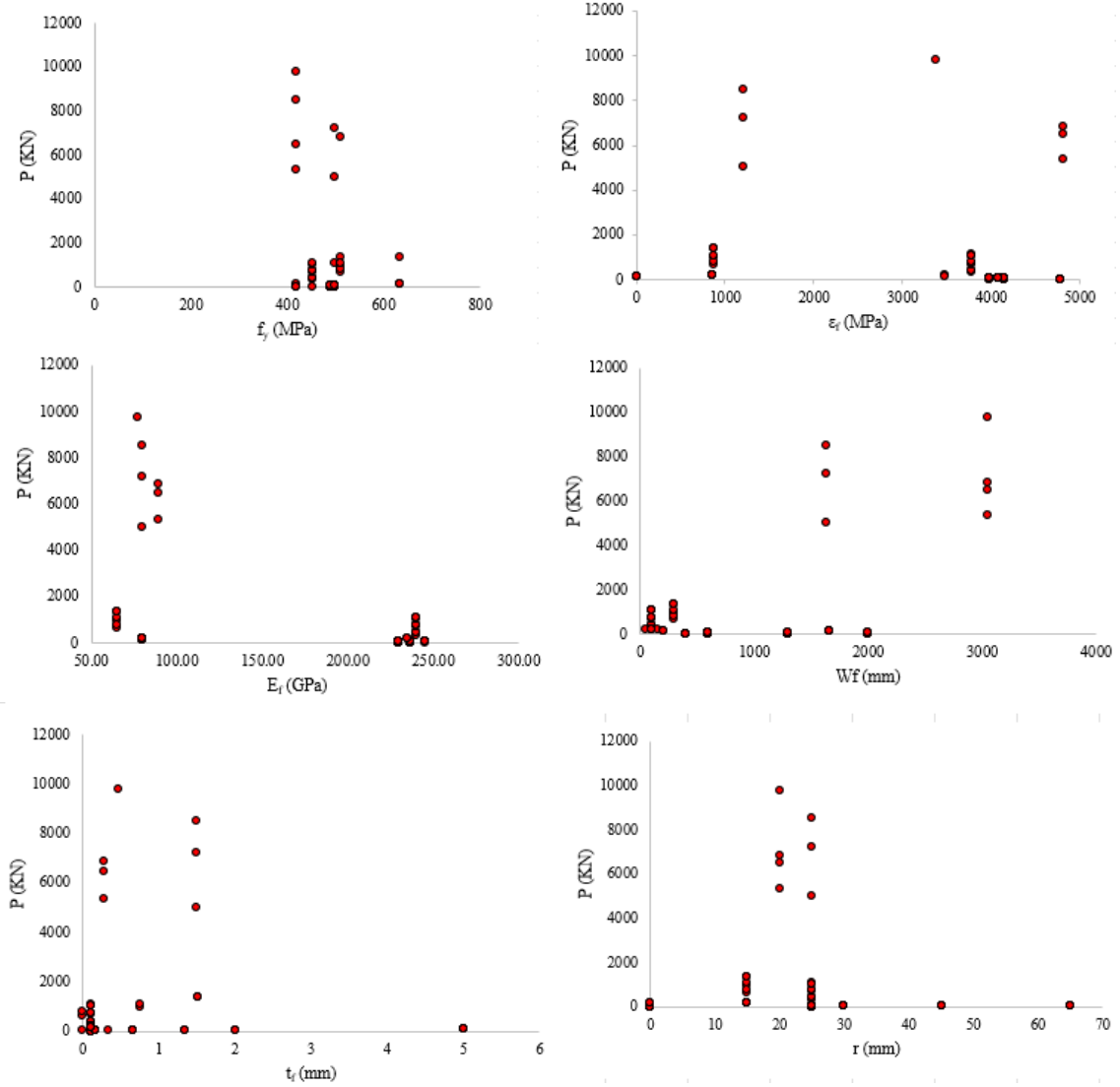
malzemelerle sarma şeklinde yapılan güçlendirme çalışmalarında; kolonun eksenel yük taşıma kapasitesinin, yanal şekil değiştirme kapasitesinin ve enerji yutma kapasitesinin arttığı görülmüştür. Şekil 4.4'te kolon moment etkisi, Şekil 4.5'te kolon eksenel yük etkisi ile veri setinin giriş parametreleri arasındaki ilişki görülmektedir. Şekildeki grafikler incelendiğinde kolon boyutlarındaki ve beton-donatı dayanımındaki artış karşılana moment ve normal kuvvet değerinde artışı sağlamıştır. FRP çekme dayanımının yüksek olduğu değerlerde genel olarak karşılana moment değeri de yüksektir. Uygulanan FRP kalınlığı ile moment ve eksenel yük ile ilgili doğru ya da ters orantılı olacak şekilde genelleme yapılamamaktadır. FRP uygulamasının daha sağlıklı olması açısından önemli olan, kolon köşesi yuvarlama yarı çapının artması moment taşıma kapasitesini arttırmıştır. Ancak bu değerin 15-25 mm arasında olduğu değerlerde kolon eksenel yük taşıma kapasitesi en yüksek değeri almıştır. FRP sargı genişliğinin artması kolon eksenel yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. FRP elastisite modülünün 250 GPa değerlerinde taşıma gücü moment, yaklaşık 80 GPa değerinde de eksenel yük taşıma kapasitesi en yüksek ve en düşük değerlerini almıştır.





Şekil 4.4. Kolon moment etkisi etkisi ile giriş parametreleri arasındaki ilişki



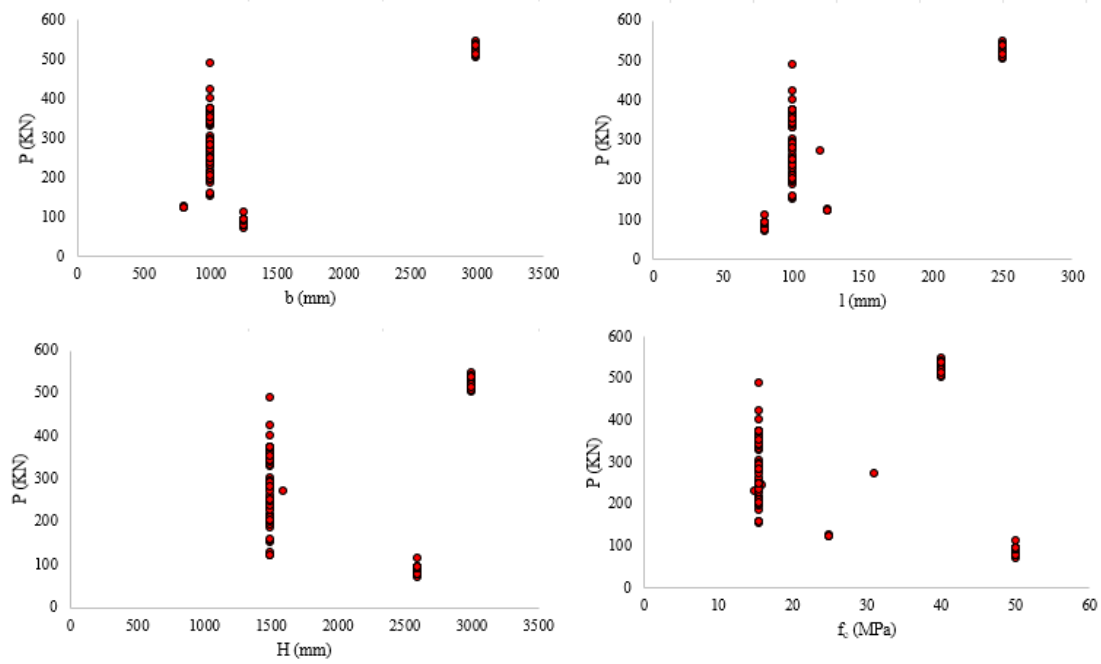


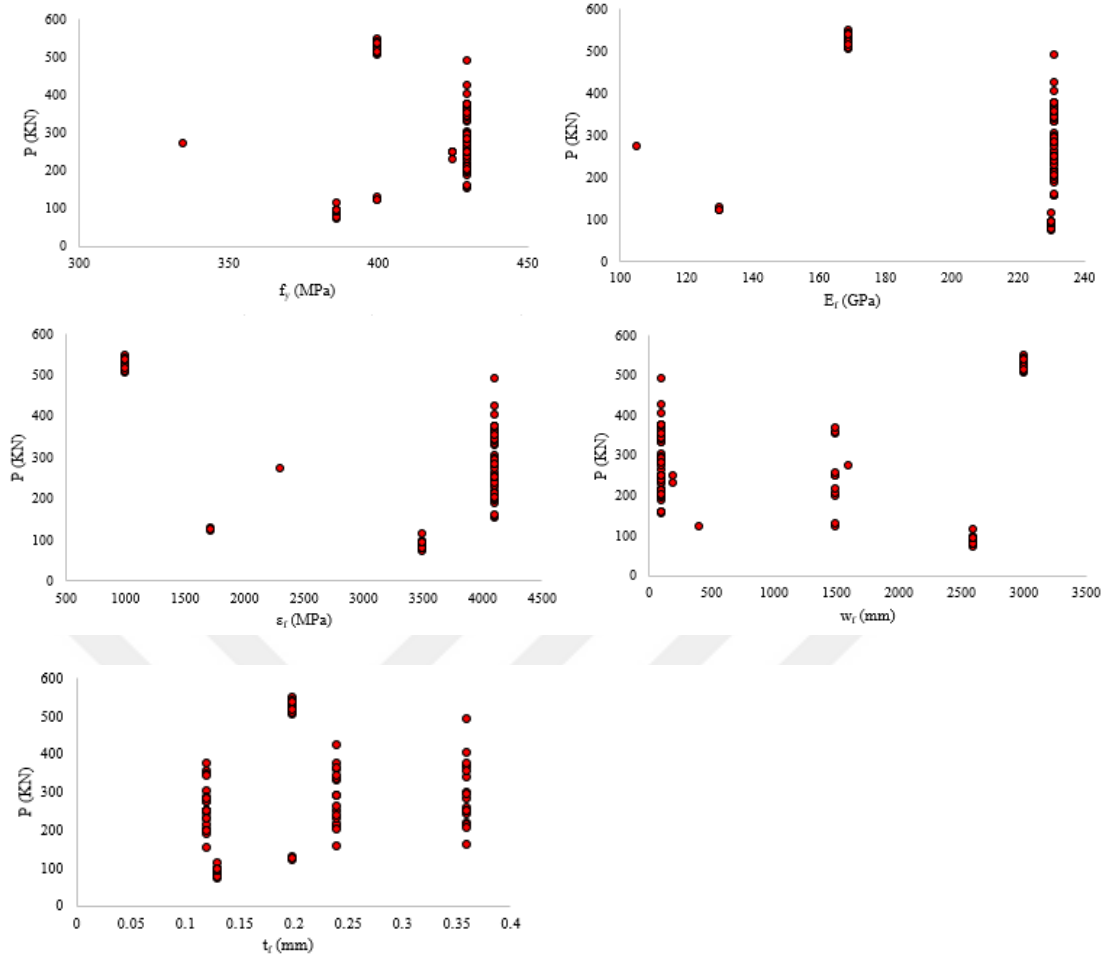
Şekil 4.5. Kolon eksenel yük etkisi etkisi ile giriş parametreleri arasındaki ilişki

4.5. Perdeler ile İlgili Yapılan Çalışma Özeti

Betonarme perdelerin karbon elyaf takviyeli lifli polimerlerle güçlendirilmesi ile ilgili Omid Habibi ve diğ. (2020), C. A. Cruz-Noguez ve diğ. (2014), S. Hiotakis ve diğ. (2004), Lombard Josh ve diğ. (1999), M. Vojdani ve R. Aghayari (2016), Mohamed Husain ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmalarda uygulama kumaş olarak sarma şeklinde yapılmıştır. Sinan Altin ve diğ. (2013), A. Delnavaz ve M. Hamidnia (2016) ise karbon elyaf takviyeli lifli polimeri şerit olarak uygulanması durumunda perde davranışını araştırmıştır. Sonuçlara göre; perde duvarların nihai yük taşıma kapasitesinin ve yanal deformasyon kapasitesinin arttığı görülmüştür. Dejian Shen ve diğ. (2019) tarafından yapılan bazalt elyaf takviyeli lifli polimer malzemelerle yapılan güçlendirme

çalışmalarında yine yük taşıma kapasitesinde iyileşme olduğu görülmüştür. Şekil 4.6’da perde eksenel yük etkisi ile veri setinin giriş parametreleri arasındaki ilişki görülmektedir. Şekildeki grafikler incelendiğinde perde boyutlarındaki ve beton-donatı dayanımındaki artış karşıl原因anan normal kuvvet değerinde doğru orantılı ilişki kurulamamaktadır. Çünkü düşük ve yüksek değerlerde karşıl原因anan normal kuvvet değeri de düşük ve yüksek değere sahiptir. FRP çekme dayanımının 4000 MPa olduğu değerde normal kuvvet değeri en zengin ve farklı değerlere sahiptir. Uygulanan FRP kalınlığı ile eksenel yük kapasitesi ile ilgili doğru ya da ters orantılı olacak şekilde genelleme yapılamamaktadır. FRP sargı genişliğinin artması kolon eksenel yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. Sargı genişliğinin en yüksek olduğu değerde eksenel yük en yüksek değerini almıştır. FRP elastisite modülünün en yüksek olduğu değer yaklaşık 235 GPa’da eksenel yük taşıma kapasitesi genel olarak en yüksek ve en düşük değerlerini almıştır.



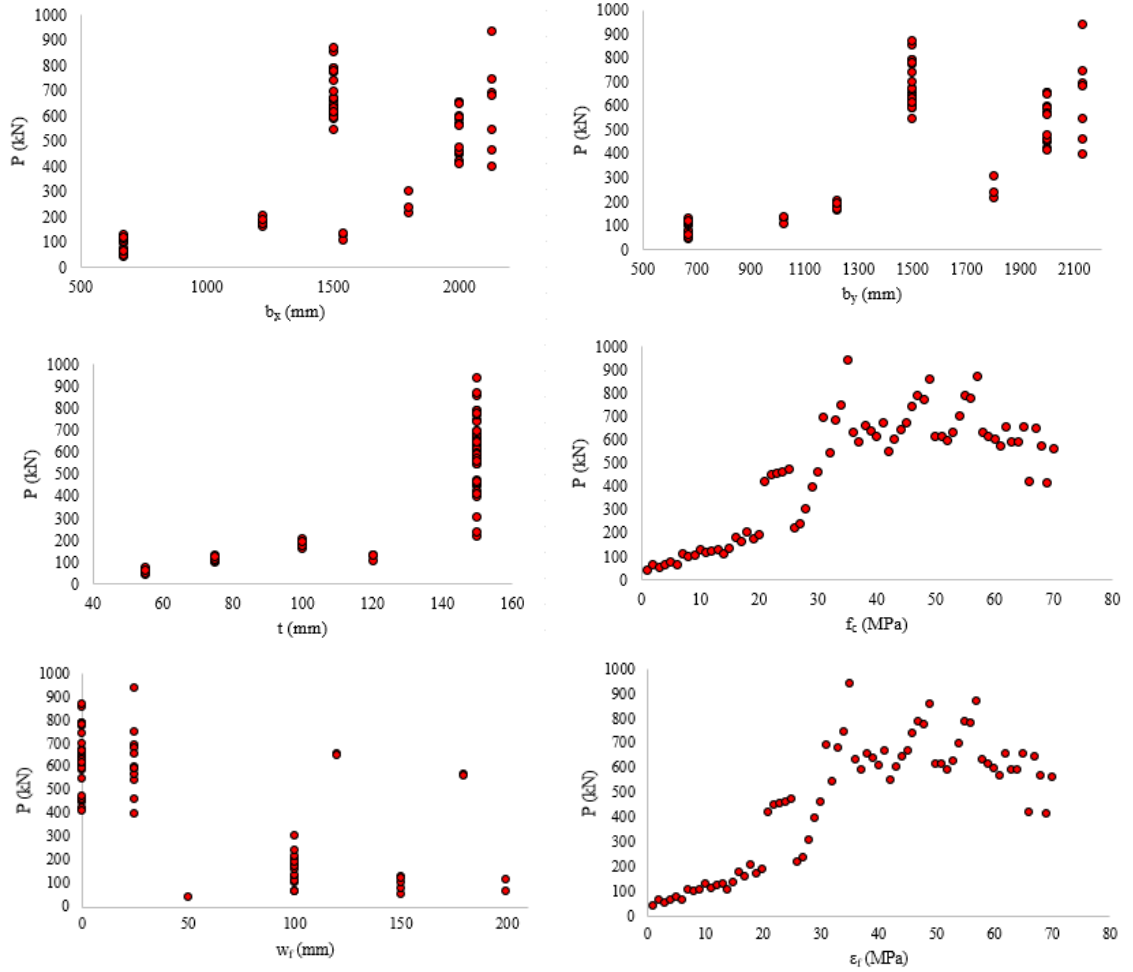


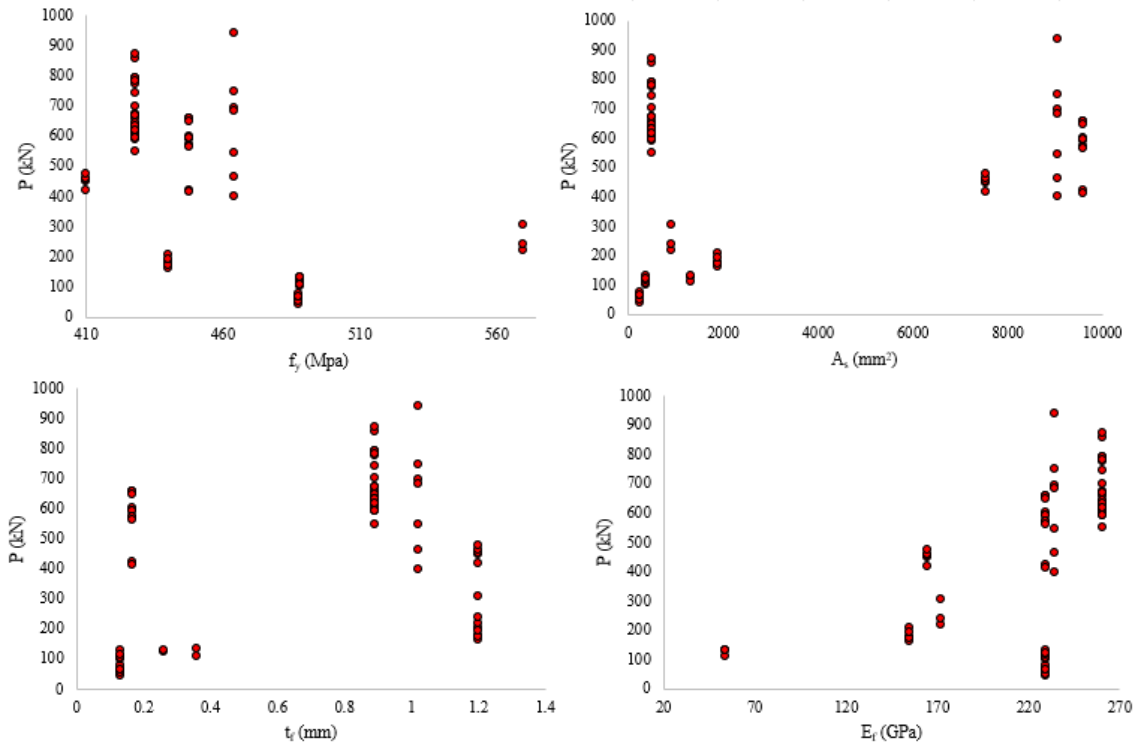
Şekil 4.6. Perde eksenel yük etkisi ile giriş parametreleri arasındaki ilişki

4.6. Döşemelerin Zımbalama Davranışı ile İlgili Yapılan Çalışma Özeti

Literatürde elyaf takviyeli lifli polimerlerin levha, şerit veya sarma olarak uygulanmasıyla döşemelerin zımbalama kapasitesine olan etkileri incelenmiştir. Karbon elyaf takviyeli polimerlerle yapılan şerit güçlendirmelerinde; (Soudki, El-Sayed, ve Vanzwol (2012), Sharaf, soudki, ve Van Dusen (2006), Abdullah, Bailey, ve Wu (2013), Binici ve Bayrak (2003), Erdogan ve diğ. (2013)) döşemenin zımbalama kapasitesinde artış olduğu görülmüştür. Sissakis ve Sheikh (2007), Harajli ve Soudki (2003), Erdogan ve diğ. (2010 ve 2011) tarafından yapılan karbon elyaf takviyeli polimerlerin levha ve sarma olarak ve Jafarian, Mostofinejad, Naderi (2020) tarafından grid olarak yapılan güçlendirme çalışmalarında kontrol numunelerine kıyasla zımbalama direncinde artış görülmüştür. Cam elyaf takviyeli polimer malzemenin sarma olarak uygulanmasıyla ilgili El-salakawy, Soudki, ve Polak (2004) tarafından yapılan çalışmada da zımbalama kapasitesinde önemli oranda artış gözlenmiştir. Şekil 4.7’de döşeme zımbalama etkisi ile

veri setinin giriş parametreleri arasındaki ilişki görülmektedir. Şekildeki grafikler incelendiğinde döşeme boyutlarındaki ve beton dayanımındaki artışla beraber zımbalama dayanımının da artış görülmüştür. FRP çekme dayanımının artması ile genel olarak zımbalama kuvveti de artmıştır. Uygulanan FRP kalınlığı 0.75 mm'den sonra zımbalama yük kapasitesi artmış ve istrarlı bir şekilde belli değerler almıştır. FRP sargı genişliğinin düşük olması zımbalama kuvveti değerini olumsuz yönde etkilememiştir. FRP elastisite modülünün artması zımbalama kuvvetini de genel olarak arttırmıştır.



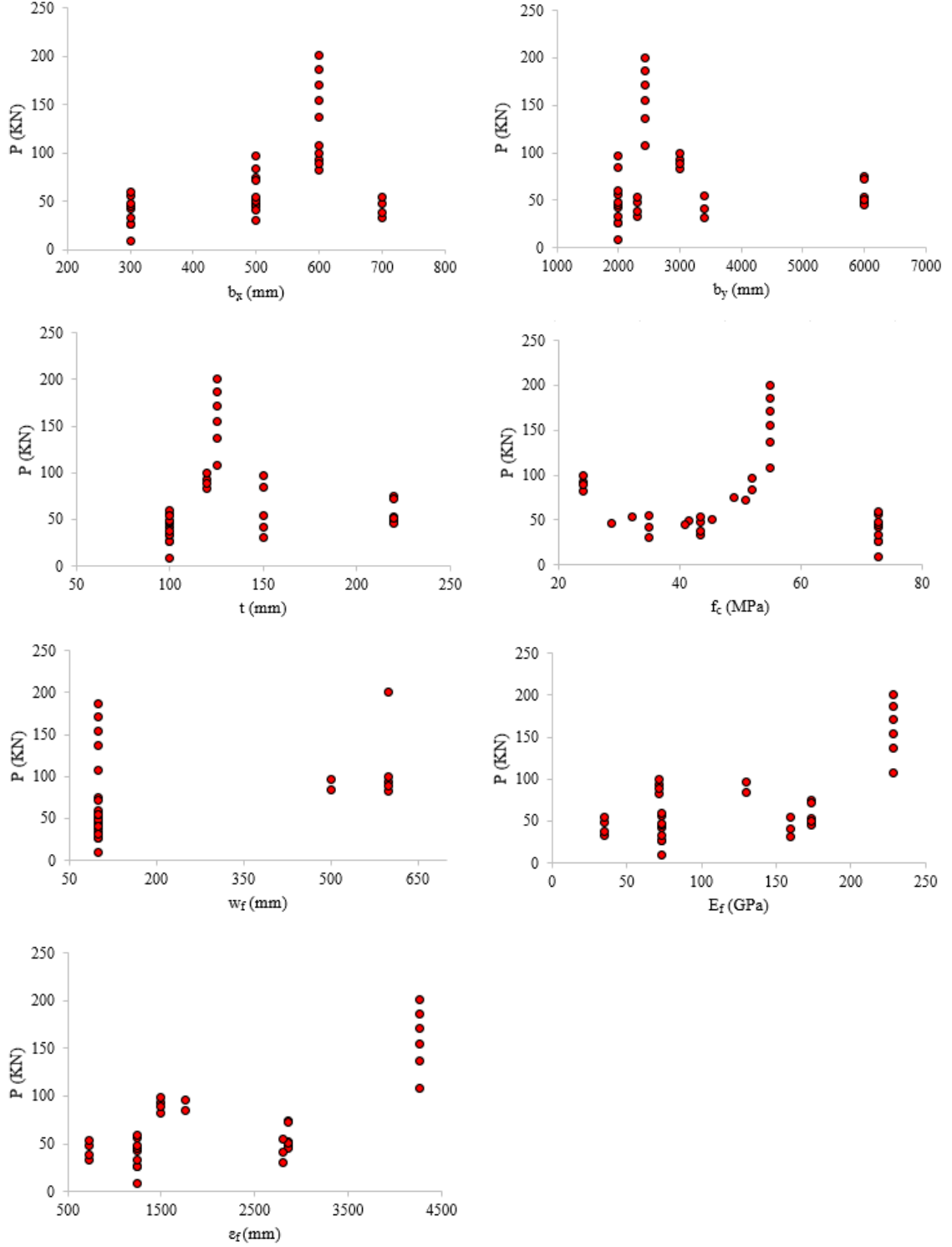


Şekil 4.7. Döşeme zımbalama etkisi ile giriş parametreleri arasındaki ilişki

4.7. Döşemelerin Eğilme Davranışı ile İlgili Yapılan Çalışma Özeti

Literatürde karbon elyaf takviyeli lifli polimerin levha ve şerit olarak uygulanmasıyla döşemelerin eğilme kapasitesini arttırmaya yönelik güçlendirilme yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda (Renata Kotynia ve diğ. (2014), H.S. Mahmoud ve diğ. (2021), Omar Al-Ghazawi ve Rajai Z. Al-Rousan (2020), Sina Yazdani ve diğ. (2021), Niloufar Moshiri ve diğ. (2020)) yeterli miktarda ve uygun şekilde yapılmış olan güçlendirmenin döşemenin nihai eğilme kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Liang Fang ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada bazalt elyaf takviyeli laminant ile güçlendirme yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda döşemenin eğilme kapasitesinin büyük oranda arttığı görülmüştür. Ayrıca döşemenin sehim durumu da azalmıştır. Nehal M. Ayash ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada cam elyaf takviyeli laminant levha ile güçlendirme uygulanmıştır. Bu çalışma sonucunda da sehim değeri düşük, yük taşıma kapasitesinin de fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 4.8’de döşeme eğilme etkisi ile veri setinin giriş parametreleri arasındaki ilişki görülmektedir. Şekildeki grafikler incelendiğinde döşeme boyutlarındaki ve beton dayanımındaki artışla beraber eğilme

dayanımında da artış görülmüştür. FRP çekme dayanımının artması ile genel olarak eğilme kuvveti de artmıştır. FRP sargı genişliğinin ile eğilme kuvveti arasında kayda değer bir ilişki görülmemektedir. FRP elastisite modülünün en yüksek olduğu değerde eğilme kuvveti de en yüksek değeri almıştır.



Şekil 4.8. Döşeme eğilme etkisi ile giriş parametreleri arasındaki ilişki

5. MAKİNE ÖĞRENMESİ TANIMI VE GELİŞİMİ

Yapay zekâ, genellikle insan zekâsı gerektiren görevleri yerine getirebilen makinelerin geliştirilmesine odaklanan bir bilgisayar bilimi alanıdır. Yapay zekâ hızla kişisel yaşamlarımızdan günlük yaşamlarımızın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Yapay zekâ, makinelerin genellikle insan zekâsı gerektiren bilişsel görevleri yerine getirme yeteneğini ifade eder. Bunlar öğrenme, akıl yürütme, algılama ve karar verme gibi süreçleri içerir. Yapay zekâ sistemleri insan zekasını simüle etmek ve değişen koşullara uyum sağlamak için tasarlanmıştır (Russel ve Norvig, 2016).

Makine öğrenmesi, verilerden kalıpların çıkarılmasıyla ilgilenen ve daha sonra algoritmaların kendilerini deneyimle geliştirmelerini sağlamak için bu kalıpları kullanan bir yapay zekâ alt kümesidir.

Makine Öğrenmesi, bilgisayar biliminin bir alt dalıdır. Yapay zekâ ile öğrenme gerçekleştirilmesine ve tahmin üretmeye çalışan algoritmalarından oluşan bir sistemdir. Bu algoritmalar, bilinen klasik algoritmaların aksine, kuralları önceden belirlenmiş ve yapılacak işlemleri sabit olan algoritmalar değildir. Bu algoritmalar veri girişlerinden öğrenme gerçekleştirebilmek için tahminler ve kararlar üretmek üzere programlanmıştır (Alkan, 2019).

İlk olarak 1943 yılında, nörobilimci Warren McCulloch ve mantıkçı Walter Pitts makine öğrenmesinin temellerini atmıştır. İnsan beynindeki sinir ağlarının modellenmesini yapmışlardır. Makine öğrenmesi tabiri 1952 yılında Arthur Samuel tarafından adlandırılmıştır. Arthur Samuel ilk makine öğrenmesi programlarını IBM'deki laboratuvarında yazmıştır. Dama oyununda her oynadığında yaptığı hataları düzeltebilmek adına her oynadığı oyundan elde ettiği verilerle kazanma olasılığını iyileştirmeye yarayan programı, makine öğrenmesinin ilk örneklerindendir. Henry Kelley 1960 yılında "Optimal Uçuş Rotaları için İrtifa Kuramı" makalesini yayımlamıştır. Yapay sinir ağlarını eğitmede kullanılan hatalarının geriye doğru yayılımı modellerinin gelişiminde temel rol oynamıştır.

1971 yılında Ivakhnenko, "Veri İşlemede Grup Metodu" yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntemle sekiz katmanlı bir derin ağ oluşturabilme imkânı sağlanmıştır. Yetmişli yılların sonunda Fukushima, görsellerin nasıl tanınacağını öğrenen yapay sinir ağları olan "neocognitron"u ortaya koymuştur. 1995 yılında Cortes ve Vapnik tarafından destek vektör makineleri (metinlerin sınıflandırılması, görsellerin sınıflandırılması, el

yazılarının tanınması gibi konularda kullanılmaktadır) önemli bir ilerleme göstermiştir. 2009'da ImageNet Prof. Fei-Fei Li tarafından kurulmuştur. 2019 itibariyle, on dört milyondan fazla etiketli görselin erişime açık olduğu ücretsiz bir veri tabanı oluşturmuştur. 2014 yılında Facebook, %97.35 doğrulukla yapay sinir ağlarını kullanarak Deep Face ile yüzleri tanımaya başlamıştır. Bugün ise günlük hayat, siber güvenlik konusu gibi hemen her alanda kullanılan makine öğreniminin önemi dünyada gittikçe artmaktadır.

Makine öğrenmesi, veriler üzerinde matematiksel işlemler yapılarak tahminler üretilen çalışma bütünüdür. Makine öğrenmesi, makinelerin verileri öğrenmesi zorunluluğunun fark edilmesiyle bir ihtiyaç haline gelmiş ve geliştirilmeye başlanmıştır. Daha önce bilgisayar biliminin bir alt dalı olan makine öğrenmesi, hakkında yapılan çalışmaların ve duyulan ihtiyacın artmasıyla 1990'lı yıllarda yeniden adından söz ettirmiş ve bu sefer ayrı bir bilim alanı olarak gelişimine devam etmiştir. Makine öğrenmesi sıklıkla veri madenciliği ile karıştırılmaktadır. Temelde, makine öğrenmesi elde olan verilerle öğrenme gerçekleştirip tahmin üretmeyi hedefler. Veri madenciliği ise eldeki verilerden, o veriye ait daha önce bulunmamış özellikleri çıkarıp tanımlamayı hedefler. Bu iki sistemin ortak kullandığı metotlar bulunmaktadır (Alkan, 2019). Aslında makine öğrenmesi, insan beynini taklit ederek geliştirilmiştir. Tıpkı insanlar gibi, mevcut durumları görüp değerlendirdikçe, öğrenme becerisi de tahmin başarısı da artmaktadır. Derin öğrenme, makine öğrenmesinden çıkarımlar sağlamak için kullanılan özel bir makine öğrenmesi çeşididir ve sinir ağları kullanır. Günümüzde karşı karşıya kaldığımız büyük veriden sonuç çıkarmak, klasik yöntemlerle artık mümkün değildir. Mümkün olsa bile çok zaman ve kaynak gerektirmektedir. Makine öğrenmesinin her geçen gün popülerliğinin artmasında, büyük veriden sonuç çıkarmak için duyulan gerekliliğin etkisi vardır (Alkan, 2019). Algoritmalar ile verilere ait kalıpları öğrenen makine öğrenmesi, kalıpları kullanarak tahminler üretir. Makine öğrenmesi sabit komutlarla değil, verinin kendisiyle öğrenme gerçekleştirdiği için, değişken verilerle çalışırken oldukça kullanışlıdır. En yaygın makine öğrenimi kullanım alanları şunlardır: Kişisel reklamlar gösterme, sahtekarlık tespiti, e-posta analizi, kullanıcı davranışlarına uygun cevaplar veren chatbotlar, sosyal medya ana sayfaları, CRM (Müşteri İlişkileri Yönetimi). Makine öğrenmesi sistemleri, her ne kadar öğrenme ve tahmin üretme işini kendileri yapsalar da öğrenilecek girdi verisini ve hangi çıktının isteneceğini belirleyen kişiler veri bilimi uzmanlarıdır. Modelin özelliklerini ve modelin daha iyi sonuçlar vermesi için

gereklilikleri veri bilimi uzmanları belirlemektedir. Çalışmanın giriş kısmında büyük veri olarak tanımlanan verinin, depolanmasının yanı sıra işlenmesinin de zorluğundan bahsedilmiştir. Büyük verinin analiz edilebilmesi için geçmişteki verileri kullanarak gelecekteki veriye dair tahminde bulunulması, makine öğrenmesinin temel amacıdır (Diri, 2014). Makine öğrenmesi uygulanacak olan veri kümesinde, elemanların özellikleri birbirine çok benzer olduğunda sınıflandırma işleminin doğru çalışması güçleşir. Bu gibi durumlarda, kullanılan verinin sayısının artırılması algoritmanın daha doğru sonuç vermesine olanak sağlamaktadır (Koyun ve Afşin, 2017).

Makine öğrenmesi verinin olduğu her alanda kullanılabilmektedir, özellikle gelecekteki bir sonucu tahminlemek için oldukça sık kullanılan bir metodolojidir. Öğrenci başarısından, seçim sonuçlarına, kanser teşhisi konmasından güneş enerji verimliliğine kadar çok geniş bir yelpazede çalışma örnekleri görülmektedir. Hazır olan verilerin algoritmalar yardımıyla kullanılmasıyla doğruluğu tespit edilerek arttırılmaya çalışılır. Makine Öğrenmesi'nin bir alt dalından bahsedecek olursak, bu da derin öğrenmedir.

5.1. Makine Öğrenmesi Teknikleri

Makine öğrenmesi, insan fizyolojisine yönelik mümkün olan eğitim, öğrenme ve bilgi aktarım süreçlerinin makineler üzerinde algoritmalar aracılığıyla gerçekleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu süreç için veriler üzerinden eğitim modeli oluşturularak sistemin karar verme kalitesi geliştirilir. Böylece sağlanan öğrenmeyle sistemin başarılı tahminler yapması veya benzer veriler sağlandığında başarılı sınıflandırmalar yapması beklenir.

Makine öğrenmesi, problemin niteliğine göre çözümler sunan bir algoritma sistemidir. Makine öğrenmesi algoritmaları sınıflandırma yapabilir, tahminlerde bulunur ve nesneleri tanıır. Makine öğrenmesi Denetimli (eğitilmiş) ve denetimsiz (eğitimsiz) öğrenme olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır.

Denetimli öğrenmede; makine elindeki veriler ve çıktılarından bilgileri öğrenir, matematiksel olarak modeller ve yeni verileri tahmin eder. Regresyon (tahmin) ve sınıflandırma denetimli öğrenme yöntemleridir. Ayrıca en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Denetimsiz öğrenmede; makinenin elinde veri seti yoktur. Yani modelleme yapmak söz konusu değildir. Makinenin kayda değer bir sonuç çıkarmasını bekleriz.

Denetimli öğrenmede eğitmek için her veri noktasının önceden belirlenmiş bir hedef değerine bağlandığı etiketli bir veri kümesi kullanılır. Algoritma, eğitim verilerinde keşfettiği kalıplara dayanarak yeni, öngörülemeyen veriler için hedef değeri tahmin etmeyi öğrenir. Doğrusal regresyon, karar ağaçları ve sinir ağları bazı yaygın denetimli öğrenme tekniklerindendir (Goodfellow ve diğ., 2016). Algoritma etiketlenmemiş bir veri kümesi üzerinde eğitilir; bunun tersine, veri noktalarının herhangi bir ilişkili hedef değerine sahip olmadığı anlamına gelir.

Denetimsiz öğrenme, makine öğreniminin bir alt kümesidir. Bunun yerine, verinin neyi temsil ettiğine dair önceden bir anlayışa gerek kalmadan program, verinin kendi içindeki kalıpları ve yapıyı bulur. Denetimsiz öğrenmede kümeleme, anormallik tespiti ve boyutluluk azaltma yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır (Hastie ve diğ., 2009).

Denetimli ve denetimsiz öğrenmenin avantajları ve dezavantajları vardır ve hangi yöntemin kullanılması gerektiği konuya ve mevcut verilere bağlıdır. Denetimli ve denetimsiz öğrenme teknikleri ve özelliklerinde gelecek bölümlerde bahsedilmiştir.

5.2. Makine Öğrenmesinde Tahmin Yöntemleri

Makine öğrenmesi Gözetimli (Supervised) ve Gözetimsiz (Unsupervised) olmak üzere iki farklı teknikten oluşmaktadır.

Gözetimli öğrenmede veri seti bir dizi girdi verisi ve bunların bilinen çıktılarından (etiketlerinden) oluşmaktadır. Gözetimli denilmesinin sebebi girdi verilerinin açıklaması (çıktısı) olan etiketlerin gözetmen tarafından verilmiş ya da belirlenmiş olmasıdır (Mohammed ve diğ., 2016). Burada hedef veri setinde olmayan yeni veriler geldiğinde makul tahminler oluşturmak için bir model eğitilmesidir. Gözetimli öğrenmede makine öğrenmesi modeli geliştirmek için sınıflandırma (classification) ve regresyon (regression) teknikleri uygulanmaktadır.

Sınıflandırma tekniği belirli bir veri setinde özniteliklere bağlı olarak girdilerin sınıflara ayrılmasında kullanılmaktadır. Kısaca bir ayırım mekanizmasıdır ve amaç bir kategoriyi ya da sınıfı tahmin etmektir. Örneğin; bir e-postanın spam ya da değil olarak sınıflandırılmasında, bir tümörün kanserli ya da iyi huylu olarak ayrılmasında kullanılır.

Regresyon tekniği ise çıktı olarak sayısal bir değer tahmin edilmeye çalışıldığında kullanılmaktadır (Gollapudi, 2016). Örneğin elektrik şebekesindeki tüketimin tahmininde veya bir ekipmanın arıza yapmasına kalan süresinin tahmininde kullanılır.

Gözetimsiz öğrenmede etiketsiz veri setleri analiz edilir. Buradaki amaç veri setindeki gizli yapıların, örüntülerin veya veri gruplarının ortaya çıkarılmasıdır (Mohammed ve diğ., 2016).

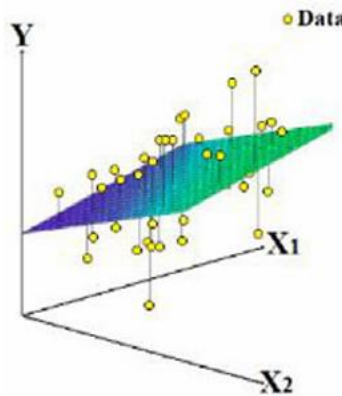
Regresyon tabanlı Makine öğrenmesi algoritmaları, veriler için bilinmeyen değerlerin tahmin edilmesinde kullanılır. Algoritma bir problemi çözmek için tanımlanan adımlardır. Makine öğrenmesi ile algoritma eğitimi sayesinde algoritmalar, veriyi tanımlanabilen ve verinin alt değerlerini tahmin edebilmektedir. Regresyon birden fazla değişken arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bağımlı değişkenin (y) ve bağımsız değişkenin (x) olması durumunda regresyon yöntemi, y'nin x'in bağımlı bir fonksiyonu olması şeklinde tanımlanır ve verilerdeki değişkenler arasında fonksiyon türüne göre farklılaştırılır. Makine öğrenmesi modellerinin eğitilmesi için öncelikle büyük ölçüde verinin yönetilmesi ve verinin eğitilmesi için en uygun algoritmanın seçilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında Basit-Çoklu Doğrusal Regresyon, Karar Ağacı, Rastgele Orman ve Destek Vektör Regresyon, Extreme Gradient Boosting (XG-Boost), ADABOOST, Bagging-DT tahmin algoritma modelleri ele alınmıştır.

K-En Yakın Komşular sınıflandırması, Navie Bayes algoritması, K-Ortalama Kümeleme algoritması gibi algoritma modelleri, çalışmada kullanılmayan, sınıflandırma grubuna ait olan algoritmalar. Çalışmada elde olan verilerden, bir tahmin elde etme yolu izlendiği için tahmin algoritmaları kullanılmıştır.

5.2.1. Doğrusal Regresyon

Basit Doğrusal Regresyonlar, x ve y arasındaki ilişkinin doğrusal bir yayılım gösterdiği istatistik tabanlı bir algoritmadır. Şekil 5.1'de doğrusal regresyon şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 5.1. Doğrusal regresyon grafiksel gösterimi (Doğan, 2024)

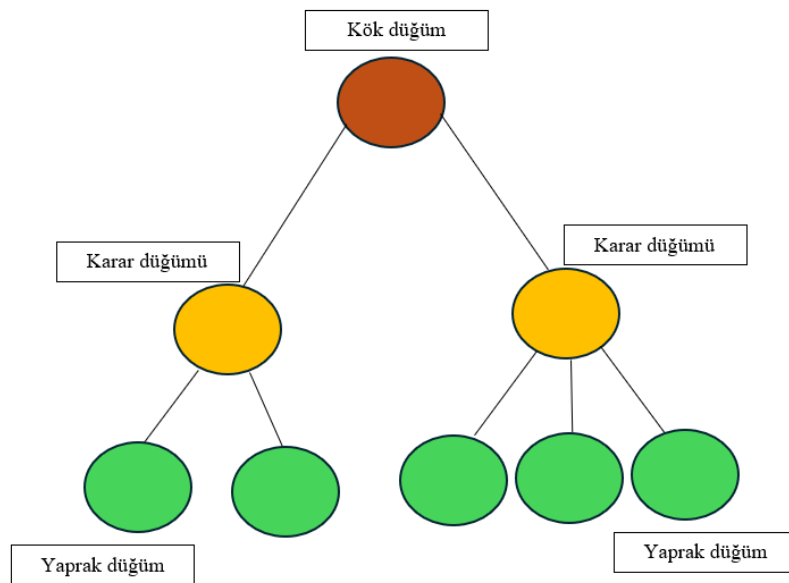
Giriş verileri bağımsız x değişkeni olarak, çıkış verileri ise x 'e bağlı y değişkeni olarak tanımlanır. Y yalnızca bir x değişkenine bağlıdır (Denklem 5.1). Bağımlı değişken (y) birden fazla bağımsız değişkene (x) bağlı ise Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇLR) kullanılmalıdır (Denklem 5.2). Tahmin değerini sağlayan fonksiyonlar doğrusal regresyon denklemlerinde gösterilmektedir. Bu denklemlerde hata terimi ε gösterilirken β_0 kesim noktası olarak, β_1, β_2 gibi değerler ise bağımsız değişkenin regresyon katsayısı olarak gösterilmektedir (Doğan ve Arslan, 2022).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon_i \quad (5.1)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon_i. \quad (5.2)$$

5.2.2. Karar Ağacı Regresyonu

Karar Ağacı (DT), tıpkı bir ağacın köklerinden yapraklarına kadar uzanan yapısı gibi, girdi verilerinin daha küçük kümelerle bölünmesiyle oluşturulan bir algoritmadır. Bu kümeleme işleminde verinin özellikleri esas alınır ve aynı tür verinin bulunduğu düğüm bir küme oluşturabilir. Algoritma yapısal olarak kök, karar ve yaprak düğümlerinden oluşur. Kök düğüm, başlangıç noktası olarak tüm veri kümesini temsil eder. Veriler kök düğümden sonra kümelerle bölünür. Veriler kümelerden alt gruplara ayrılabilirse karar düğümü olarak nitelendirilebilir. Algoritma yapısında en alttaki bölünemez düğüm, yaprak düğüm olarak bilinir (Doğan ve Arslan, 2022).

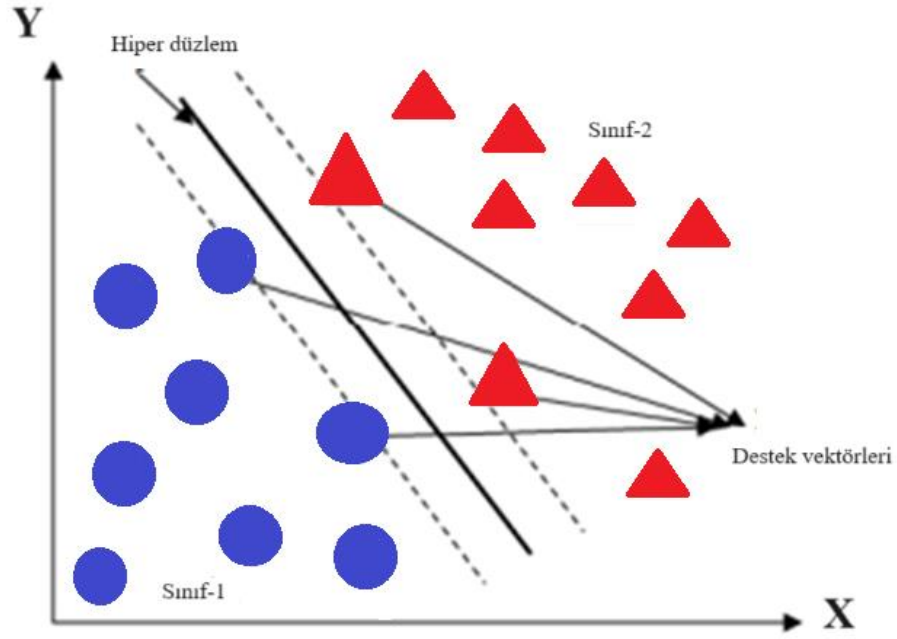


Şekil 5.2. Karar Ağacı Regresyonu şematik gösterimi

Daha kısa anlatımla; bir ağaç hayal edelim, köklerinden yapraklarına kadar. Kök veri kümesidir, yapraklar sonuç kümesidir (Şekil 5.2). Kökler ve yapraklardan yola çıkılarak bu algorithmada veriler ve sonuçlar farklı alt gruplara bölünebilir. Veriler kümelerden alt gruplara ayrılabiliriyorsa karar düğümü olarak nitelendirilebilir. Kısaca; giriş alanını farklı alanlara bölerek her alana sabit bir değer atar.

5.2.3. Destek Vektör Regresyonu (SVR)

Destek Vektör Regresyonunun (SVR) amacı, belirli bir sınır aralığında bir çizgi veya eğri olarak maksimum noktayı minimum hatayla tanımlamaktır. Bu algoritmanın temel mantığı, en dar aralıktaki çoğu veriyi kapsamaktır. Destek Vektör Regresyonu (SVR), regresyon analizi gerçekleştirmek için, destek vektör makinelerini kullanan bir regresyon tekniğidir. Amaç, veri tabanlarını en iyi şekilde yerleştiren ve belirli bir hata marjını hesaba katan bir hiper düzlemi belirlemektir. Destek Vektör Regresyon algoritması'nın temel amacı en fazla veriyi, olabilecek en dar aralıkta kapsayabilmektir (Demirkol, 2022). SVR'de sınıflandırma yaparken eğitim verileri kullanılarak en uygun hiper düzlem çizgisi bulunur ve sonra test verileri sınır çizgisinin hangi tarafında kalıyorsa o bölgeye göre sınıflandırma yapılır. Optimum hiper-düzlem çizgisinin belirlenebilmesi için sınırları oluşturan ve hiper düzleme paralel iki düzlem çizgisi belirlenir. Bu paralel düzlemleri oluşturan noktalar “destek vektörleri” olarak adlandırılmıştır. Şekil 5.3'te destek vektörleri ve hiper düzlem çizgisi gösterilmiştir (Doğan, 2018).

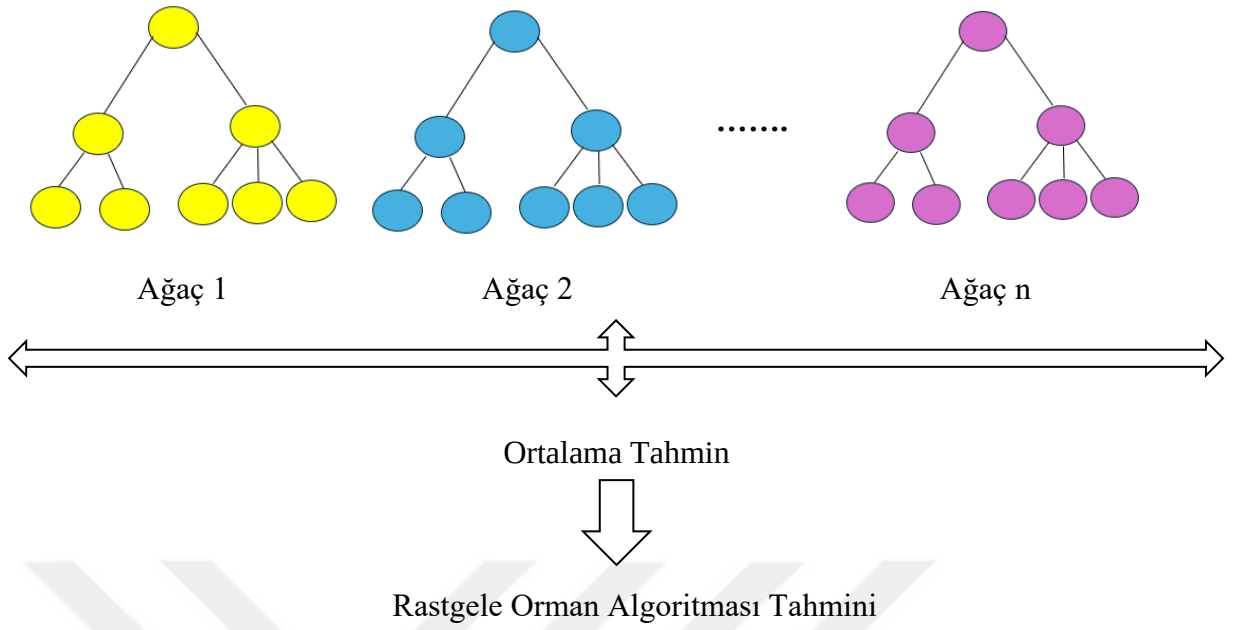


Şekil 5.3. Destek vektör regresyonu şematik gösterimi

5.2.4. Rastgele Orman Algoritması

Rastgele Orman algoritması karar ağacı algoritmasını temel almaktadır. Rastgele Orman (RF), aynı veri seti için birden fazla karar ağacını birleştirerek sonuç üreten bir yöntemdir. Bu yöntemde karar ağaçlarının veri tahmin başarısı değerlendirilerek ormandan elde edilen optimum veri başarısı sonuç olarak ortaya çıkar. Ormanı oluşturan karar ağaçlarının sayısı, algoritma oluşturmada önemli parametrelerden biridir. Bu modelde birden fazla karar ağacı oluşturulmakta ve ağaç modelleri tarafından hazırlanan tahminler arasında en çok oy alan tahmin rastgele orman sonucu olarak tanımlanmaktadır. Bu algoritma bu yönüyle bir “topluluk öğrenme” modelidir. Rastgele Orman modelinde eğitim farklı veri setleri üzerinden gerçekleştirildiğinden varyans azalmaktadır. Rastgele Orman’ın en önemli parametresi birleştirilen ağaç sayısıdır (Doğan ve Arslan, 2022). Rastgele orman algoritması denklem 5.3’te görüldüğü gibi ifade edilebilir.

$$y = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T f_t(x) \quad (5.3)$$



Şekil 5.4. Rastgele orman regresyonu şematik gösterimi

5.2.5. Torbalama (Bootstrap Toplama, Bagging)

Ağaç tabanlı bu yöntem, Breiman tarafından 1996 yılında geliştirilmiştir. Makine öğrenmesinde topluluk modelleri, performansı artırmak için birden fazla modelden alınan kararları birleştirir. Bu yöntemlerden biri de Torbalama yöntemidir. Torbalamada (Bagging), eğitim seti küçük parçalara ayrılarak oluşturulan farklı eğitim setleri ile modeller kurulur. Kurulan çoklu veri seti modellerinin tekli eğitim veri setine göre daha iyi tahmin oluşturabilmesi amaçlanmaktadır. Tüm topluluk yinelemeleri aynı model parametreleri kullanılarak uygulanır ancak tek fark kullanılan eğitim setleridir. Örneklerin son sınıf etiketleri, topluluk yinelemelerinin çıktılarına uygulanan bir oylama mekanizması kullanılarak belirlenir (Ribeiro ve Coelho, 2020). Birden fazla Karar Ağacı modelinin sonucu ile performansın artırılması Bagging modeli ile sağlanabilmektedir. Orijinal veri setinden elde edilen ön yükleme örneklerine tahmin ediciler uygulanır ve bir grup oluşturulur. Ön yükleme, rastgele seçimler yaparak alt örnekler oluşturmak için kullanılır. Bu nedenle ön yüklemeyle oluşturulan örneklerde bazı gözlemler gerçekleşmezken bazılarının iki veya daha fazla kez görülebilmesi mümkündür. Tahminlerin birleştirilmesi aşamasında regresyon ağaçlarının ortalaması alınarak çıktı değeri oluşturulur. Ayrıca torbalama yöntemi deneysel sonuçlara göre tekli ağaçlara göre daha verimli sonuçlar verir. Şekil 5.5' te şematik olarak gösterim mevcuttur.

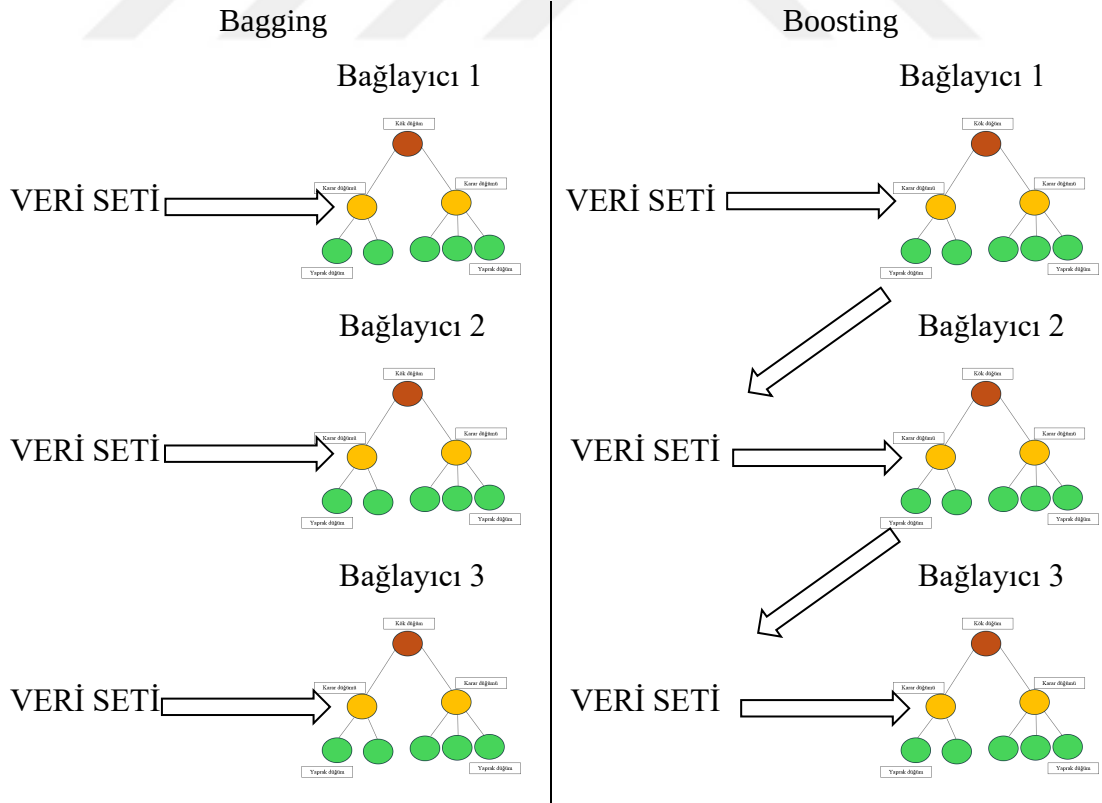
5.2.6. Arttırma, Geliştirme (Boosting)

Boosting, birden fazla zayıf öğrenci modelini birleştirerek güçlü bir öğrenci modeli oluşturarak kümülatif eğitim yapar. Tahmin modeli olarak karar ağacı kullanılır. Model için ihtiyaç duyulan veri setlerine farklı ağırlıklar verilerek ağaç algoritmalarından daha nitelikli ve genel bir hedefe ulaşılır. Yanlış tahmin yapan ağaç modellerinin ağırlık değerleri değiştirilerek en optimum ve doğru sonuçları veren bir model oluşturulmuştur. Bagging yönteminden farklı olarak paralel hesaplama yerine ardışık hesaplama kullanılır. Şekil 5.5’ te şematik olarak gösterim mevcuttur. En sık kullanılan güçlendirme modelleri AdaBoost, Gradient Boosting ve XGBoost’tur. Bagging ve Boosting algoritmalarının matematiksel ifadesi denklem 5.4 ve 5.5’te verilmiştir.

$$y = \sum_{t=1}^t f_t(x) \quad (5.4)$$

$$F = \{f_t = w_s(x)\} \quad (5.5)$$

Bu denklemlerde; t = ağaç sayısı, w = yaprak ağırlığı, s = her bir ağacın yapısı’dır.



Şekil 5.5. Bagging-Boosting Regresyonları şematik gösterimi

5.2.6.1. Adaptive Boosting (AdaBoost)

En yaygın olarak uygulanan boosting yöntemi AdaBoost'tur. Bu topluluk stratejisi, önceki adımlarda doğru bir şekilde sınıflandırılmamış zor örneklerle odaklanarak veri setinin seri bir şekilde ağırlıklı yeniden örneklendirilmesiyle oluşturulur. Bu yöntemde yanlış cevaplar tekrar test edilerek, tahmin sonuçlarında sadece doğru olanlar dikkate alınır. Ağırlıklı çoğunluk oylaması yaklaşımına göre, her örneğe son sınıf etiketi atanır (Zhang ve Ding, 2016; Tuysuzoglu ve Birant, 2020). Uyarlanabilir güçlendirme (AdaBoost), en basit yükseltme algoritmalarından biridir. Bu algoritma 1995 yılında Freund ve Schapire (1995) tarafından geliştirilmiştir. Ağaç tabanlı bu algoritma modeli, nihai modeli oluştururken yanlış tahminlerde bulunan ardışık modellere yeni ağırlıklar atayarak çıktı verilerini doğru tahmin etmeyi amaçlanmaktadır.

Öncelikle veri setindeki tüm gözlemlere eşit ağırlıklar verilir. Bu model veri alt kümesine dayanmaktadır. Hatalar, tahminler ve gerçek değerler karşılaştırılarak hesaplanır. Bir sonraki model hazırlanırken yanlış tahmin edilen veri düğümlerine daha fazla ağırlık verilir. Ağırlık, hata değeri kullanılarak belirlenebilir. Bu süreç hiçbir hata fonksiyonu değişmeyene veya maksimum tahmin sayısına ulaşılan kadar tekrarlanır (González ve diğ., 2020).

5.2.6.2. Gradient Boosting

Gradyan artırma algoritması, Friedman (2001) tarafından 2004 yılında geliştirilen, regresyon ve sınıflandırma problemlerinde kullanılan bir diğer topluluk öğrenme ML algoritmasıdır. Güçlü bir tahmin oluşturmak için temel öğrenici olarak ağaç algoritmalarını kullanır ve her model, önceki ağaç modeli tarafından hesaplanan hatalara göre oluşturulur.

Gradient Boosting, Rastgele orman algoritmasından farklı olarak, karar ağacı oluşturma prosedürü boyunca karar verme sonuçlarını birleştirerek her aşamada tek bir ağaç oluşturur (Zhang ve Ding, 2016). Gradient Boosting (GB), Gradient boosting tree, kullanılacak olan kademeli iyileştirme modeli arayışı için birçok modeli eğiten, kayıp fonksiyonunda gradyan değerlerini kullanan bir modeldir. Her aşamada elde edilen özellikler ile büyüme istenmektedir. Rastgele orman algoritmasından farklı olarak, karar ağacı oluşturma prosedürü boyunca karar verme sonuçlarını birleştirerek her aşamada tek

bir ağaç oluşturur (Zhang ve Ding, 2016). GB’de modelin son çıktısının iyileştirilmesi için daha fazla ağaç eklenmektedir. Bu algoritmanın öğrenme olasılığı diğer algoritmalara göre daha yüksektir.

5.2.6.3. Extreme Gradient Boosting (XGBoost)

Ekstrem gradyan artırma (XGBoost) modeli, Chen ve Guestrin (2016) tarafından 2016 yılında geliştirilen, gradyan artırma algoritmasının geliştirilmiş bir modelidir. Bu algoritmanın en önemli özelliği, aşırı uyum olmadan veriler için yüksek oranda doğru tahminler yaparak diğer popüler algoritmalara göre 10 kat daha hızlı çalışabilmesidir. Bir sonraki adım olarak üç tabanlı algoritma ile tahmin yapılarak geliştirilen modelin çalışma prensibi, gradyan artırmaya benzer.

Bagging ve Boosting algoritmaları karşılaştırıldığında Boosting, örnek seçimi sırasında eğitim setindeki zorlu unsurlara odaklandığından, daha az hatalı sonuç çıkarır (Quinlan, 1996). Ancak, Boosting’te bir modelin girdileri diğerlerinin çıktılarına bağlı olduğu için paralelleştirilmesi zor olmaktadır.

5.3. Algoritma Performans Değerlendirme Yöntemleri

Makine öğrenmesi modellerinin başarısını değerlendirmek için çeşitli performans ölçütleri mevcuttur. Performans ölçütleri istatistiklere dayalı olarak ortaya çıkmıştır. Sınıflandırma ve regresyon modelleri için farklı türde başarı ölçütleri vardır. Bu tez çalışmasında, R-kare puanı (R^2), ortalama mutlak hata (MAE) ve ortalama karesel hatanın kökü (RMSE) değerleri verilmektedir.

R-kare (R^2) puanı, bağımlı değişkenlerde gözlemlenen, açıklanabilen veya açıklanabilen fark miktarının istatistiksel bir ölçümüdür. Bağımsız değişkenler tarafından tahmin edilmektedir. Bu değişken 0'dan 1'e kadar değişir, dolayısıyla daha büyük değerler daha optimal bir düzeltme düzeyine karşılık gelir (Lu, 2010). R^2 değeri yüzde (%) olarak da verilebilmektedir ve R^2 değerinin yüksek olması modelin uyumlu olduğunu göstermektedir (Denklem 5.6). Regresyon algoritmalarında sıklıkla kullanılan başarı kriteri MAE hata metriğidir (Denklem 5.7). İki değişken arasındaki farkı temsil eden MAE metriği, veri ile veriye en uygun çizgi arasındaki yatay mesafeyi temsil eder ve 0 ile ∞ arasında değer alabilir. Diğer bir deyişle, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler

arasındaki farktır. Algoritma modeli başarısının iyi olması için MAE değerinin düşük olması beklenmektedir. Doğrusal veri seti kullanan modellerde bir diğer başarı kriteri ise RMSE değeridir. RMSE, tahmin ile gerçek gözlem arasındaki ortalama kare farkın karekökü alınarak elde edilen hata ölçüsüdür (Denklem 5.8). Modelin başarılı olabilmesi için RMSE değerinin düşük olması beklenmektedir. Python yazılımındaki “sklearn kütüphanesi”nin metrik sınıfında hata/başarı metrikleri çeşitlendirilmiştir (Doğan ve Arslan, 2022).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y - y_{ort})^2}{\sum_{i=1}^n (y - y')^2} \quad (5.6)$$

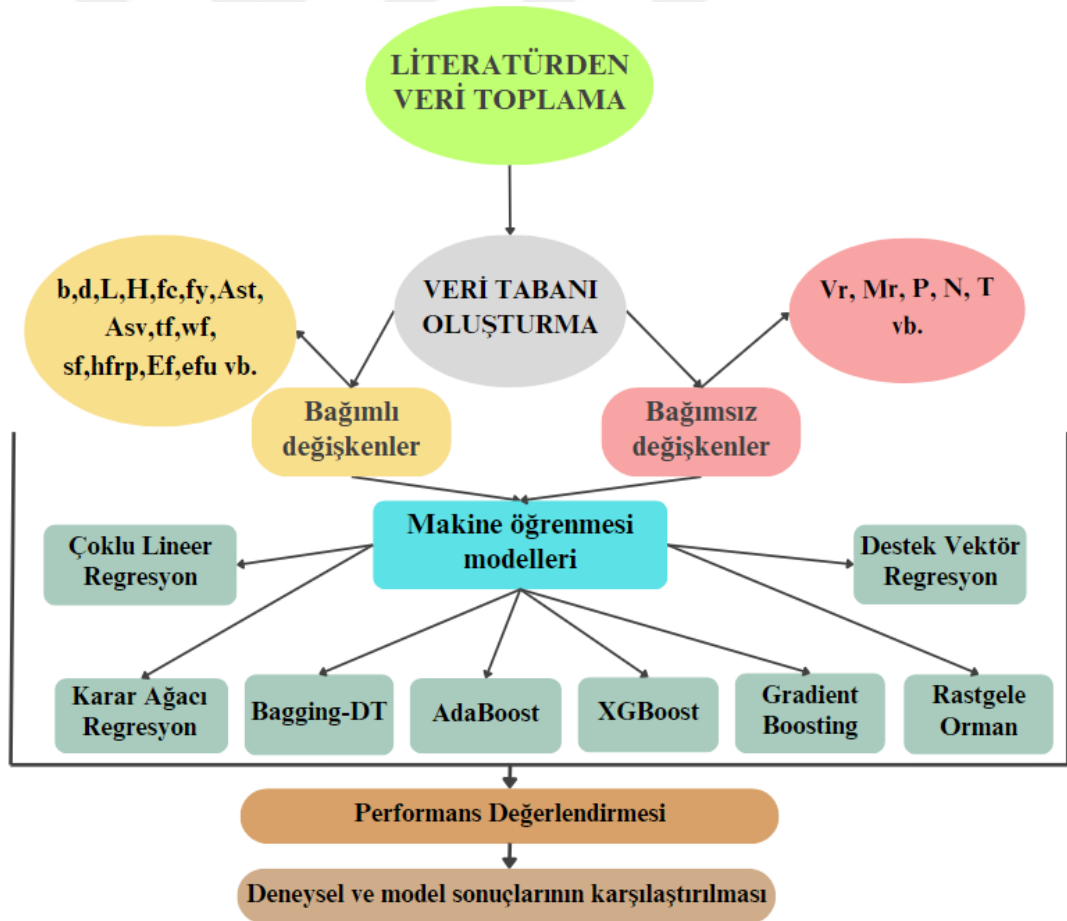
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y - y'| \quad (5.7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y' - y)^2} \quad (5.8)$$

Bu denklemlerde; y gerçek değer, y' tahmin edilen değer, y_{ort} gerçek ortalama değer ve n veri örneklerinin sayısıdır.

6. MAKİNE ÖĞRENMESİ KULLANILARAK LİFLİ POLİMERLER İLE BETONARME ELEMANLARIN GÜÇLENDİRİLMESİ İLE İLGİLİ YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARININ TAHMİNİ

Yapılan tez çalışmasında, yaklaşık son yirmi yılda yapılmış güncel tüm makaleler taranarak çok geniş bir veri havuzu oluşturulmuştur. Bu veri havuzunda kiriş, kolon, perde, döşeme gibi tüm taşıyıcı sistem elemanlarının lifli polimerler ile güçlendirilmesi ile ilgili yapılmış kesme, bileşik eğilme, eğilme, burulma, zımbalama vs. gibi veriler bulunmaktadır. Bu veriler gruplandırılacak ve sistematik bir şekilde ayrıştırılarak veri setleri oluşturulmuştur. Yapılan literatür taraması ve veri setinin oluşturulmasına müteakip çeşitli akıllı sistem uygulamaları bu veriler üzerinde test edilmiş ve en iyi sonucu veren algoritmalar belirlenmiştir (Şekil 6.1). Veri setindeki deney sayılarının gruplara göre dağılımı Çizelge 6.1’de görülmektedir.



Şekil 6.1. Tez çalışması akış şeması

Çizelge 6.1. Veri havuzunda bulunan deneyler ve sayıları

Deney Türü	Eğitim Verisi (%67)	Test Verisi (%33)	Toplam
Kiriş Kesme Etkisi (V_r)	104	52	156
Kiriş Eğilme Etkisi (P)	40	20	60
Kiriş Burulma Etkisi (T)	69	35	104
Döşeme Eğilme Etkisi (P)	23	12	35
Döşeme Zımbalama Etkisi (P)	46	24	70
Kolon Moment Etkisi (M_r)	28	14	42
Kolon Eksemel Yük Etkisi (P)	54	27	81
Perde Eksenel Yük Etkisi (P)	60	31	91

Derlenen veri grupları tahmininde; Basit-Çoklu Doğrusal Regresyon, Karar Ağacı, Rastgele Orman ve Destek Vektör Regresyon, Extreme Gradient Boosting (XGBoost), ADABOOST, Bagging-DT regresyon algoritmaları kullanılmıştır. Makine öğrenmesi algoritmalarının kodlaması ‘Anaconda Navigator’ programında, Spyder (Python 3.11) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Verilerin işlenmesi için öncelikle gerekli kütüphaneler olan “Numpy” ve “Pandas” kütüphaneleri Python ortamına kurulmuştur. Deney setleri için her bir veri seti kendi içindeki algoritmalarla test edilmiştir. Her veri seti eğitim ve test seti olarak ikiye ayrılmıştır. Tahmin algoritmaları bir eğitim veri seti kullanılarak eğitilip öğrenme algoritması bu şekilde sağlanmıştır. Algoritmadaki test verileri kullanılarak model tahmin başarısı test edilmiştir. Veriler üzerinde rastgele bölme yöntemi kullanılarak 0.33 oranında test ölçüsü oluşturulmuştur. Yani tüm verinin 2/3’ü eğitim seti olarak, 1/3’ü ise test seti olarak "rastgele" olarak bölünmüştür.

6.1. Makine Öğrenmesi Kullanılarak Lifli Polimerler (LP) ile Kirişlerin Kesme Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ACI 440.2R-17 (2017), TBEC-2019 ve FIB-2001’de kesme hasarı nedeniyle taşıma gücüne ulaşan elemanlar gevrek eleman kategorisine girmekte ve bu nedenle bu durumdaki elemanlara etki eden kesit tesiri (ki genellikle kesme kuvveti) eleman kesme kapasitesini aştığında bu elemanlar

eğilme kapasitesine ulaşamadıkları için göçme ani ve habersiz olmaktadır. Bu nedenle kesme etkileri açısından kritik gevrek elemanların ya güçlendirilerek moment kapasitelerinin önemli ölçüde arttırılmaları, ya da bu elemanların kesme dayanımları arttırılarak gevrek eleman kategorisinden, sünek eleman kategorisine geçmenin sağlanması gereklidir. LP kompozitler ile enine doğrultuda sargılama ile elemanın kesme kuvveti kapasitesinin arttırılması ve elemanın sünek eleman kategorisine getirilmesi oldukça pratik bir yöntemdir.

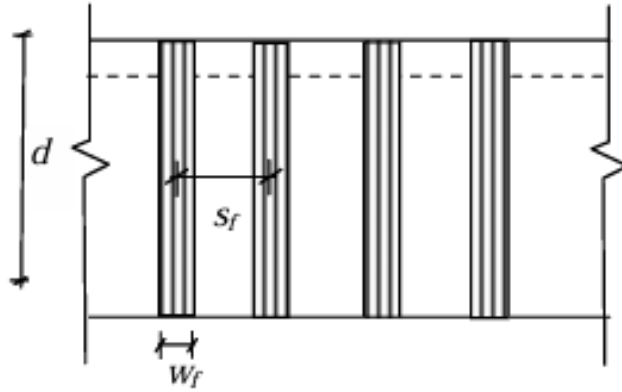
Kesme etkileri altındaki betonarme bir eleman diyagonal çekme ve basınç etkilerine maruz kalmaktadır. Güvenliğin sağlanabilmesi için elemanın hem diyagonal çekme hem de diyagonal basınç etkileri altında güvenli olduğu gösterilmelidir. Örneğin TBDY-2018 15. bölümü betonarme elemanların LP'ler ile kesme etkilerine karşı güçlendirilmesi ile ilgili önemli detaylar içermektedir. TBDY-2018 yalnızca tam sargı şeklinde (temas kritik) uygulama ile kesme etkilerine karşı güçlendirmeye izin vermektedir. ACI 440.2R-17 ise tam sargının yanı sıra iki ve üç taraftan yapıştırma (yapışma kritik) uygulama ile güçlendirmeye olanak tanımaktadır. TBDY-2018'a göre; LP ile sargılanmış kirişlerin kesme kuvveti dayanımı V_c denklem (6.1) ile hesaplanmaktadır.

$$V_r = V_c + V_w + V_f \leq V_{\max} \quad (6.1)$$

Kesme kuvveti dayanımına betonun katkısı V_c , enine donatının katkısı V_w ve asal basınç gerilmelerini sınırlamak üzere tanımlanan $V_{\max}$ değerleri, TS 500-2000 (2000) tarafından önerilen denklemler ile, ancak TBDY-2018'e göre belirlenen mevcut malzeme dayanımları kullanılarak hesaplanacaktır. Kesme kuvveti dayanımına LP sargının katkısı sargılamanın şeritler halinde olması durumunda denklem (6.2) ile hesaplanacaktır.

$$V_f = \frac{2 \times n_f \times t_f \times w_f \times E_f \times \varepsilon_f \times d}{s_f} \quad (6.2)$$

Denklem 6.2'de n_f tek yüzdeki lifli polimer sargı tabaka sayısını, t_f bir tabaka lifli polimer için etkili kalınlığı, w_f lifli polimer şeridinin genişliğini, E_f lifli polimer elastisite modülünü, ε_f lifli polimer etkin birim uzama sınırını, d eleman faydalı yüksekliğini, s_f ise lifli polimer şeritlerin, eksenden eksene olmak üzere, aralıklarını göstermektedir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. Kirişler için şerit şeklinde sargılama durumu (TBDY-2018)

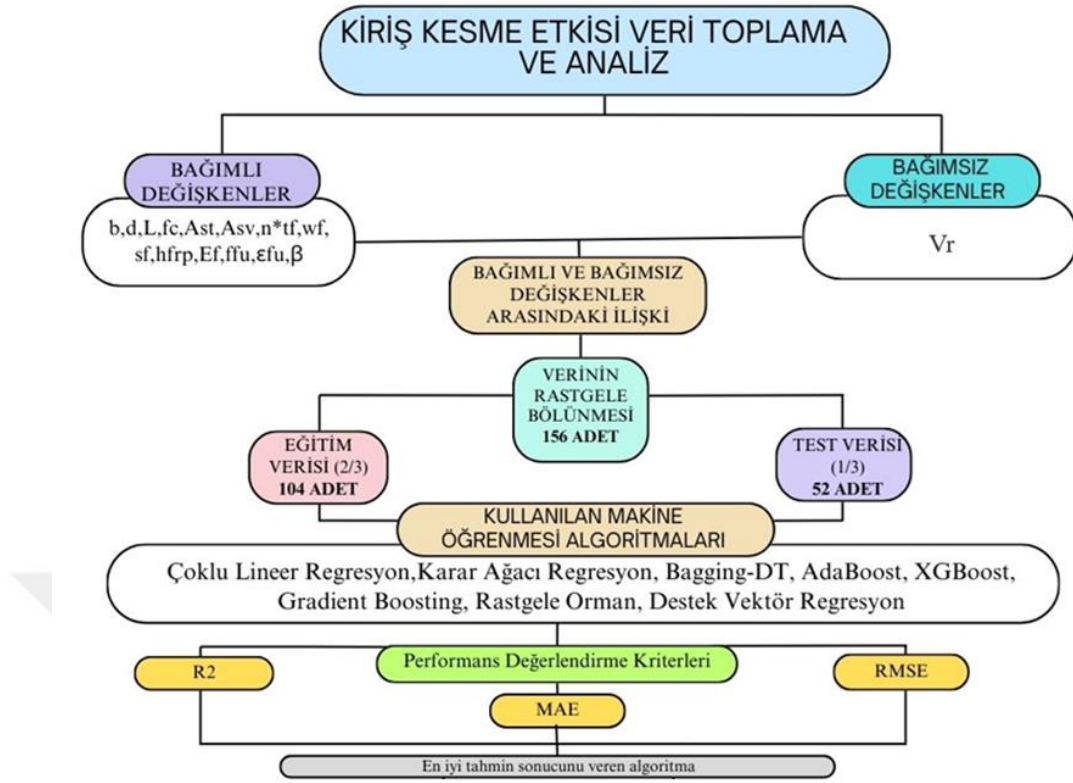
Sargılamanın sürekli yapılması durumunda, $w_f = s_f$ alınacaktır. Etkin birim uzama değeri denklem (6.3) ve denklem (6.4)'e göre belirlenen değerlerin küçük olanı olarak alınacaktır.

$$E_f \leq 0.0044 \quad (6.3)$$

$$\varepsilon_f \leq 0.5\varepsilon_{fu} \quad (6.4)$$

Denklem (6.4)'te ε_{fu} lifli polimer kopma birim uzamasıdır. Süreksiz (şeritler halinde) lifli polimer kullanılması durumunda lifli polimer şeritlerin aralıkları s_f , $w_f + \frac{d}{4}$ değerini geçmeyecektir. Yukarıda verilen hesap akışı diğer yönetmeliklerde de benzerdir. Hesapların yapılabilmesi için malzeme bilgileri ve deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar gereklidir.

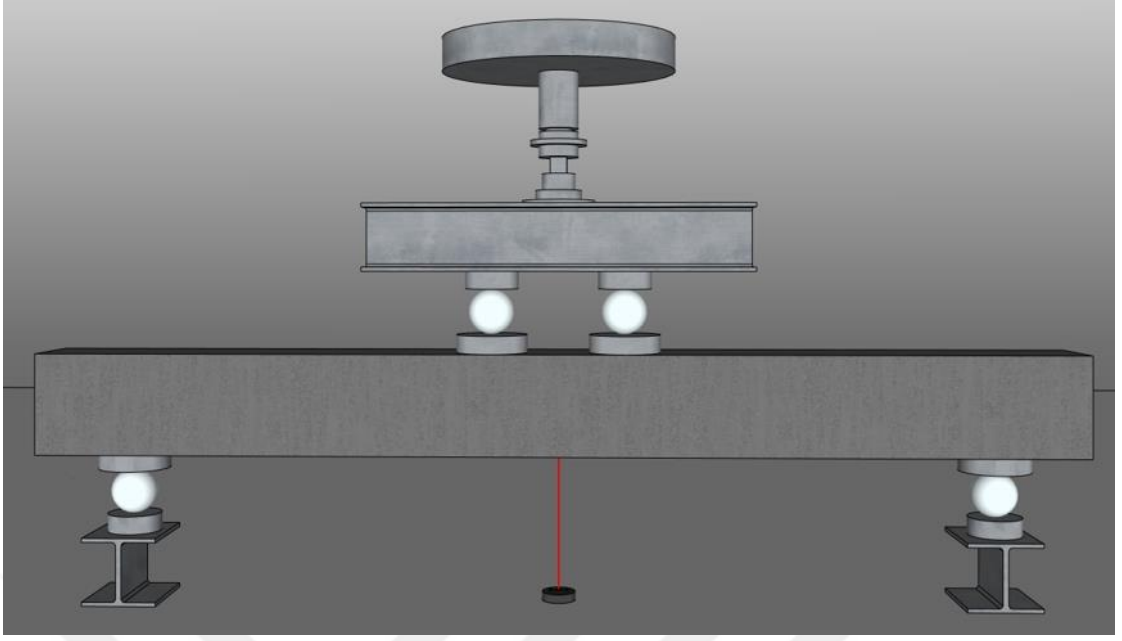
Şekil 6.3'te verilen diyagram bu bölümde yapılan çalışmanın genel özetini göstermektedir.



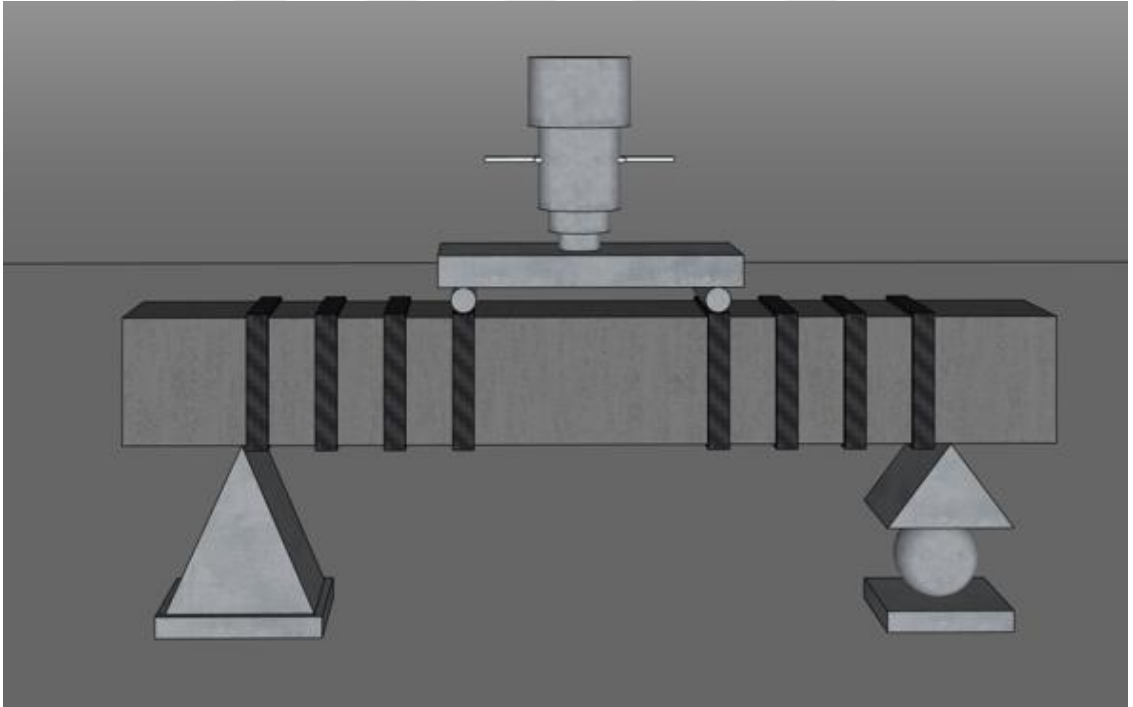
Şekil 6.3.Kiriş kesme etkisi çalışma akış şeması

Kesme Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme dayanımı değerini (V_r) tahmin etmek amacıyla kesme davranışına yönelik yapılan deneylerin verileri toplanmıştır (Ek Çizelge 10.1). Algoritmalar, 0.33 oranında test ölçüsü oluşturmuştur. Böylece 156 tane veri setinin; 104 (2/3'ü) eğitim seti olarak, 52 (1/3'ü) ise test seti olarak "rastgele" olarak bölünmüştür.

Kirişlerin kesme davranışını incelemek için Şekil 6.4'te verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Kiriş numuneleri Şekil 6.4'teki düzeneğe yerleştirilerek yükleme yapılmaktadır. Yer değiştirme ve yük ölçerler ile veriler kayıt altına alınmaktadır. Bu deney düzeneğinin FRP ile güçlendirilmiş hali de Şekil 6.5'te görülmektedir.



Şekil 6.4. Kiriş kesme deney düzeneği



Şekil 6.5. FRP ile güçlendirilmiş kiriş kesme deney düzeneği

Çizelge 6.2. Kirişte kesme davranışı için veri tabanındaki bilgi parametre özeti

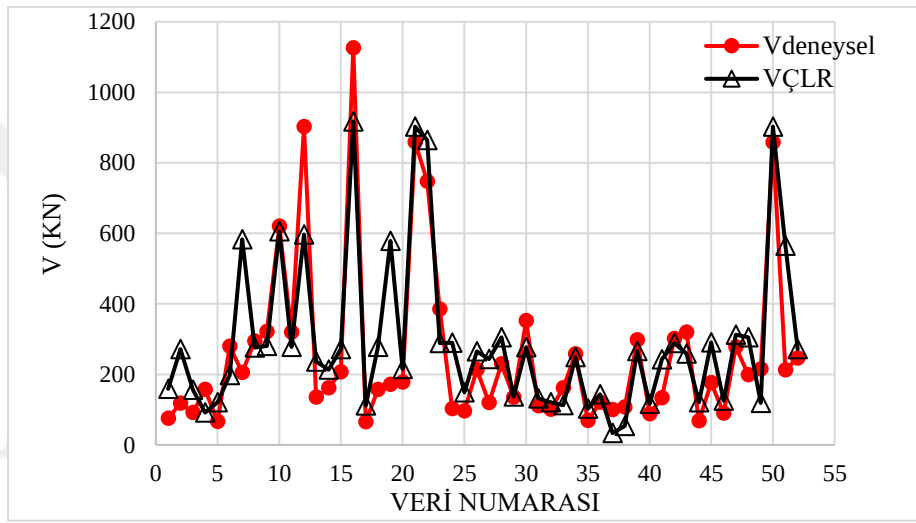
Parametre	Detay	Minimum değer	Maksimum değer	Ortalama değer	Birim
b	Kesit genişliği	100.00	457.00	188.49	mm
d	Kesit faydalı yükseklik	150.00	1220.00	439.54	mm
L	Kiriş uzunluğu	1600.00	10675.00	4478.80	mm
f_c	Beton basınç dayanımı	12.40	58.70	32.41	MPa
A_{st}	Boyuna donatı oranı	0.001	0.05	0.03	-
A_{sv}	Enine donatı oranı	0.00	0.01	0.002	-
$n \cdot t_f$	Lifli polimer sargı kalınlığı	0.11	2.60	0.55	mm
w_f	Lifli polimer sargı genişliği	20.00	6095.00	985.19	mm
s_f	Lifli polimer sargılar arası uzaklık	0.00	1000.00	199.75	mm
h_{FRP}	Kiriş uzun kenarı FRP sargı yüksekliği	160.00	1017.00	395.70	mm
E_f	Lifli polimer elastisite modülü	13.20	5300.00	284.04	GPa
f_{tu}	Lifli polimer çekme dayanımı	112.00	4300.00	2063.53	MPa
ϵ_{fu}	Nihai lifli polimer deformasyonu	0.004	1.00	0.04	-
β	Kiriş köşesi yuvarlama açısı	45.00	90.00	89.71	-
V_r	Kesme kapasitesi	55.50	1192.00	290.79	KN

Kesme davranışına yönelik yapılan deneylerin verilerinin parametre özeti de Çizelge 6.2’de görülmektedir. Çizelge 6.2’den de görüldüğü gibi veri setinde kullanılan ortalama beton dayanımı, boyuna ve enine donatı oranı vs. gibi malzeme ve donatı özellikleri TS-500-2000 (2000) ve TBDY-2018 (2018) de verilen basınç dayanımı normları aralığındadır. Benzer şekilde kirişlerde kullanılan enine ve boyuna donatı oranlarının ortalaması da yine aynı yönetmelikte yer alan alt ve üst limit sınırları içindedir. Fakat kesme testinin yapıldığı incelenen bu veri setinin doğası gereği bazı deneylerde etriye sıklaştırması yapılmamış, bazı kirişlerde ise oldukça düşük dayanımlı beton kullanılmıştır.

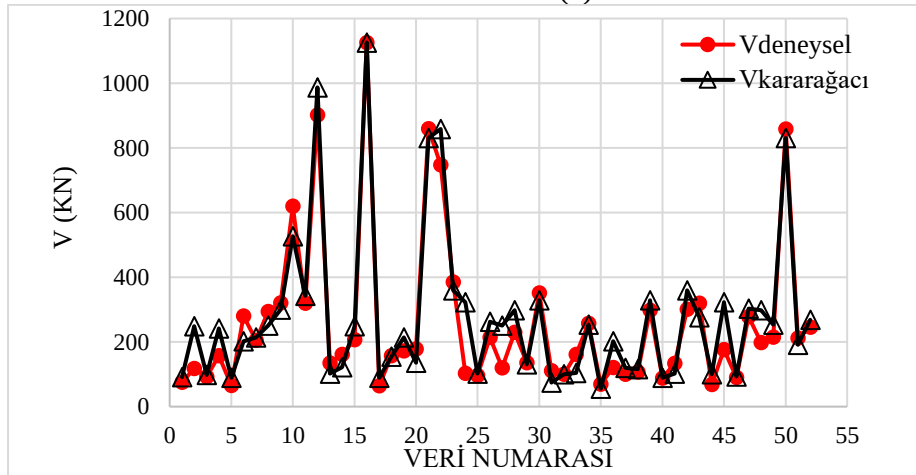
Çizelge 6.3. Makine öğrenmesi algoritmaları ile V (kiriş kesme kuvveti, KN) tahmin sonuçları

Sıra no	V _{deneyssel}	ÇLR	KARAR A.	BAGGING-DT	RASSAL ORMAN	XG-BOOST	ADA BOOST	GRADİENT BOOST	DVR deneyssel-ölçekli	DVR tahmin-ölçekli
1	75.00	158.79	91.00	81.90	80.20	78.65	102.29	79.16	-0.54	-0.64
2	118.30	271.01	248.70	236.28	232.34	248.69	276.80	233.97	-0.63	-0.72
3	92.00	156.27	98.00	92.10	96.00	98.00	102.29	97.49	-0.33	-0.44
4	157.07	91.75	241.82	210.72	234.66	199.45	197.70	212.85	-0.26	-0.65
5	66.00	120.94	89.00	82.40	73.80	76.37	102.29	79.23	1.09	1.88
6	280.00	197.91	202.00	187.13	207.92	201.99	203.71	195.22	-0.27	-0.34
7	205.00	582.95	214.00	448.06	740.10	246.60	268.08	448.14	-0.57	-0.47
8	294.00	276.02	250.60	239.10	213.18	288.06	226.58	196.29	0.62	0.90
9	321.00	280.13	300.33	302.30	290.57	300.33	306.28	304.29	-0.18	0.37
10	620.20	605.89	527.10	566.75	578.09	528.40	622.70	592.11	-0.40	-0.50
11	320.00	277.76	343.00	321.46	308.37	343.64	268.08	322.06	-0.54	-0.45
12	902.00	596.44	987.00	927.74	1000.57	987.00	964.74	976.25	-0.82	-0.92
13	135.00	235.76	102.50	113.46	98.79	108.34	142.89	112.22	1.55	3.62
14	162.00	213.57	121.50	166.63	144.28	121.52	226.58	138.95	-0.54	-0.44
15	207.20	271.01	248.70	236.28	232.34	248.69	276.80	233.97	-0.12	-0.02
16	1126.00	917.34	1126.00	1005.85	1031.01	1057.35	963.11	1067.54	-0.82	-0.92
17	65.00	112.11	89.00	86.00	84.73	85.57	102.29	84.05	0.49	0.59
18	157.50	278.22	155.00	199.30	182.59	150.42	226.58	163.77	-0.27	-0.27
19	172.00	578.24	214.00	448.06	740.10	246.63	268.08	454.97	-0.76	-0.81
20	178.00	215.48	136.00	138.50	132.67	136.00	195.04	172.34	-0.08	0.02
21	859.00	902.62	830.75	834.38	825.19	830.75	864.71	835.91	-0.71	-0.79
22	747.00	863.95	858.00	858.30	858.33	890.31	864.71	857.66	0.10	0.22
23	385.00	289.06	359.00	342.88	337.31	359.00	306.28	346.77	-0.32	-0.67
24	103.00	289.86	322.80	303.46	292.48	265.68	276.80	283.54	-0.77	-0.87
25	96.50	148.96	102.50	102.60	103.54	102.49	129.47	109.24	-0.44	-0.64
26	213.73	264.91	262.61	262.31	262.36	262.61	268.08	270.80	1.13	-0.19
27	119.90	243.07	250.60	220.90	233.63	250.57	226.58	206.91	-0.71	-0.81
28	230.00	305.18	298.60	289.95	302.10	298.61	276.80	300.10	0.29	0.27
29	135.70	137.37	131.10	181.01	172.10	169.87	226.58	163.62	-0.48	-0.58
30	352.00	277.12	329.00	298.86	301.00	320.88	268.08	311.76	-0.76	-0.82
31	110.70	131.97	74.10	90.45	77.99	74.10	102.29	76.18	0.45	0.42
32	100.50	120.70	100.10	96.69	87.85	100.10	102.29	93.63	-0.09	-0.02
33	162.00	113.02	104.00	110.93	107.07	104.01	165.35	113.92	-0.54	-0.52
34	258.00	248.61	254.00	270.76	273.51	262.34	268.08	274.45	1.55	3.31
35	69.10	102.86	55.50	72.57	70.71	55.50	102.29	65.82	-0.32	-0.22
36	120.90	143.23	202.20	195.46	185.08	167.94	226.58	163.62	0.49	0.41
37	100.00	33.39	120.00	117.61	123.15	119.99	102.29	120.41	1.56	3.09
38	107.20	53.42	116.00	112.50	123.41	116.02	102.29	119.86	-0.29	0.02
39	298.00	265.87	329.00	304.12	302.97	331.17	268.08	316.32	-0.83	-0.91
40	88.00	116.53	89.00	91.00	85.27	89.47	102.29	84.94	-0.70	-0.80
41	133.50	242.83	102.50	113.46	98.79	108.14	142.89	112.22	0.08	-0.02
42	301.00	289.06	359.00	342.88	337.31	359.00	306.28	346.77	0.16	0.26
43	320.00	258.84	276.00	255.66	273.20	264.91	268.08	279.32	0.14	0.04
44	68.10	120.70	100.10	96.69	87.85	100.10	102.29	93.63	-0.82	-0.89
45	176.10	290.75	322.80	305.23	301.36	322.78	276.80	308.03	-0.18	-0.30
46	90.00	125.28	93.00	87.40	86.07	94.29	102.29	94.43	-0.76	-0.80
47	278.00	312.30	303.00	309.30	303.89	303.00	276.80	302.71	0.33	0.36
48	198.40	305.47	298.60	289.95	302.10	298.61	276.80	300.10	0.28	0.26
49	215.00	119.23	254.00	237.63	238.66	237.99	203.71	228.84	0.28	0.51
50	858.00	902.62	830.75	834.38	825.19	830.75	864.71	835.91	0.62	0.52
51	212.00	564.75	191.40	281.01	408.31	192.23	214.00	200.12	0.26	0.36
52	246.00	271.66	268.00	259.53	280.88	267.98	276.80	280.60	0.14	0.04

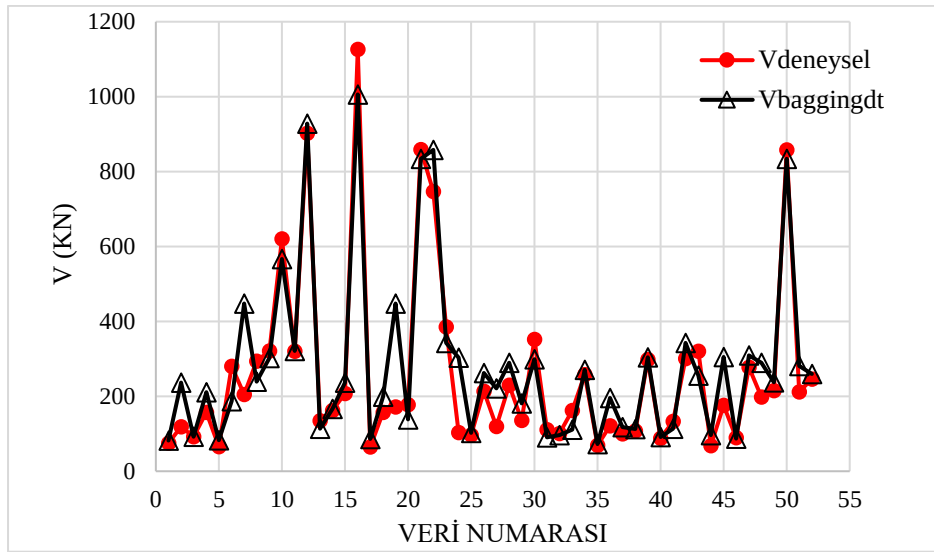
Tüm algoritma modellerinden elde edilen tahmin edilen kesme mukavemeti değerleri ile literatürdeki deneysel kesme mukavemeti değerleri Çizelge 6.3'te verilmiştir. Şekil 6.6'da, tüm algoritma modellerinden elde edilen tahmin kesme mukavemeti değerleri ile literatürdeki deneysel kesme mukavemeti değerlerinin karşılaştırılma grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde; deneysel verilerle en fazla kesişmenin görüldüğü yani birbirine en yakın değerlerin olduğu algoritma modelinin XG-Boost algoritması olduğu söylenebilir. Şekil 6.7'de ise tüm algoritma modellerinin deneysel kesme mukavemeti ile ilişkisi görülmektedir.



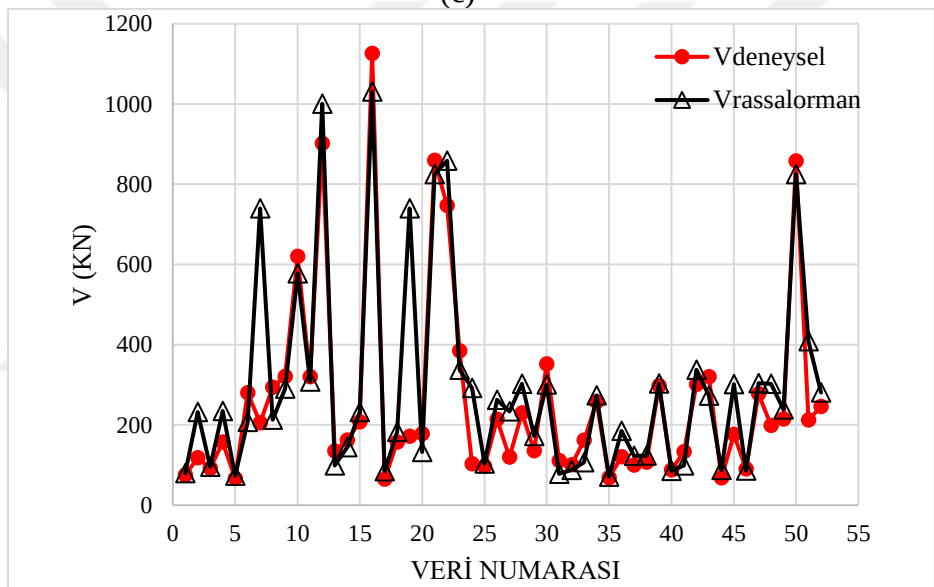
(a)



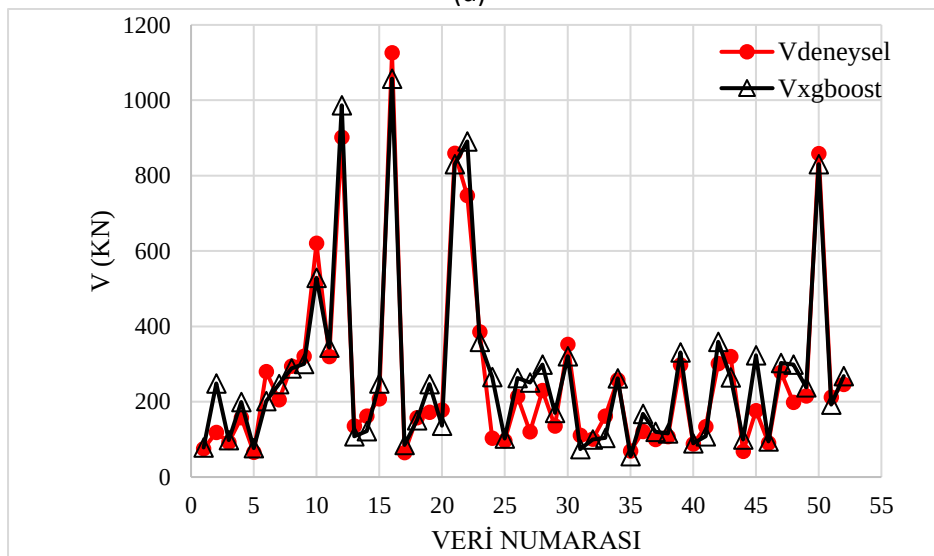
(b)



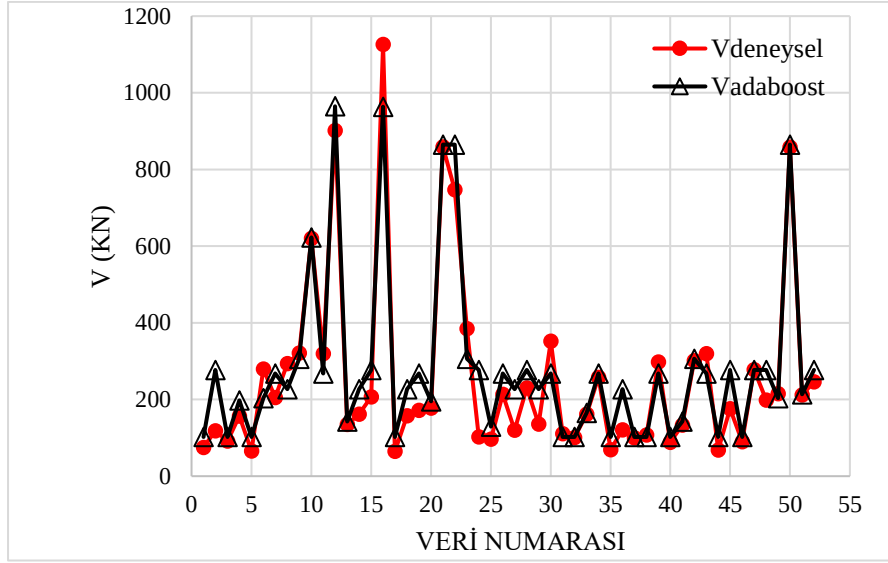
(c)



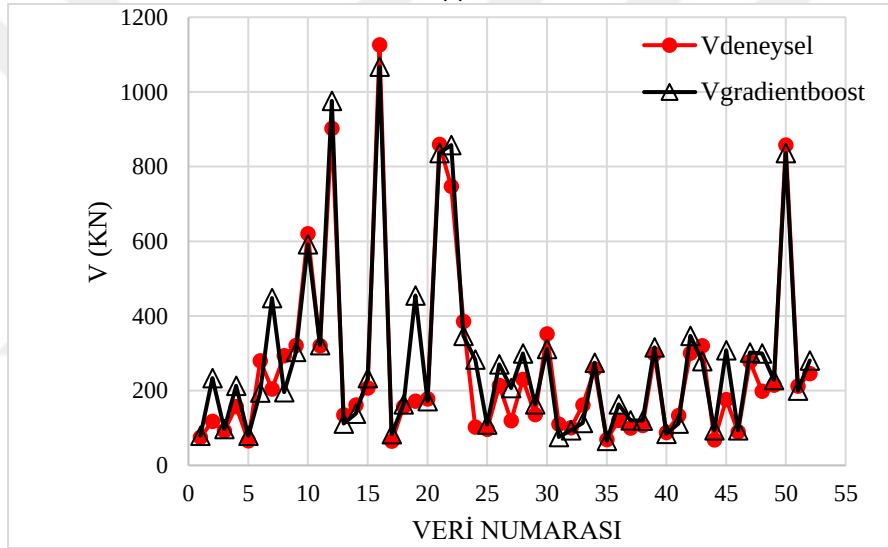
(d)



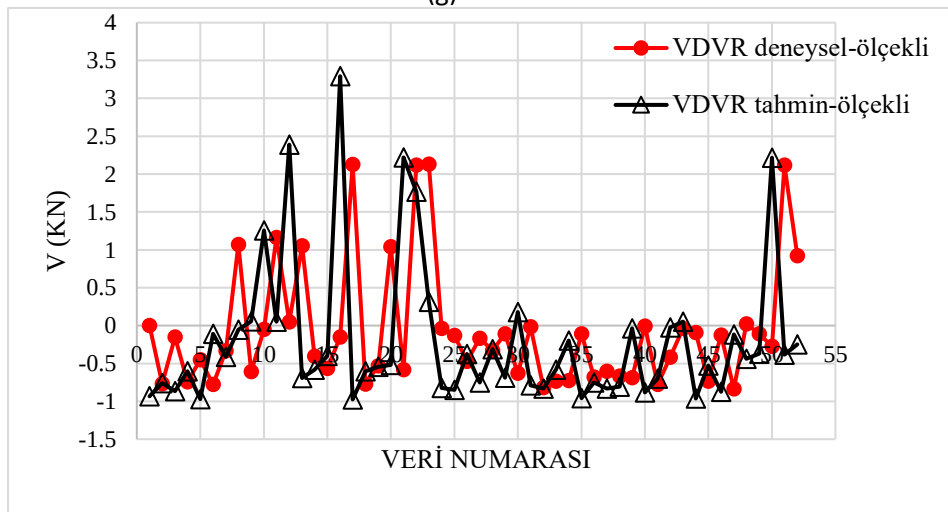
(e)



(f)

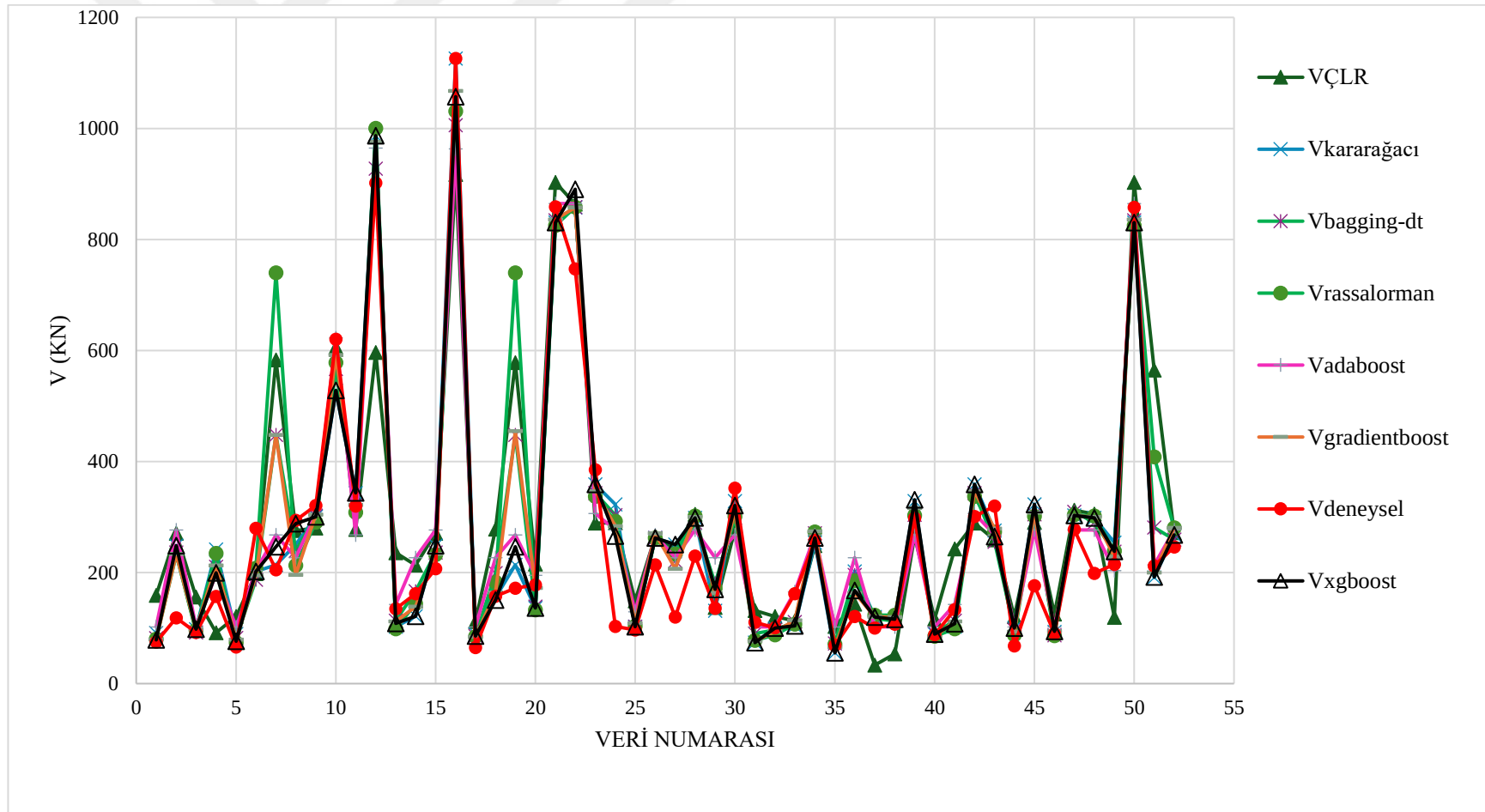


(g)



(h)

Şekil 6.6. Makine öğrenmesi algoritmaları ile kesme kuvveti değerlerinin tahmin sonuçlarının grafik ile gösterilmesi



Şekil 6.7. Makine öğrenmesi algoritmaları ile kesme kuvveti değerlerinin tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

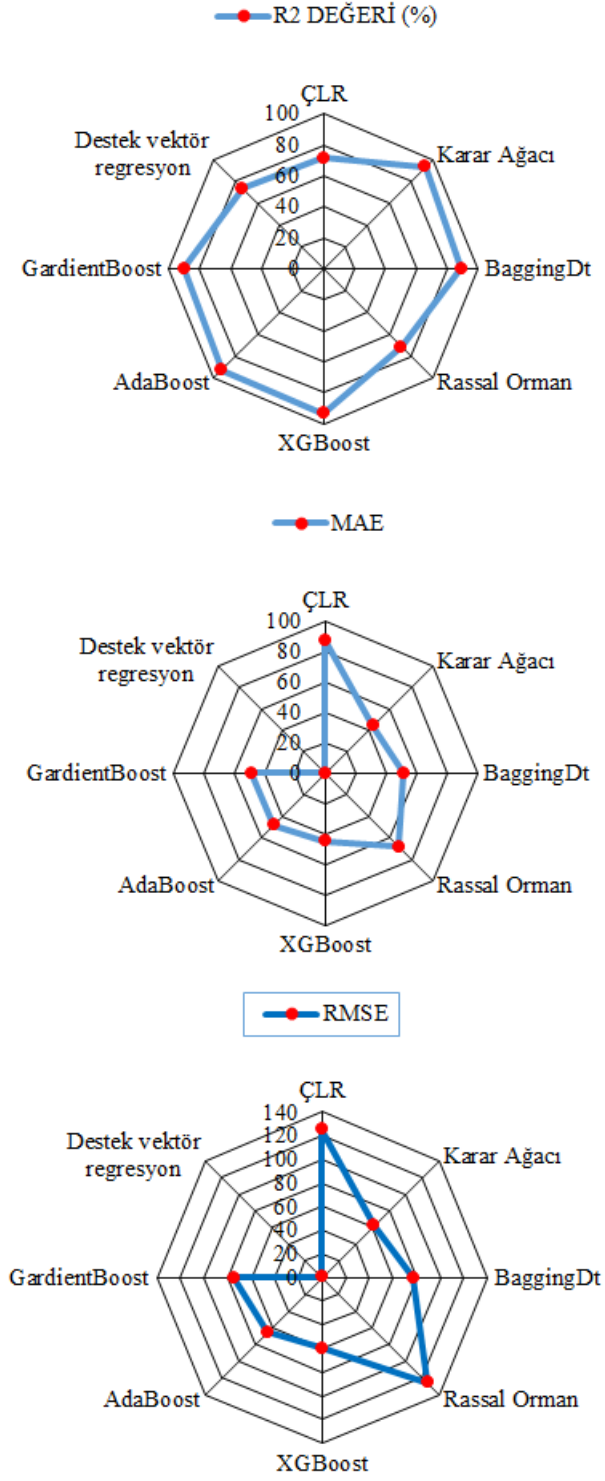
Makine öğrenmesi regresyon modellerine dayalı performans, R^2 skoru başarı metriği, RMSE ve MAE hata metrikleri kullanılarak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Makine öğrenmesi modellerinin performans başarıları değerleri Çizelge 6.4'te verilmiştir. Çizelgedeki değerler incelendiğinde algoritma tahmin performanslarında büyük oranda farklılık yoktur. ÇLR algoritmasının en düşük R^2 değeri (%71.61) ve diğer algoritma modellerine göre daha yüksek MAE (87,35), RMSE (125,56) değeri ile diğerlerinden daha düşük tahmin başarıları göstermiştir.

XG-Boost algoritması; R^2 puanı %93.56, MAE değeri 44.28 ve RMSE değeri 59.80 ile deneysel verilere en yakın kesme mukavemeti tahminini oluşturmuştur.

Çizelge 6.4. Kiriş kesme kuvveti sonuçları için makine öğrenmesi algoritmalarının tahmin performansları

M.Ö. ALGORİTMASI	R^2 DEĞERİ (%)	MAE	RMSE
Çoklu Lineer Regresyon	71.61	87.35	125.56
Karar Ağacı	93.04	44.37	62.15
BaggingDt	89.20	51.30	77.42
Rassal Orman	71.39	67.99	126.04
XG-Boost	93.56	44.28	59.80
AdaBoost	92.39	47.80	65.01
GardientBoost	89.89	48.43	74.91
Destek vektör regresyon	73.26	0.31	0.49

Çizelge 6.4'teki metriklerin radar grafiği üzerinde gösterimi ise Şekil 6.8'de verilmiştir. Metrik değeri yüksek olan algoritmalar radar grafiğinde en dıştaki radarda, metrik değeri düşük olan algoritmalar grafik merkezine yakın olarak görülmektedir.



Şekil 6.8. Makine öğrenmesi modellerinin performans başarıları radar grafiği

6.2. Makine Öğrenmesi Kullanılarak LP ile Kirişlerin Eğilme Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini

Lifler eleman boyuna doğrultusuna paralel olacak şekilde, elemanın çekme yüzüne lifli polimer kompozit donatı, levha veya kumaş yapıştırılarak, elemanın eğilme dayanımı arttırılabilir. TBDY-2018 lifli polimer malzemelerle kirişlerin eğilme kapasitesinin arttırılamayacağı belirtilmiştir. Betonarme kirişlerin düşey yükler altında (deprensiz yükler) eğilme etkilerine karşı güçlendirilmesi (ACI-440.2R, 2017) standardında sunulmuştur. Bu standart yöntemin uygulanabilmesi için iki farklı sınırlama söz konusudur. Bunlar, yapının işletme yükleri altında yeterli güvenliğe sahip olması ve lifli polimer kompozit yapışacak yüzeyde beton basınç dayanımının en az 17 MPa olması gereğidir. Betonarme kirişler için süneklik koşulları ve işletme yükleri altında sağlanması gerekli kullanılabilirlik şartları dikkate alındığında, eğilme etkilerine karşı güçlendirmede %40 dayanım artışı uygun bir üst sınır olarak düşünülebilir (ACI-440.2R, 2017).

Eğilme etkilerine karşı güçlendirme için, özellikle deprem durumunda karşılaşılabilecek yön değiştiren tekrarlı etkilere karşı güçlendirme konusunda henüz yönetmeliklerde yer alacak düzeyde bilgi birikimi bulunmamaktadır. Bu konudaki en önemli zorluklar; lifli polimer kompozitlerin basınç etkileri altındaki davranışlarındaki belirsizlik ve lifli polimer kompozit donatıların mesnet kesitlerine uygun şekilde ankrajında yaşanan zorluklardır.

LP kompozitler ile eğilme güçlendirmesi tasarımı yapılırken olası göçme modları aşağıdaki kabul sırası ile kullanılabilir:

- Basınç bölgesindeki beton ezilmeden çekme bölgesine yapıştırılan LP beton yüzeyinden ayrılır.
- Basınç bölgesindeki beton ezilmeden çekme bölgesine yapıştırılan LP kopar.
- Basınç bölgesindeki beton çekme donatısı akma şekil değiştirmesine ulaştıktan sonra ezilir.
- Basınç bölgesindeki beton çekme donatısı akma şekil değiştirmesine ulaşmadan ezilir.

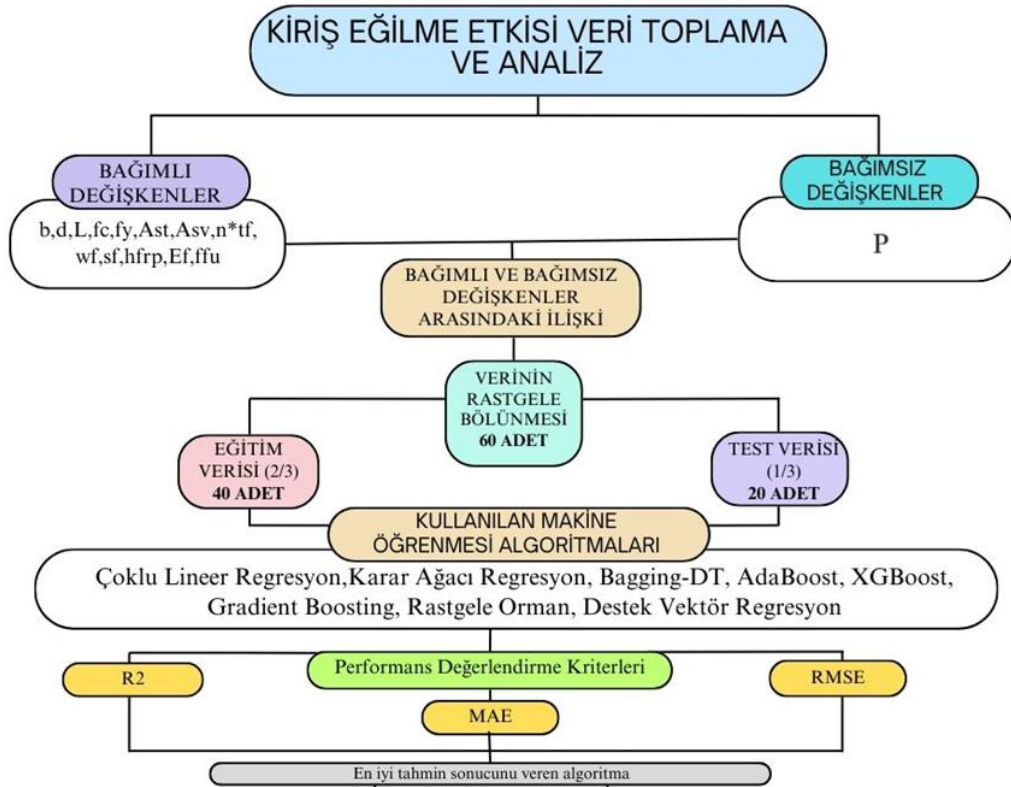
Yapılan araştırmalar özellikle CFRP kullanılarak geliştirilen güçlendirme detaylarında gerilme birikmelerinin meydana geldiği, yapıştırılan CFRP bileşenlerinin uç bölgeleri, bindirme bölgeleri, yapı elemanlarının kesit değiştirdiği bölgeler, köşe bölgeleri gibi yerlerde yapıştırılan CFRP elemanların yüzeyden soyuldukları ve

güçlendirme amacıyla geliştirilen detaydan istenilen performans elde edilemeden çok daha düşük kapasitelerde bu soyulma olayının meydana geldiğini göstermiştir. Özellikle CFRP elamanlar ile yapılan güçlendirmenin düşük çekme ve kayma dayanımına sahip bir yapı elemanı yüzeyine uygulanması durumunda yüzeyden soyulmanın çok daha düşük kapasite değerlerinde ve ani bir şekilde meydana geldiği yapılan çalışmalar ile belirlenmiştir. Bu konularda yapılan araştırmalar CFRP ile uygulanan güçlendirme detaylarında yüzeyden soyulmanın geciktirilmesi için değişik türde ankraj uygulamaların kullanılabileceğini göstermiştir (Anıl ve Belgin, 2010; Anıl ve Belgin, 2009; Anıl vd., 2010; Baran ve Anıl, 2010; Mertoğlu vd., 2016).

Güçlendirilmiş kesitin eğilme momenti kapasitesinin hesaplanması için, kesit bileşke beton basınç kuvveti etkime noktası etrafında moment dengesi yazılırsa denklem 6.5'teki gibi hesaplanır. (ACI 440.2R 2017)

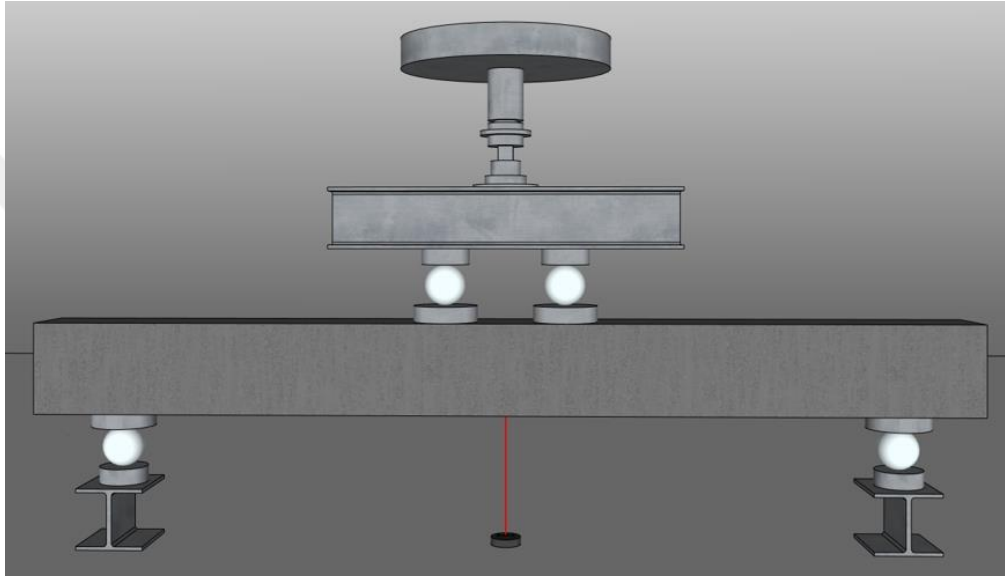
$$\phi M_r = \phi \left(A_s f_y \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \right) \quad (\text{Denklem 6.5})$$

Şekil 6.9'da verilen diyagram bu bölümde yapılan çalışmanın genel özetini göstermektedir.

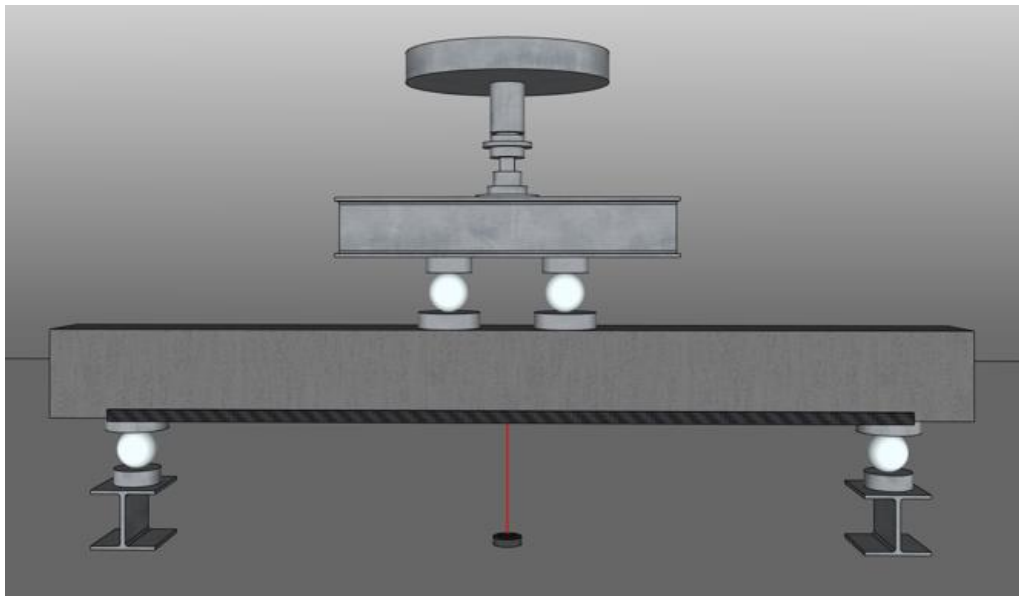


Şekil 6.9. Kiriş eğilme etkisi çalışma akış şeması

Bu bölümde kirişlerin eğilme mukavemeti değerini (P) tahmin etmek amacıyla eğilme davranışına yönelik yapılan deneylerin verileri toplanmıştır. (Ek Çizelge 10.2) Algoritmalar, 0.33 oranında test ölçüsü oluşturmuştur. Böylece 60 tane veri setinin; 40 tanesi ($2/3$ 'ü) eğitim seti olarak, 20 tanesi ($1/3$ 'ü) ise test seti olarak "rastgele" olarak bölünmüştür. Bu çalışmalarda kirişlerin eğilme davranışını incelemek için Şekil 6.10'da verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Bu deney düzeneğinin FRP ile güçlendirilmiş hali de Şekil 6.11'de görülmektedir.



Şekil 6.10. Kiriş eğilme deney düzeneği



Şekil 6.11. FRP ile güçlendirilmiş kiriş eğilme deney düzeneği

Çizelge 6.5. Kirişte eğilme davranışı için veri tabanındaki bilgi parametre özeti

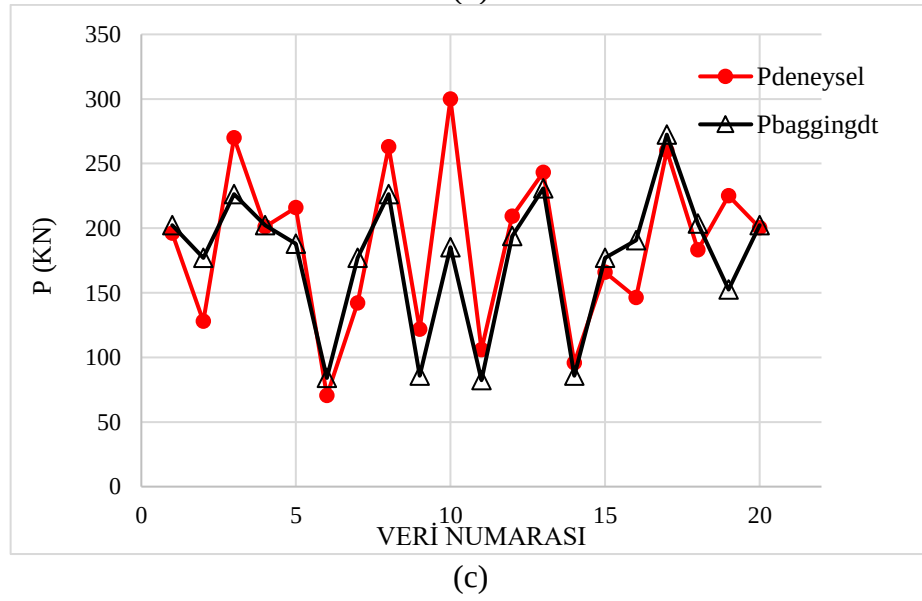
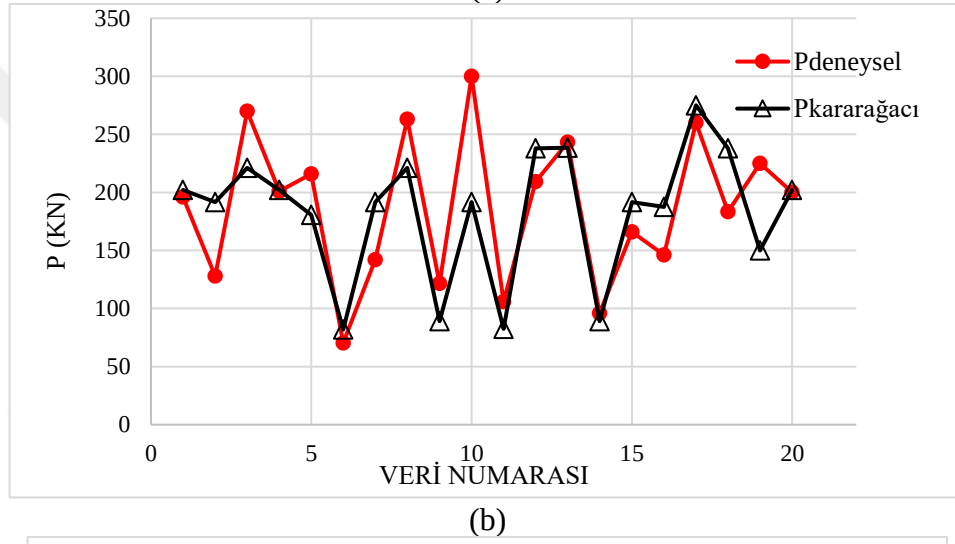
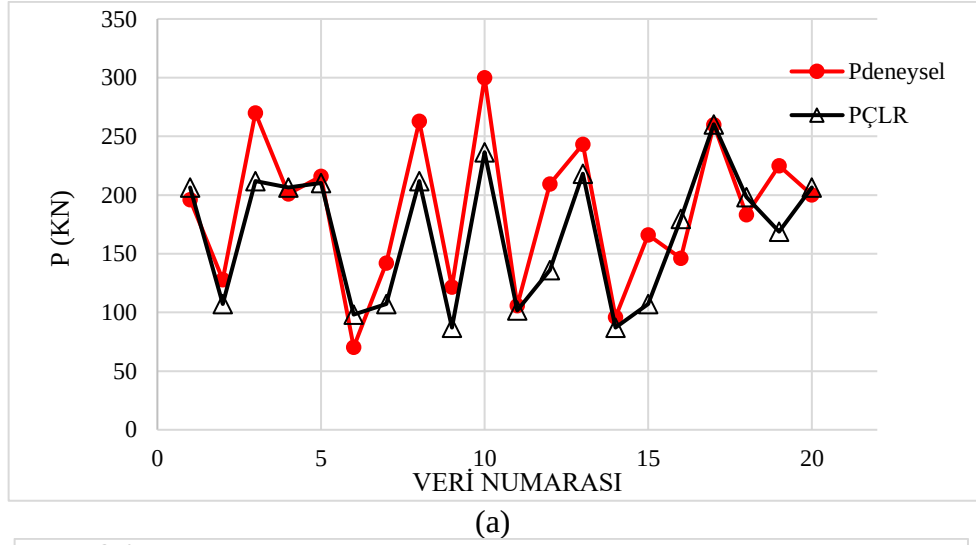
Parametre	Detay	Minimum Değer	Maksimum Değer	Ortalama Değer	Birim
b	Kesit genişliği	150.00	300.00	202.33	mm
d	Kesit faydalı yükseklik	120.00	455.00	298.17	mm
L	Kiriş uzunluğu	1500.00	6000.00	3165.00	mm
f_c	Beton basınç dayanımı	22.80	79.70	36.78	MPa
f_y	Donatı akma dayanımı	400.00	516.00	439.99	MPa
ρ_{st}	Boyuna donatı oranı	0.003	0.019	0.01	-
ρ_{sv}	Enine donatı oranı	0.002	0.030	0.01	-
$n \cdot t_f$	Lifli polimer sargı kalınlığı	0.11	15.30	2.32	mm
w_f	Lifli polimer sargı genişliği	50.00	2050.00	270.53	mm
s_f	Lifli polimer sargılar arası uzaklık	0.00	400.00	86.25	mm
h_{FRP}	Kiriş uzun kenarı lifli polimer sargı yüksekliği	100.00	455.00	306.50	mm
E_f	Lifli polimer elastisite modülü	27.00	242.00	123.53	GPa
f_{fu}	Lifli polimer çekme dayanımı	400.00	4103.00	1928.07	MPa
P	Eğilme taşıma yükü	64.00	306.00	192.97	KN

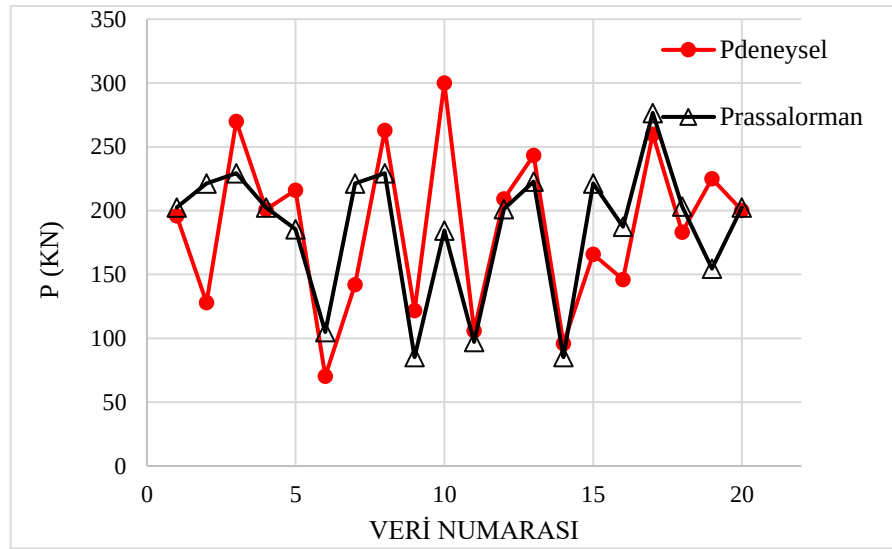
Eğilme davranışına yönelik yapılan deney verilerinin parametre özeti de Çizelge 6.5'te görülmektedir. Çizelge 6.5'ten de görüldüğü gibi veri setinde kullanılan ortalama beton dayanımı, boyuna ve enine donatı oranı vs. gibi malzeme ve donatı özellikleri TS-500-2000 (2000) ve TBDY-2018 (2018) de verilen basınç dayanımı normları aralığındadır. Benzer şekilde kirişlerde kullanılan enine ve boyuna donatı oranlarının ortalaması da yine aynı yönetmelikte yer alan alt ve üst limit sınırları içindedir. Fakat eğilme testinin yapıldığı incelenen bu veri setinin doğası gereği bazı deneylerde etriye sıklaştırması yapılmamış, bazı kirişlerde ise oldukça düşük dayanımlı beton kullanılmıştır.

Çizelge 6.6. Makine öğrenmesi algoritmaları ile P (kiriş eğilme kuvveti, KN) tahmin sonuçları

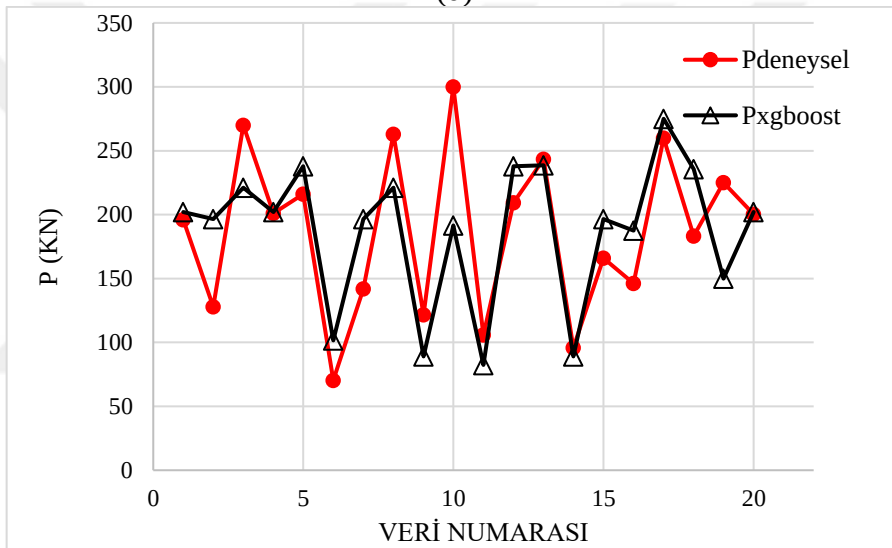
Sıra no	P _{deneysel}	ÇLR	KARAR A.	BAGGING-DT	RASSAL ORMAN	XG-BOOST	ADA BOOST	GRADİENT BOOST	DVR deneysel-ölçekli	DVR tahmin-ölçekli
1	196.00	206.51	202.08	202.37	202.43	202.08	206.61	202.33	0.13	0.002
2	128.00	107.21	191.50	177.14	221.19	196.49	175.90	213.46	-0.01	-0.98
3	270.00	211.91	221.00	226.37	229.42	221.00	243.73	221.27	0.49	1.08
4	201.00	206.51	202.08	202.37	202.43	202.08	206.61	202.33	0.13	0.07
5	216.00	210.25	180.60	187.95	185.40	237.84	180.60	181.43	-0.12	0.29
6	70.40	98.30	81.90	84.22	104.90	101.51	87.75	77.73	-1.43	-1.82
7	142.00	107.21	191.50	177.14	221.19	196.49	175.90	213.46	-0.01	-0.78
8	263.00	211.91	221.00	226.37	229.42	221.00	243.73	221.27	0.49	0.97
9	121.70	87.10	89.03	85.88	85.29	89.02	93.66	87.73	-1.52	-1.08
10	300.00	236.50	191.50	185.10	184.56	191.50	175.90	192.11	0.72	1.51
11	105.90	101.64	82.40	82.40	97.23	82.40	87.75	83.46	-1.31	-1.31
12	209.30	136.19	238.00	193.81	201.29	237.84	206.61	223.34	-0.15	0.19
13	243.25	218.16	238.50	230.69	222.70	238.50	206.61	237.64	0.52	0.69
14	95.89	87.10	89.03	85.88	85.29	89.02	93.66	87.73	-1.52	-1.45
15	166.00	107.21	191.50	177.14	221.19	196.49	175.90	213.46	-0.01	-0.43
16	146.20	179.70	187.43	190.73	187.54	187.43	175.90	188.29	-0.22	-0.72
17	260.00	260.28	275.00	272.40	276.59	275.00	272.67	274.78	1.05	0.93
18	183.30	198.33	238.00	203.61	203.33	235.72	206.61	221.59	-0.11	-0.18
19	225.00	168.85	150.00	152.50	154.57	150.00	152.70	151.68	-0.57	0.42
20	200.25	206.51	202.08	202.37	202.43	202.08	206.61	202.33	0.13	0.06

Tüm algoritma modellerinden elde edilen tahmin edilen eğilme mukavemeti değerleri ile literatürdeki deneysel eğilme mukavemeti değerleri Çizelge 6.6'da verilmiştir. Şekil 6.12'de, tüm algoritma modellerinden elde edilen tahmin eğilme mukavemeti değerleri ile literatürdeki deneysel eğilme mukavemeti değerlerinin karşılaştırılma grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde; deneysel verilerle uyum içinde olan, değerler arasında paralelliğin en fazla olduğu algoritma modelinin Destek Vektör algoritması olduğu söylenebilir. Şekil 6.13'te ise tüm algoritma modellerinin deneysel kesme mukavemeti ile ilişkisi görülmektedir.

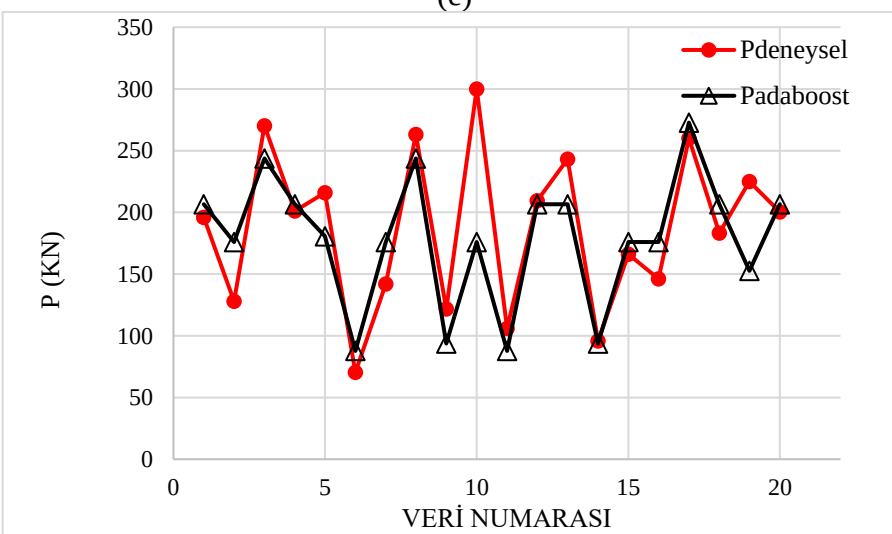




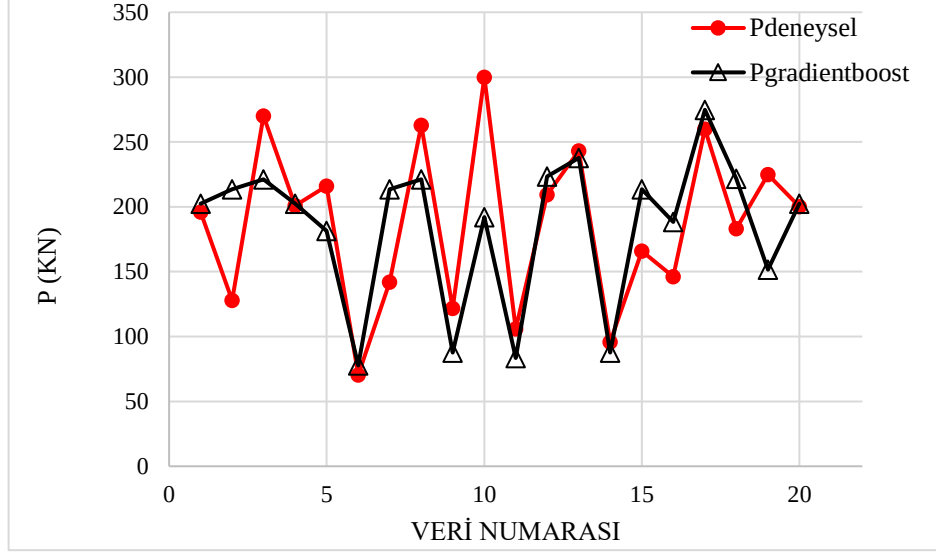
(d)



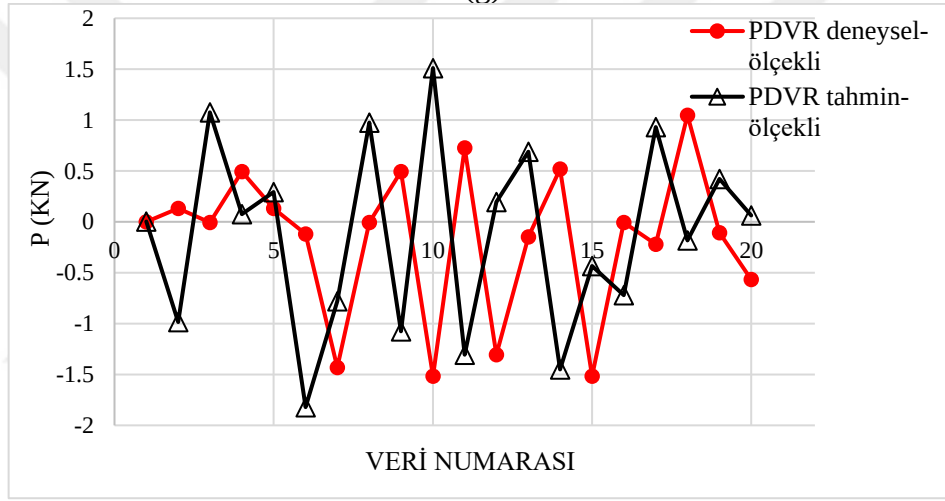
(e)



(f)

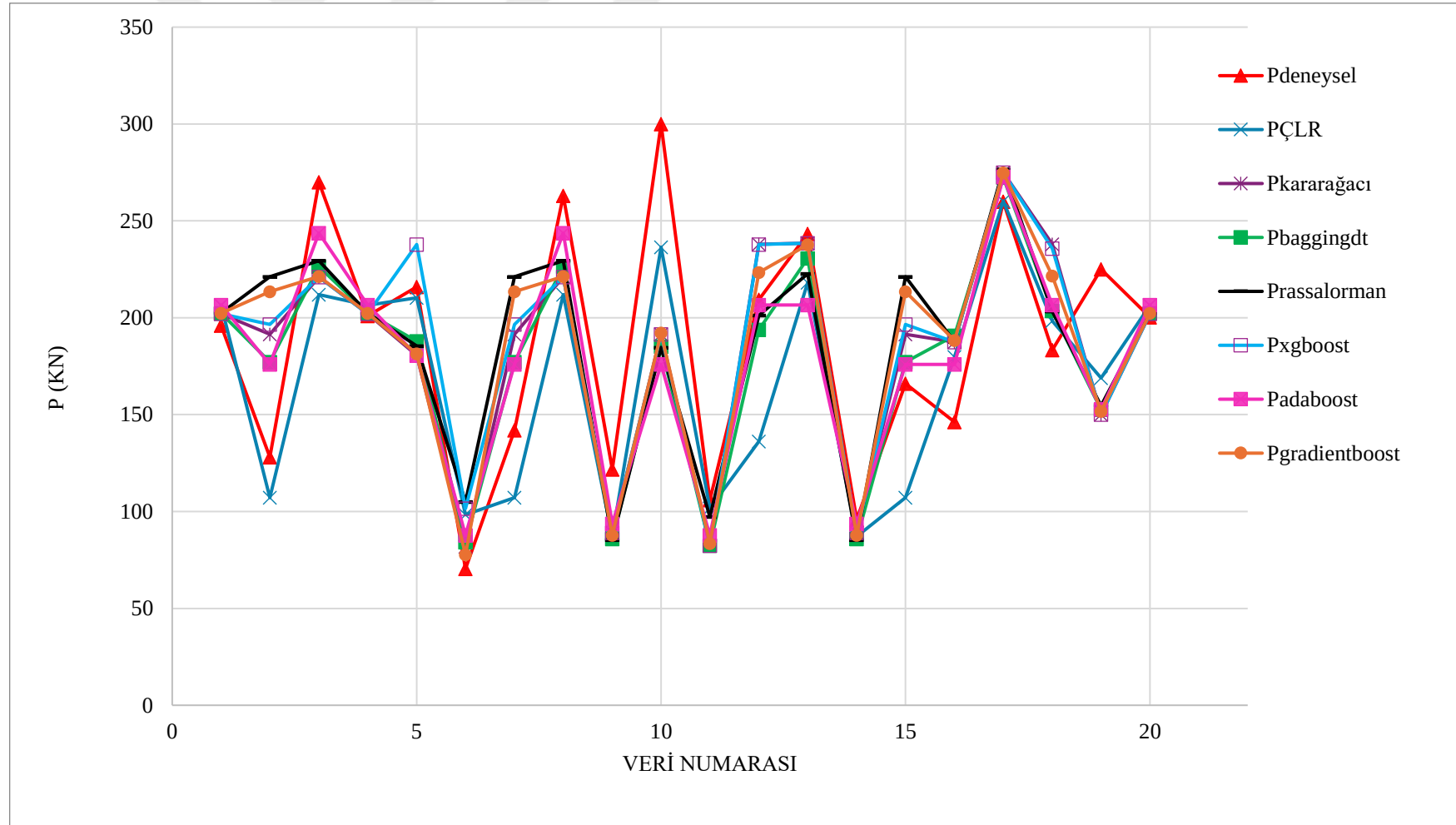


(g)



(h)

Şekil 6.12. Makine öğrenmesi algoritmaları ile eğilme kuvveti değerlerinin tahmin sonuçlarının grafik ile gösterilmesi



Şekil 6.13. Makine öğrenmesi algoritmaları ile eğilme kuvveti değerlerinin tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

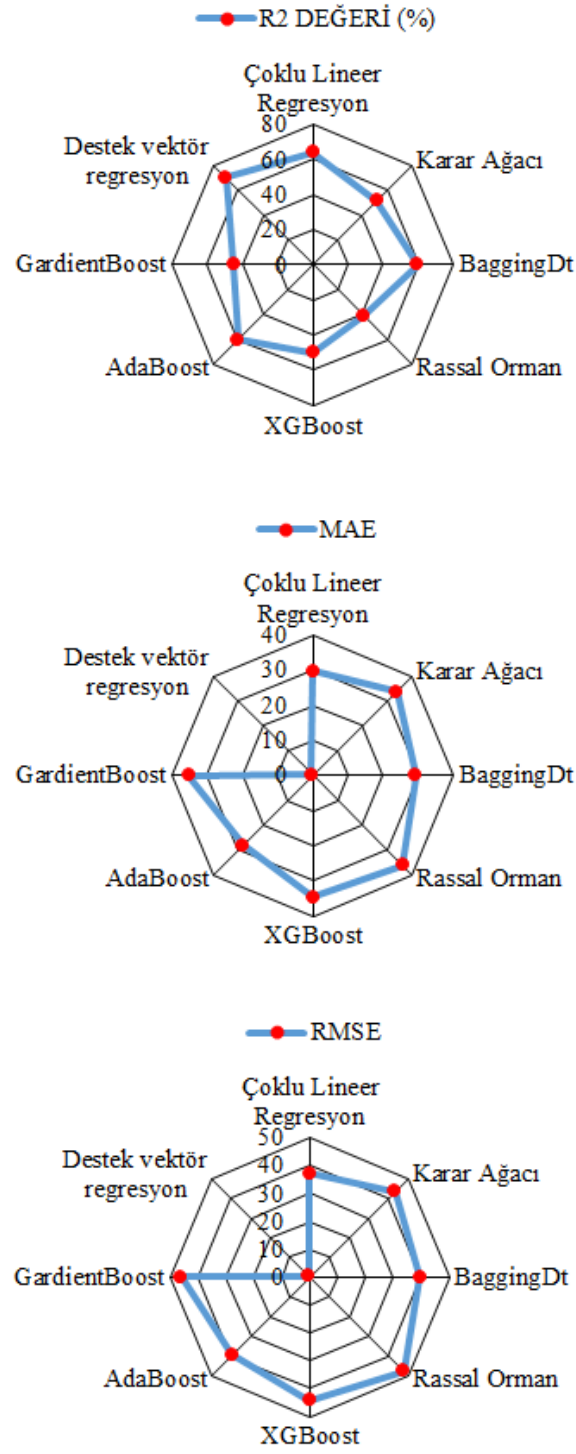
Makine öğrenmesi regresyon modellerine dayalı performans, R^2 skoru başarı metriği, RMSE ve MAE hata metrikleri kullanılarak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Makine öğrenmesi modellerinin performans başarıları Çizelge 6.7’de verilmiştir. Destek vektör algoritması dışındaki algoritmaların; R^2 , MAE ve RMSE değerleri incelendiğinde tahmin başarıları oranlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Destek vektör regresyon algoritması; R^2 puanı %70.14, MAE değeri 0.38 ve RMSE değeri 0.49 ile deneysel verilere en yakın eğilme mukavemeti tahminini elde etmiştir.

Çizelge 6.7. Kiriş eğilme kuvveti sonuçları için makine öğrenmesi algoritmalarının tahmin performansları

M.Ö. ALGORİTMASI	R^2 DEĞERİ (%)	MAE	RMSE
Çoklu Lineer Regresyon	64.04	29.68	37.33
Karar Ağacı	51.60	33.81	43.33
BaggingDt	59.51	29.47	39.61
Rassal Orman	41.15	36.24	47.76
XGBoost	49.93	34.74	44.05
AdaBoost	59.97	28.12	39.38
GardientBoost	45.18	35.35	46.09
Destek vektör regresyon	70.14	0.38	0.49

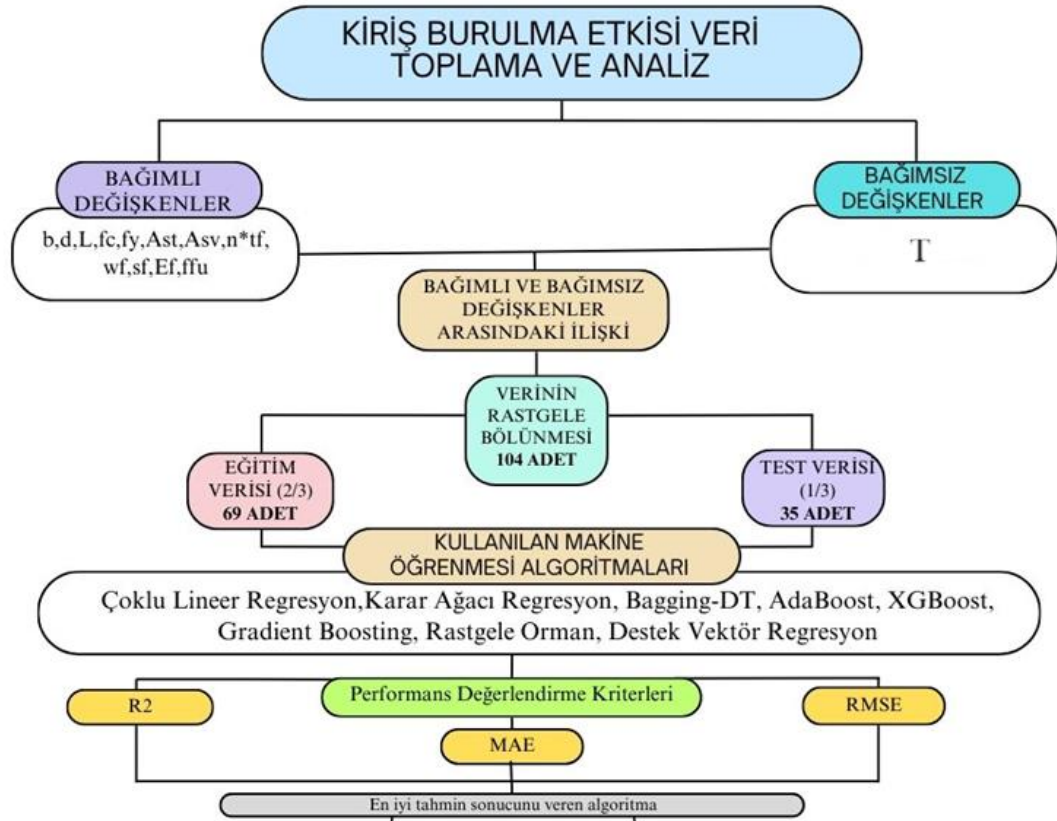
Çizelge 6.7’deki metriklerin radar grafiği üzerinde gösterimi ise Şekil 6.14’te verilmiştir. Metrik değeri yüksek olan algoritmalar radar grafiğinde en dıştaki radarda, metrik değeri düşük olan algoritmalar grafik merkezine yakın olarak görülmektedir.



Şekil 6.14. Makine öğrenmesi modellerinin performans başarıları radar grafiği

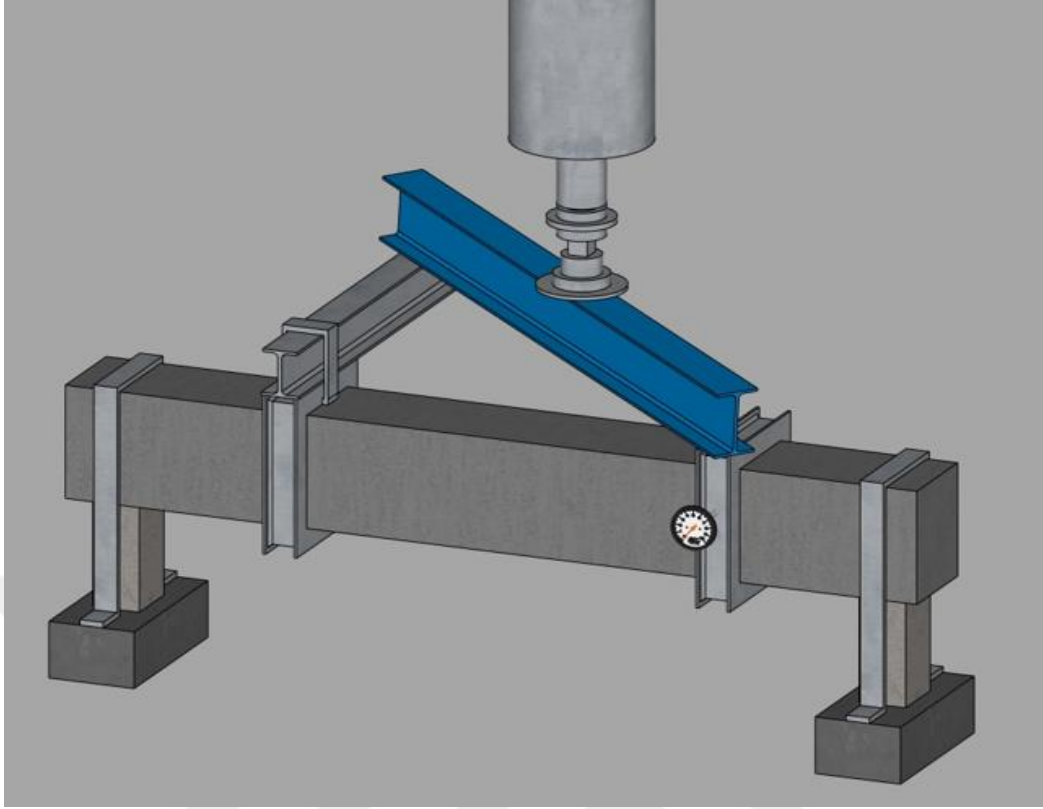
6.3. Makine Öğrenmesi Kullanılarak LP ile Kirişlerin Burulma Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini

Kiriş etkileyen döndürme momenti sonucu burulma oluşur. Bir kuvvet çifti etkileyen elemanlarda oluşan döndürme etkisi kesitte burulma momenti oluşur. Şekil 6.15’de verilen diyagram bu bölümde yapılan çalışmanın genel özetini göstermektedir.

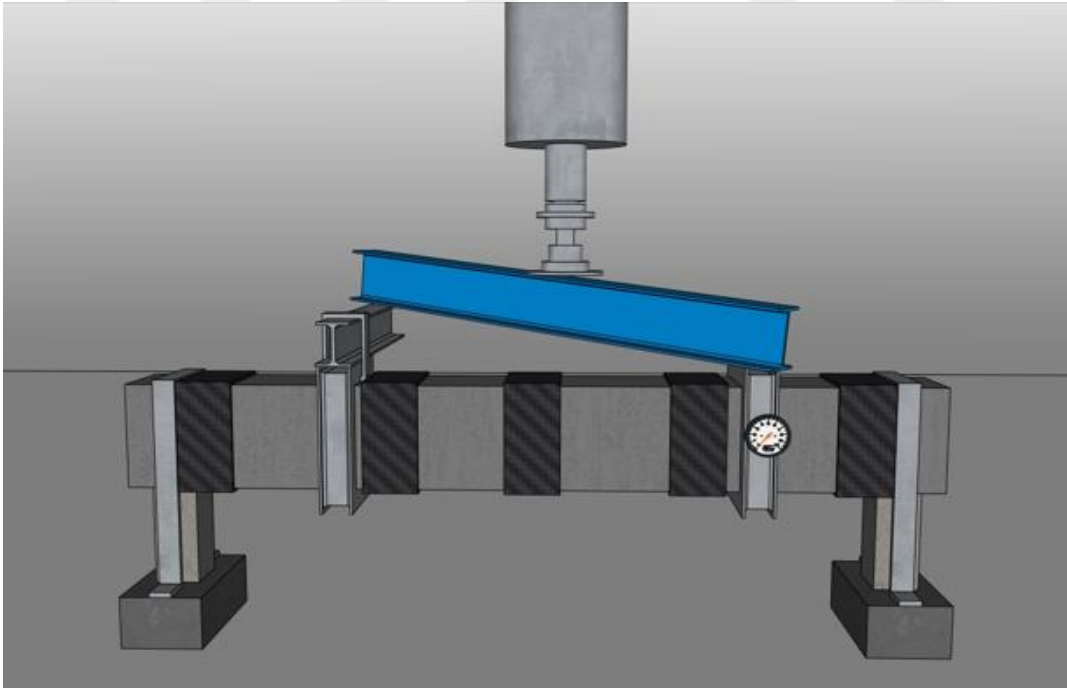


Şekil 6.15. Kiriş burulma etkisi çalışma akış şeması

Bu bölümde kirişlerin burulma mukavemeti değerini (P) tahmin etmek amacıyla burulma davranışına yönelik yapılan deneylerin verileri toplanmıştır (Ek Çizelge 10.3). Algoritmalar, 0.33 oranında test ölçüsü oluşturmuştur. Böylece 104 tane veri setinin; 69 tanesi (2/3'ü) eğitim seti olarak, 35 tanesi (1/3'ü) ise test seti olarak "rastgele" olarak bölünmüştür. Bu çalışmalarda kirişlerin eğilme davranışını incelemek için Şekil 6.16’da verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Bu deney düzeneğinin FRP ile güçlendirilmiş hali de Şekil 6.17’de görülmektedir.



Şekil 6.16. Kiriş burulma deney düzeneği



Şekil 6.17. FRP ile güçlendirilmiş kiriş burulma deney düzeneği

TS-5002000 (2000) yönetmeliğine göre basit burulma hesabı aşağıdaki şekilde yapılmaktadır;

$$T_{cr} = 1,35f_{ctd}S \quad (6.6)$$

Denklem 6.6 içerisinde yer alan T_{cr} , burulmada çatlama dayanımı S burulma dayanım momentidir. S değeri, yönetmelikteki ‘Değişik Kesitler İçin Yaklaşık Burulma Dayanım Momentleri’ Çizelgesundan alınabilir. Hesabı yapılacak olan kirişin tasarım burulma momenti (T_d) burulmada çatlama momentine (sadece uygunluk burulması durumunda) eşit kabul edilmektedir ($T_d = T_{cr}$). Yönetmelik şartlarına göre eğer $T_d \leq 0.65f_{ctd}S$ ise burulma ihmal edilebilir.

Çizelge 6.8. Kirişte burulma davranışı için veri tabanındaki bilgi parametre özeti

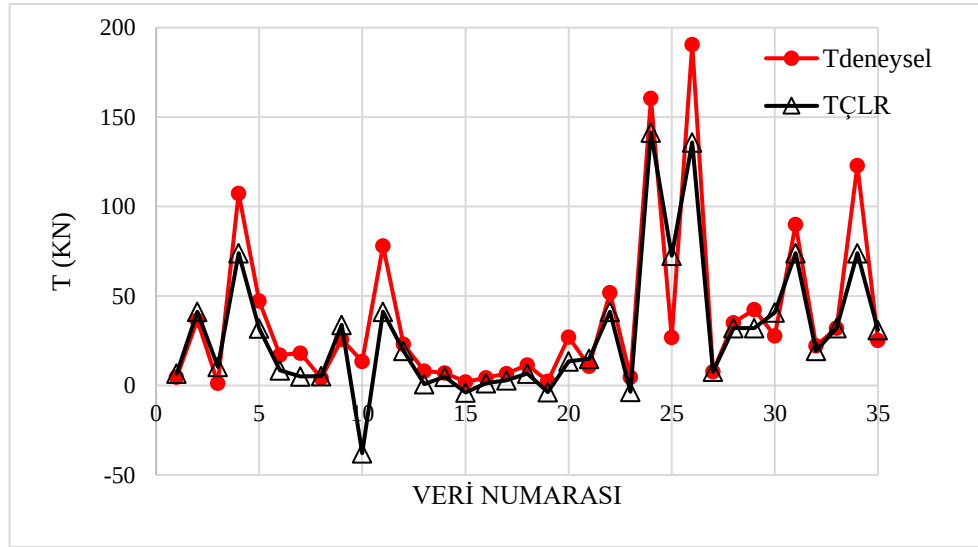
Parametre	Detay	Minimum Değer	Maksimum Değer	Ortalama Değer	Birim
b	Kesit genişliği	80.00	750.00	214.96	mm
d	Kesit faydalı yükseklik	200.00	600.00	310.39	mm
L	Kiriş uzunluğu	1300.00	3960.00	2199.42	mm
f_c	Beton basınç dayanımı	20.00	80.56	41.73	MPa
f_y	Donatı akma dayanımı	251.00	560.00	439.45	MPa
ρ_{st}	Boyuna donatı oranı	0.003	0.080	0.02	-
ρ_{sv}	Enine donatı oranı	0.001	0.015	0.01	-
(n*tf)	Lifli polimer sargı kalınlığı	0.11	2.50	0.40	mm
w_f	Lifli polimer sargı genişliği	15.00	3690.00	635.90	mm
s_f	Lifli polimer sargılar arası uzaklık	0.00	600.00	161.85	mm
E_f	Lifli polimer elastisite modülü	72.00	252.00	207.61	GPa
f_{tu}	Lifli polimer çekme dayanımı	1317.00	4900.00	3764.94	MPa
T	Burulma taşıma yükü	0.50	204.20	29.37	KNm

Burulma davranışına yönelik yapılan deney verilerinin parametre özeti de çizelge 6.8’de görülmektedir. Çizelge 6.8’de görüldüğü gibi veri setinde kullanılan ortalama beton dayanımı, boyuna ve enine donatı oranı vs. gibi malzeme ve donatı özellikleri TS-500-2000 (2000) ve TBDY-2018 (2018) de verilen basınç dayanımı normları aralığındadır. Benzer şekilde kirişlerde kullanılan enine ve boyuna donatı oranlarının ortalaması da yine aynı yönetmelikte yer alan alt ve üst limit sınırları içindedir. Fakat burulma testinin yapıldığı incelenen bu veri setinin doğası gereği bazı deneylerde etriye sıklaştırması yapılmamış, bazı kirişlerde ise oldukça düşük dayanımlı beton kullanılmıştır.

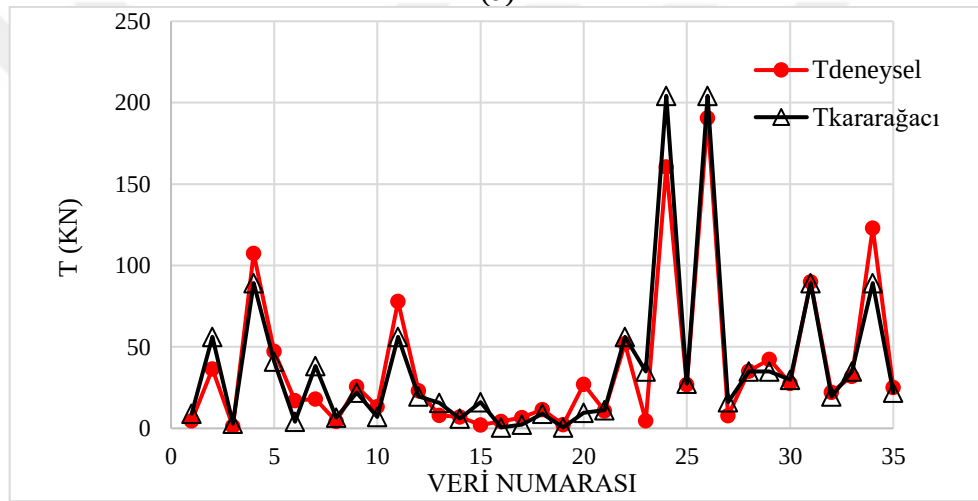
Çizelge 6.9. Makine öğrenmesi algoritmaları ile P (kiriş burulma kuvveti, KN) tahmin sonuçları

Sıra no	T _{deneyssel}	ÇLR	KARAR A.	BAGGING-DT	RASSAL ORMAN	XG-BOOST	ADA BOOST	GRADİENT BOOST	DVR deneyssel-ölçekli	DVR tahmin-ölçekli
1	4.70	6.67	9.00	7.81	8.15	6.47	9.31	7.56	-0.39	-0.63
2	36.50	41.29	56.10	56.59	55.75	56.10	56.71	56.26	0.77	0.33
3	1.30	10.49	2.90	3.14	4.67	3.08	6.73	4.55	-0.61	-0.73
4	107.50	73.95	89.30	89.27	86.55	89.30	97.53	88.93	1.37	2.49
5	47.30	31.89	41.00	40.57	40.87	41.00	36.45	39.88	0.31	0.66
6	17.00	8.49	4.00	15.11	10.37	16.29	19.11	16.75	-0.11	-0.26
7	18.10	5.10	38.30	26.11	27.69	30.07	18.21	29.07	0.11	-0.22
8	4.20	5.24	6.60	6.10	6.11	6.60	6.73	5.86	-0.52	-0.64
9	25.80	33.85	21.90	21.29	19.03	21.90	18.21	21.52	-0.03	0.01
10	13.40	-37.83	7.00	11.94	9.89	12.24	14.08	13.38	-0.20	-0.37
11	78.00	41.29	56.10	56.59	55.75	56.10	56.71	56.26	0.77	1.59
12	23.10	19.31	19.56	20.08	19.64	19.56	23.76	19.59	-0.14	-0.07
13	8.10	0.80	15.60	17.81	22.86	15.60	6.70	14.88	-0.56	-0.53
14	7.00	4.86	6.00	9.88	7.23	6.98	14.09	7.00	-0.49	-0.56
15	2.10	-3.84	16.00	12.29	14.49	13.03	14.03	12.53	-0.44	-0.71
16	4.30	1.27	0.60	18.06	8.78	2.34	3.95	3.61	-0.57	-0.64
17	6.70	2.96	2.40	5.79	3.41	2.40	6.73	4.26	-0.61	-0.57
18	11.50	6.67	9.00	7.81	8.15	6.47	9.31	7.56	-0.39	-0.42
19	2.40	-3.76	0.60	7.70	10.76	1.40	6.26	5.38	-0.55	-0.70
20	27.00	13.57	9.50	10.35	10.08	9.50	14.09	9.62	-0.49	0.05
21	10.80	14.85	11.10	10.69	8.90	11.46	14.08	8.62	-0.35	-0.44
22	52.00	41.29	56.10	56.59	55.75	56.10	56.71	56.26	0.77	0.80
23	4.70	-3.43	34.87	5.35	16.62	8.25	6.70	10.38	-0.67	-0.63
24	160.50	141.40	204.20	167.42	131.18	204.20	204.20	200.35	0.69	4.09
25	26.96	72.45	27.54	28.71	27.26	27.54	26.35	28.53	0.16	0.05
26	190.68	135.94	204.20	167.42	131.18	204.20	204.20	203.93	0.71	5.01
27	7.80	7.71	16.00	12.57	14.46	16.40	14.09	15.78	-0.38	-0.54
28	35.10	32.18	34.87	36.18	33.91	34.87	36.45	35.08	0.31	0.29
29	42.50	32.18	34.87	36.18	33.91	34.87	36.45	35.08	0.31	0.52
30	27.75	40.83	29.87	29.64	28.39	29.87	26.35	29.24	0.03	0.07
31	90.00	73.95	89.30	89.27	86.55	89.30	97.53	88.93	1.37	1.96
32	22.20	19.31	19.56	20.08	19.64	19.56	23.76	19.59	-0.14	-0.10
33	32.00	32.18	34.87	36.18	33.91	34.87	36.45	35.08	0.31	0.20
34	123.00	73.95	89.30	89.27	86.55	89.30	97.53	88.93	1.37	2.96
35	25.20	31.05	21.90	21.29	17.00	45.35	24.76	27.37	-0.17	-0.01

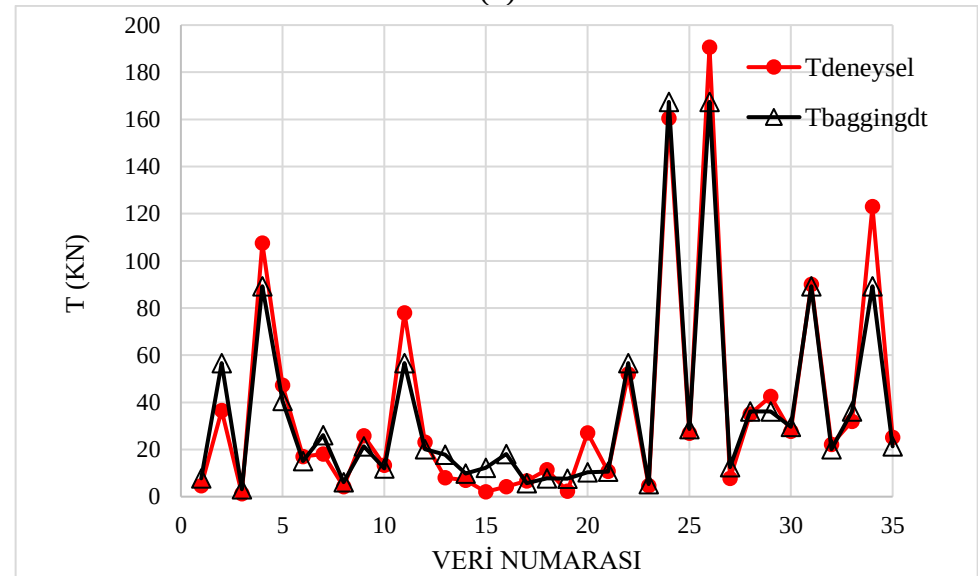
Tüm algoritma modellerinden elde edilen tahmin edilen burulma mukavemeti değerleri ile literatürdeki deneysel burulma mukavemeti değerleri Çizelge 6.9’da verilmiştir. Şekil 6.18’de, tüm algoritma modellerinden elde edilen tahmin burulma mukavemeti değerleri ile literatürdeki deneysel burulma mukavemeti değerlerinin karşılaştırılma grafikleri verilmiştir. Grafikler, algoritma sonuçlarının deneysel verilerle ne kadar uyum içinde olduğu, değerler arasında paralelliğin olup olmadığının tespitine imkân tanımaktadır. Şekil 6.19’da ise tüm algoritma modellerinin deneysel burulma mukavemeti ile ilişkisi görülmektedir.



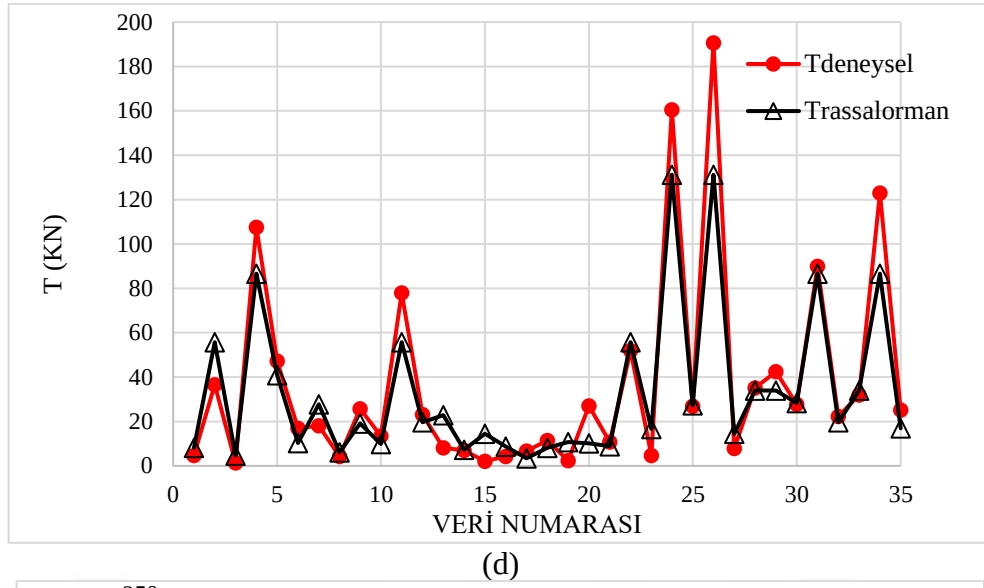
(a)



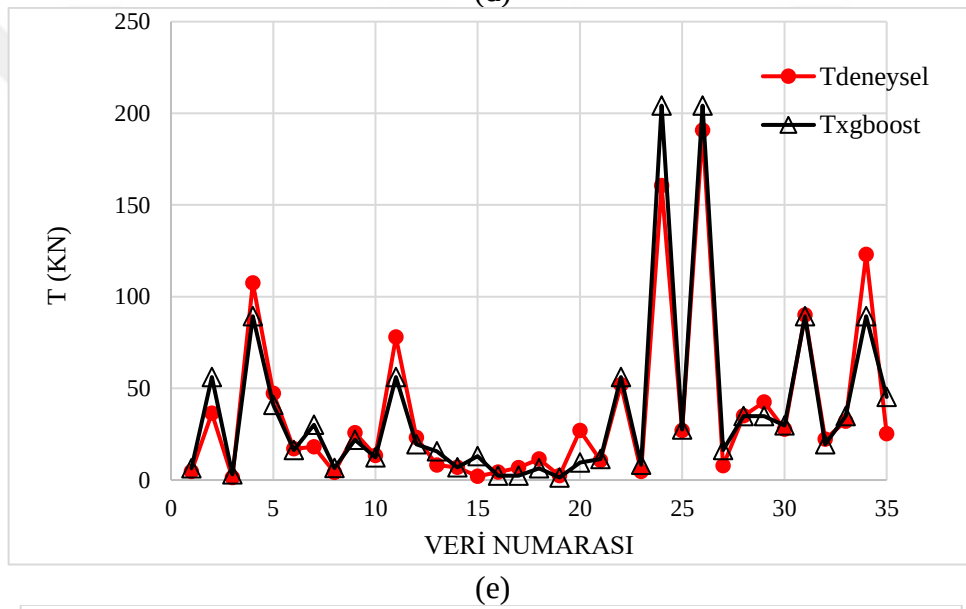
(b)



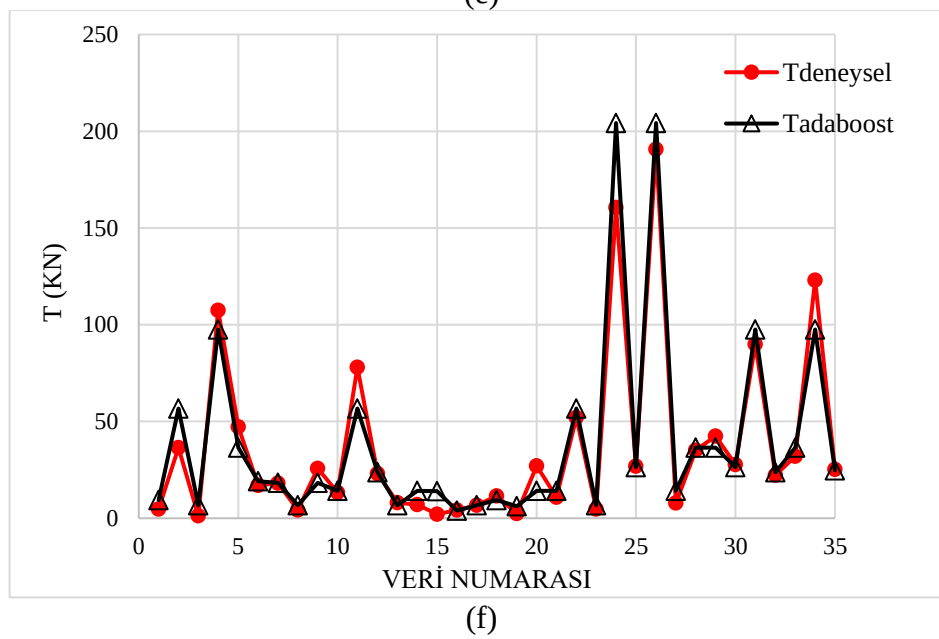
(c)



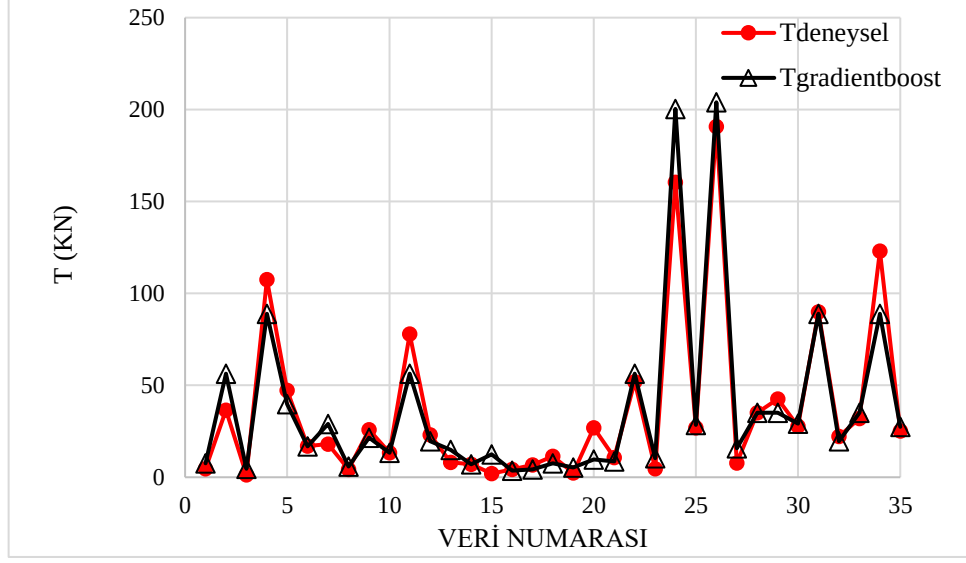
(d)



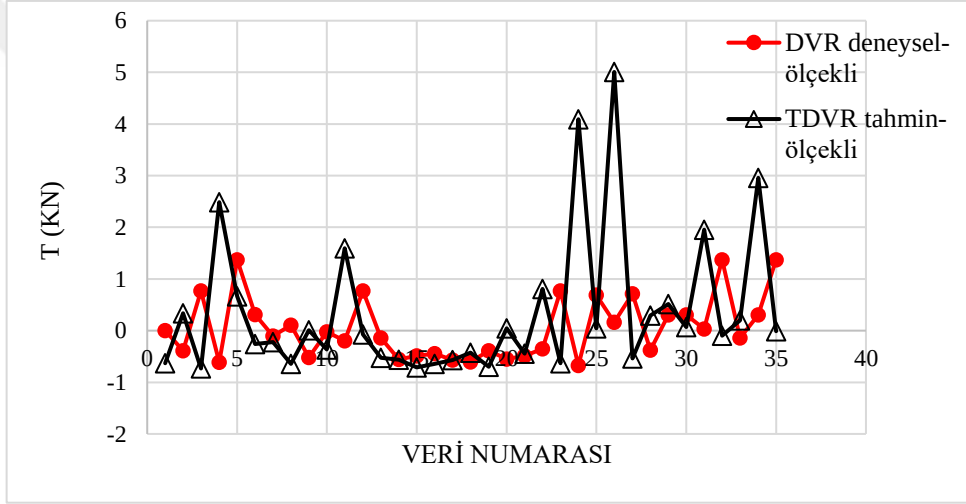
(e)



(f)

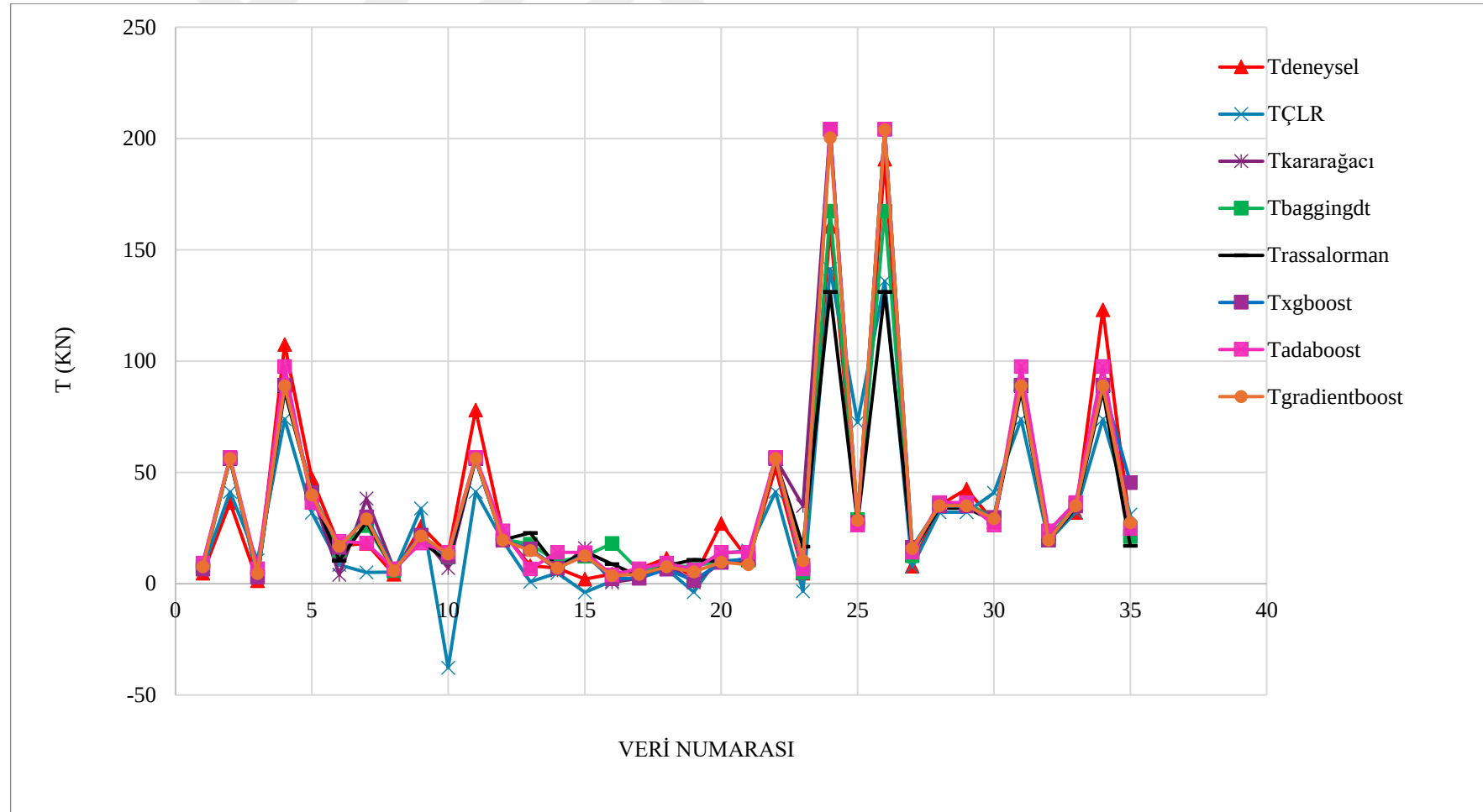


(g)



(h)

Şekil 6.18. Makine öğrenmesi algoritmaları ile burulma kuvveti değerlerinin tahmin sonuçlarının grafik ile gösterilmesi



Şekil 6.19. Makine öğrenmesi algoritmaları ile burulma kuvveti değerlerinin tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

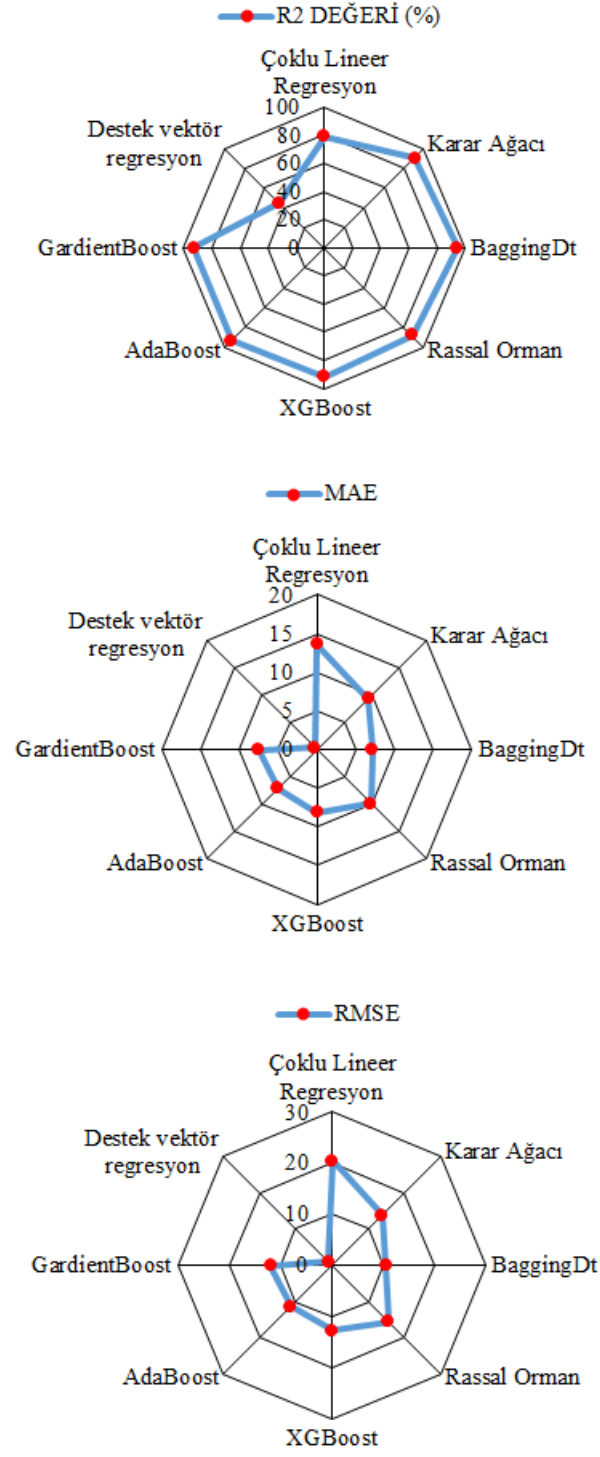
Makine öğrenmesi regresyon modellerine dayalı performans, R^2 skoru başarı metriği, RMSE ve MAE hata metrikleri kullanılarak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Makine öğrenmesi modellerinin performans başarısı Çizelge 6.10'da verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü üzere, algoritma tahmin performanslarında farklılıklar vardır. R^2 değerleri incelendiğinde; en yüksek R^2 değerine sahip algoritma Bagging-Dt algoritmasıdır.

Bagging-Dt algoritması, R^2 puanı %94.48, MAE değeri 7.17 ve RMSE değeri 10.59 ile deneysel verilere en yakın burulma mukavemeti tahminini oluşturmuştur.

Çizelge 6.10. Kiriş burulma kuvveti sonuçları için makine öğrenmesi algoritmalarının tahmin performansları

M.Ö. ALGORİTMASI	R^2 DEĞERİ (%)	MAE	RMSE
Çoklu Lineer Regresyon	79.27	13.61	20.52
Karar Ağacı	90.41	9.35	13.95
Bagging-Dt	94.48	7.17	10.59
Rassal Orman	88.13	9.93	15.53
XGBoost	91.89	8.17	12.83
AdaBoost	93.65	7.09	11.36
GardientBoost	92.90	7.58	12.00
Destek vektör regresyon	45.12	0.45	1.01

Çizelge 6.10'daki metriklerin radar grafiği üzerinde gösterimi ise Şekil 6.20'de verilmiştir. Metrik değeri yüksek olan algoritmalar radar grafiğinde en dıştaki radarda, metrik değeri düşük olan algoritmalar grafik merkezine yakın olarak görülmektedir.

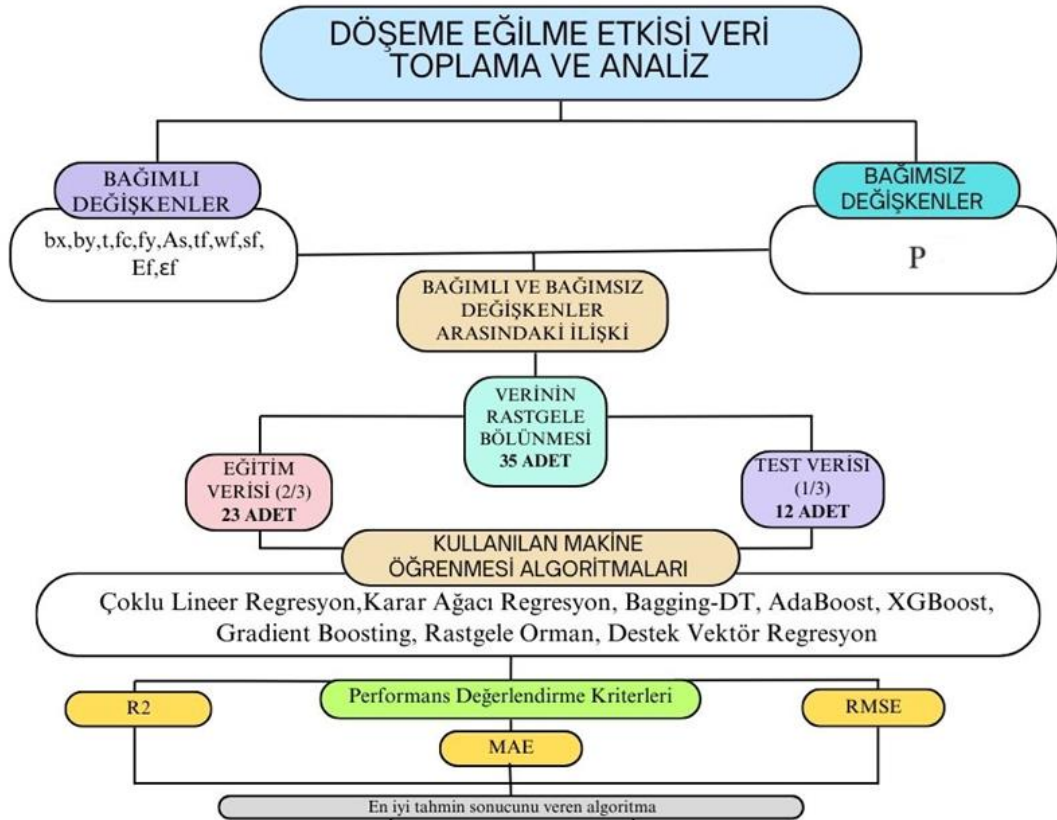


Şekil 6.20. Makine öğrenmesi modellerinin burulma mukavemeti performans başarıları radar grafiği

6.4. Makine Öğrenmesi Kullanılarak LP ile Döşemelerin Eğilme Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini

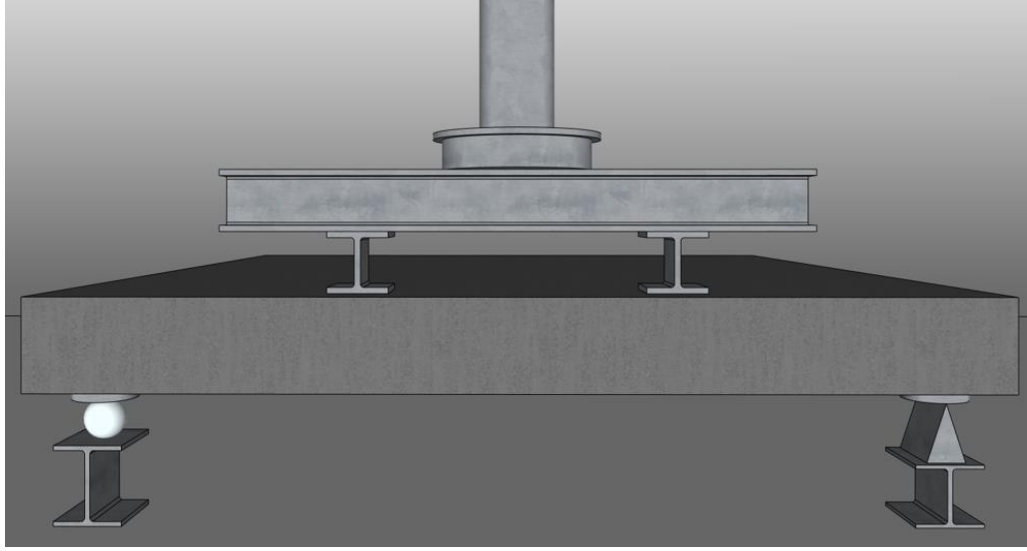
Bu bölümde döşemelerin eğilme mukavemeti değerini (P) tahmin etmek amacıyla eğilme davranışına yönelik yapılan deneylerin verileri toplanmıştır (Ek Çizelge 10.4). Algoritmalar, 0.33 oranında test ölçüsü oluşturmuştur. Böylece 35 tane veri setinin; 23 tanesi (2/3'ü) eğitim seti olarak, 12 tanesi (1/3'ü) ise test seti olarak "rastgele" olarak bölünmüştür.

Şekil 6.21' de verilen diyagram bu bölümde yapılan çalışmanın genel özetini göstermektedir.

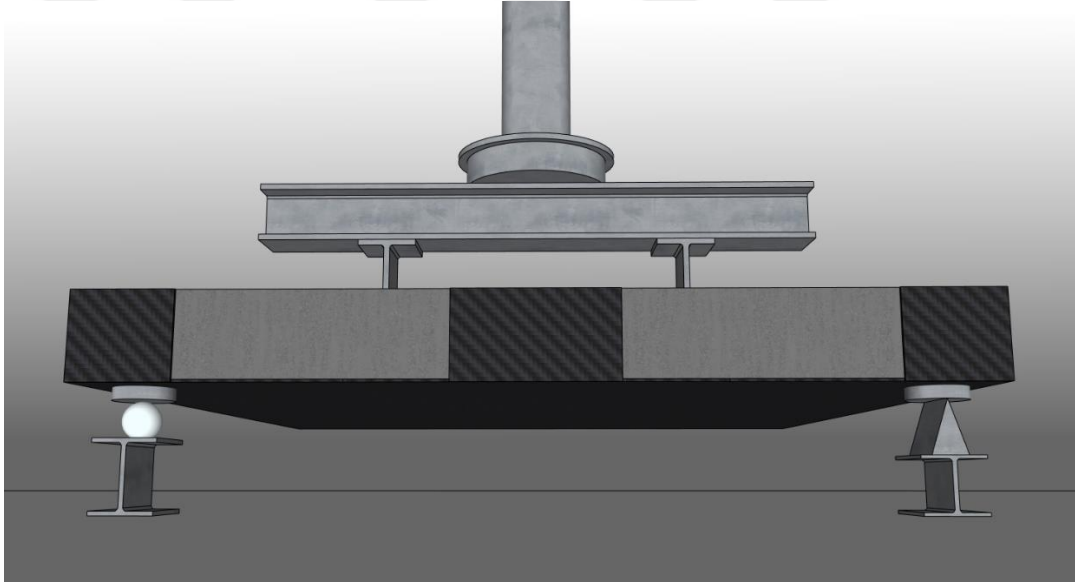


Şekil 6.21. Döşeme eğilme etkisi çalışma akış şeması

Bu çalışmalarda döşemelerin eğilme davranışını incelemek için Şekil 6.22'de verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Bu deney düzeneğinin FRP ile güçlendirilmiş hali de Şekil 6.23'te görülmektedir.



Şekil 6.22. Döşeme eğilme deney düzeneği



Şekil 6.23. FRP ile güçlendirilmiş döşeme eğilme deney düzeneği

Basit donatılı, dikdörtgen kesitli, denge altı kirişlerde en dış lifteki beton birim kısalması ezilme sınırına erişmeden önce çekme donatısı akacağından, kırılma anına göre yapılacak taşıma gücü hesabında, $\sigma_s = f_{yd}$ ($F_c = F_s$) alınır.

$$0.85f_{cd}b_wk_1c = A_sf_{yd} \quad (6.7)$$

$$\frac{k_1c}{d} = \frac{A_s}{b_wd} \left(\frac{f_{yd}}{0.85f_{cd}} \right) = \rho \left(\frac{f_{yd}}{0.85f_{cd}} \right) \quad (6.8)$$

$$j = \left(1 - \frac{k_1c}{2d} \right) = 1 - 0.59\rho \left(\frac{f_{yd}}{f_{cd}} \right) \quad (6.9)$$

$$M_r = F_s j d = A_s f_y j d \quad (6.10)$$

Denklem 6.7, 6.8, 6.9 ve 6.10 ile taşıma gücü momenti (M_r) hesaplanır.

Güçlendirilmiş kesitin eğilme momenti kapasitesinin hesaplanması için, kesit bileşke beton basınç kuvveti etkiye noktası etrafında moment dengesi yazılırsa denklem 6.11'deki gibi hesaplanır. (ACI 440.2R 2017)

$$\phi M_r = \phi \left(A_s f_y \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \right) \quad (6.11)$$

ϕ : Dayanım azaltma katsayısı

A_s : Çekme donatısı alanı

f_{ck} : Betonun basınç dayanımı

f_y : Çelik donatının akma dayanımı

F_c, F_s : Beton ve donatı iç kuvvetler

d : Kesit faydalı derinliği

ρ : Donatı oranı, b_w : kesit genişliği, h : Kesit derinliği, c : Tarafsız eksen derinliği

β_1 : Dikdörtgen basınç bloğu dönüştürme parametresi, A_f : Lifli polimer kesit alanı

ψ_f : Lifli polimer için ilave güvenlik faktörü, f_{fe} : Lifli polimerin etkin gerilmesi

Çizelge 6.11. Döşeme eğilme davranışı için veri tabanındaki bilgi parametre özeti

Parametre	Detay	Minimum Değer	Maksimum Değer	Ortalama Değer	Birim
b_x	Döşeme x eksen boyutu	300.00	700.00	500.00	mm
b_y	Döşeme y eksen boyutu	2000.00	6000.00	3144.00	mm
t	Döşeme kalınlığı	100.00	220.00	137.71	mm
f_y	Donatı akma dayanımı	350.00	595.00	480.34	MPa
f_c	Beton basınç dayanımı	24.00	72.80	50.08	MPa
A_s	Donatı alanı	100.48	2160.32	457.25	mm ²
t_f	Lifli polimer sargı kalınlığı	0.17	72.80	0.97	mm
w_f	Lifli polimer sargı genişliği	100.00	600.00	194.29	mm
s_f	Lifli polimer sargılar arası uzaklık	0.00	300.00	121.63	mm
E_f	Lifli polimer elastisite modülü	35.10	228.00	126.10	GPa
ϵ_f	Lifli polimer çekme dayanımı	725.95	4272.00	2217.57	MPa
P	Eğilme taşıma yükü	8.80	200.40	72.39	KN

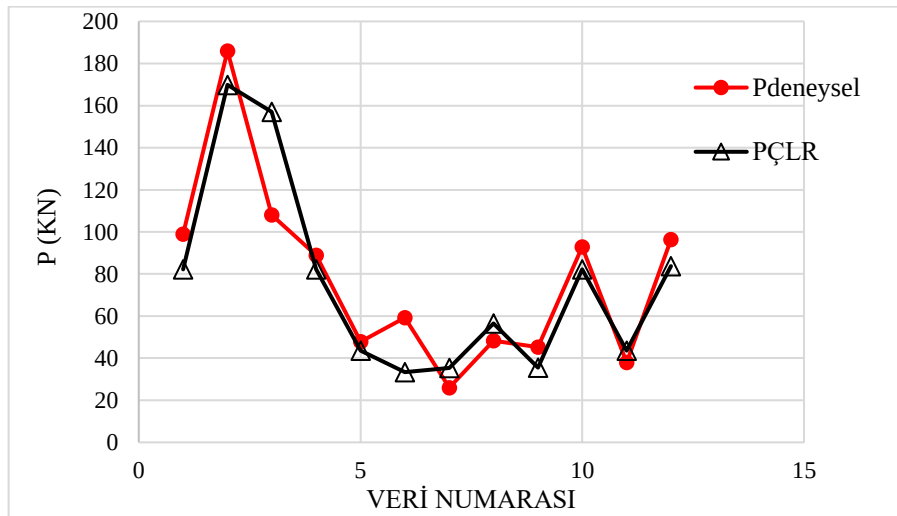
Döşeme eğilme davranışına yönelik yapılan deney verilerinin parametre özeti de Çizelge 6.11'de görülmektedir. Çizelge 6.11'den de görüldüğü gibi veri setinde kullanılan ortalama beton dayanımı, boyuna ve enine donatı oranı vs. gibi malzeme ve donatı özellikleri TS-500-2000 (2000) ve TBDY-2018 (2018) de verilen basınç dayanımı normları aralığındadır. Benzer şekilde döşemelerde kullanılan enine ve boyuna donatı oranlarının ortalaması da yine aynı yönetmelikte yer alan alt ve üst limit sınırları içindedir. Fakat eğilme testinin yapıldığı incelenen bu veri setinin doğası gereği bazı

deneylerde donatı yerleşimine dikkat edilmemiş, bazı döşemelerde ise oldukça düşük dayanımlı beton kullanılmıştır.

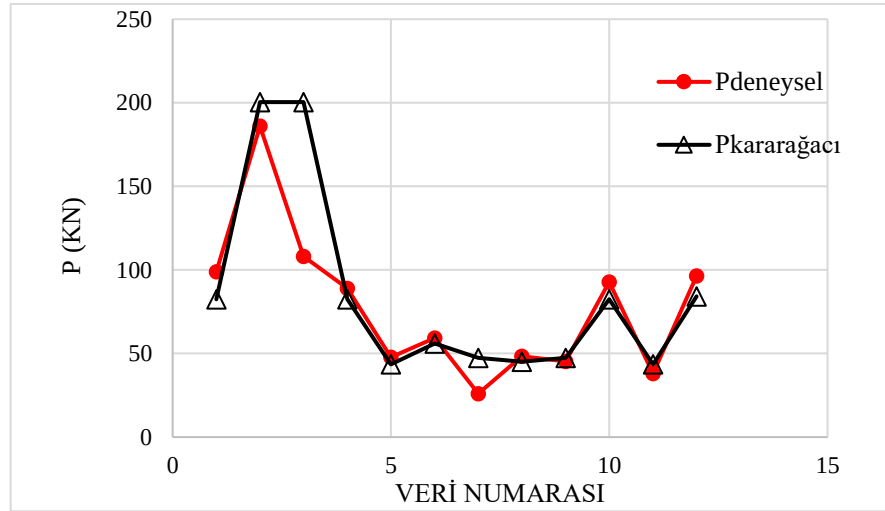
Çizelge 6.12. Makine öğrenmesi algoritmaları ile P (döşeme eğilme kuvveti, KN) tahmin sonuçları

Sıra no	P _{deneysel}	ÇLR	KARAR A.	BAGGING-DT	RASSAL ORMAN	XG-BOOST	ADA BOOST	GRADİENT BOOST	DVR deneyse-ölçekli	DVR tahmin-ölçekli
1	99.00	82.15	82.50	91.48	85.70	82.50	82.50	82.41	0.22	0.61
2	186.00	169.86	200.40	169.14	185.19	170.80	170.80	182.83	1.56	2.41
3	108.10	156.99	200.40	160.91	177.56	137.13	154.70	156.88	1.50	0.80
4	88.90	82.15	82.50	91.48	85.70	82.50	82.50	82.41	0.22	0.40
5	47.80	43.50	43.50	48.29	40.20	43.50	44.34	43.52	-0.42	-0.45
6	59.30	33.36	56.08	51.51	49.36	56.08	46.47	55.36	-0.65	-0.21
7	26.00	35.33	47.44	38.82	46.19	47.44	42.09	47.45	-0.66	-0.90
8	48.30	56.43	45.10	45.47	45.60	41.67	46.68	40.55	-0.34	-0.44
9	45.20	35.54	47.44	43.86	46.90	47.44	44.34	47.25	-0.66	-0.50
10	92.80	82.15	82.50	91.48	85.70	82.50	82.50	82.41	0.22	0.48
11	38.00	43.50	43.50	48.29	40.20	43.50	44.34	43.52	-0.42	-0.65
12	96.42	83.73	84.20	95.31	92.47	84.20	84.20	84.26	0.41	0.56

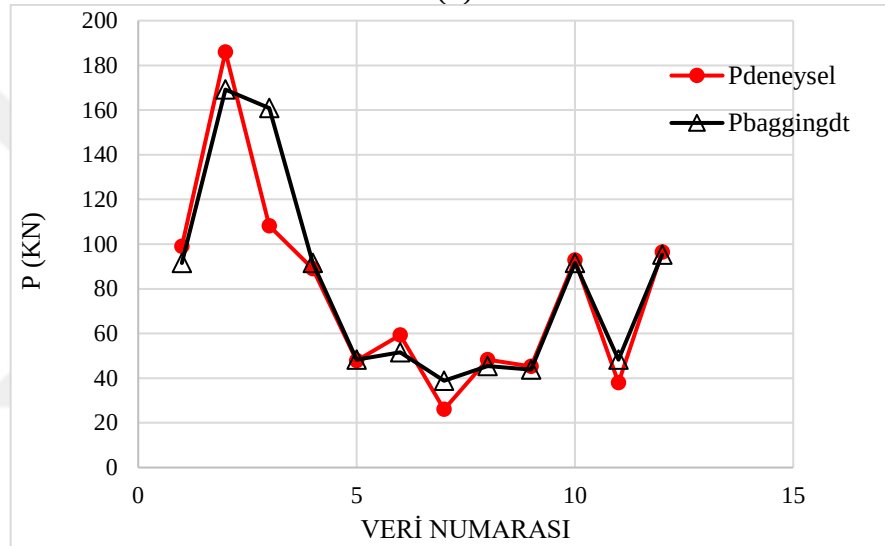
Tüm algoritma modellerinden elde edilen tahmin edilen eğilme mukavemeti değerleri ile literatürdeki deneysel eğilme mukavemeti değerleri Çizelge 6.12’de verilmiştir. Şekil 6.24’te, tüm algoritma modellerinden elde edilen tahmin eğilme mukavemeti değerleri ile literatürdeki deneysel kesme mukavemeti değerlerinin karşılaştırılma grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde; deneysel verilerle en fazla kesişmenin görüldüğü yani birbirine en yakın değerlerin olduğu algoritma modelinin XG-Boost algoritması olduğu söylenebilir. Şekil 6.25’te ise tüm algoritma modellerinin deneysel eğilme mukavemeti ile ilişkisi görülmektedir.



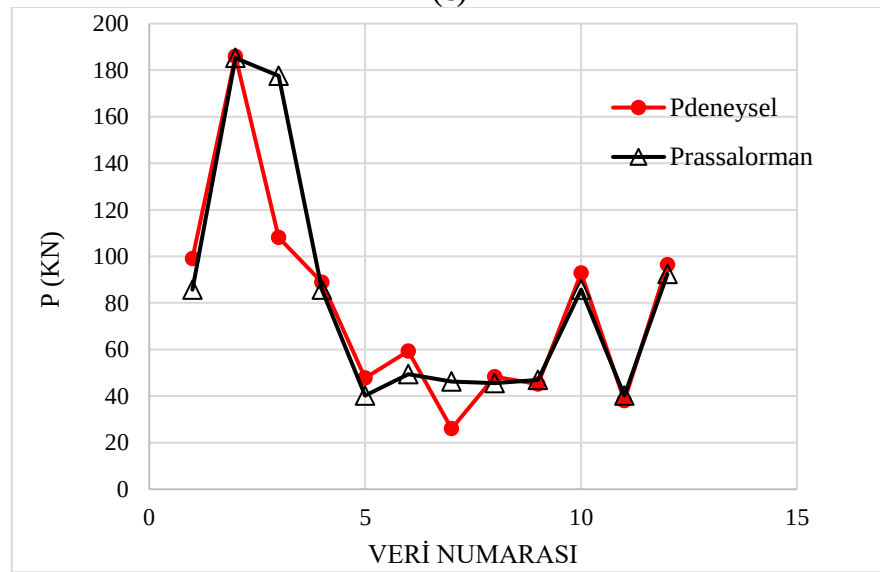
(a)



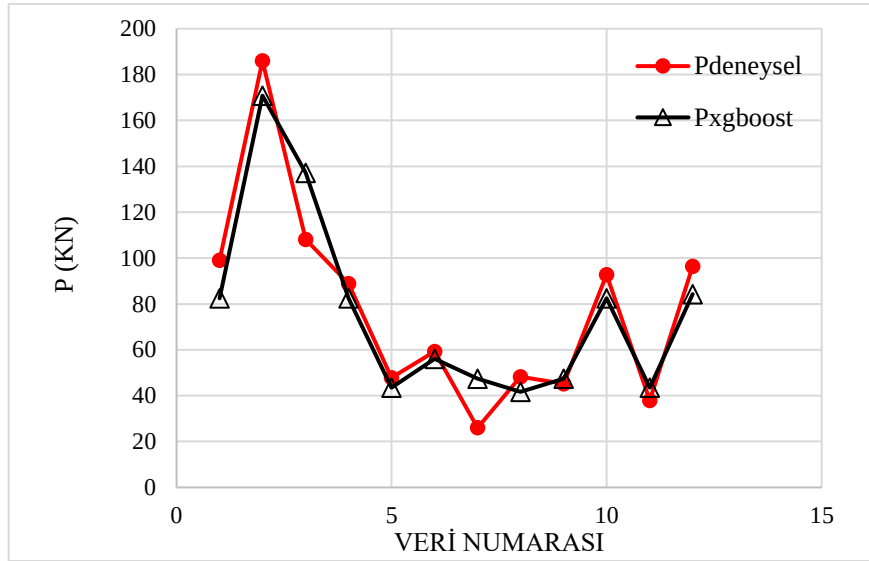
(b)



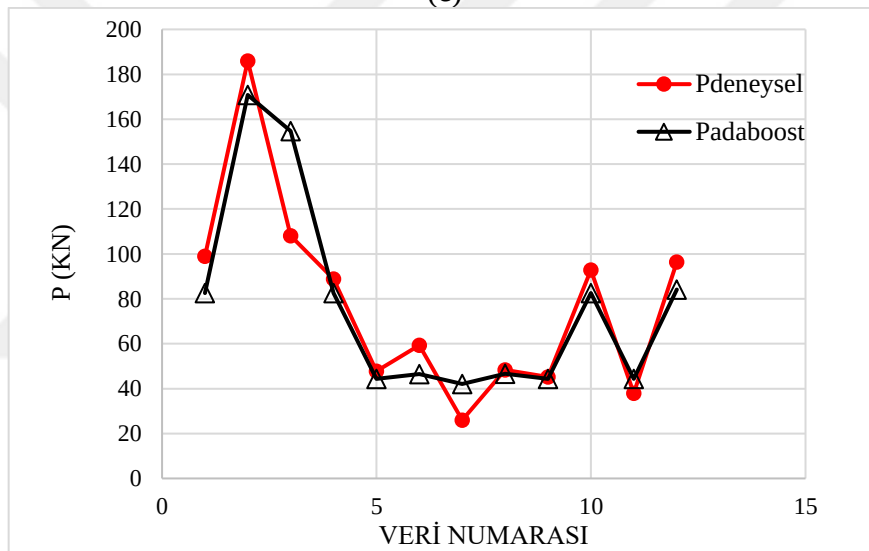
(c)



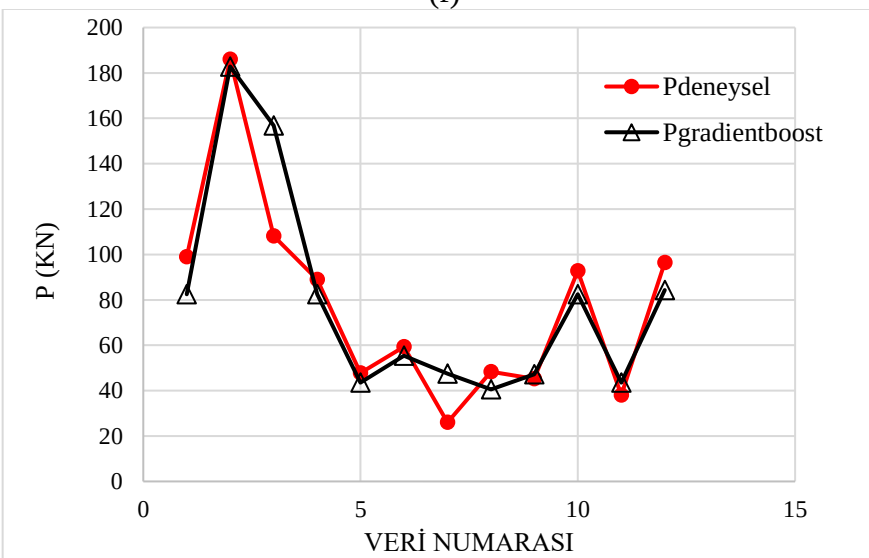
(d)



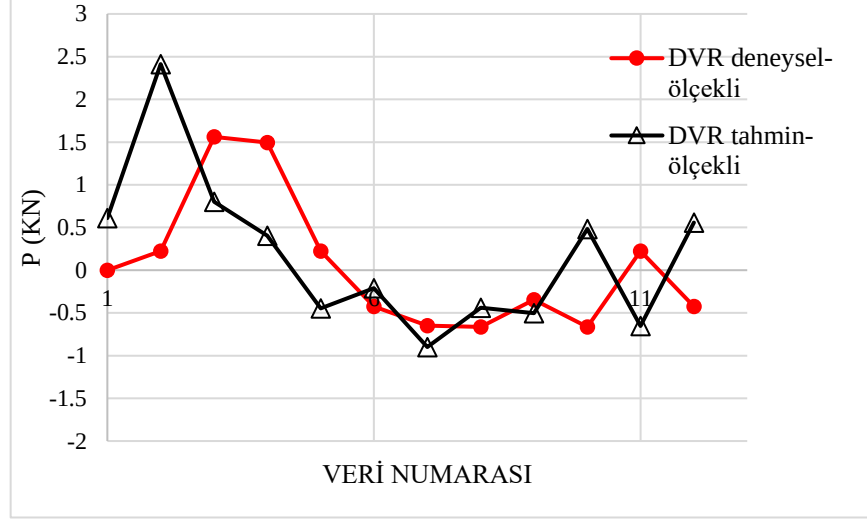
(e)



(f)

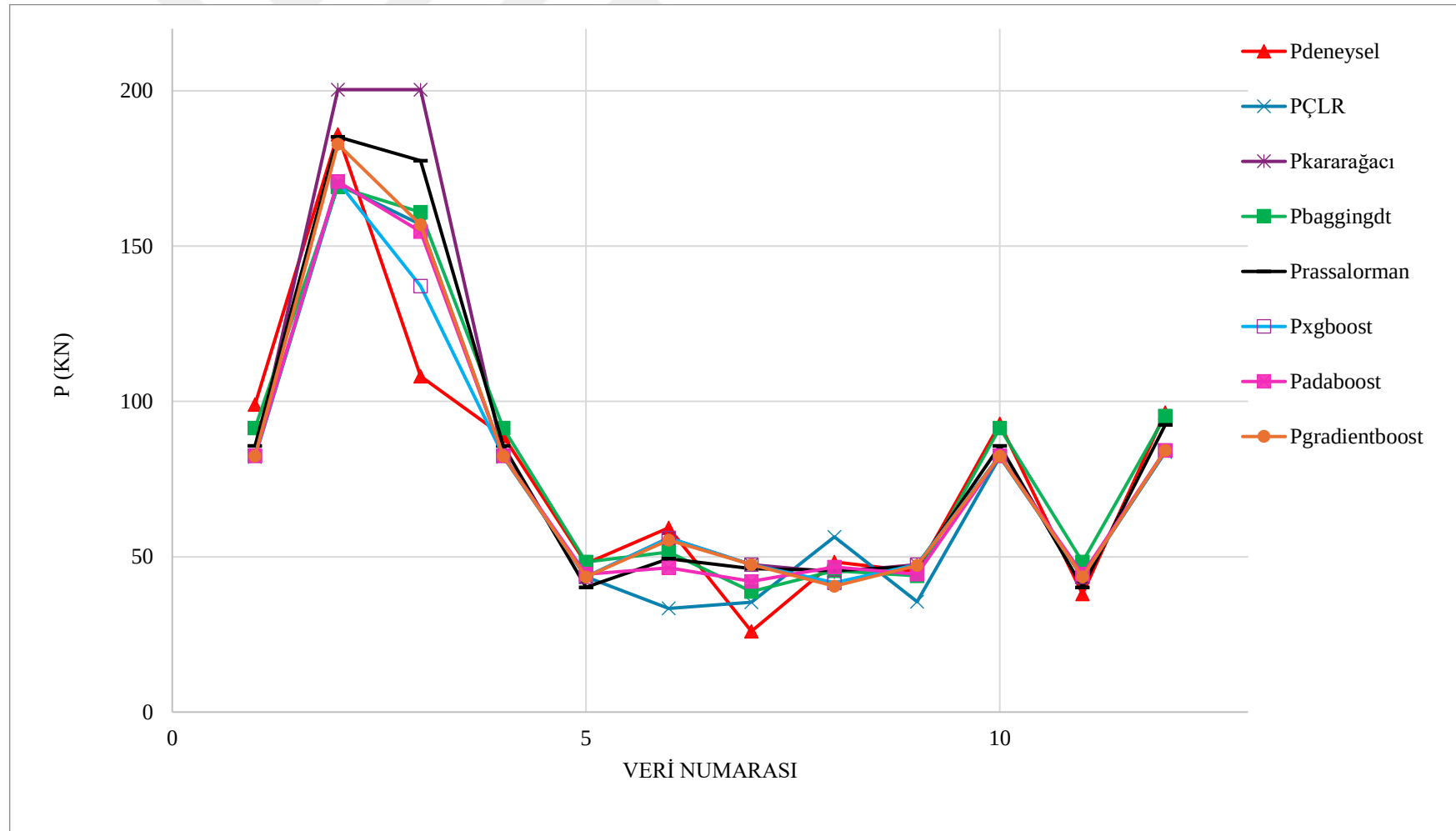


(g)



(h)

Şekil 6.24. Makine öğrenmesi algoritmaları ile döşeme eğilme mukavemeti değerlerinin tahmin sonuçlarının grafik ile gösterilmesi



Şekil 6.25. Makine öğrenmesi algoritmaları ile döşeme eğilme mukavemeti değerlerinin tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

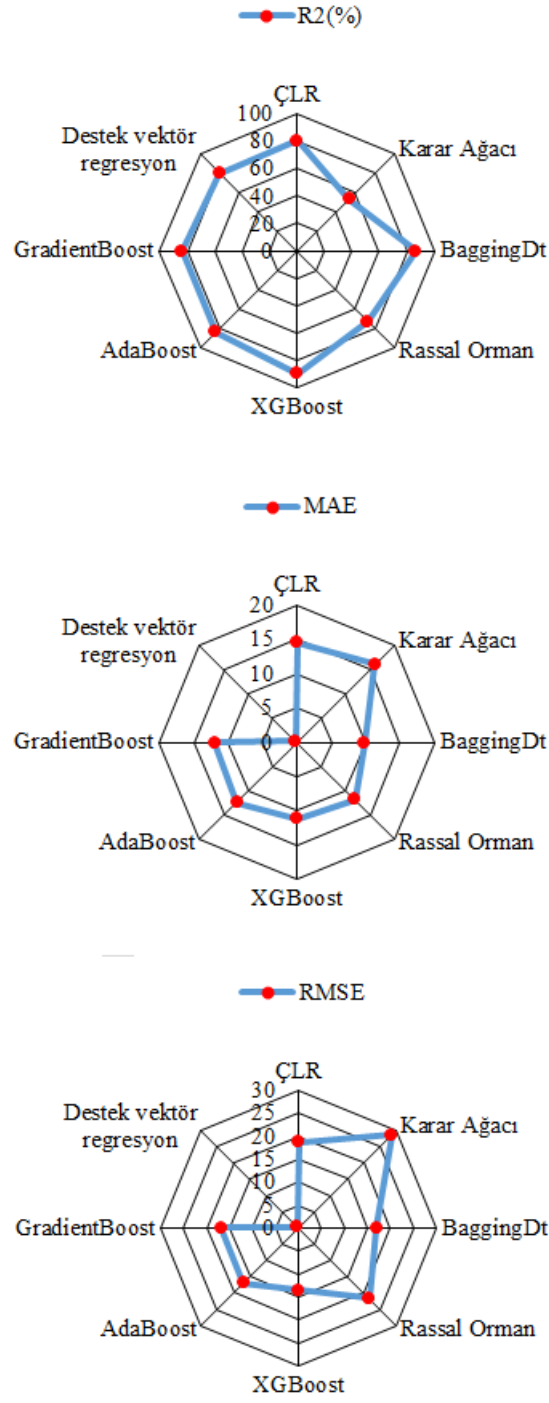
Makine öğrenmesi regresyon modellerine dayalı performans, R^2 skoru başarı metriği, RMSE ve MAE hata metrikleri kullanılarak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Makine öğrenmesi modellerinin performans başarıları Çizelge 6.13'te verilmiştir. Çizelden de görüldüğü üzere, algoritma tahmin performansları incelendiğinde R^2 değeri en büyük, MAE ve RMSE değeri en küçük algoritma modeli XG-Boost olmak üzere, bu değeri Bagging-DT, Gradient Boost ve AdaBoost algoritma değerleri takip etmektedir. En düşük R^2 değeri (%53.66), en yüksek MAE (16.00) ve RMSE (28.61) değeri karar ağacı algoritmasına aittir.

XG-Boost algoritması; R^2 puanı %89.58, MAE değeri 11.08 ve RMSE değeri 13,57 ile deneysel verilere en yakın eğilme mukavemeti tahminini oluşturmuştur.

Çizelge 6.13. Döşeme eğilme kuvveti sonuçları için makine öğrenmesi algoritmalarının tahmin performansları

M.Ö. ALGORİTMASI	$R^2(\%)$	MAE	RMSE
ÇLR	80.09	14.56	18.75
Karar Ağacı	53.66	16.00	28.61
Bagging-DT	86.59	9.81	17.03
Rassal Orman	73.32	11.84	21.71
XG-Boost	89.58	11.08	13.57
AdaBoost	83.73	12.36	16.95
Gradient Boost	83.95	11.93	16.84
Destek vektör regresyon	80.01	0.30	0.38

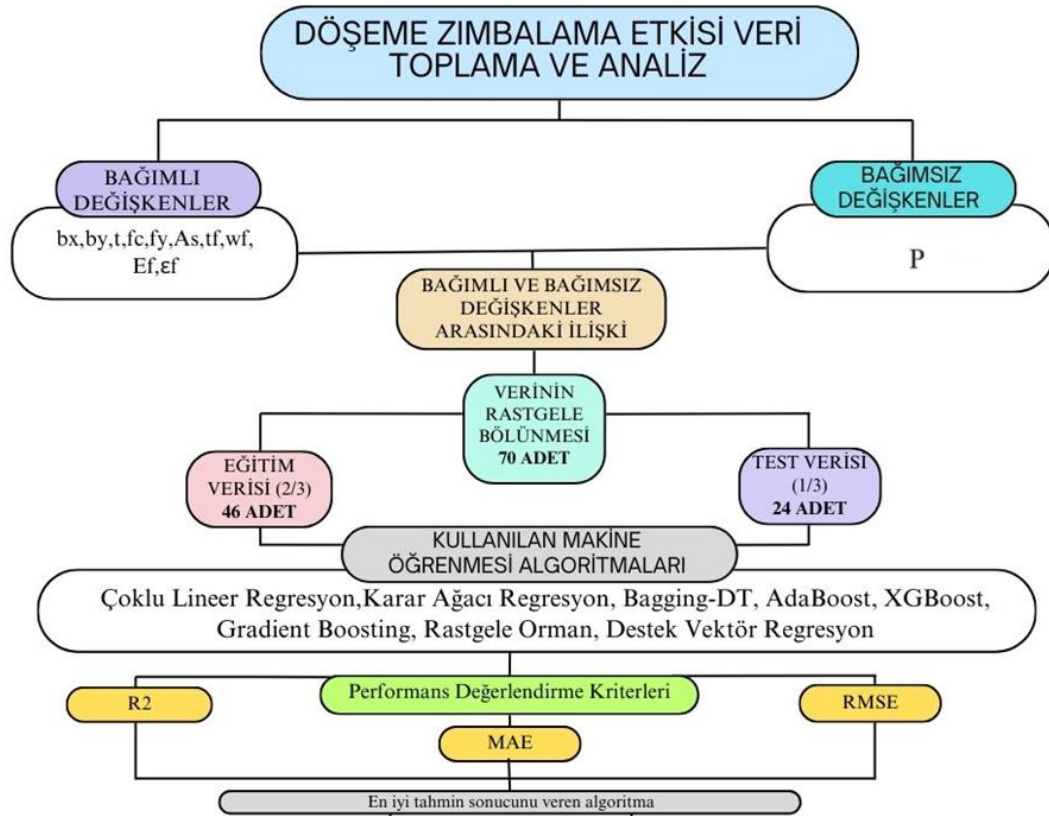
Çizelge 6.13'teki metriklerin radar grafiği üzerinde gösterimi ise Şekil 6.26'da verilmiştir. Metrik değeri yüksek olan algoritmalar radar grafiğinde en dıştaki radarda, metrik değeri düşük olan algoritmalar grafik merkezine yakın olarak görülmektedir.



Şekil 6.26. Makine öğrenmesi modellerinin döşeme eğilme mukavemeti performans başarıları radar grafiği

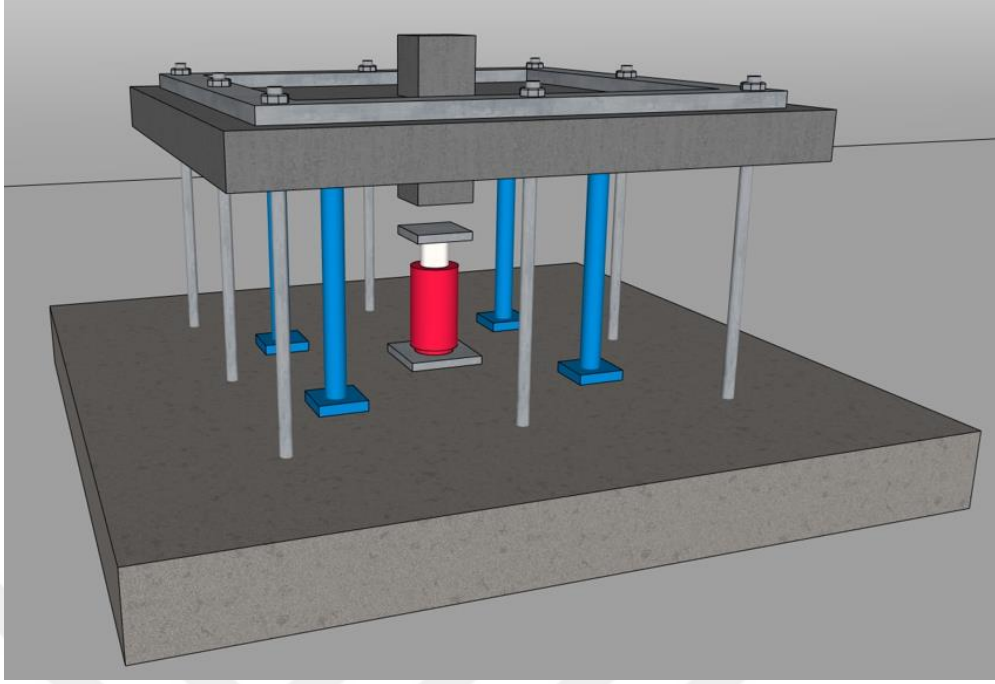
6.5. Makine Öğrenmesi Kullanılarak Lifli Polimerler ile Döşemelerin Zımbalama Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini

Bu bölümde döşemelerin zımbalama mukavemeti değerini (P_{test}) tahmin etmek amacıyla zımbalama davranışına yönelik yapılan deneylerin verileri toplanmıştır (Ek Çizelge 10.5). Veri setinin yaklaşık %33'üne karşılık gelen veriler test verisi olarak algoritmalar tarafından kullanılmıştır. Böylece 70 tane veri setinin; 46 tanesi (2/3'ü) eğitim seti olarak, 24 tanesi (1/3'ü) ise test seti olarak "rastgele" olarak bölünmüştür. Şekil 6.27' de verilen diyagram bu bölümde yapılan çalışmanın genel özetini göstermektedir.

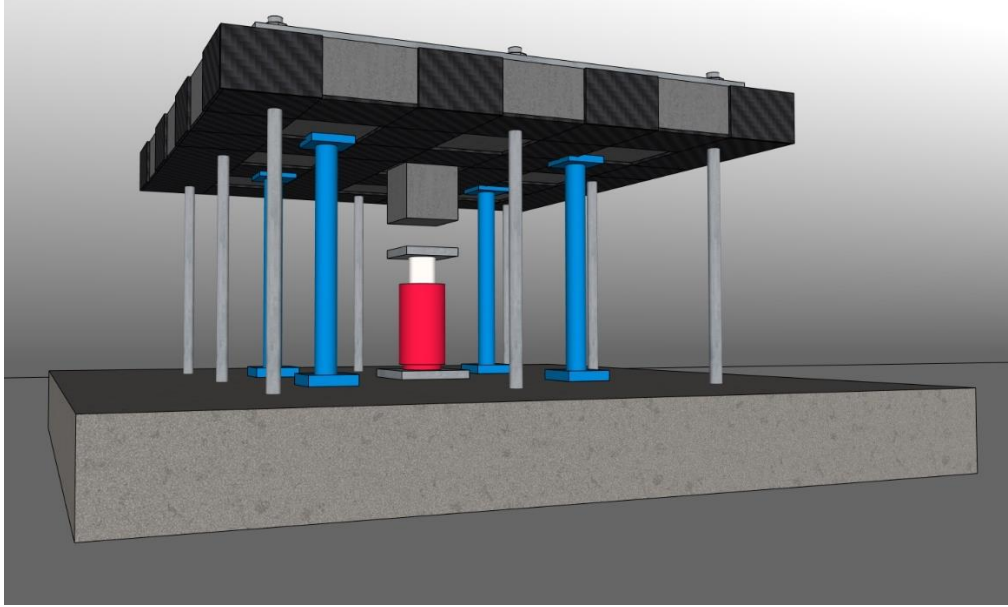


Şekil 6.27. Döşeme zımbalama etkisi çalışma akış şeması

Bu çalışmalarda döşemelerin zımbalama davranışını incelemek için Şekil 6.17'de verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Bu deney düzeneğinin FRP ile güçlendirilmiş hali de Şekil 6.29'da görülmektedir.



Şekil 6.28. Döşeme zımbalama deney düzeneği



Şekil 6.29. FRP ile güçlendirilmiş döşeme zımbalama deney düzeneği

ACI440'e göre zımbalama kuvvetinin hesaplanması aşağıdaki denklem 6.12 ve denklem 6.13 ile yapılmaktadır (Doğan ve Arslan, 2022).

$$P = \frac{4}{5} \sqrt{f_c b_o c} \quad (6.12)$$

$$c = kd, \quad k = \sqrt{2p_{ho} n_f + (p_{ho} n_f)^2} - p_{ho} n_f \quad (6.13)$$

b_o : döşemeler ve temeller için kritik bölümün çevresi, c : tarafsız eksen derinliği,
 p_{ho} : FRP takviye oranı, η_f : modüler oran (E_f/E_c)

BS8110 (British standard)'a göre zımbalama kuvvetinin hesaplanması denklem 6.14'te görüldüğü gibi yapılmaktadır (Doğan ve Arslan, 2022).

$$P = 0.79 \left[100 p_{ho} (1,8) \frac{E_f}{E_s} \right]^{1/3} \left[\frac{400}{d} \right]^{1/4} \left[\frac{f_{ck}}{25} \right]^{1/3} b_o d \quad (6.14)$$

f_{ck} : Silindir numunelerinin 28 günlük ortalama beton basınç dayanımı

d : Kesit faydalı derinlik, E_f : FRP elastisite modülü

E_s : Betonun elastisite modülü, p_{ho} : FRP takviye oranı

Çizelge 6.14. Döşeme zımbalama davranışı için veri tabanındaki bilgi parametre özeti

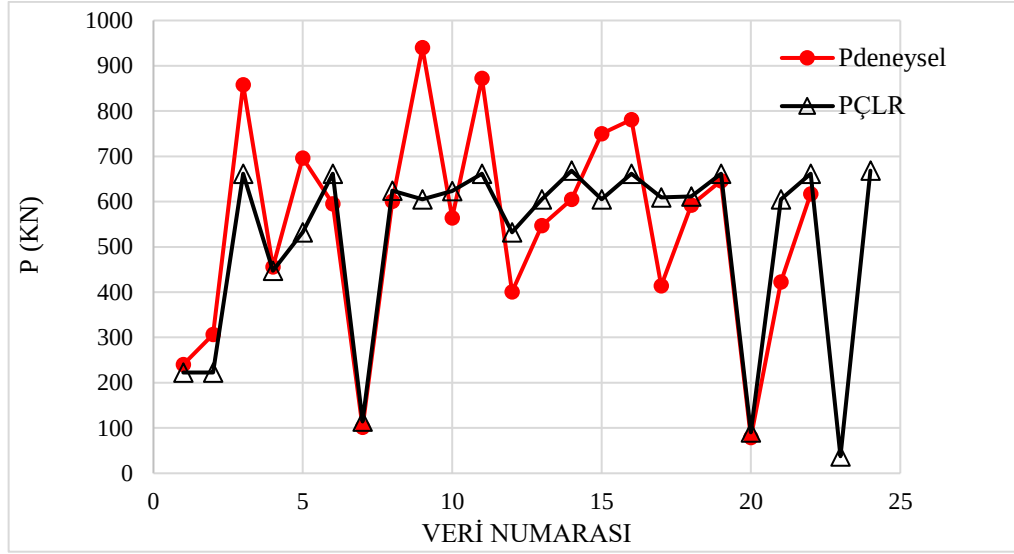
Parametre	Detay	Minimum Değer	Maksimum Değer	Ortalama Değer	Birim
b_x	Döşeme x eksen boyutu	670.00	2130.00	1529.57	mm
b_y	Döşeme y eksen boyutu	670.00	2130.00	1507.29	mm
t	Döşeme kalınlığı	55.00	150.00	130.57	mm
f_y	Donatı akma dayanımı	410.00	570.00	453.29	MPa
f_c	Beton basınç dayanımı	15.60	42.60	31.30	MPa
A_s	Donatı alanı	251.20	9595.84	3410.16	mm ²
t_f	Lifli polimer sargı kalınlığı	0.13	1.20	0.69	mm
w_f	Lifli polimer sargı genişliği	0.00	200.00	51.43	mm
E_f	Lifli polimer elastisite modülü	0.26	234.50	131.65	GPa
ϵ_f	Lifli polimer çekme dayanımı	1260.00	3793.00	3156.33	MPa
P	Zımbalama taşıma yükü	43.50	940.00	463.77	KN

Döşeme zımbalama davranışına yönelik yapılan deney verilerinin parametre özeti de Çizelge 6.14'te görülmektedir. Çizelge 6.14'ten de görüldüğü gibi veri setinde kullanılan ortalama beton dayanımı TS-500-2000 (2000) ve TBDY-2018 (2018) de verilen basınç dayanımı normları aralığındadır. Fakat zımbalama testinin yapıldığı incelenen bu veri setinin doğası gereği bazı deneylerde donatı yerleşimine dikkat edilmemiş, bazı döşemelerde ise oldukça düşük dayanımlı beton kullanılmıştır.

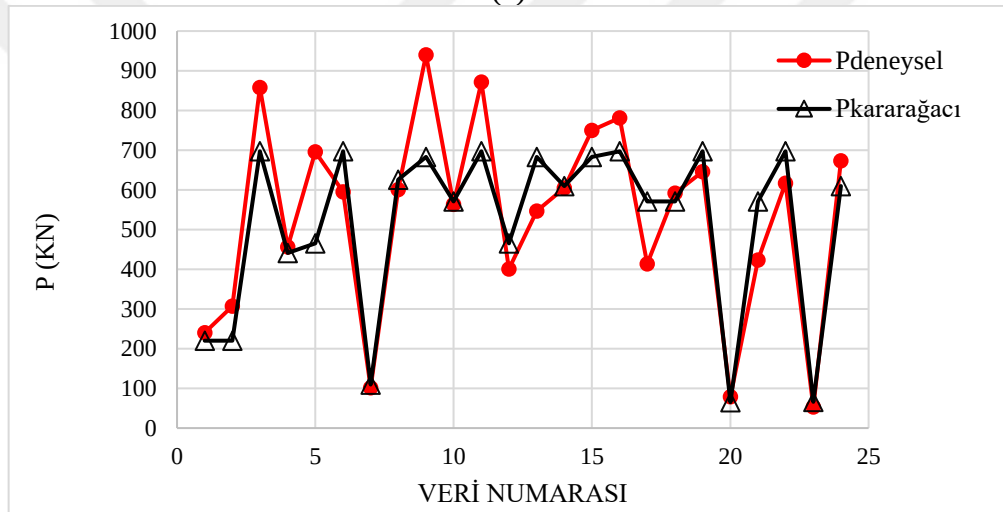
Çizelge 6.15. Makine öğrenmesi algoritmaları ile P (döşeme zımbalama kuvveti, KN) tahmin sonuçları

Sıra no	P _{deneysel}	ÇLR	KARAR A.	BAGGİNG-DT	RASSAL ORMAN	XG-BOOST	ADA BOOST	GRADİENT BOOST	DVR deneyssel-ölçekli	DVR tahmin-ölçekli
1	240.00	222.41	220.00	283.35	388.41	220.00	220.00	220.87	-0.72	-0.74
2	307.00	222.41	220.00	283.35	388.41	220.00	220.00	220.87	-0.72	-0.48
3	858.00	661.34	697.10	689.59	696.57	697.10	707.41	696.82	0.85	1.71
4	456.00	447.60	441.00	448.00	441.43	441.00	453.75	441.32	0.06	0.11
5	696.00	532.35	465.00	517.70	507.40	465.00	469.00	465.59	0.05	1.07
6	595.00	661.34	697.10	689.59	696.57	697.10	707.41	696.82	0.85	0.67
7	101.70	114.26	110.00	117.77	115.14	115.01	120.60	114.72	-1.26	-1.29
8	601.00	624.41	625.50	641.95	645.81	642.31	696.09	648.58	0.79	0.69
9	940.00	605.31	683.00	628.37	675.33	683.00	696.09	681.64	0.80	2.03
10	564.00	623.75	571.00	548.84	610.60	571.00	590.78	571.96	0.60	0.54
11	872.00	661.34	697.10	689.59	696.57	697.10	707.41	696.82	0.85	1.76
12	401.00	532.35	465.00	517.70	507.40	465.00	469.00	465.59	0.05	-0.10
13	547.00	605.31	683.00	628.37	675.33	683.00	696.09	681.64	0.80	0.48
14	605.00	668.33	610.00	618.45	605.41	610.00	599.25	610.46	0.87	0.71
15	750.00	605.31	683.00	628.37	675.33	683.00	696.09	681.64	0.80	1.28
16	781.00	661.34	697.10	689.59	696.57	697.10	707.41	696.82	0.85	1.40
17	414.00	609.30	571.00	583.15	604.48	564.39	598.25	566.24	0.68	-0.05
18	592.00	611.31	571.00	583.15	604.48	564.39	598.25	565.57	0.76	0.65
19	646.00	661.34	697.10	689.59	696.57	697.10	707.41	696.82	0.85	0.87
20	78.80	90.04	65.20	65.86	65.75	68.57	80.67	70.73	-1.21	-1.38
21	423.00	604.93	571.00	564.45	583.86	565.35	594.00	566.24	0.65	-0.02
22	617.00	661.34	697.10	689.59	696.57	697.10	707.41	696.82	0.85	0.75
23	53.00	37.61	66.00	66.84	66.36	66.00	66.00	74.35	-1.42	-1.49
24	673.00	668.33	610.00	618.45	605.41	610.00	599.25	610.46	0.87	0.98

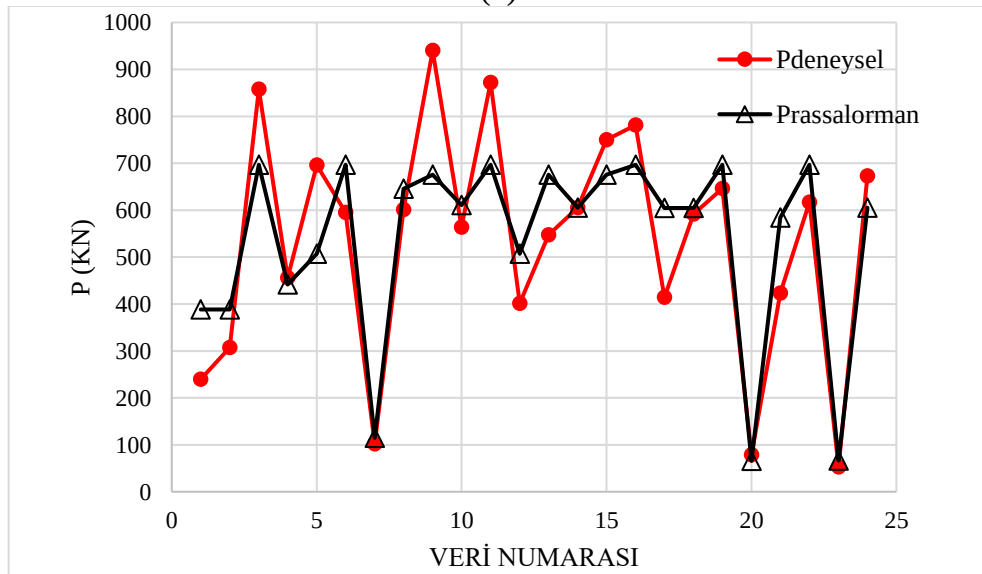
Tüm algoritma modellerinden elde edilen tahmin edilen zımbalama mukavemeti değerleri ile literatürdeki deneysel zımbalama mukavemeti değerleri Çizelge 6.15'te verilmiştir. Şekil 6.30'da tüm algoritma modellerinden elde edilen tahmin zımbalama mukavemeti değerleri ile literatürdeki deneysel zımbalama mukavemeti değerlerinin karşılaştırılma grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde; deneysel verilerle en fazla kesişmenin çok fazla olmadığı, tahmin değerleri ile deneysel değerlerin birbirinden uzak olduğu görülmektedir. Şekil 6.31'de ise tüm algoritma modellerinin deneysel zımbalama mukavemeti ile ilişkisi görülmektedir.



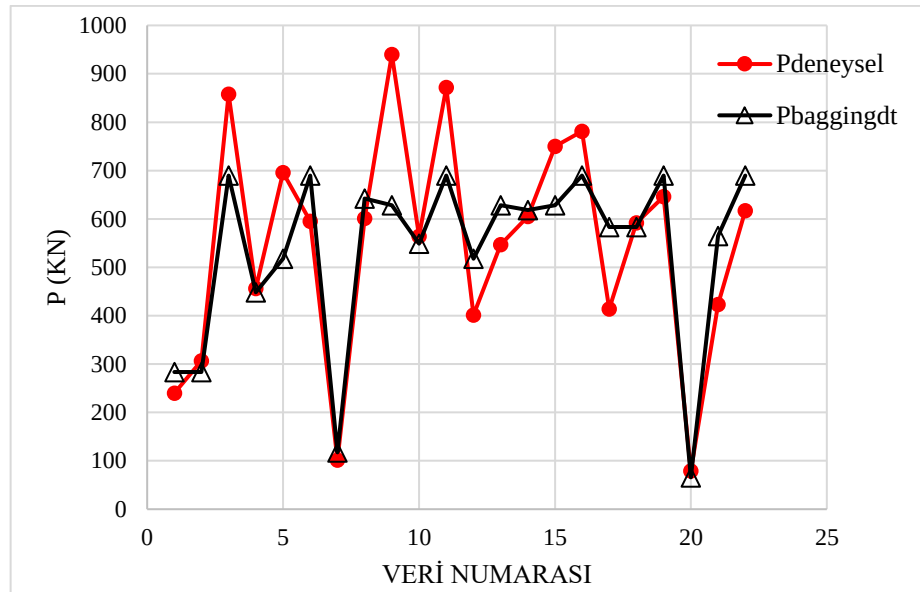
(a)



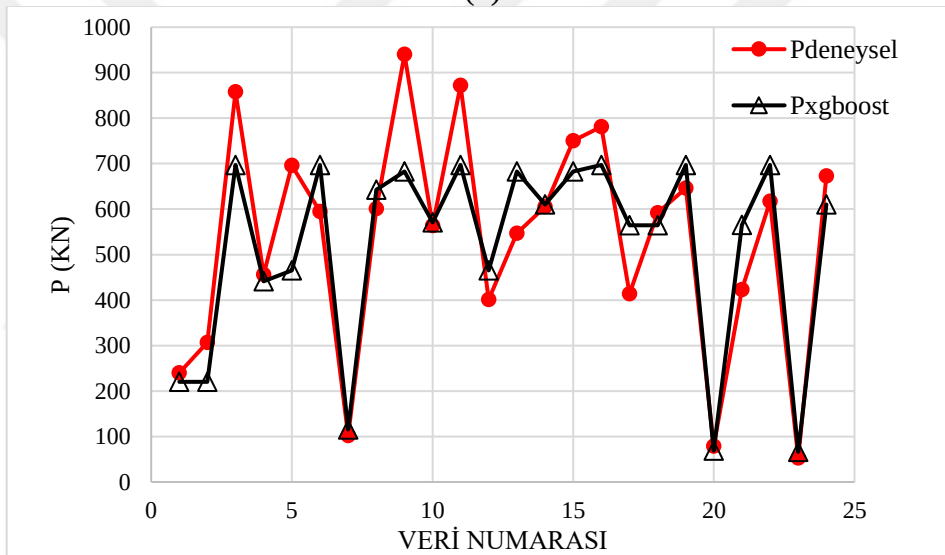
(b)



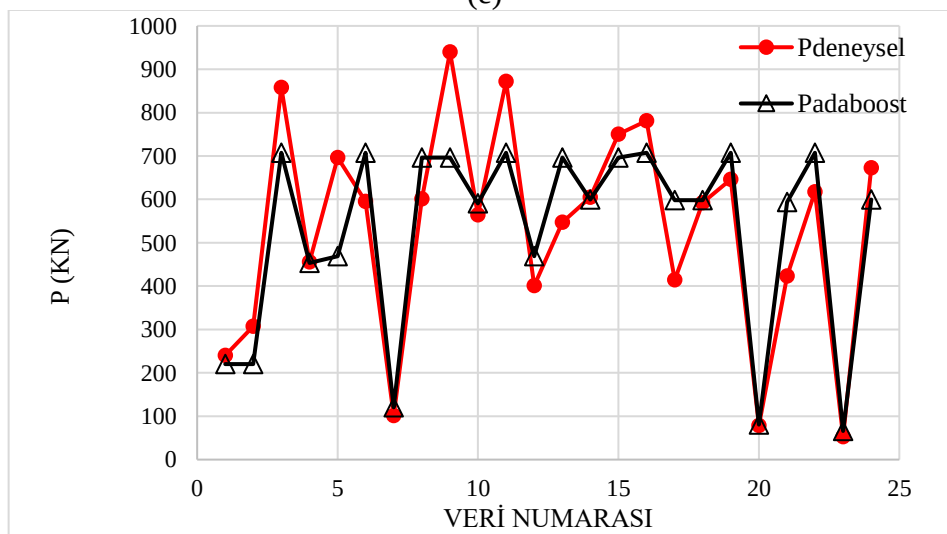
(c)



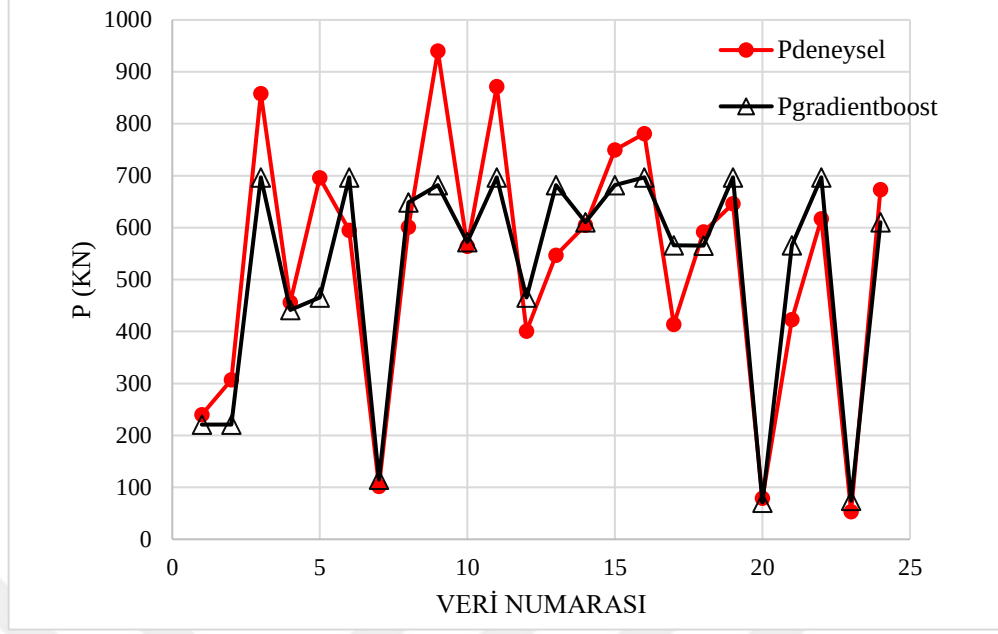
(d)



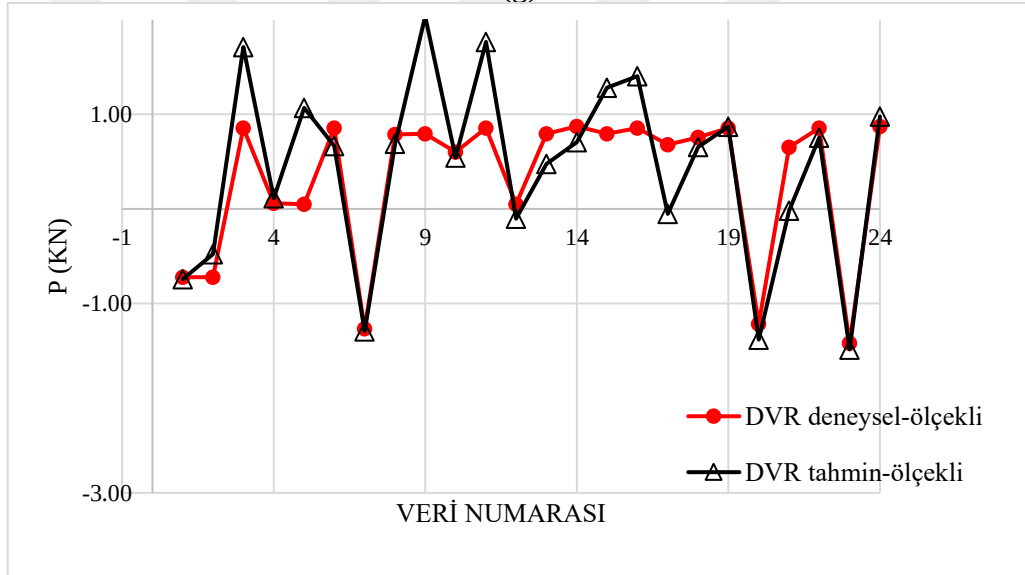
(e)



(f)

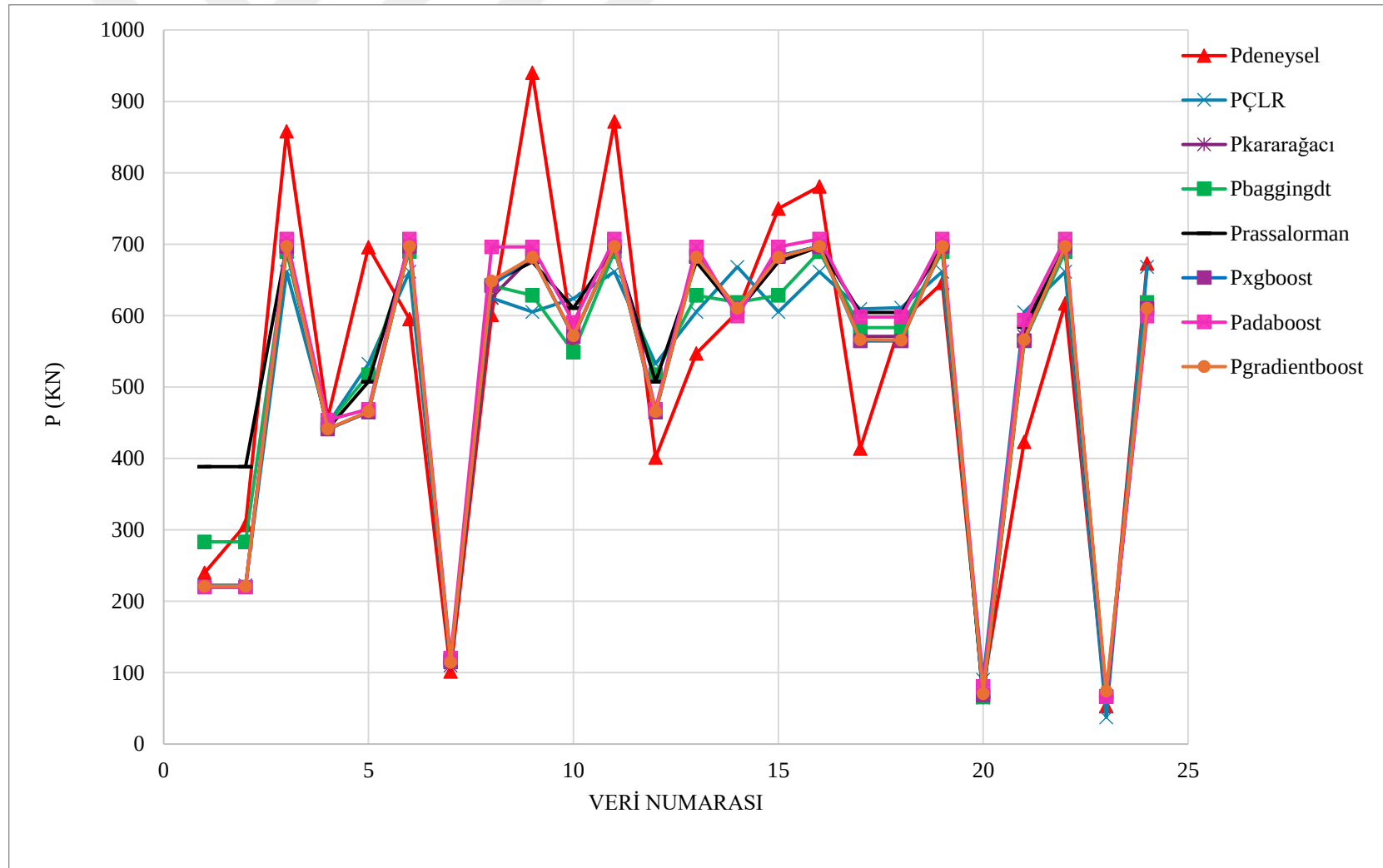


(g)



(h)

Şekil 6.30. Makine öğrenmesi algoritmaları ile döşeme zımbalama mukavemeti değerlerinin tahmin sonuçlarının grafik ile gösterilmesi



Şekil 6.31. Makine öğrenmesi algoritmaları ile döşemelerin zımbalama kuvveti değerlerinin tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

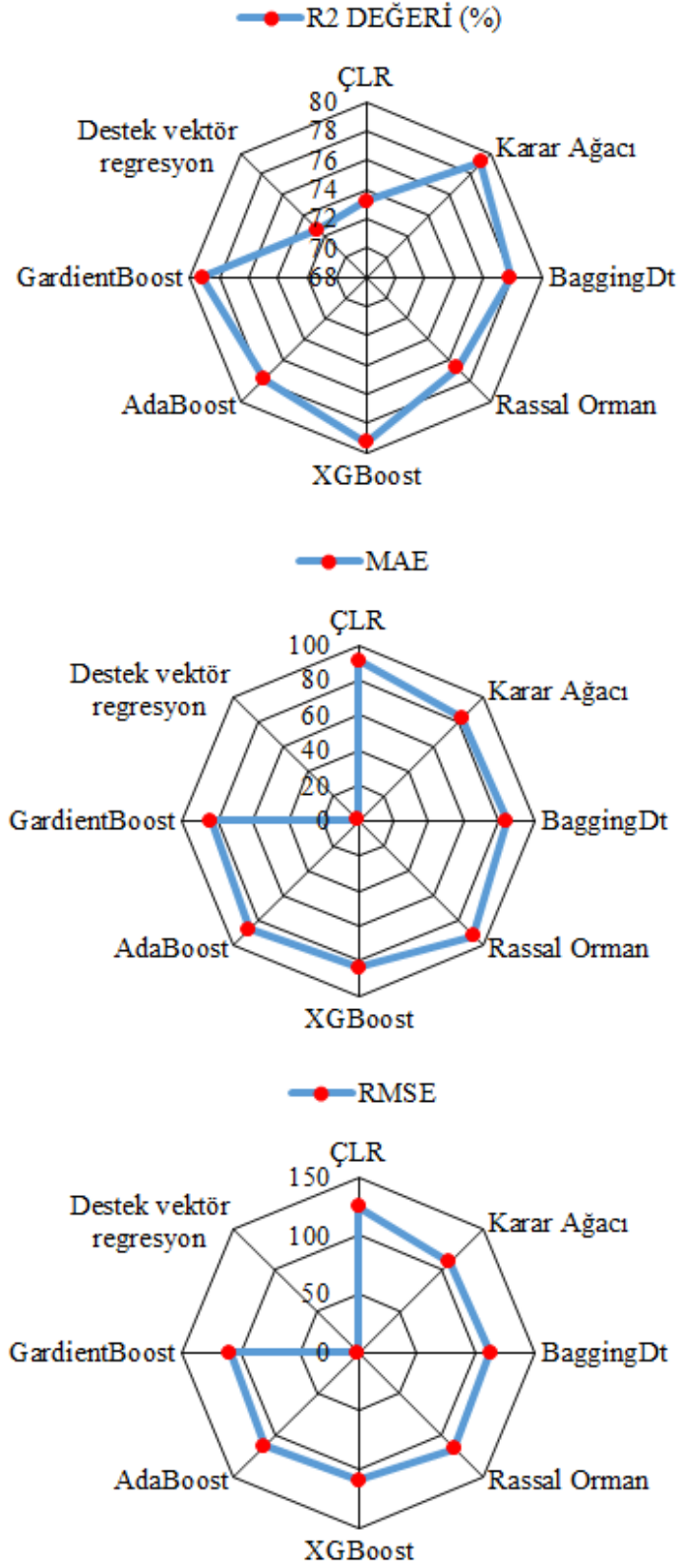
Makine öğrenmesi regresyon modellerine dayalı performans, R^2 skoru başarı metriği, RMSE ve MAE hata metrikleri kullanılarak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Makine öğrenmesi modellerinin performans başarıları Çizelge 6.11’de verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü üzere, algoritma tahmin performansları incelendiğinde R^2 değerlerinde çok büyük farklılıkların olmadığı görülmektedir. Ancak tahmin başarısının yüksek olması için yüksek R^2 değeri, düşük MAE ve RMSE değeri önemlidir. Buna göre, en düşük R^2 değeri %72.63 destek vektör regresyon algoritmasına aittir. Algoritma değerleri arasında büyük farklılıklar yoktur. Yani kullanılan algoritma modelleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir.

XG-Boost algoritması; R^2 puanı %79.29, MAE değeri 83.46 ve RMSE değeri 109.44 ile deneysel verilere en yakın zımbalama mukavemeti tahminini oluşturmuştur.

Çizelge 6.16. Döşeme zımbalama kuvveti sonuçları için makine öğrenmesi algoritmalarının tahmin performansları

M.Ö. ALGORİTMASI	R^2 DEĞERİ (%)	MAE	RMSE
ÇLR	73.19	90.96	124.52
Karar Ağacı	79.13	82.93	109.87
Bagging-Dt	77.89	84.33	113.08
Rassal Orman	76.76	92.63	115.93
XG-Boost	79.29	83.46	109.44
AdaBoost	77.85	87.53	113.19
Gardient Boost	79.16	84.04	109.77
Destek vektör regresyon	72.63	0.34	0.49

Çizelge 6.16’daki metriklerin radar grafiği üzerinde gösterimi ise Şekil 6.32’de verilmiştir. Metrik değeri yüksek olan algoritmalar radar grafiğinde en dıştaki radarda, metrik değeri düşük olan algoritmalar grafik merkezine yakın olarak görülmektedir.



Şekil 6.32. Makine öğrenmesi modellerinin döşeme zımbalama mukavemeti performans başarıları radar grafiği

6.6. Makine Öğrenmesi Kullanılarak LP ile Kolonların Moment Taşıma Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini

FRP ile sargılı kolonun basınç dayanımı ve karşılık gelen şekil değiştirmesine ilişkin hesap yöntemi denklem 6.11 ve denklem 6.12’de verilmiştir.

$$f_{cc} = f_c \left[1 + 2,54 \frac{f_1}{f_c} \right] \quad (6.11)$$

f_c , sargısız betonun basınç dayanımı, f_1 , FRP sargısından kaynaklanan etkili yanıl basınç, f_{cc} , sargılı betonun basınç dayanımıdır.

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + \frac{h}{b} \times (LTF) \times 19,27 \times \left(\frac{f_1}{f_c} \right)^{0,53} \right] \quad (6.12)$$

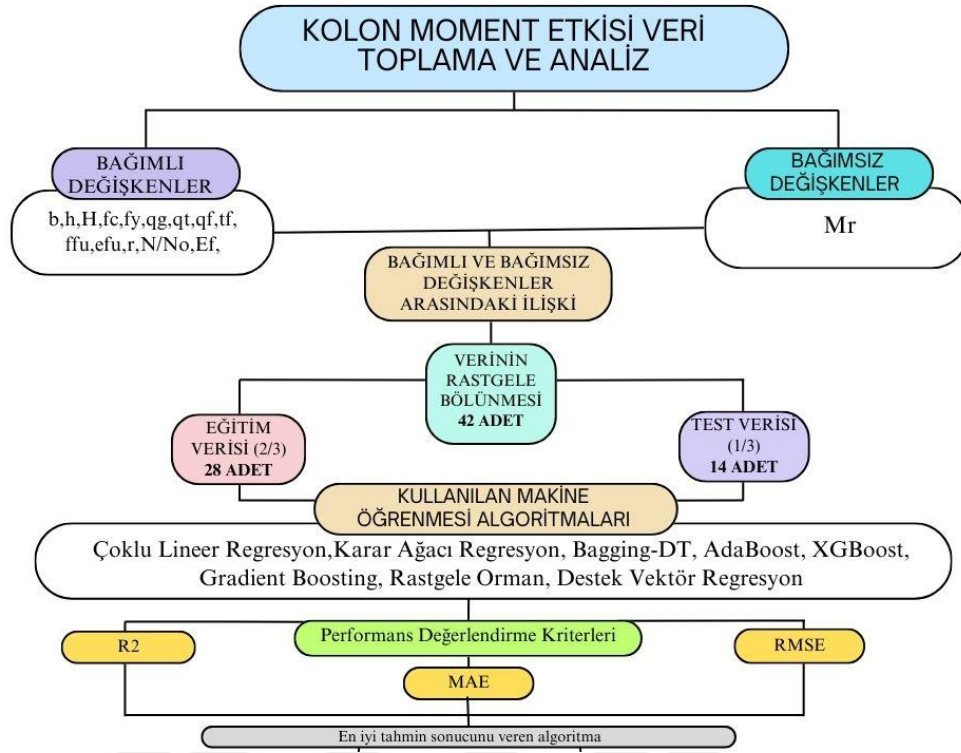
ε_{co} ve ε_{cc} sırasıyla sargısız ve sargılı beton dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirmelerdir ve ε_{co} 0.002 olarak kabul edilmiştir. LTF, monotonik ve çevrimsel yüklemeler için sırasıyla 1 ve 2 olarak dikkate alınması gereken yükleme tipi faktörüdür.

Etkin yanıl sarılma gerilmesi, f_1 Denklem 6.13 kullanılarak elde edilebilir.

$$f_1 = \frac{K_a \rho_f \varepsilon_{fu} E_{frp}}{2} \quad (6.13)$$

K_a , etkili sınırlandırılmış kesit alanının brüt kesit alanına oranı olarak kesit geometrisine dayalı olarak belirlenecek verimlilik faktörüdür. ρ_f , FRP'nin hacimsel oranı, ε_{fu} , FRP'nin kopma gerilmesi, E_{frp} ise FRP'nin elastisite modülüdür.

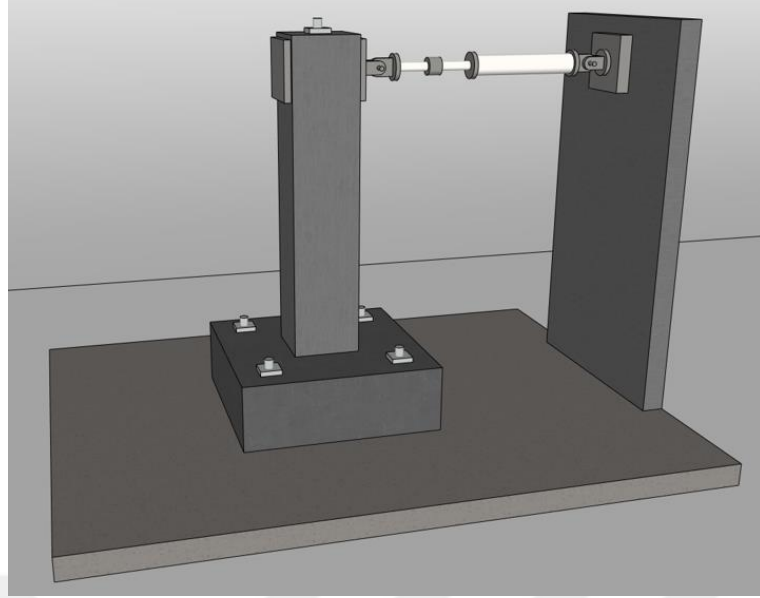
Şekil 6.33'te verilen diyagram bu bölümde yapılan çalışmanın genel özetini göstermektedir.



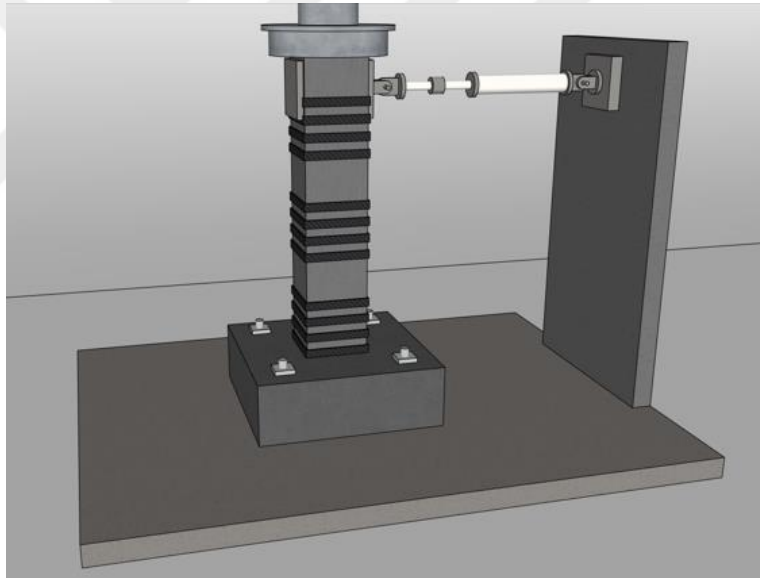
Şekil 6.33. Kolon moment etkisi çalışma akış şeması

Bu bölümde kolonların moment taşıma mukavemet değerini (M_r) tahmin etmek amacıyla moment taşıma kapasitesi davranışına yönelik yapılan deneylerin verileri toplanmıştır (Ek Çizelge 10.6). Algoritmalar, 0.33 oranında test ölçüsü oluşturmuştur. Böylece 42 tane veri setinin; 28 tanesi (2/3'ü) eğitim seti olarak, 14 tanesi (1/3'ü) ise test seti olarak "rastgele" olarak bölünmüştür.

Bu çalışmalarda kolonların moment taşıma davranışını incelemek için Şekil 6.34'te verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Bu deney düzeneğinin FRP ile güçlendirilmiş hali de Şekil 6.35'te görülmektedir.



Şekil 6.34. Kolonların yatay yük altında davranışının belirlenmesi için hazırlanan test düzeneği



Şekil 6.35. FRP ile güçlendirilmiş kolonların yatay yük altında davranışının belirlenmesi için hazırlanan test düzeneği

Kolon moment etkisi davranışına yönelik yapılan deney verilerinin parametre özeti de çizelge 6.17’de görülmektedir. Çizelge 6.17 veri gurubuna dahil edilmiş yapılan çalışmaların deneylerinde kullanılan numune özelliklerinin ve güçlendirme malzemelerinin minimum, maksimum ve ortalama değerlerini içermektedir.

Çizelge 6.17. Kolon moment taşıma kapasitesi için veri tabanındaki bilgi parametre özeti

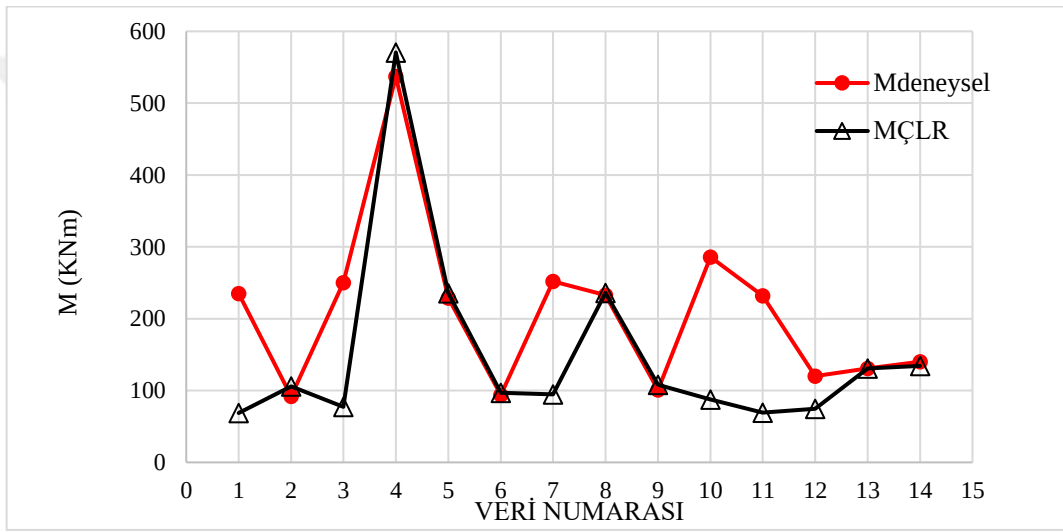
Parametre	Detay	Minimum Değer	Maksimum Değer	Ortalama Değer	Birim
b	Kesit genişliği	150.00	500.00	297.95	mm
h	Kesit yüksekliği	250.00	500.00	350.33	mm
H	Kolon yüksekliği	1.12	3.05	1.79	m
f_c	Beton basınç dayanımı	9.00	44.20	26.14	MPa
f_y	Donatı çekme dayanımı	287.00	565.00	434.12	MPa
qg	Boyuna çelik donatı oranı	0.01	0.03	0.017	-
qt	Enine çelik donatı oranı	0.00	0.02	0.007	-
qf	FRP takviyesinin hacimsel oranı	0.00	0.07	0.013	-
E_f	Lifli polimer elastisite modülü	19.75	267.36	155.90	GPa
f_{fu}	Lifli polimer çekme dayanımı	450.00	4206.00	2385.29	MPa
efu	Lifli polimer nihai çekme gerilimi	1.17	3.10	1.60	%
t_f	Lifli polimer sargı kalınlığı	0.11	1.25	0.46	mm
r	Kolon köşesi yuvarlama yarıçapı	13.00	51.00	22.10	mm
N/N_0	Eksenel yük seviyesi	0.13	0.81	0.38	N/N_0
Mr	Moment taşıma gücü	48.00	640.00	222.50	KNm

Çizelge 6.17’de görüldüğü gibi veri setinde kullanılan ortalama beton dayanımı, boyuna ve enine donatı oranı vs. gibi malzeme ve donatı özellikleri TS-500-2000 (2000) ve TBDY-2018 (2018) de verilen basınç dayanımı normları aralığındadır. Benzer şekilde kolonlarda kullanılan enine ve boyuna donatı oranlarının ortalaması da yine aynı yönetmelikte yer alan alt ve üst limit sınırları içindedir. Fakat moment taşıma kapasitesi testinin yapıldığı incelenen bu veri setinin doğası gereği bazı deneylerde etriye sıklaştırması yapılmamış, bazı kolonlarda ise oldukça düşük dayanımlı beton kullanılmıştır.

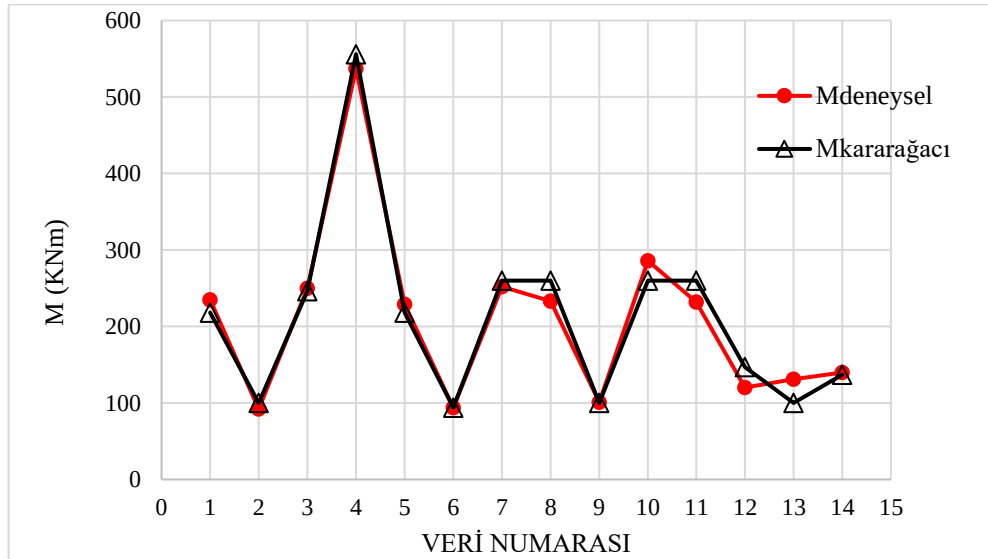
Çizelge 6.18. Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile M (kolon moment etkisi, KN) tahmin sonuçları

Sıra no	$M_{deneysel}$	ÇLR	KARAR A.	BAGGING-DT	RASSAL ORMAN	XG-BOOST	ADA BOOST	GRADİENT BOOST	DVR deneyisel-ölçekli	DVR tahmin-ölçekli
1	235.00	68.74	218.00	223.60	210.80	238.87	218.00	229.84	0.03	0.17
2	92.00	105.87	100.00	113.90	127.00	100.00	116.60	100.19	-0.79	-0.87
3	250.00	77.53	246.00	243.20	226.87	246.00	241.33	256.42	0.12	0.26
4	537.00	570.63	556.00	541.20	498.53	581.16	564.33	579.63	1.77	0.64
5	229.00	235.60	218.00	223.60	202.40	217.62	218.00	218.73	0.00	0.07
6	94.00	96.82	94.00	103.90	92.60	90.58	100.24	88.10	-0.77	-0.93
7	252.00	94.60	260.00	246.00	253.47	260.00	239.00	259.22	0.13	0.36
8	233.00	235.94	260.00	240.40	226.20	226.27	239.00	234.16	0.02	0.16
9	101.00	108.16	100.00	118.90	127.00	100.00	116.60	100.19	-0.73	-0.87
10	286.00	87.68	260.00	246.00	253.47	260.00	239.00	259.22	0.33	0.37
11	232.00	69.30	260.00	246.00	253.47	247.50	239.00	255.99	0.02	0.30
12	120.00	74.47	147.00	120.70	132.60	123.03	127.78	153.88	-0.62	-0.70
13	131.00	131.01	100.00	125.50	133.67	115.44	119.00	127.54	-0.56	-0.83
14	140.00	134.49	137.00	134.50	141.33	137.00	147.00	136.57	-0.51	-0.52

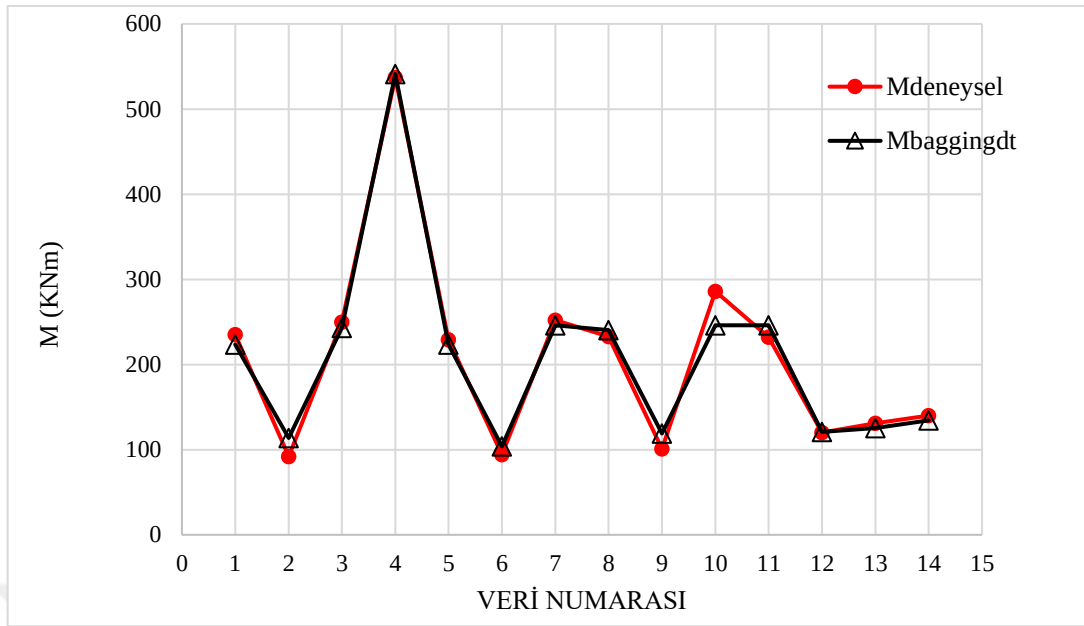
Tüm algoritma modellerinden elde edilen tahmin edilen kolon moment taşıma kapasitesi değerleri ile literatürdeki deneysel kolon moment taşıma kapasitesi değerleri Çizelge 6.18’de verilmiştir. Şekil 6.36’da tüm algoritma modellerinden elde edilen tahmin kolon moment taşıma kapasitesi değerleri ile literatürdeki deneysel kolon moment taşıma kapasitesi değerlerinin karşılaştırılma grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde; Çoklu Lineer Regresyon ve Destek Vektör Regresyon algoritmaları hariç, diğerlerinin bazı farklılıklar dışında birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir. Şekil 6.37’de ise tüm algoritma modellerinin deneysel kolon moment taşıma kapasitesi değerleri ile ilişkisi görülmektedir.



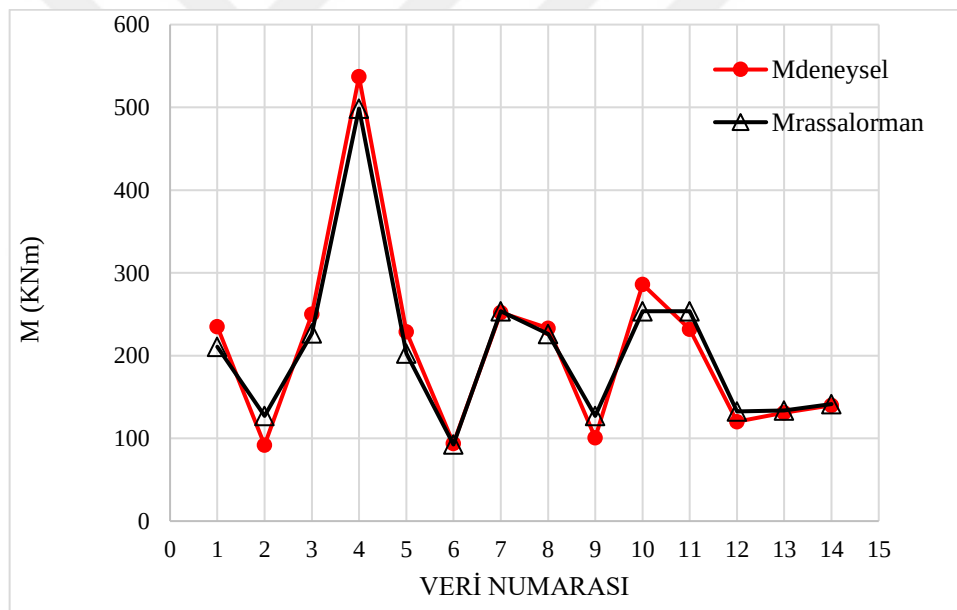
(a)



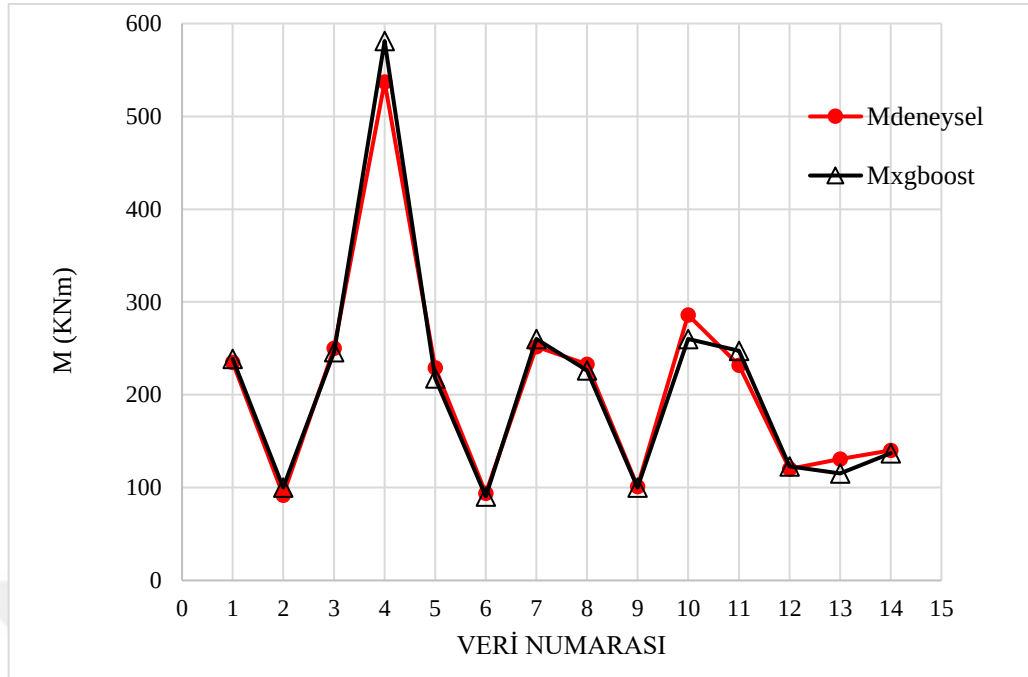
(b)



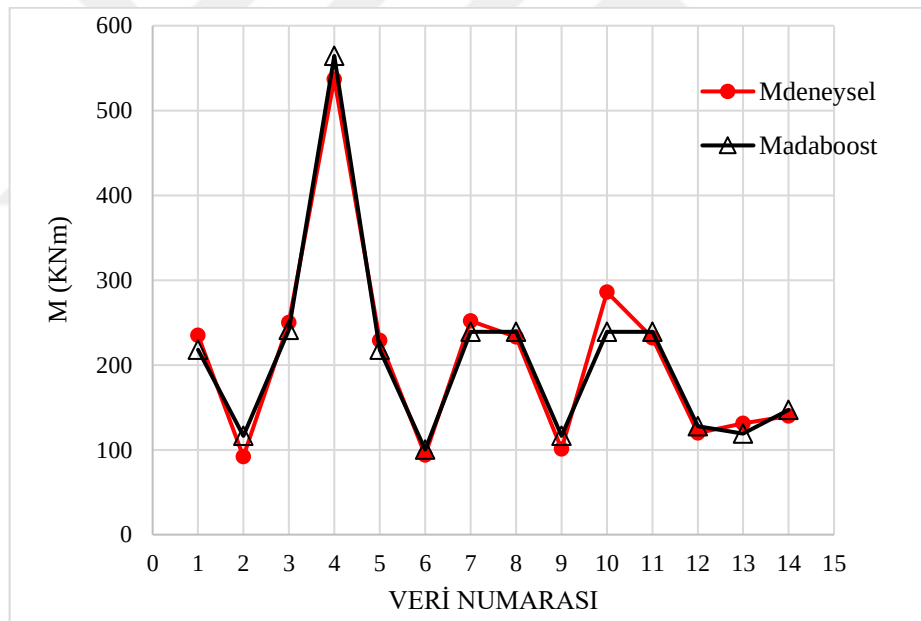
(c)



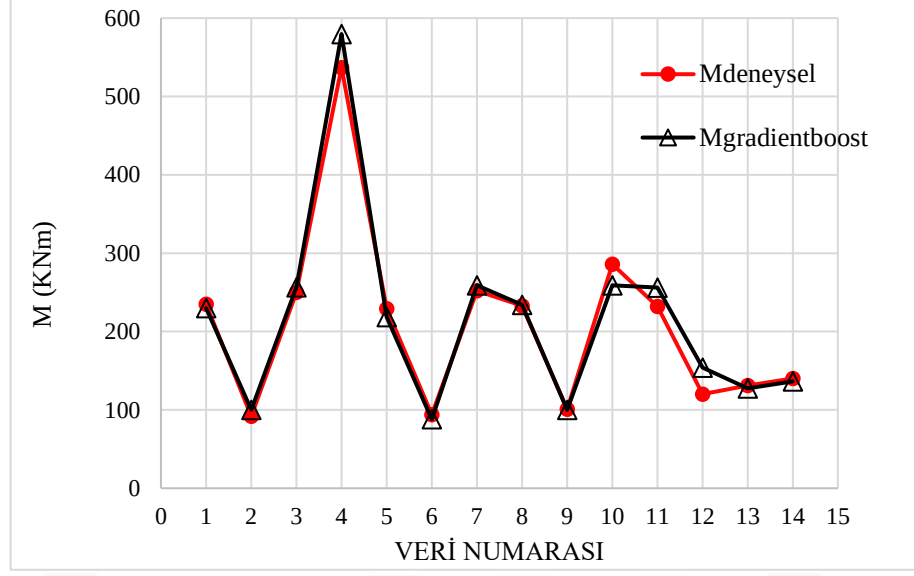
(d)



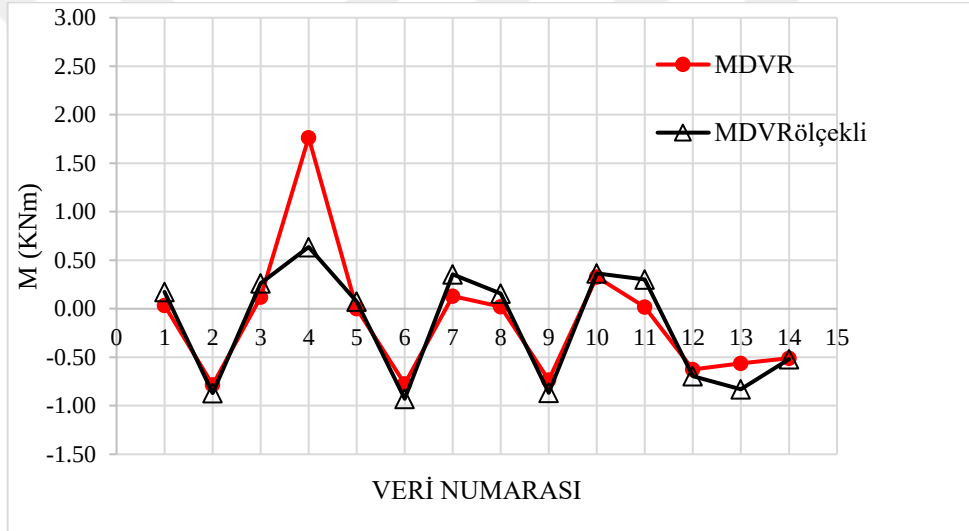
(e)



(f)

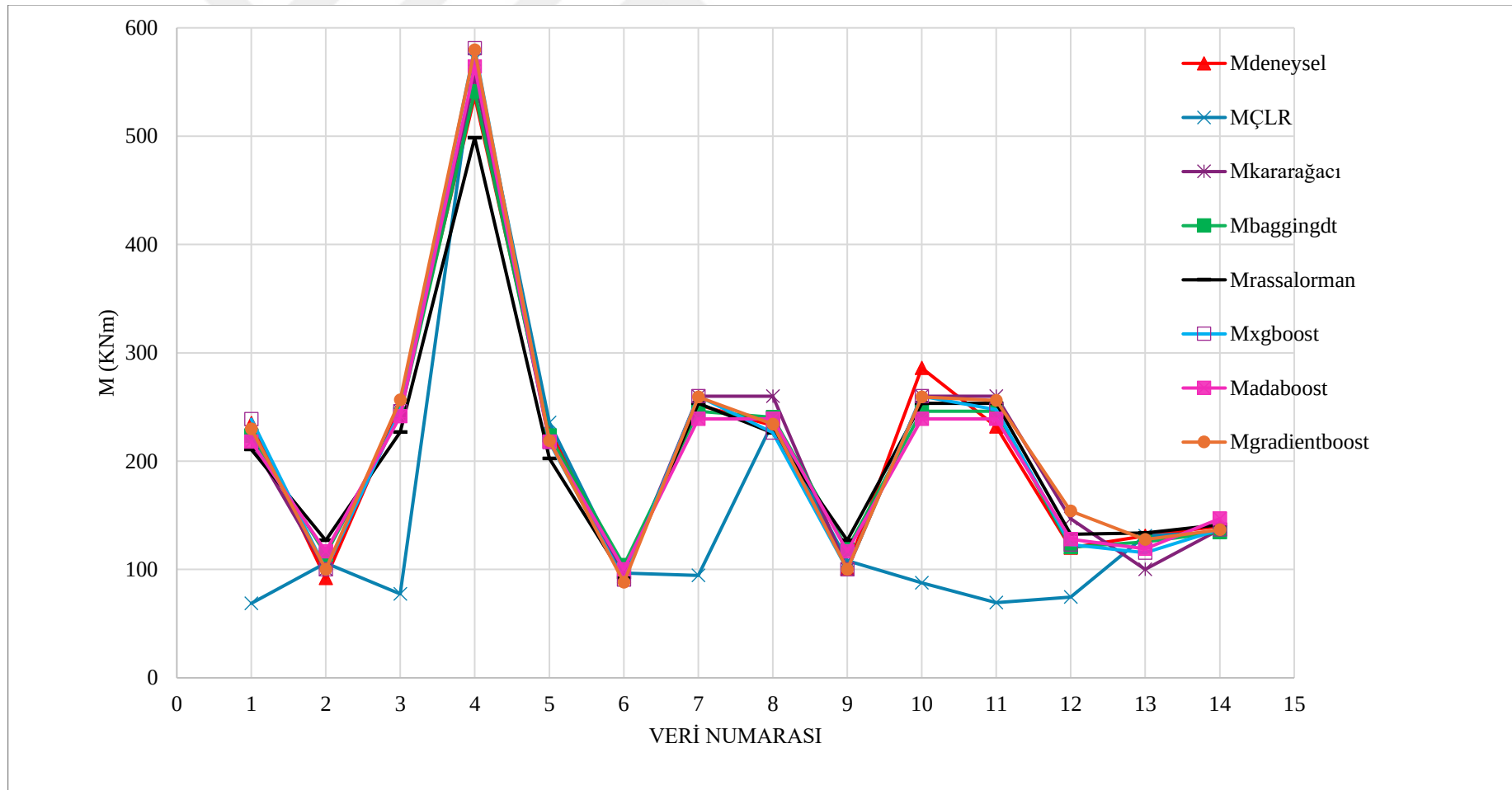


(g)



(h)

Şekil 6.36. Makine öğrenmesi algoritmaları ile kolon momet taşıma kapasitesi değerlerinin tahmin sonuçlarının grafik ile gösterilmesi



Şekil 6.37. Makine öğrenmesi algoritmaları ile kolon momet taşıma kapasitesi değerlerinin tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

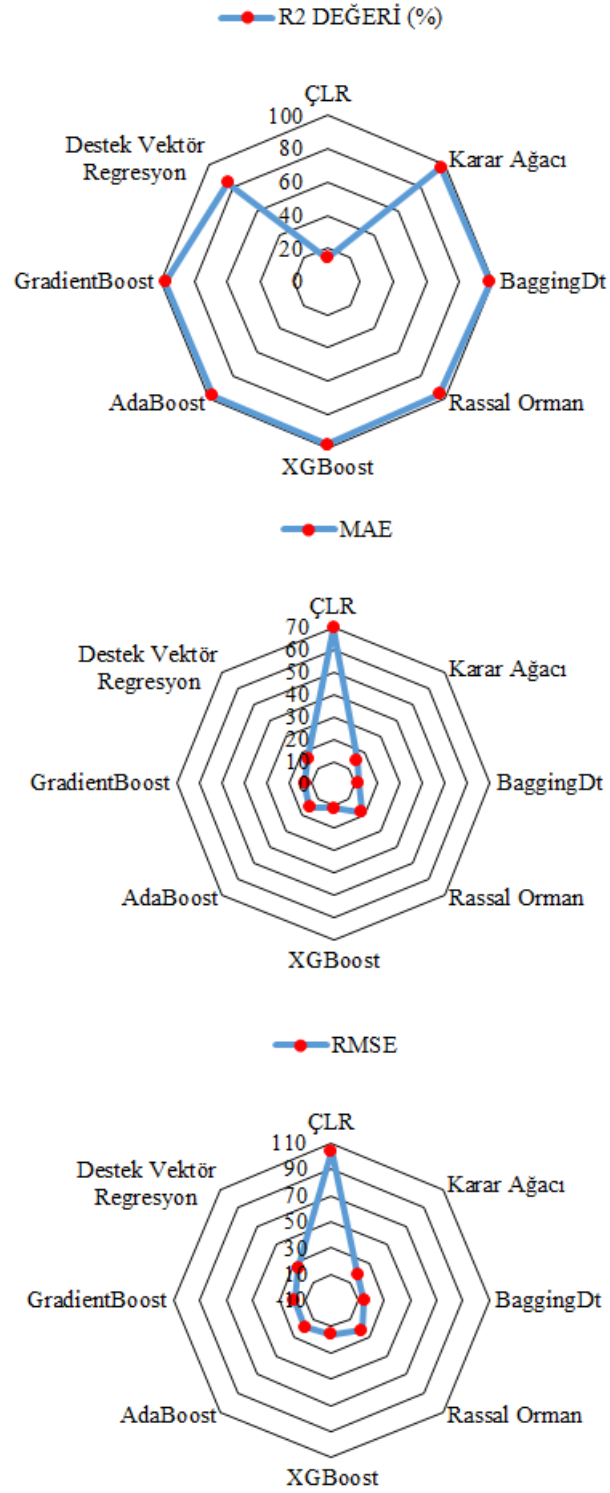
Makine öğrenmesi regresyon modellerine dayalı performans, R^2 skoru başarı metriği, RMSE ve MAE hata metrikleri kullanılarak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Makine öğrenmesi modellerinin performans başarıları Çizelge 6.14'te verilmiştir. Tahmin başarısının yüksek olması için yüksek R^2 değeri, düşük MAE ve RMSE değeri önemlidir. Buna göre; en düşük R^2 , en yüksek MAE ve RMSE değerine sahip algoritma Çoklu Lineer Regresyon algoritmasıdır. En yüksek R^2 , en düşük MAE ve RMSE değerine sahip algoritma Bagging-DT algoritmasıdır.

Bagging-DT algoritması; R^2 puanı %98.26, MAE değeri 11.18 ve RMSE değeri 14.80 ile deneysel verilere en yakın moment taşıma kapasitesi tahminini oluşturmuştur.

Çizelge 6.18. Kolon moment taşıma kapasitesi için makine öğrenmesi algoritmalarının tahmin performansları

M.Ö. ALGORİTMASI	R^2 DEĞERİ (%)	MAE	RMSE
ÇLR	14.19	69.65	104.02
Karar Ağacı	97.27	15.00	18.52
BaggingDt	98.26	11.18	14.80
Rassal Orman	96.06	18.11	22.27
XGBoost	98.03	10.97	15.75
AdaBoost	97.26	15.01	18.58
GradientBoost	97.38	12.80	18.14
Destek Vektör Regresyon	84.25	16.17	25.54

Çizelge 6.18'deki metriklerin radar grafiği üzerinde gösterimi ise Şekil 6.38'de verilmiştir. Metrik değeri yüksek olan algoritmalar radar grafiğinde en dıştaki radarda, metrik değeri düşük olan algoritmalar grafik merkezine yakın olarak görülmektedir.



Şekil 6.38. Makine öğrenmesi modellerinin kolon moment taşıma kapasitesi performans başarıları radar grafiği

6.7. Makine Öğrenmesi Kullanılarak Lifli Polimerler ile Kolonların Normal Kuvvet Taşıma Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini

TBDY-2018'e göre, LP sargılama ile kolonların eksenel basınç dayanımlarının arttırılabilmesi için, kolon kesitinin uzun boyutunun kısa boyutuna oranı iki buçuktan fazla olmamalıdır. Kolonların enkesitleri dikdörtgenden elipse dönüştürülerek LP'nin etkinliği arttırılabilir. Elips kesitlerde uzun boyutun kısa boyuta oranı en fazla üç olabilir. LP ile sargılanmış bir kolonun eksenel yük dayanımı hesaplanırken beton basınç dayanımı için f_{cd} yerine denklem 6.14 ile belirlenen f_{cc} değeri kullanılacaktır.

$$f_{cc} = f_{cm} [1 + 2,4(f_1/f_{cm})] \geq 1,2 f_{cm} \quad (6.14)$$

Denklem 6.9'da f_{cm} sarılmamış betonun mevcut basınç dayanımı, f_1 LP sargının sağladığı yanal basınç miktarıdır. f_1 denklem 6.5'e göre hesaplanacaktır.

$$f_1 = \frac{1}{2} K_a \rho_f \varepsilon_f E_f \quad (6.15)$$

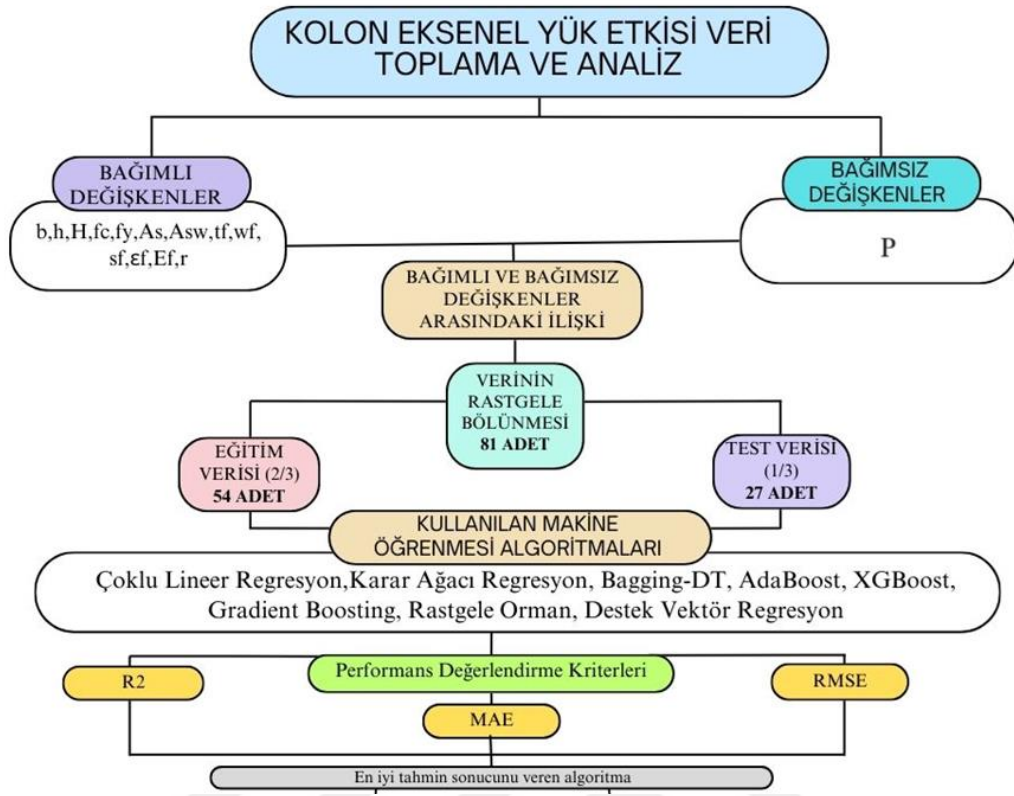
Denklem 6.10'da ε_f , denklem 6.7 ve denklem 6.8'den küçük olanıdır. Bu denklemde K_a kesit şekil etkinlik katsayısı, ρ_f LP hacimsel oranıdır. K_a çeşitli kesitler için farklı değerler almaktadır. (TBDY-2018)

Kolonda eksenel yük taşıma kapasitesi denklem 6.16 ile hesaplanmaktadır.

$$N_r = 0.85 f_{cd} A_c + f_{yd} A_{st} \quad (6.16)$$

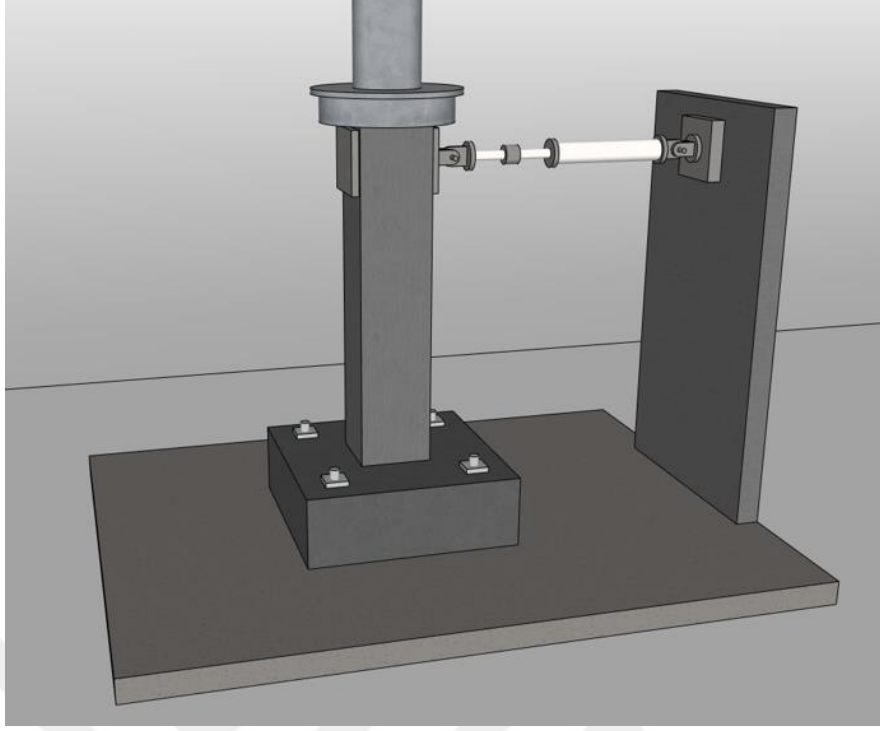
A_c ; beton alanı, A_{st} ; donatı alanı, f_{cd} ve f_{yd} ; beton ve donatı hesap basınç dayanımı değerleridir.

Şekil 6.39'da verilen diyagram bu bölümde yapılan çalışmanın genel özetini göstermektedir.

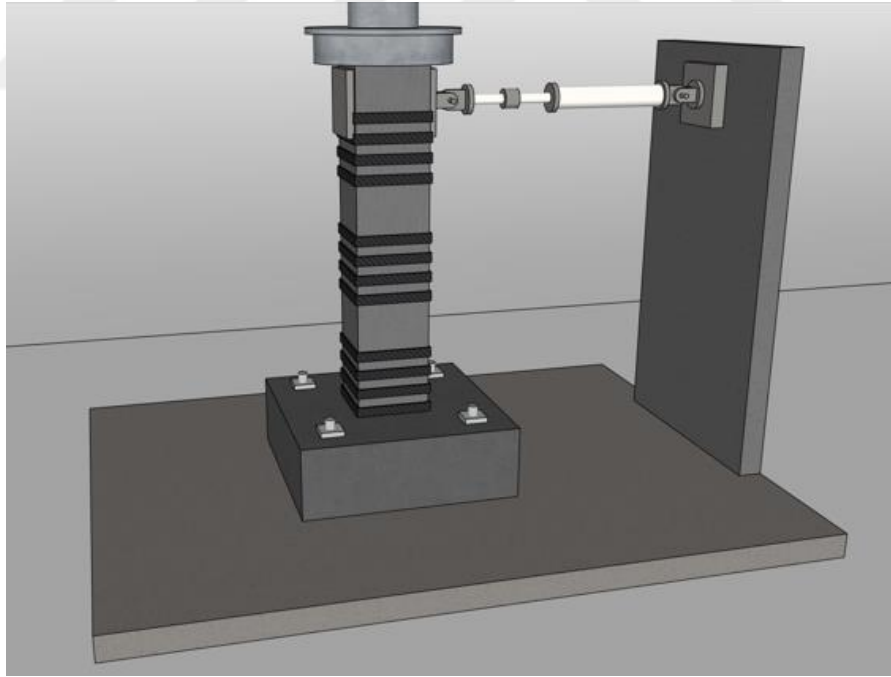


Şekil 6.39. Kolon eksenel yük etkisi çalışma akış şeması

Bu bölümde kolonların eksenel yük taşıma kapasitesi değerini (P_{test}) tahmin etmek amacıyla eksenel yük taşıma kapasitesi davranışına yönelik yapılan deneylerin verileri toplanmıştır (Ek Çizelge 10.7). Algoritmalar, 0.33 oranında test ölçüsü oluşturmuştur. Böylece 81 tane veri setinin; 54 tanesi (2/3'ü) eğitim seti olarak, 27 tanesi (1/3'ü) ise test seti olarak "rastgele" olarak bölünmüştür. Bu çalışmalarda kolonların eksenel yük taşıma kapasitesi davranışını incelemek için Şekil 6.40'te verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Bu deney düzeneğinin FRP ile güçlendirilmiş hali de Şekil 6.41'de görülmektedir.



Şekil 6.40. Kolonlarda aksenal yük taşıma kapasitesi deney düzeneği



Şekil 6.41. FRP ile güçlendirilmiş kolonlarda aksenal yük taşıma kapasitesi deney düzeneği

Kolon aksenal yük etkisi davranışına yönelik yapılan deney verilerinin parametre özeti de Çizelge 6.19’da görülmektedir.

Çizelge 6.19. Kolon eksenel yük taşıma kapasitesi için veri tabanındaki parametre özeti

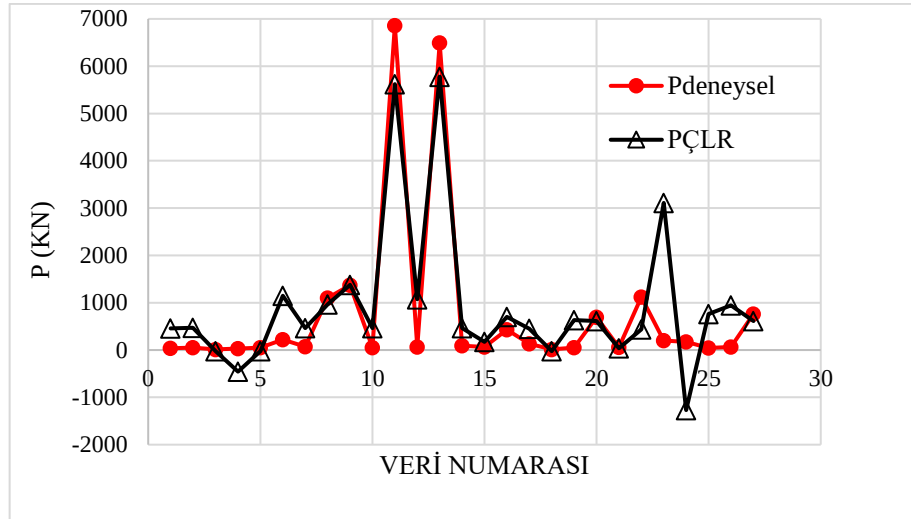
Parametre	Detay	Minimum Değer	Maksimum Değer	Ortalama Değer	Birim
b	Kesit genişliği	100.00	610.00	192.20	mm
h	Kesit yüksekliği	100.00	610.00	244.06	mm
H	Kolon yüksekliği	300.00	3048.00	974.22	mm
f_c	Beton basınç dayanımı	8.80	70.00	32.01	MPa
f_y	Donatı çekme dayanımı	287.00	636.00	465.85	MPa
ρ_s	Boyuna donatı oranı	0.0041	0.040	0.015	-
ρ_{sw}	Enine donatı oranı	0.0010	0.008	0.004	-
E_f	Lifli polimer elastisite modülü	65.40	245.60	195.54	GPa
ε_f	Lifli polimer çekme dayanımı	30.00	4840.00	3462.93	MPa
w_f	Lifli polimer sargı genişliği	50.00	3048.00	822.12	mm
s_f	Lifli polimer sargılar arası uzaklık	0.00	200.00	21.60	mm
t_f	Lifli polimer sargı kalınlığı	0.11	5.00	0.54	mm
r	Kolon köşesi yuvarlama yarıçapı	0.00	65.00	21.60	mm
P	Taşıma gücü	14.02	9790.00	825.36	KN

Çizelge 6.19’da görüldüğü üzere; beton dayanımı, boyuna ve enine donatı oranı vs. gibi malzeme ve donatı özellikleri TS-500-2000 (2000) ve TBDY-2018 (2018) de verilen basınç dayanımı normları aralığındadır. Benzer şekilde kolonlarda kullanılan enine ve boyuna donatı oranlarının ortalaması da yine aynı yönetmelikte yer alan alt ve üst limit sınırları içindedir. Fakat eksenel yük testinin yapıldığı incelenen bu veri setinin doğası gereği bazı deneylerde etriye sıklaştırması yapılmamış, bazı kolonlarda ise oldukça düşük dayanımlı beton kullanılmıştır.

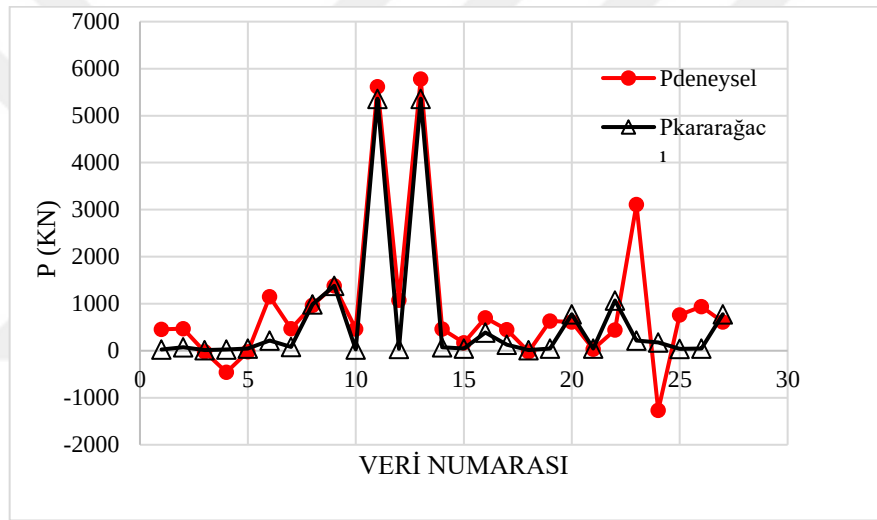
Çizelge 6.20. Makine öğrenmesi algoritmaları ile P (kolon yük taşıma kapasitesi, KN) tahmin sonuçları

Sıra no	P _{deneysel}	ÇLR	KARAR A.	BAGGING-DT	RASSAL ORMAN	XG-BOOST	ADA BOOST	GRADİENT BOOST	DVR deneyssel-ölçekli	DVR tahmin-ölçekli
1	35.3	457.87	24.60	57.24	44.19	41.14	45.44	34.51	-0.38	-0.30
2	51.4	470.85	73.20	63.70	65.70	73.14	45.44	62.76	-0.38	-0.30
3	14.02	-21.10	14.02	14.02	14.02	14.02	45.44	13.56	-0.39	-0.29
4	29.6	-457.68	25.30	25.23	25.37	25.30	46.00	27.34	-0.39	-0.34
5	50.5	-24.26	46.00	55.38	46.64	46.00	46.00	48.28	-0.38	-0.28
6	217.9	1150.72	217.52	218.51	219.07	217.52	223.47	220.04	-0.30	-0.20
7	75.1	467.31	84.10	76.32	78.91	84.04	45.44	66.10	-0.36	-0.30
8	1098	963.12	985.00	999.25	917.93	985.01	985.00	984.62	0.12	-0.04
9	1373	1380.02	1379.00	1339.60	1209.27	1378.97	1225.50	1374.00	0.25	0.35
10	51.5	461.02	24.60	57.24	44.19	24.69	45.44	34.51	-0.38	-0.30
11	6860	5618.31	5360.00	6246.00	4299.38	5358.33	5360.00	5358.25	2.83	1.95
12	63.9	1071.76	42.20	42.61	48.87	261.56	45.44	237.15	-0.37	0.37
13	6490	5779.49	5360.00	6246.00	4299.38	5358.33	5360.00	5358.25	2.66	1.95
14	94.6	464.16	77.00	81.68	77.89	76.99	45.44	73.84	-0.36	-0.30
15	65.6	172.30	46.00	54.74	46.64	46.00	46.00	48.28	-0.37	-0.27
16	432	701.98	388.50	355.04	418.50	388.50	428.00	394.56	-0.20	-0.13
17	130.59	449.95	131.79	131.79	131.79	131.79	131.79	133.85	-0.34	-0.24
18	14.02	-21.10	14.02	14.02	14.02	14.02	45.44	13.56	-0.39	-0.29
19	51.1	632.72	44.90	43.42	50.51	45.68	45.44	237.15	-0.38	0.35
20	697	614.68	778.00	695.34	719.89	777.97	778.00	749.59	-0.07	-0.13
21	55.6	34.71	46.00	54.74	46.64	46.00	46.00	48.28	-0.37	-0.28
22	1123	440.06	1067.00	1910.40	963.58	1067.00	967.33	1073.19	0.13	0.01
23	199.11	3109.72	217.52	199.63	248.83	217.52	223.47	220.04	-0.31	-0.13
24	171	-1269.17	177.50	224.44	227.10	204.70	182.91	194.31	-0.32	-0.18
25	45.2	763.13	42.20	42.61	48.87	43.06	45.44	237.15	-0.38	0.34
26	68.4	941.34	44.90	43.42	50.51	264.07	45.44	237.15	-0.37	0.37
27	762	614.68	778.00	695.34	719.89	777.97	778.00	749.59	-0.04	-0.13

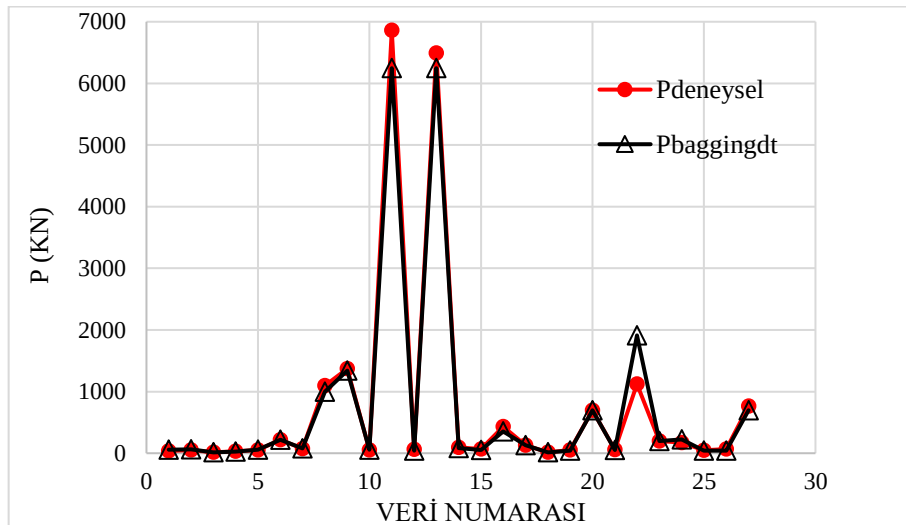
Tüm algoritma modellerinden elde edilen tahmin edilen kolon eksenel yük taşıma kapasitesi değerleri ile literatürdeki deneyssel kolon eksenel yük taşıma kapasitesi değerleri Çizelge 6.20’de verilmiştir. Şekil 6.42’de, tüm algoritma modellerinden elde edilen tahmin kolon eksenel yük taşıma kapasitesi değerleri ile literatürdeki deneyssel kolon eksenel yük taşıma kapasitesi değerlerinin karşılaştırılma grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde; Algoritmaların küçük farklılıklar dışında birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir. Şekil 6.43’te ise tüm algoritma modellerinin deneyssel kolon eksenel yük taşıma kapasitesi değerleri ile ilişkisi görülmektedir.



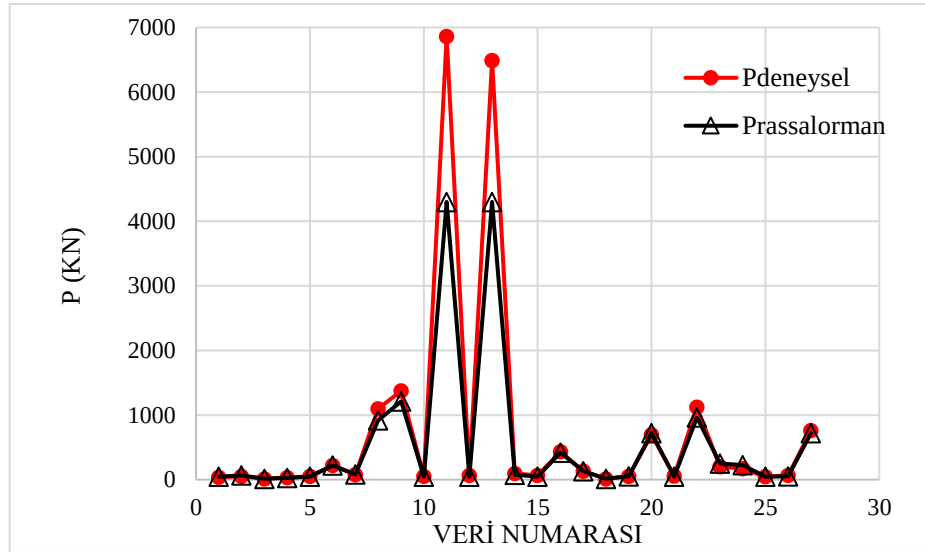
(a)



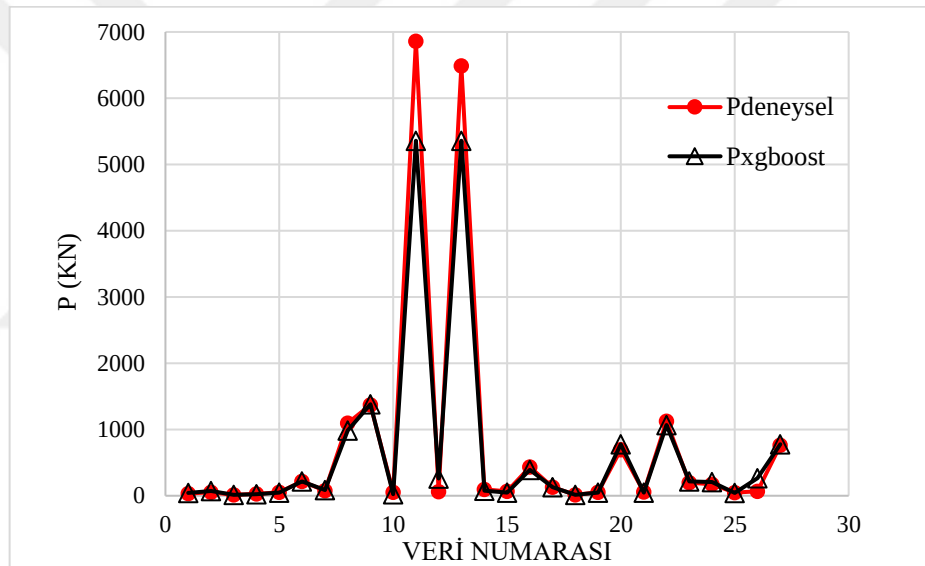
(b)



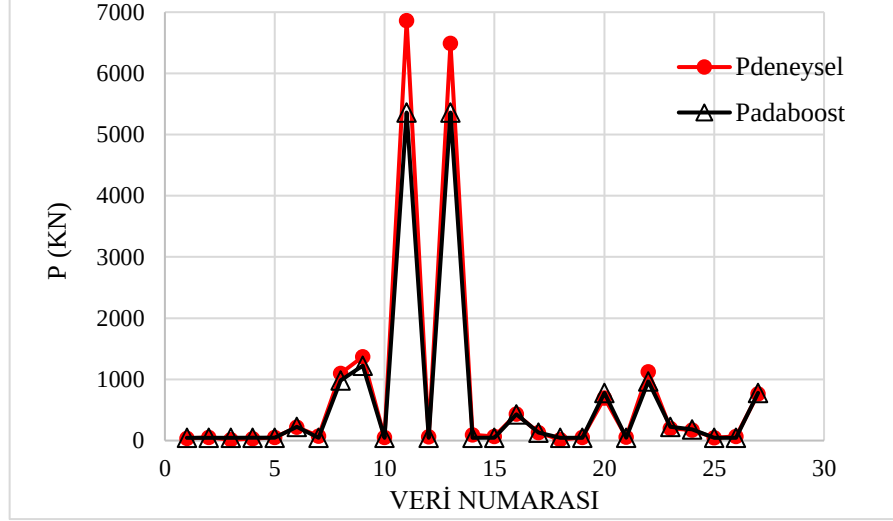
(c)



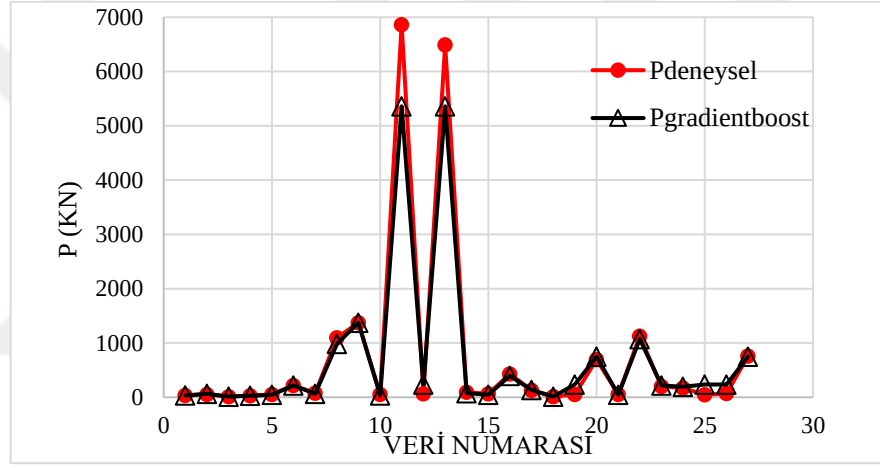
(d)



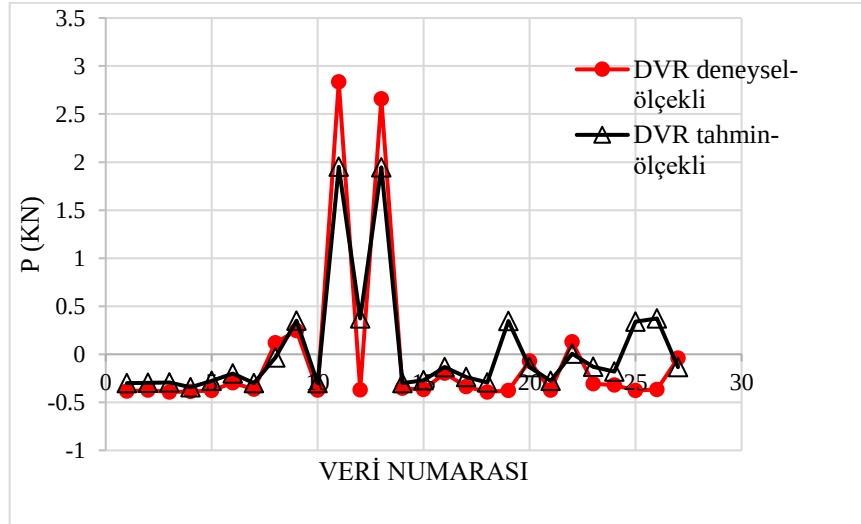
(e)



(f)

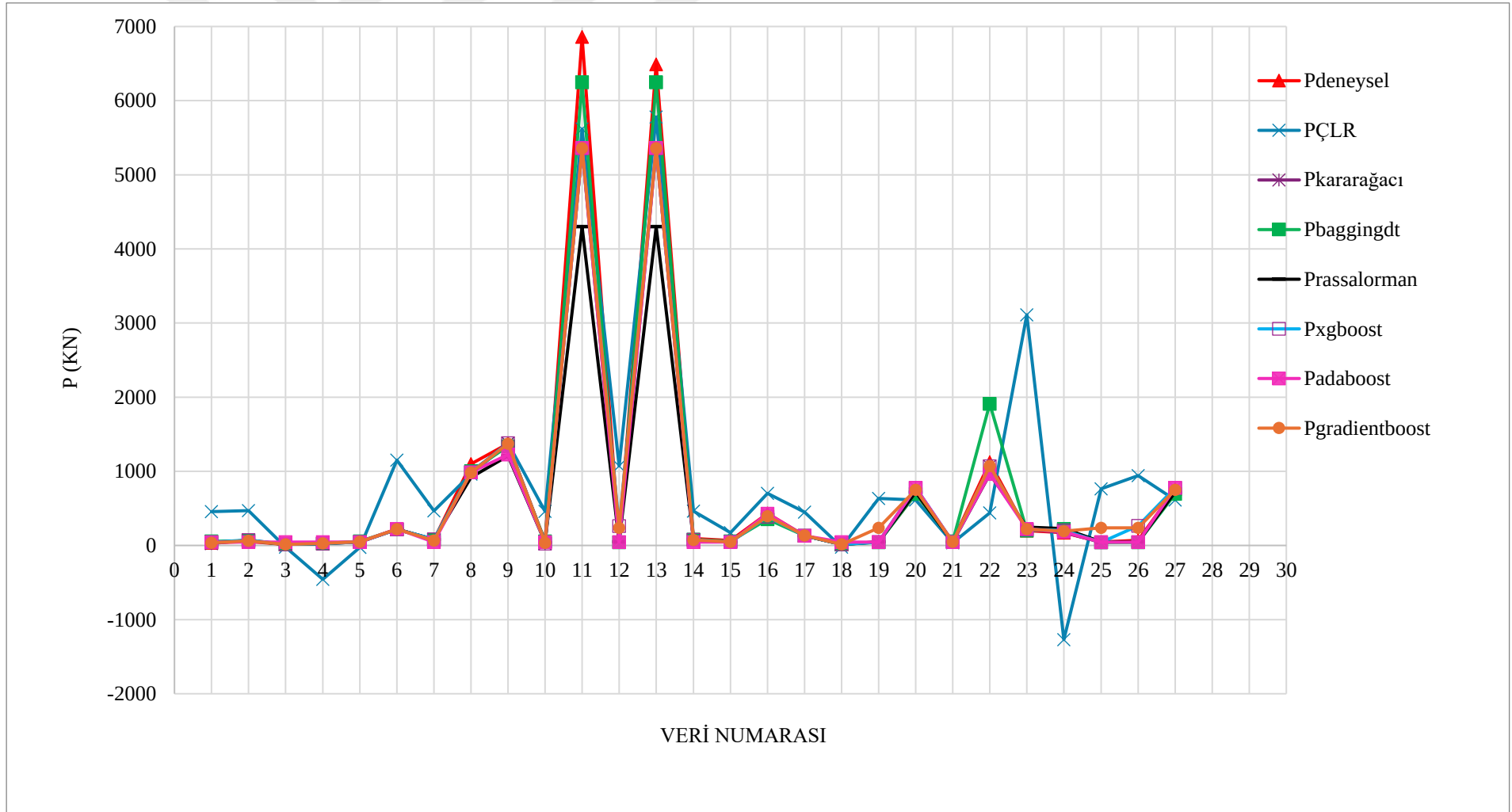


(g)



(h)

Şekil 6.42. Makine öğrenmesi algoritmaları ile kolonların aksenal taşıma kapasitesi değerlerinin tahmin sonuçlarının grafik ile gösterilmesi



Şekil 6.43. Makine öğrenmesi algoritmaları ile kolonların eksenel yük taşıma kapasitesi değerlerinin tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

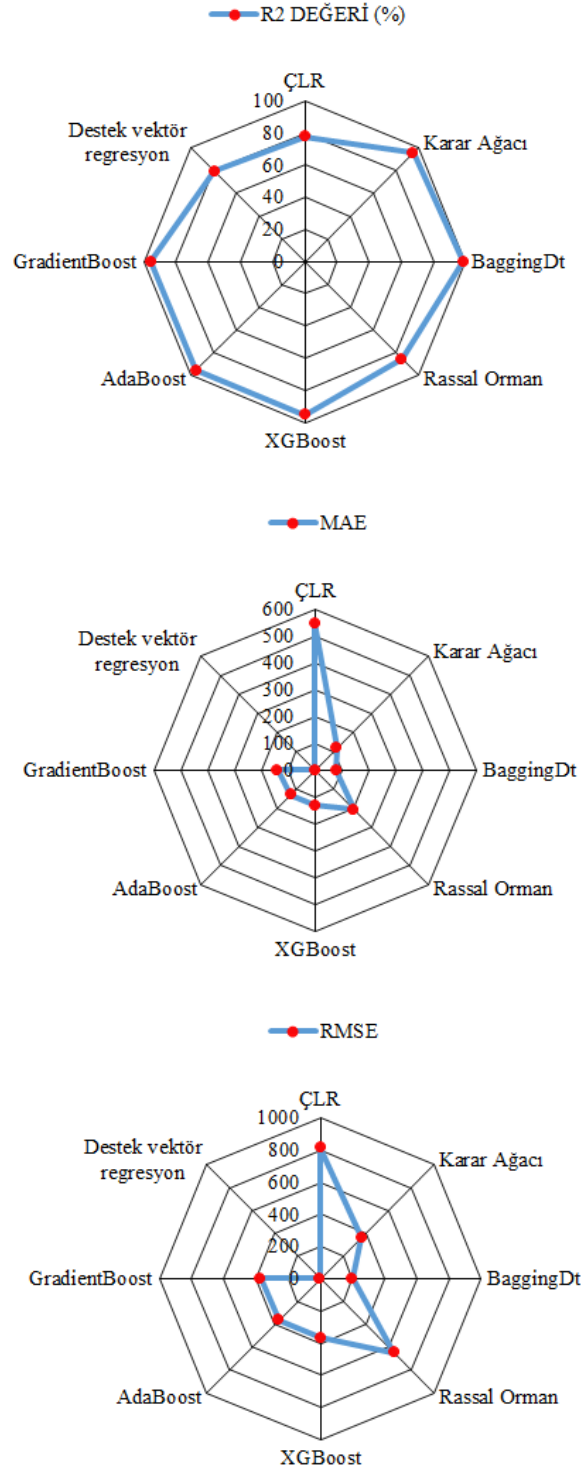
Makine öğrenmesi regresyon modellerine dayalı performans, R^2 skoru başarı metriği, RMSE ve MAE hata metrikleri kullanılarak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Makine öğrenmesi modellerinin performans başarısı Çizelge 6.17’de verilmiştir. Algoritma tahmin performanslarının başarısına karar verebilmek için en önemli kriter yüksek R^2 değeridir. Bunun yanında düşük MAE ve RMSE değerleri olmalıdır. En düşük R^2 değeri (%77.59) Çoklu lineer regresyon algoritmasına aittir.

Bagging-Dt algoritması; R^2 puanı %98.64, MAE değeri 78.15 ve RMSE değeri 200.25 ile deneysel verilere en yakın eksenel yük taşıma kapasitesi tahminini oluşturmuştur.

Çizelge 6.21. Kolon yük taşıma kapasitesi sonuçları için makine öğrenmesi algoritmalarının tahmin performansları

M.Ö. ALGORİTMASI	R^2 DEĞERİ (%)	MAE	RMSE
ÇLR	77.59	549.37	813.13
Karar Ağacı	95.53	116.68	362.87
BaggingDt	98.64	78.15	200.25
Rassal Orman	85.62	206.12	651.2
XGBoost	95.42	130.45	367.23
AdaBoost	95.48	127.83	365.16
GradientBoost	95.37	139.21	369.58
Destek vektör regresyon	79.47	0.24	0.36

Çizelge 6.21’deki metriklerin radar grafiği üzerinde gösterimi ise Şekil 6.44’te verilmiştir. Metrik değeri yüksek olan algoritmalar radar grafiğinde en dıştaki radarda, metrik değeri düşük olan algoritmalar grafik merkezine yakın olarak görülmektedir.



Şekil 6.44. Makine öğrenmesi modellerinin kolon eksenel yük taşıma kapasitesi performans başarıları radar grafiği

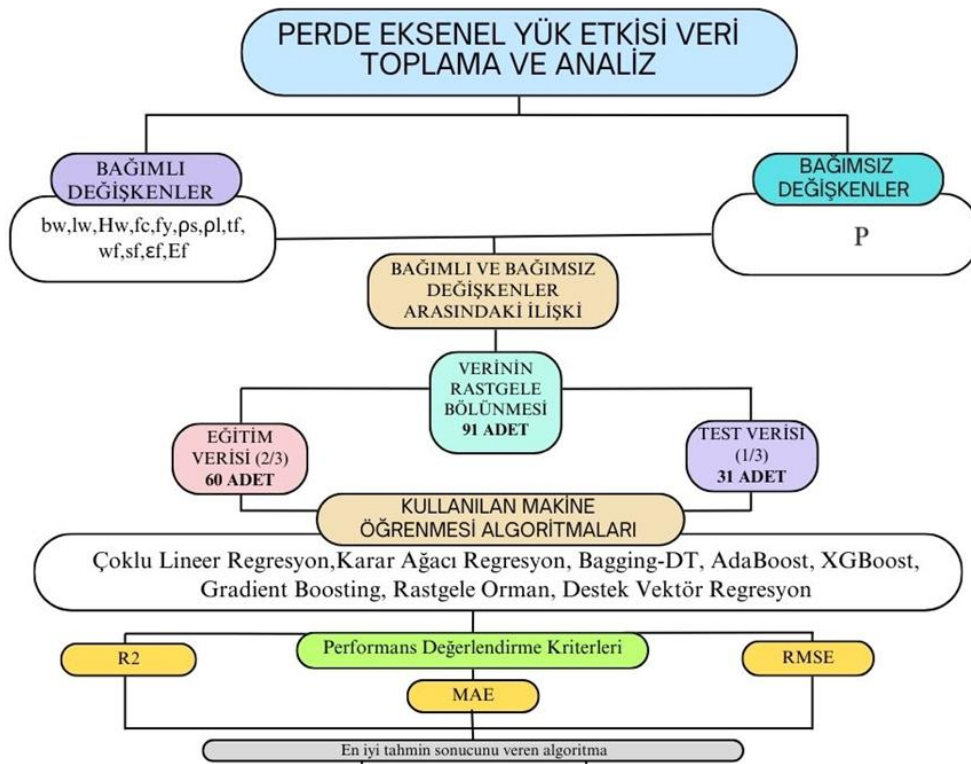
6.8. Makine Öğrenmesi Kullanılarak Lifli Polimerler ile Perdelerin Normal Kuvvet Taşıma Davranışına Karşı Güçlendirilmesi ile İlgili Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Tahmini

Perdelerde eksenel yük taşıma kapasitesi, kolonlarda kullanılan hesap yöntemi ile benzer olup denklem 6.17 ile hesaplanmaktadır.

$$N_r = 0.85f_{cd}A_c + f_{yd}A_{st} \quad (6.17)$$

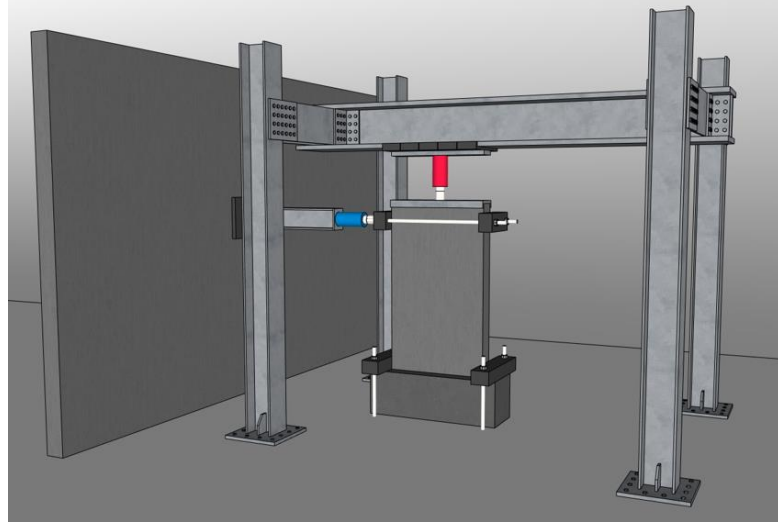
A_c ; beton alanı, A_{st} ; donatı alanı, f_{cd} ve f_{yd} ; beton ve donatı hesap basınç dayanımı hesap değerleridir.

Şekil 6.45’ de verilen diyagram bu bölümde yapılan çalışmanın genel özetini göstermektedir.

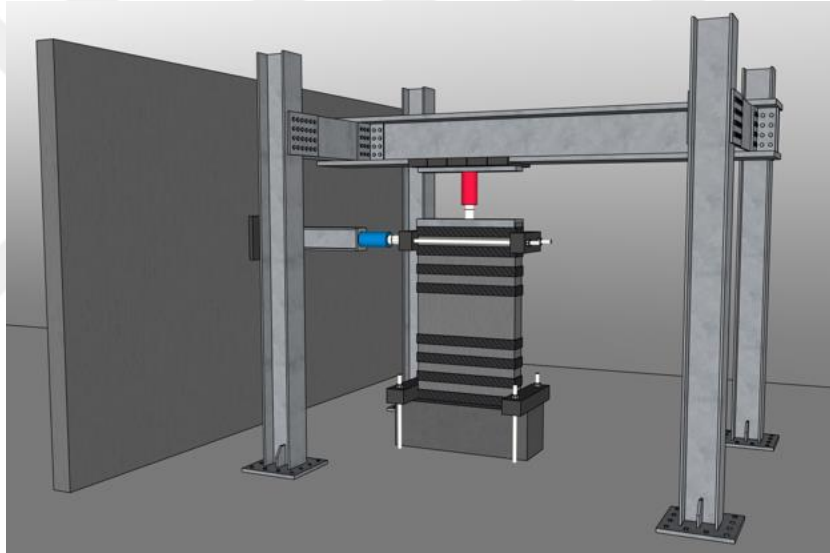


Şekil 6.45. Kolon eksenel yük etkisi çalışma akış şeması

Bu çalışmalarda perdelerin eksenel yük taşıma kapasitesi davranışını incelemek için Şekil 6.46’da verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Bu deney düzeneğinin FRP ile güçlendirilmiş hali de Şekil 6.47’de görülmektedir.



Şekil 6.46. Perdelerin yatay ve düşey yük altında davranışının belirlenmesi için yapılan test düzeneği



Şekil 6.47. FRP ile güçlendirilmiş perdelerin yatay ve düşey yük altında davranışının belirlenmesi için yapılan test düzeneği

Bu bölümde perdelerin eksenel yük taşıma kapasitesi değerini (P) tahmin etmek amacıyla eksenel yük taşıma kapasitesi davranışına yönelik yapılan deneylerin verileri toplanmıştır (Ek Çizelge 10.8). Algoritmalar, 0.33 oranında test ölçüsü oluşturmuştur. Böylece 91 tane veri setinin; 60 tanesi ($2/3$ 'ü) eğitim seti olarak, 31 tanesi ($1/3$ 'ü) ise test seti olarak "rastgele" olarak bölünmüştür.

Perde yük etkisi davranışına yönelik yapılan deney verilerinin parametre özeti de Çizelge 6.22'de görülmektedir.

Çizelge 6.22. Perde eksenel yük taşıma kapasitesi için veri tabanındaki parametre özeti

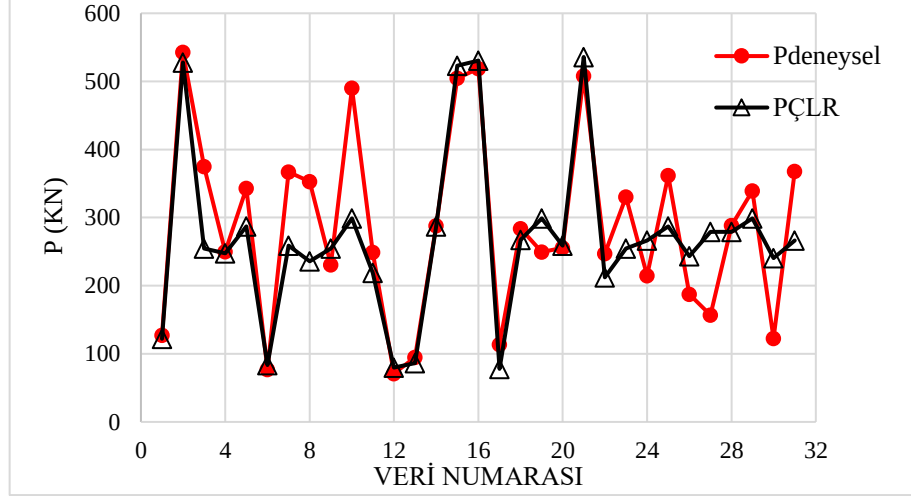
Parametre	Detay	Minimum Değer	Maksimum Değer	Ortalama Değer	Birim
b_w	Kesit genişliği	800	3000	1380.77	mm
l_w	Kesit yüksekliği	80	250	124.56	mm
H_w	Perde yüksekliği	1500	3000	1921.98	mm
ρ_l	Boyuna donatı oranı	0.0062	0.0183	0.015	-
ρ_s	Enine donatı oranı	0.001	0.005	0.003	-
f_c	Beton basınç dayanımı	15.00	50.00	25.22	MPa
f_{yl}	Donatı çekme dayanımı	335	430	416.19	MPa
E_f	Lifli polimer elastisite modülü	105	231	215.24	GPa
ϵ_f	Lifli polimer çekme dayanımı	1000	4100	3371.02	MPa
w_f	Lifli polimer sargı genişliği	100	3000	1158.24	mm
s_f	Lifli polimer sargılar arası uzaklık	0	700	64.29	mm
t_f	Lifli polimer sargı kalınlığı	0.12	0.36	0.21	mm
P	Yük taşıma kapasitesi	71	547.5	288.67	KN

Çizelge 6.22’de görüldüğü gibi veri setinde kullanılan ortalama beton dayanımı, boyuna ve enine donatı oranı vs. gibi malzeme ve donatı özellikleri TS-500-2000 (2000) ve TBDY-2018 (2018) de verilen basınç dayanımı normları aralığındadır. Benzer şekilde perdelerde kullanılan enine ve boyuna donatı oranlarının ortalaması da yine aynı yönetmelikte yer alan alt ve üst limit sınırları içindedir. Fakat eksenel yük taşıma kapasitesi testinin yapıldığı incelenen bu veri setinin doğası gereği bazı deneylerde etriye sıklaştırması yapılmamış, bazı perdelerde ise oldukça düşük dayanımlı beton kullanılmıştır.

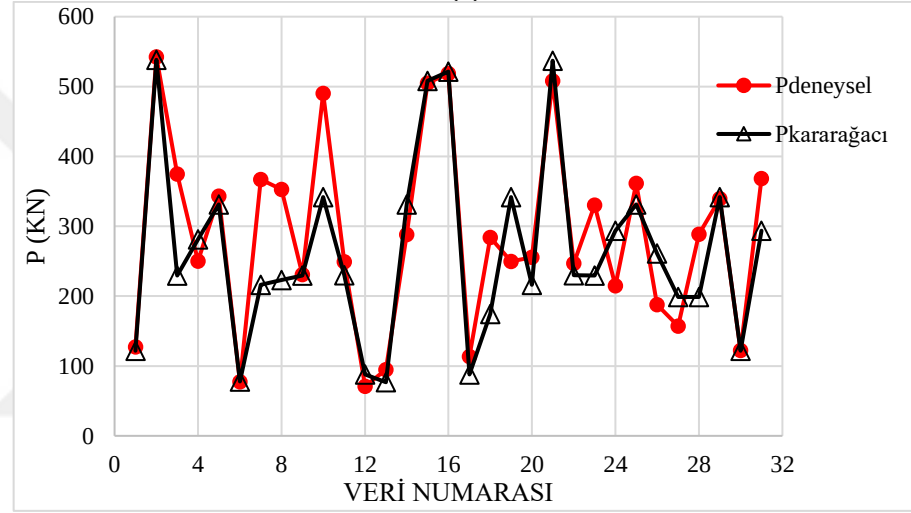
Çizelge 6.23. Makine öğrenmesi algoritmaları ile P (perde yük taşıma kapasitesi, KN) tahmin sonuçları

Sıra no	P _{deneysel}	ÇLR	KARAR A.	BAGGING-DT	RASSAL ORMAN	XG-BOOST	ADA BOOST	GRADİENT BOOST	DVR deneyse-ölçekli	DVR tahmin-ölçekli
1	127.30	121.89	121.80	121.80	182.71	121.80	121.80	122.95	-0.85	-1.10
2	542.60	527.60	538.20	533.37	536.35	538.20	528.80	533.89	1.62	1.72
3	374.80	254.85	229.57	232.15	237.56	229.57	314.22	248.63	-0.39	0.58
4	249.90	247.40	281.30	301.53	309.28	281.30	281.89	263.67	-0.47	-0.27
5	343.00	287.05	331.30	340.92	329.65	331.30	326.72	327.50	-0.04	0.37
6	77.17	83.42	77.80	78.12	77.99	77.80	85.86	78.90	-1.36	-1.44
7	367.10	259.09	216.20	258.41	264.39	216.21	314.22	219.53	-0.34	0.53
8	352.70	235.71	223.25	259.60	233.54	223.25	252.25	241.96	-0.46	0.43
9	230.90	254.85	229.57	232.15	237.56	229.57	314.22	248.63	-0.39	-0.40
10	490.20	298.74	341.93	331.70	338.19	341.93	340.39	340.62	0.12	1.37
11	249.00	219.03	230.00	252.09	253.98	250.80	252.82	240.74	-0.43	-0.27
12	71.00	79.75	88.00	83.37	85.32	88.00	86.66	86.17	-1.32	-1.49
13	94.85	86.17	76.77	83.24	79.89	76.77	86.66	78.90	-1.33	-1.32
14	288.00	287.05	331.30	340.92	329.65	331.30	326.72	327.50	-0.04	-0.01
15	504.70	523.01	507.90	517.37	514.25	507.90	507.90	509.53	1.41	1.47
16	518.60	530.35	521.40	524.98	527.59	540.40	531.86	525.35	1.67	1.56
17	113.63	77.92	88.00	83.37	85.32	88.00	86.66	92.18	-1.26	-1.20
18	283.80	267.31	174.45	182.64	171.77	174.45	232.14	178.33	-0.29	-0.04
19	249.70	298.74	341.93	331.70	338.19	341.93	340.39	340.62	0.12	-0.27
20	255.40	259.09	216.20	258.41	264.39	216.21	314.22	219.53	-0.34	-0.23
21	508.10	535.85	536.80	534.95	529.87	536.80	532.21	536.56	1.54	1.49
22	247.00	212.57	230.00	234.31	253.98	227.97	252.25	233.19	-0.44	-0.29
23	330.50	254.85	229.57	232.15	237.56	229.57	314.22	248.63	-0.39	0.28
24	214.70	266.55	293.50	282.41	306.69	293.50	315.75	291.27	-0.22	-0.51
25	361.60	287.05	331.30	340.92	329.65	331.30	326.72	327.50	-0.04	0.49
26	187.60	243.16	260.90	258.25	259.36	260.90	252.82	250.52	-0.41	-0.69
27	157.00	279.00	199.00	193.37	192.99	199.00	233.09	196.04	-0.19	-0.90
28	288.70	279.00	199.00	193.37	192.99	199.00	233.09	196.04	-0.19	0.00
29	339.40	298.74	341.93	331.70	338.19	341.93	340.39	340.62	0.12	0.34
30	122.50	240.51	121.80	121.80	179.19	136.67	121.80	115.02	0.00	-1.13
31	368.10	266.546	293.50	282.41	306.69	293.50	315.75	291.27	-0.22	0.54

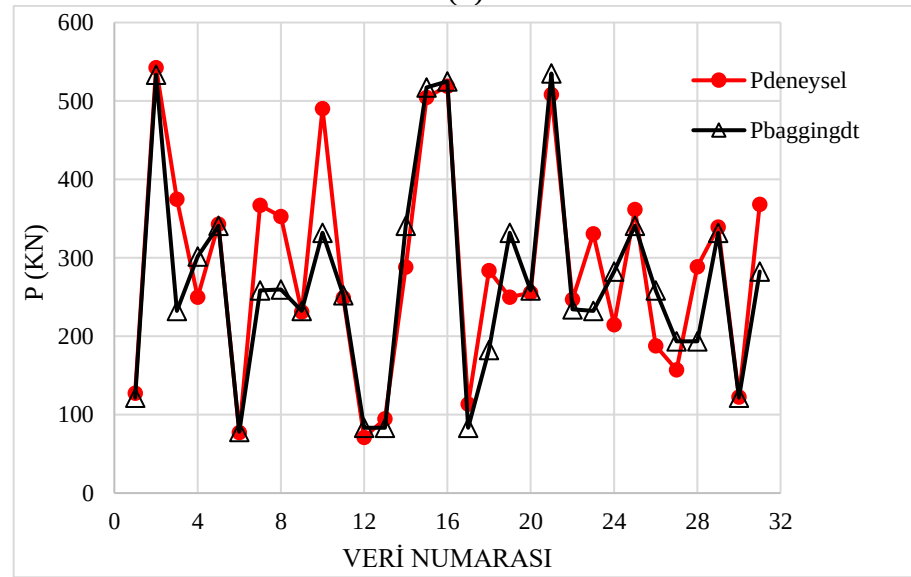
Algoritma modellerinden elde edilen perde eksenel yük taşıma kapasitesi değerleri ile literatürdeki deneysel perde eksenel yük taşıma kapasitesi değerleri Çizelge 6.23'te verilmiştir. Şekil 6.48'de, tüm algoritma modellerinden elde edilen tahmin perde eksenel yük taşıma kapasitesi değerleri ile literatürdeki deneysel perde eksenel yük taşıma kapasitesi değerlerinin karşılaştırılma grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde; Algoritmaların küçük farklılıklar dışında birbirini paralel olarak takip ettiği görülmektedir. Şekil 6.49'da ise tüm algoritma modellerinin deneysel kolon eksenel yük taşıma kapasitesi değerleri ile ilişkisi görülmektedir.



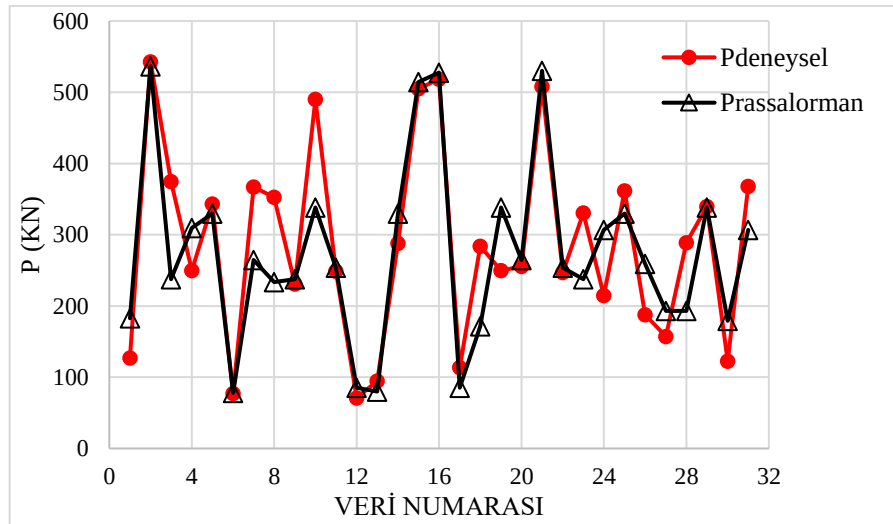
(a)



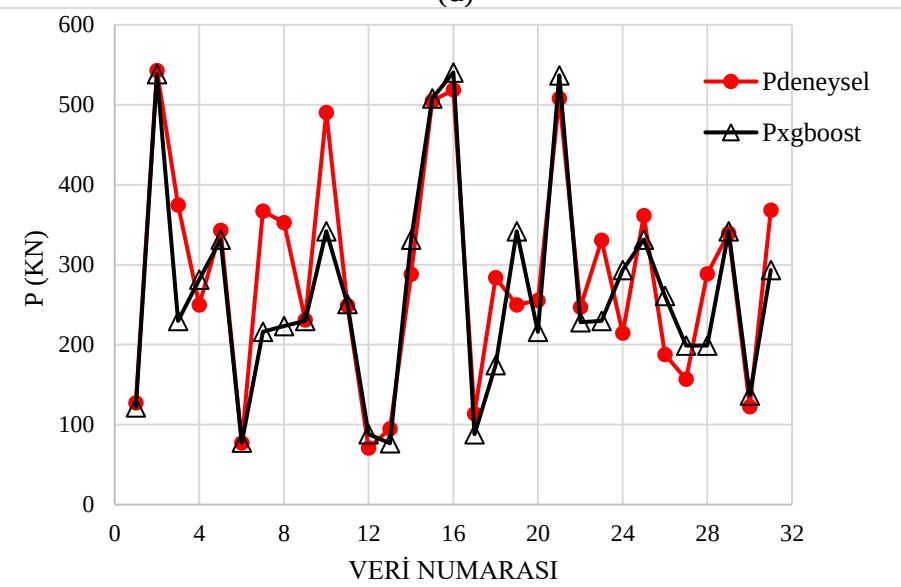
(b)



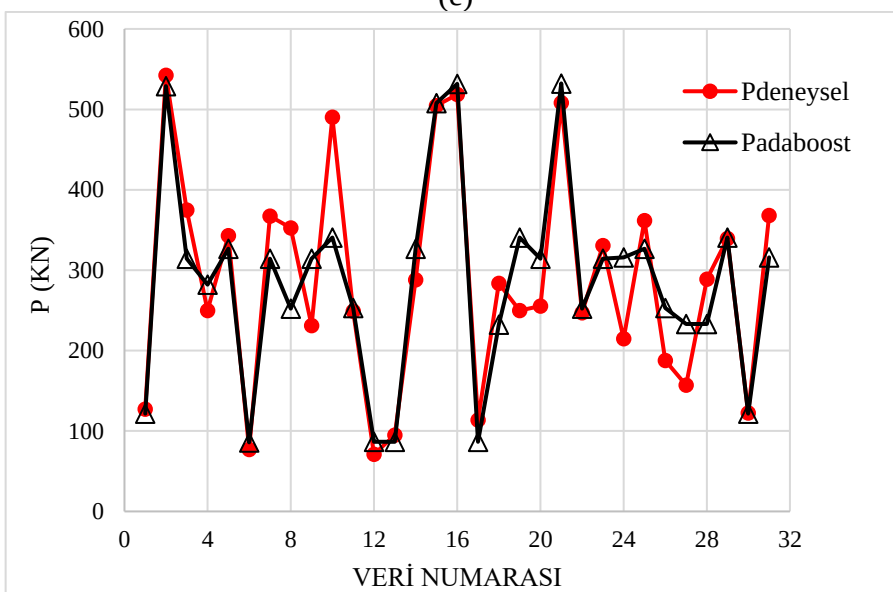
(c)



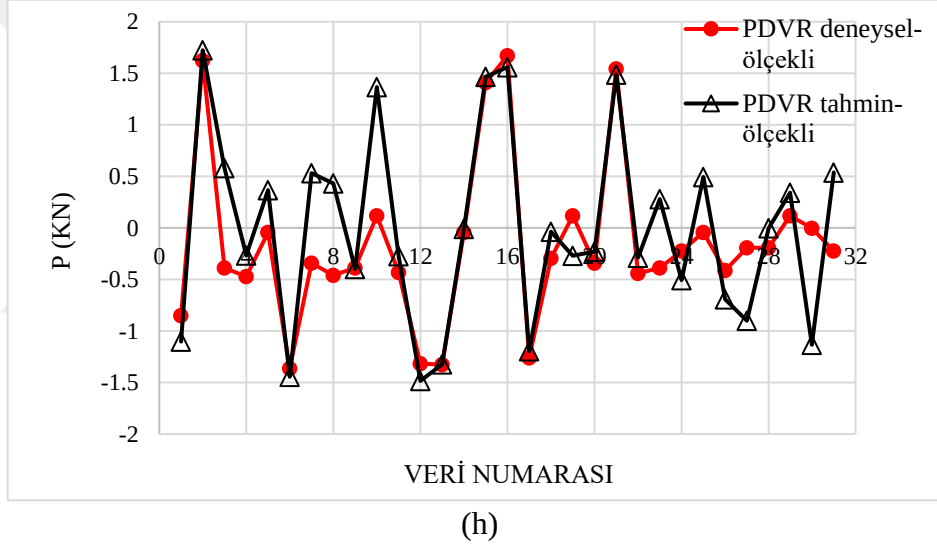
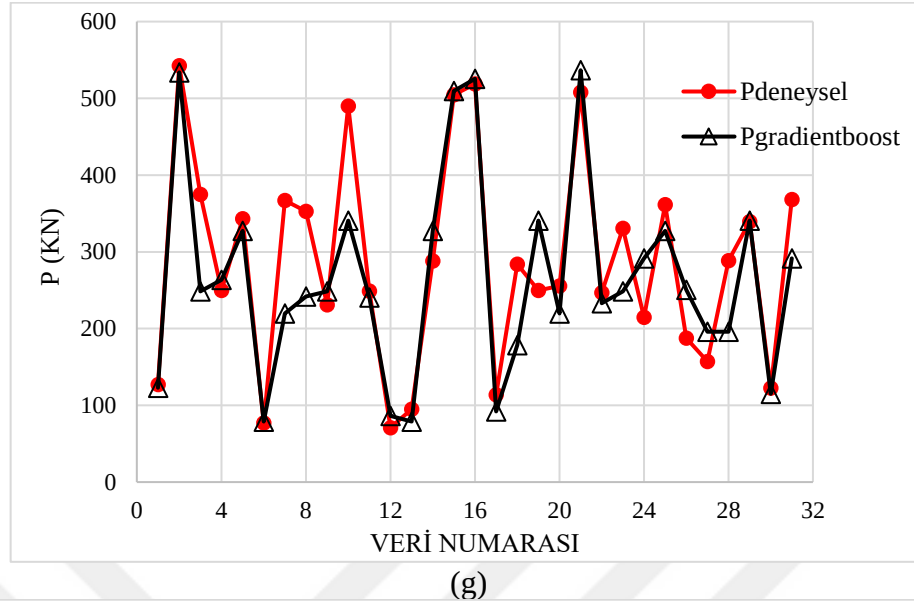
(d)



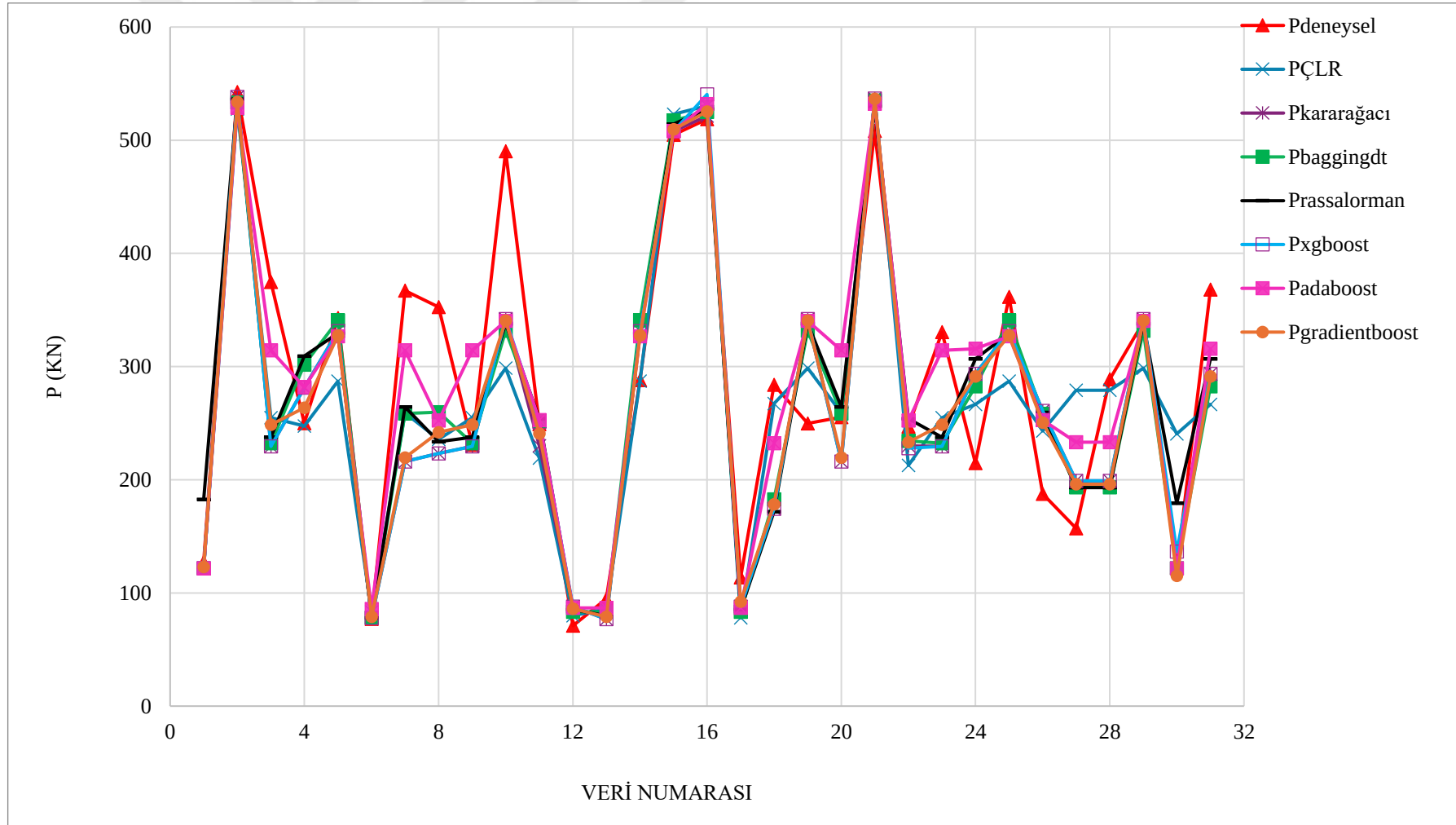
(e)



(f)



Şekil 6.48. Makine öğrenmesi algoritmaları ile kolonların eksenel taşıma kapasitesi değerlerinin tahmin sonuçlarının grafik ile gösterilmesi



Şekil 6.49. Makine öğrenmesi algoritmaları ile kolonların eksenel yük taşıma kapasitesi değerlerinin tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

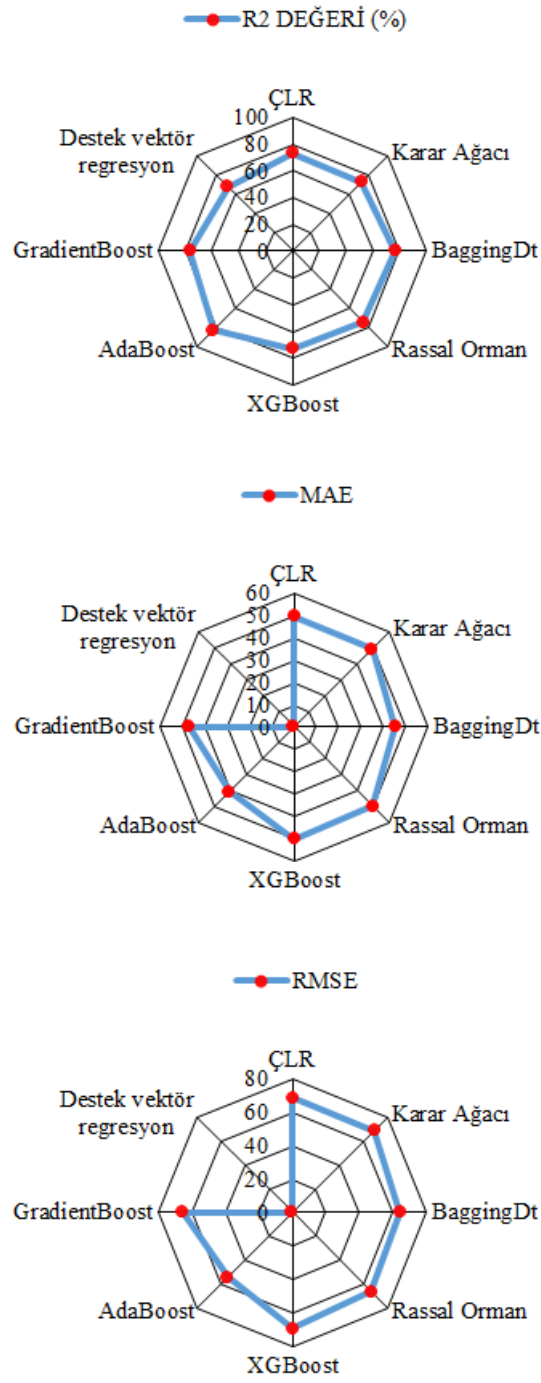
Makine öğrenmesi regresyon modellerine dayalı performans, R^2 skoru başarı metriği, RMSE ve MAE hata metrikleri kullanılarak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Makine öğrenmesi modellerinin performans başarısı Çizelge 6.20’de verilmiştir. Algoritma tahmin performanslarının başarısına karar verebilmek için en önemli kriter yüksek R^2 değeridir. Bunun yanında düşük MAE ve RMSE değerleri olmalıdır. Çizelgedeki algoritma tahmin performansları incelendiğinde R^2 değeri en büyük olan algoritma Adaboost algoritmasıdır. Algoritma modelleri genel olarak %70’in hemen üzerinde değerler almış, %90’ı geçen algoritma değeri olmamıştır.

AdaBoost algoritması; R^2 puanı %83.03, MAE değeri 40.86 ve RMSE değeri 54.71 ile deneysel verilere en yakın eksenel yük taşıma kapasitesi tahminini oluşturmuştur.

Çizelge 6.24. Perde yük taşıma kapasitesi sonuçları için makine öğrenmesi algoritmalarının tahmin performansları

M.Ö. ALGORİTMASI	R^2 DEĞERİ (%)	MAE	RMSE
ÇLR	73.35	49.69	68.57
Karar Ağacı	72.85	49.58	69.20
BaggingDt	76.55	45.54	64.33
Rassal Orman	74.70	50.11	66.81
XGBoost	72.78	50.14	69.29
AdaBoost	83.03	40.86	54.71
GradientBoost	76.00	46.93	65.06
Destek vektör regresyon	68.39	0.36	0.50

Çizelge 6.24’teki metriklerin radar grafiği üzerinde gösterimi ise Şekil 6.50’de verilmiştir. Metrik değeri yüksek olan algoritmalar radar grafiğinde en dıştaki radarda, metrik değeri düşük olan algoritmalar grafik merkezine yakın olarak görülmektedir.



Şekil 6.50. Makine öğrenmesi modellerinin perde eksenel yük taşıma kapasitesi performans başarıları radar grafiği

6.9. Elde Edilen Analiz Sonuçlarının Yorumlanması ve Tartışma

Yapılan çalışma sonucunda en iyi tahmin sonucunu veren makine öğrenmesi algoritması tespit edilmeye çalışılmıştır. En iyi tahmin değerinin ilk ölçütü R^2 değerinin %100'e en yakın değere sahip olmasıdır. R^2 değerinin yüksek olması modelin uyumlu olduğunu göstermektedir. İki değişken arasındaki farkı temsil eden MAE metriği, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farktır. Algoritma modeli başarısının iyi olması için MAE değerinin düşük olması beklenmektedir. RMSE, tahmin ile gerçek gözlem arasındaki ortalama kare farkın karekökü alınarak elde edilen hata ölçüsüdür. Modelin başarılı olabilmesi için RMSE değerinin düşük olması beklenmektedir.

Yapılan çalışma sonucu elde edilen sonuçlar özetle şöyledir;

- 1) Kiriş kesme mukavemeti çalışmasında; R^2 değeri %93.56, MAE değeri 44.28 ve RMSE değeri 59.80, Döşeme eğilme mukavemeti çalışmasında R^2 değeri %89.58, MAE değeri 11.08 ve RMSE değeri 13.57, döşeme zımbalama mukavemeti çalışmasında R^2 değeri %79.29, MAE değeri 83.46 ve RMSE değeri 109.44 ile en iyi tahmin sonucunu XG-Boost algoritması vermiştir.
- 2) XG-Boost algoritması aşırı uyum olmadan veriler için yüksek oranda doğru tahminler yaparak diğer popüler algoritmalara göre 10 kat daha hızlı çalışabilmektedir. Bagging ve Boosting algoritmaları karşılaştırıldığında Boosting, örnek seçimi sırasında eğitim setindeki zorlu unsurlara odaklandığından, daha az hatalı sonuç çıkarmaktadır.
- 3) Kiriş burulma mukavemeti çalışmasında, R^2 değeri %94.48, MAE değeri 7.17 ve RMSE değeri 10.59; kolon moment taşıma gücü çalışmasında; R^2 puanı %98.26, MAE değeri 11.18 ve RMSE değeri 14.80; kolon yük taşıma gücü çalışmasında; R^2 puanı %98.64, MAE değeri 78.15 ve RMSE değeri 200.25 ile en iyi tahmin performansını Bagging-DT algoritması göstermiştir.
- 4) Bagging-Dt Algoritması; ağaç tabanlı torbalama yöntemidir. Torbalamada eğitim seti küçük parçalara ayrılarak oluşturulan farklı eğitim setleri ile modeller kurulur. Birden fazla Karar Ağacı modelinin sonucu ile performansın artırılması Bagging modeli ile sağlanabilmektedir. Orijinal veri setinden elde edilen ön yükleme örneklerine tahmin ediciler uygulanır ve bir grup oluşturulur. Ön yükleme, rastgele seçimler yaparak alt örnekler oluşturmak için kullanılır. Bu nedenle ön yüklemeyle oluşturulan örneklerde

bazı gözlemler gerçekleşmezken bazılarının iki veya daha fazla kez görülebilmesi mümkündür. Bu yöntem deneysel sonuçlara göre tekli ağaçlara göre daha verimli sonuçlar vermektedir.

- 5) Perde yük taşıma gücü çalışmasında; R^2 değeri %83.03, MAE değeri 40.86 ve RMSE değeri 54.71 ile en iyi tahmini AdaBoost algoritması vermiştir. Bu algortmada, yanlış cevaplar tekrar test edilerek, tahmin sonuçlarında sadece doğru olanlar dikkate alınmaktadır. Ağaç tabanlı bu algoritma modeli, nihai modeli oluştururken yanlış tahminlerde bulunan ardışık modellere yeni ağırlıklar atayarak çıktı verilerini doğru tahmin etmeyi amaçlamaktadır.
- 6) Kiriş eğilme mukavemeti çalışmasında R^2 puanı %70.14, MAE değeri 0.38 ve RMSE değeri 0.49 ile en iyi tahmin sonucunu DVR algoritması vermiştir. Destek Vektör Regresyon algoritmasının temel mantığı en fazla veriyi, olabilecek en dar aralıkta kapsayabilmektir. Bu algoritma doğrusal veya doğrusal olmayan modellerde çalışır, ancak veri seti sayısal değerler arasındaki büyük farklara karşı duyarlıdır.
- 7) Yapılan çalışmalarda elde edilen algoritma sonuçları görsel olarak radar grafiklerinde görülmektedir. Radar grafiklerine bakıldığında değerlerin hangi aralıkları kapsadığı ve yoğunlaştığı değerler hakkında fikir sahibi olunabilmektedir. Ayrıca tahmin değerleri de grafiksel olarak listelenmiştir.
- 8) Veri seti sayısının sınırlı olması ve algoritmaların öğrenme sürecine katkı sağlayan eğitim verilerinin az olması nedeniyle ÇLR, Bagging-DT, Rastgele Orman ve XG-Boost algoritmalarında başarı oranları daha düşüktür. (Doğan ve Arslan,2022) Bu görüşle paralel ve zıt sonuçlar elde edilmiştir. En az veri setine sahip döşeme eğilme etkisi ve kolon moment taşıma etkisi çalışmalarında XG-Boost ve Bagging-DT algoritmaları en iyi tahmin sonucunu vermiştir. Bunun yanında en çok veri setine sahip kiriş kesme etkisi çalışmasında en iyi tahmin sonucunu XG-Boost algoritması vermiştir.
- 9) Genel olarak betonarme elemanlarının lifli polimerler ile güçlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda algoritma modeli olarak literatürde XG-Boost kullanılmıştır (ya da tahmin modelini en iyi veren algoritmanın XG-Boost olduğu vurgulanmıştır (Çakıroğlu ve diğ.,2022). Bu çalışmada kiriş kesme, döşeme eğilme, döşeme zımbalama mukavemeti çalışmalarında en iyi tahmin performansını XG-Boost algoritması göstermiştir. Kiriş burulma, kolon yük ve

kolon moment mukavemeti çalışmalarında en iyi tahmin performansını Bagging-Dt algoritması göstermiştir. Ancak kiriş burulma, kolon yük ve kolon moment mukavemeti çalışmalarında XG-Boost algoritmasının R^2 değeri oldukça yüksek ve Bagging-Dt algoritması R^2 değerine çok yakındır. DVR gibi makine öğrenimi algoritmaları, oldukça doğrusal olmayan karmaşık problemler için uygun bir alternatif olabilir (Kurtoğlu ve diğ., 2022). Bu görüşe zıt olarak, yapılan çalışmada diğer veri setlerine göre oldukça az sayıda veri içeren kiriş eğilme etkisi çalışmasında DVR algoritması en iyi tahmini vermiştir. Ayrıca tahmin edilen sonuçların yalnızca kullanılan veri tabanı aralığında geçerli olduğu unutulmamalıdır. Elde edilen sonuçlar ve yapılan yorumların verilere dayalı olduğunu ve yanlış sunulan veriler dahil edildiyse kapasite tahminin sağlıklı olamayacağı gözden kaçmamalıdır. Çizelge 6.25’de genel olarak ve kısaca elde edilen sonuç özetlenmiştir.

Çizelge 6.25. Bütün çalışma grupları sonuç özeti

Deney Türü	Numune Sayısı	Eğitim /Test	En İyi Sonucu Veren Algoritma	Başarı Yüzdesi (R^2 değeri, %)
Kiriş Kesme Etkisi	156	104/52	XG-Boost	93.56
Kiriş Eğilme Etkisi	60	40/20	Destek Vektör Regresyon	70.14
Kiriş Burulma Etkisi	104	69/35	Bagging-DT	94.48
Döşeme Eğilme Etkisi	35	23/12	XG-Boost	89.58
Döşeme Zımbalama Etkisi	70	46/24	XG-Boost	79.29
Kolon Moment Etkisi	42	28/14	Bagging-DT	98.26
Kolon Eksenel Yük Etkisi	81	54/27	Bagging-DT	98.64
Perde Eksenel Yük Etkisi	91	60/31	AdaBoost	83.03

7. SONUÇLAR

Betonarme yapılarda herhangi bir sebeple hasar görmüş veya imalatı esnasında yapılan hatalardan dolayı kusurlu olan betonarme taşıyıcı elemanların kapasitelerini artırmak için pek çok güçlendirme metodu kullanılmaktadır. ‘‘Lifli Polimerlerle Güçlendirme’’ bu amaçla kullanılan yaygın bir metoddur. Lifli polimerlerin taşıyıcı elemanın kesit kapasitesine yapacağı katkı derecesi önem arz etmektedir. Bu katkının kolaylıkla tespit edilebilmesi amacıyla; özellikle lifli polimer uygulamaları ile kabul görmüş deneysel çalışmalara ait veri havuzundan çeşitli akıllı sistem uygulamaları ile tasarımcıların kullanabileceği bir arayüze sahip kullanıcı dostu bir yazılım geliştirilmesi bu çalışmanın önemini artırmaktadır.

Bu çalışmada, lifli polimerlerle güçlendirilmiş her türlü betonarme elemanın kapasite değerlerini büyük oranda tahmin edebilen makine öğrenmesi algoritmalarının tespiti için son yirmi yılda yapılmış güncel tüm makaleler taranarak bir veri havuzu oluşturulmuştur. Bu veri havuzunda kiriş, kolon, perde, döşeme gibi tüm taşıyıcı sistem elemanlarının lifli polimerler ile güçlendirilmesi ile ilgili yapılmış kesme, bileşik eğilme, eğilme, burulma, zımbalama verileri bulunmaktadır. Bu bağlamda literatürdeki değişik amaçlar için yapılmış çok sayıda deney verisi derlenmiş ve gruplara ayrılmış, her bir veri için farklı algoritmalar ile eleman kapasitelerinin tahminiyle ilgili fikir sahibi olunmuştur.

Bu çalışma ile kesme, eğilme, burulma etkisi altındaki kirişlerin; kolon moment ve eksenel yük etkisi altındaki kolonların; eğilme ve zımbalama etkisi altındaki döşemelerin, eksenel yük etkisi altındaki perdelerin taşıma kapasiteleri ÇLR, Karar Ağacı, BaggingDt., Rassal Orman, SVR, XGBoost, AdaBoost, GradientBoost makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Çalışmada kullanılan veri seti literatürdeki deneysel ve analitik çalışmalardan elde edilmiştir. Bu çalışmada; kesme etkisi altındaki kirişler için 156 adet veri seti, eğilme etkisi altındaki kirişler için 60 adet veri seti, burulma etkisi altındaki kirişler için 104 adet veri seti, eğilme etkisi altındaki döşemeler için 35 adet veri seti, zımbalama etkisi altındaki döşemeler için 70 adet veri seti, moment etkisi altındaki kolonlar için 42 adet veri seti, eksenel yük etkisi altındaki kolonlar için 81 adet veri seti, eksenel yük altındaki perdeler için 91 adet veri seti kullanılmıştır. Veri setleri ile ilgili ayrıntılı bilgilerin yer aldığı Çizelgeler ise Ek. Olarak sunulmuştur.

Makine öğrenmesi algoritmalarının kodlaması ‘Anaconda Navigator’ programında, Spyder (Python 3.11) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Verilerin işlenmesi için öncelikle gerekli kütüphaneler olan “Numpy” ve “Pandas” kütüphaneleri Python ortamına kurulmuştur. Deney setleri için her bir veri seti kendi içindeki algoritmalarla test edilmiştir. Her veri seti eğitim ve test seti olarak ikiye ayrılmıştır. Tahmin algoritmaları bir eğitim veri seti kullanılarak eğitilip öğrenme algoritması bu şekilde sağlanmıştır. Algoritmadaki test verileri kullanılarak model tahmin başarısı test edilmiştir. Veriler üzerinde rastgele bölme yöntemi kullanılarak 0,33 oranında test ölçüsü oluşturulmuştur. Yani tüm verinin 2/3’ü eğitim seti olarak, 1/3’ü ise test seti olarak "rastgele" olarak bölünmüştür. Algoritmaların her birinin ayrı ayrı tahmin sonuçları ve değerlendirme ölçüt değerleri her bölümde Çizelgeler ile verilmiştir. Ayrıca algoritma sonuçları grafiksel olarak da gösterilmiştir. Kiriş kesme, burulma, kolon eksenel yük, kolon moment, döşeme zımbalama çalışmalarında; R^2 değerinin yüksek, MAE ve RMSE değerlerinin düşük olduğu Bagging-Dt algoritması en başarılı tahmin sonucunu vermiştir. Döşeme eğilme mukavemeti çalışmasında en iyi tahmini XG-Boost algoritması vermiştir. Perde yük taşıma gücü çalışmasında en iyi tahmini AdaBoost algoritması vermiştir. Kiriş eğilme mukavemeti çalışmasında en iyi tahmin sonucunu SVR algoritması vermiştir. Buradaki en iyi tahmin değerinin ilk ölçütü R^2 değerinin %100’e en yakın değere sahip olmasıdır. R^2 değerinin yüksek olması modelin uyumlu olduğunu göstermektedir. İki değişken arasındaki farkı temsil eden MAE metriği, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farktır. Algoritma modeli başarısının iyi olması için MAE değerinin düşük olması beklenmektedir. Modelin başarılı olabilmesi için RMSE değerinin düşük olması beklenmektedir.

Kiriş kesme mukavemeti çalışmasında; R^2 değeri %93.56, MAE değeri 44.28 ve RMSE değeri 59.80 ile en iyi tahmin sonucunu XG-Boost algoritması vermiştir. Döşeme eğilme mukavemeti çalışmasında R^2 değeri %89.58, MAE değeri 11.08 ve RMSE değeri 13.57 ile en iyi tahmin sonucunu XG-Boost algoritması vermiştir. Döşeme zımbalama mukavemeti çalışmasında R^2 değeri %79.29, MAE değeri 83.46 ve RMSE değeri 109.44 ile en iyi tahmin sonucunu XG-Boost algoritması vermiştir. Kiriş burulma mukavemeti çalışmasında, R^2 değeri %94.48, MAE değeri 7.17 ve RMSE değeri 10.59 ile en iyi tahmin performansını Bagging-DT algoritması göstermiştir. Kolon moment taşıma gücü çalışmasında; R^2 puanı %98.26, MAE değeri 11,18 ve RMSE değeri 14.80 ile en iyi tahmin performansını Bagging-DT algoritması göstermiştir. Kolon yük taşıma gücü

çalışmasında; R^2 puanı %98.64, MAE değeri 78.15 ve RMSE değeri 200.25 ile en iyi tahmin performansını Bagging-DT algoritması göstermiştir. Perde yük taşıma gücü çalışmasında; R^2 değeri %83.03, MAE değeri 40.86 ve RMSE değeri 54.71 ile en iyi tahmini AdaBoost algoritması vermiştir. Kiriş eğilme mukavemeti çalışmasında R^2 puanı %70.14, MAE değeri 0.38 ve RMSE değeri 0.49 ile en iyi tahmin sonucunu DVR algoritması vermiştir.

Çizelge 6.18’de görüldüğü şekliyle, en fazla eğitim verisine sahip kiriş kesme etkisi veri grubunda en iyi tahmin sonucu beklenebilir. Ancak % 93.56 gibi yüksek bir başarıya sahip olmasına rağmen en yüksek tahmin başarısına sahip değildir. Çizelge 6.18 incelendiğinde veri seti sayısı ile tahmin başarısı arasında doğru orantı kurulamamaktadır.

Veri seti çizelgelerinin parametre özetleri incelendiğinde; öncelikli olarak kullanılan FRP malzemesinin elastisite modülü ve çekme dayanımı değerlerine göre, veri setinde yer alan çalışmalarda CFRP ile yapılan güçlendirme çalışmaları daha fazladır. Bu malzemenin üstün mekanik özelliğinden dolayı kullanımının, temininin daha çok olması, uygulamasının daha fazla yapılmasından dolayı nitelikli çalışanın daha çok olmasından dolayı daha fazla çalışma yapılmasına sebep olduğu söylenebilir. Buradan yola çıkılarak betonarme elemanların CFRP malzeme ile güçlendirilmesinde Bagging-Dt ve XG-Boost algoritması tahmin yönteminin kullanılması daha güvenilir sonuçlar elde etmemizi sağlayabilir, sonucuna varılabilir.

Karar ağacı algoritmasının hiçbir veri grubunda öncelikli olarak başarılı olmamasından yola çıkılarak, bu yöntemin daha az veri grubu içeren çalışmalarda kullanılması gerektiği sonucuna varılabilir.

Çoklu Lineer Regreyon algoritmasının R^2 tahmin değerinin oldukça düşük sonuçlanması, bu çalışmada kullanılan yani lineer olmayan veri gruplarına sahip çalışmalarda kullanılmasının doğru olmadığını göstermektedir.

Kullanılan veri gruplarında normalizasyon işleminin yapılması daha sağlıklı ve doğru sonuçların ortaya çıkma ihtimali olduğunu göstermektedir.

8. ÖNERİLER VE GELECEK ÇALIŞMALAR

1) Günümüzde makine öğrenmesi ve yapay zekanın gelişimi oldukça hızlı olmaktadır. Bu tez çalışmasında derlenen ve makine öğrenmesi ile kapasite tahmini yapılan veri seti daha çok genişletilerek öğrenme kapasitesi arttırılabilir.

2) Literatürde çok farklı lifli polimer tipi, farklı epoksi ve ankraj detayları ile eleman bazlı güçlendirmelerde kullanılmaktadır. Özellikle epoksinin kapasitede önemli bir kazanım getirdiği açıktır. Hâlbuki güçlendirme yönetmeliklerinde bu durum ayrıntılı bir şekilde ele alınmamıştır. Yapay zekâ yöntemleri ile kullanılacak olan epoksinin optimizasyonu ve epoksinin etkisi irdelenebilir. Diğer parametrelere göre epoksinin etkinliği hassasiyet analizleri ile değerlendirilebilir. Bu durum yönetmelikler açısından da önemli olacaktır. Özellikle güçlendirme tasarımcıları epoksinin kullanımının kapasiteye olan etkisi konusunda çoğu zaman tahminde bulunsalarda gerçek davranış hakkında tam bir kestirim yapamamaktadırlar. Bu nedenle yapay zekânın tasarımcı için bu bağlamda bir yardımcı araç olması da oldukça önemlidir.

3) Betonarme taşıyıcı sistemlerde ve sistemi oluşturan elemanların düğüm noktalarında sistemin güçlendirilmesine yönelik yapılan çalışmaların takip edilerek, taranarak yeni bir veri seti olarak incelenip benzer ya da farklı sonuçlar elde edilmesi ve bunların farklı yorumlanması gibi durumlar ortaya çıkarabilir.

4) Mevcut çalışma, FRP ile güçlendirilmiş betonarme elemanların kapasitesini tahmin etmek için MÖ modelleri kullanmıştır. Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), Gri Kurt Optimizasyonu (GWO), İnsan Saadet Algoritması (HFA) gibi çeşitli meta-sezgisel optimizasyon tekniklerinin kullanılması önemle tavsiye edilir. Ayrıca SHAP ve PDP gibi yöntemlerle modeller daha iyi yorumlanabilir.

9. KAYNAKLAR

- Abdel-Jaber M. S., Walker P. R., ve Hutchinson A. R.,2003, Shear strengthening of reinforced concrete beams using different configurations of externally bonded carbon fibre reinforced plates. *Materials and Structures* , 36, 291–301.
- Abduljalil B. S. ve Sarsam K. F.,2012, Torsional Behavior of Reinforced Concrete T Beams Strengthened with CFRP Strips. In *Tech. Journal*, Vol. 30, Issue 9.
- Abdullah, A., Bailey, C. G., ve Wu, Z. J., 2013, Tests investigating the punching shear of a column-slab connection strengthened with non-prestressed or prestressed FRP plates, *Construction and Building Materials*, 48, 1134–1144.
- ACI 440, 2008. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute Committee 440, ACI 440, Miami.
- Alabdulhady M.Y. ve Sneed L.H.,2019, *Construction and Building Materials* 205,148–163.
- Adhikary, B. B., ve Mutsuyoshi, H., 2004, Behavior of Concrete Beams Strengthened in Shear with Carbon-Fiber Sheets, *Journal of Composites for Construction*, 8(3), 258–264.
- Alkan M.,2019 Makine Öğrenimi Nedir?, *Türkiye'nin Endüstri 4.0 Platformu*, <https://www.endustri40.com/makine-ogrenimi-nedir>, Ziyaret tarihi: 10 Şubat 2021.
- Akbarzadeh, H., ve Maghsoudi, A. A., 2010, Experimental and analytical investigation of reinforced high strength concrete continuous beams strengthened with fiber reinforced polymer, *Materials and Design*, 31(3), 1130–1147.
- Akbarzadeh H., ve Maghsoudi A. A.,2011, Flexural Strengthening of RC Continuous Beams Using Hybrid FRP Sheets. *Advances in FRP Composites in Civil Engineering - Proceedings of the 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2010*, 739–743.
- Aksoylu, C.,2022, Shear strengthening of reinforced concrete beams with minimum CFRP and GFRP strips using different wrapping technics without anchoring application. *Steel and Composite Structures*, 44(6), 845.
- Aksoylu C., Yazman Ş., Özkılıç Y. O., Gemi, L., ve Arslan, M. H.,2020, Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite. *Composite Structures*, 249.
- Alabdulhady M. Y. ve Sneed L. H.,2019, Torsional strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composites: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 205, 148–163.

- Alagusundaramoorthy P., Harik I. E., ve Choo C. C.,2003, Flexural Behavior of R/C Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets or Fabric. *Journal of Composites for Construction*, 7(4), 292–301.
- Al-Amery R., ve Al-Mahaidi R.,2006, Coupled flexural-shear retrofitting of RC beams using CFRP straps. *Composite Structures*, 75(1–4), 457–464.
- Alay, D. S., 2022, Beton dayanımının farklı CFRP tipleri ile güçlendirilmiş kesme kırılganlığının davranışına olan etkisi, Yüksek Lisans, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Al-Bayati G., Al-Mahaidi R. ve Kalfat R.,2017, Torsional strengthening of reinforced concrete beams using different configurations of NSM FRP with epoxy resins and cement-based adhesives. *Composite Structures*, 168, 569–581.
- Al-Ghazawi O. ve Al-Rousan R. Z.,2020, Response of Reinforced Concrete Slabs Strengthened with CFRP. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 13(6), 125–129.
- Almusallam T. H. ve Al-Salloum Y. A.,2001, Ultimate strength prediction for RC beams externally strengthened by composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 32(7), 609–619.
- Alshihri M. M., Azmy A. M., ve El-Bisy M. S.,2009, Neural networks for predicting compressive strength of structural light weight concrete. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2214–2219.
- Altin S., Anil Ö., Koprman Y. ve Kara M. E.,2013, Hysteretic behavior of RC shear walls strengthened with CFRP strips. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 321–329.
- Altin S., Anil Ö., Koprman Y., Mertoğlu Ç. ve Kara M. E.,2010, Improving shear capacity and ductility of shear-deficient RC beams using CFRP strips. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(19), 2975–2991.
- Alzate A., Arteaga Á., de Diego A. ve Perera R., 2009, Shear strengthening of reinforced concrete beams using fibre reinforced polymers (FRP). *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13(9), 1051–1060.
- Ameli M., Ronagh H. R. ve Dux P. F., 2007, Behavior of FRP Strengthened Reinforced Concrete Beams under Torsion. *Journal of Composites for Construction*, 11(2), 192–200.
- Anıl Ö. ve Belgin Ç., 2009, Review of Bond-Strength Models and Application on CFRP to-Concrete Bonded Joints Across Crack, *Science and Engineering of Composite Materials*, 15(2),141-158.
- Anıl Ö. ve Belgin Ç., 2010, Anchorages Effects on CFRP-to-Concrete Bond Strength,*Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(4):539-557.

Anonim, Yalova Üniversitesi Polimer Mühendisliği Bölümü Notları.

Arabacı R. M., 2018, *Betonarme kirişlerin çelik levhalarla güçlendirilmesinin dayanım değişimine etkisinin araştırılması*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Arslan M. H. (2010, An evaluation of effective design parameters on earthquake performance of RC buildings using neural networks. *Engineering Structures*, 32(7), 1888–1898.

Arslan M. H., Ceylan M. ve Koyuncu T., 2012, An ANN approaches on estimating earthquake performances of existing RC buildings. *Neural Network World*, 22(5), 443–458.

Ashour A. F., El-Refaie S. A., ve Garrity S. W., 2004, Flexural strengthening of RC continuous beams using CFRP laminates. *Cement and Concrete Composites*, 26(7), 765–775.

Askandar, N. H., Mahmood, A. D., ve Kurda, R., 2022, Behaviour of RC beams strengthened with FRP strips under combined action of torsion and bending. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(9), 4263–4279.

Askander N. H., 2024, Machine Learning Models for Predicting Flexural Behavior of FRP-Strengthened RC Beams, *Passer Journal*, Passer 6 ,Issue 1,198-213.

Asteris, P. G., Tsaris, A. K., Cavaleri, L., Repapis, C. C., Papalou, A., Di Trapani, F., ve Karypidis, D. F., 2016, Prediction of the fundamental period of infilled rc frame structures using artificial neural networks. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2016.

Ayash, N. M., Abd-Elrahman, A. M., ve Soliman, A. E., 2020, Repairing and strengthening of reinforced concrete cantilever slabs using Glass Fiber–Reinforced Polymer (GFRP) wraps. *Structures*, 28, 2488–2506.

Aytaç, E., 2011, CFRP Güçlendirme Malzemesi ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.

Bae, S.-W., ve Belarbi, A. 2013, Behavior of Various Anchorage Systems Used for Shear Strengthening of Concrete Structures with Externally Bonded FRP Sheets. *Journal of Bridge Engineering*, 18(9), 837–847.

Baggio, D., Soudki, K., ve Noël, M., 2014, Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems. *Construction and Building Materials*, 66, 634–644.

Baran A. ve Anıl Ö., 2010, Nonlinear Finite Element Analysis of Effective CFRP Bonding Length and Strain Distribution along Concrete CFRP Interface, *Techno Press, Computers and Concrete an International Journal*, 7(5):427 -453.

- Başığit, C., Akkaş, A. K., ve Kurtarıcı, M. N., 2014, Betonların Radyasyon Zırh Kalınlıklarının Yapay Sinir Ağları ve Çoklu Regresyon Metotları ile Tahmini. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16(1).
- Belarbi, A., Bae, S. W., ve Brancaccio, A., 2012, Behavior of full-scale RC T-beams strengthened in shear with externally bonded FRP sheets. *Construction and Building Materials*, 32, 27–40.
- Binici, B., ve Bayrak, O., 2003, Punching Shear Strengthening of Reinforced Concrete Flat Plates Using Carbon Fiber Reinforced Polymers. *Journal of Structural Engineering*, 129(9), 1173–1182.
- Bousias, S., Spathis, A. L., ve Fardis, M. N., 2007, Seismic retrofitting of columns with lap spliced smooth bars through FRP or concrete jackets. *Journal of Earthquake Engineering*, 11(5), 653–674.
- Bousselham, A., ve Chaallal, O., 2006, Behavior of Reinforced Concrete T-Beams Strengthened in Shear with Carbon Fiber-Reinforced Polymer— An Experimental Study. *ACI Structural Journal*, 103(3).
- Bousselham, A., ve Chaallal, O., 2006, Effect of transverse steel and shear span on the performance of RC beams strengthened in shear with CFRP. *Composites Part B: Engineering*, 37(1), 37–46.
- Bukhari, I. A., Vollum, R. L., Ahmad, S., ve Sagaseta, J., 2010, Shear strengthening of reinforced concrete beams with CFRP. In *Magazine of Concrete Research* (Vol. 62, Issue 1, pp. 65–77).
- British Standards Institution, U. (BS 8110), 1997, Structural Use of Concrete. Part I: Code of Practice for Design and Construction, British Standard, ISBN 978 0 580 59893 7.
- Cakiroglu, C., Islam, K., Bekdaş, G., Kim, S., ve Geem, Z. W., 2022, Interpretable Machine Learning Algorithms to Predict the Axial Capacity of FRP-Reinforced Concrete Columns. *Materials*, 15(8).
- Çankaya, G., Arslan, M., ve Ceylan, M., 2012, Statistical methods Statistical Methods for Processing and Analysis of Digital Images Determining compressive strength of concrete. *Applied Statistics 2012 International Conference*.
- Çankaya, G., Hakan, M., ve Ceylan, M., 2013, Görüntü İşleme ve Yapay Sinir Ağları Yöntemleri ile Betonun Basınç Dayanımının Belirlenmesi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1(1), 1–12.
- Cao, S. Y., Chen, J. F., Teng, J. G., Hao, Z., ve Chen, J., 2005, Debonding in RC Beams Shear Strengthened with Complete FRP Wraps. *Journal of Composites for Construction*, 9(5), 417–428.
- Carolín, A., 2001, *Strengthening of concrete structures with CFRP-Shear strengthening and full-scale applications* [Luleå University of Technology].

- Challal O. ve Shahawy M., 2000, Performance of fiber-reinforced polymer-wrapped reinforced concrete column under combined axial-flexural loading, *ACI Structural Journal* 97(4), 659–668
- Celep Z. ve Kumbasar N., 2000, Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, *Rehber Matbaacılık*, İstanbul.
- Ceroni, F., 2010, Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1547–1559.
- Cevik, A., 2011, Modeling strength enhancement of FRP confined concrete cylinders using soft computing. *Expert Systems with Applications*, 38(5), 5662–5673.
- Cha, Y. J., ve Buyukozturk, O., 2015, Structural damage detection using modal strain energy and hybrid multiobjective optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30(5), 347–358.
- Chai, H. K., Majeed, A. A., ve Allawi, A. A., 2015, Torsional Analysis of Multicell Concrete Box Girders Strengthened with CFRP Using a Modified Softened Truss Model. *Journal of Bridge Engineering*, 20(8).
- Chalioris, C. E., 2008, Torsional strengthening of rectangular and flanged beams using carbon fibre-reinforced-polymers - Experimental study. *Construction and Building Materials*, 22(1), 21–29.
- Chatterjee, S., Sarkar, S., Hore, S., Dey, N., Ashour, A. S., ve Balas, V. E., 2017, Particle swarm optimization trained neural network for structural failure prediction of multistoried RC buildings. *Neural Computing and Applications*, 28(8), 2005–2016.
- Chen, G. M., Zhang, Z., Li, Y. L., Li, X. Q., ve Zhou, C. Y., 2016, T-section RC beams shear-strengthened with anchored CFRP U-strips. *Composite Structures*, 144, 57–79.
- Chen, T., ve Guestrin, C., 2016, XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 13-17-August-2016, 785–794.
- Chennareddy, R., ve Taha, M. M. R., 2017, Effect of Combining Near-Surface-Mounted and U-Wrap Fiber-Reinforced Polymer Strengthening Techniques on Behavior of Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, 114(3).
- Chiew, S.-P., Sun, Q., ve Yu, Y., 2007, Flexural Strength of RC Beams with GFRP Laminates. *Journal of Composites for Construction*, 11(5), 497–506.
- Chou, J. S., Ngo, N. T., ve Chong, W. K., 2017, The use of artificial intelligence combiners for modeling steel pitting risk and corrosion rate. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 65, 471–483.

- Civalek, O., ve Ulker, M., 2004, Harmonic differential quadrature (HDQ) for axisymmetric bending analysis of thin isotropic circular plates. *Structural Engineering and Mechanics*, 17(1), 1–14.
- Colomb, F., Tobbi, H., Ferrier, E., ve Hamelin, P., 2008, Seismic retrofit of reinforced concrete short columns by CFRP materials. *Composite Structures*, 82(4), 475–487.
- Cruz-Noguez, C. A., Lau, D. T., ve Sherwood, E. G., 2014, Seismic Behavior of RC Shear Walls with Externally Bonded FRP Sheets: Analytical Studies. *Journal of Composites for Construction*, 18(5).
- Daniel A. Pohoryles D., Jose M., Tiziana R., Humberto V., 2019, Seismic Retrofit Schemes with FRP for Deficient RC Beam–Column Joints: State-of-the-Art Review *Journal of Composites for Construction*, vol. 23.
- Dantas, A. T. A., Batista Leite, M., ve De Jesus Nagahama, K., 2013, Prediction of compressive strength of concrete containing construction and demolition waste using artificial neural networks. *Construction and Building Materials*, 38, 717–722.
- de Diego, A., Arteaga, Á., ve Fernández, J., 2019, Strengthening of square concrete columns with composite materials. Investigation on the FRP jacket ultimate strain. *Composites Part B: Engineering*, 162, 454–460.
- De Luca, A., Nardone, F., Matta, F., Nanni, A., Lignola, G. P., ve Prota, A., 2011, Structural Evaluation of Full-Scale FRP-Confined Reinforced Concrete Columns. *Journal of Composites for Construction*, 15(1), 112–123.
- Deifalla, A., Awad, A., ve Elgarhy, M., 2013, Effectiveness of externally bonded CFRP strips for strengthening flanged beams under torsion: An experimental study. *Engineering Structures*, 56, 2065–2075.
- Delnavaz, A., ve Hamidnia, M., 2016, Analytical investigation on shape configuration of CFRP strips on lateral loading capacity of strengthened RC shear wall. *Structural Concrete*, 17(6), 1059–1070.
- Demirkol Z., 2022, Herkes İçin Yapay Zekâ, *Genç Destek Yayınları*, 376.
- Deniaud, C., ve Roger Cheng, J. J., 2003, Reinforced Concrete T-Beams Strengthened in Shear with Fiber Reinforced Polymer Sheets. *Journal of Composites for Construction*, 7(4), 302–310.
- Dirar, S. ; Lees, ve Morley., 2012, Precracked Reinforced Concrete T-Beams Repaired in Shear with Bonded Carbon Fiber-Reinforced Polymer Sheets. *ACI Structural Journal*, 109(2), 215–224.
- Diri, B. (2014). *Makine Öğrenmesine Giriş (Machine Learning-ML) Doğal Dil İşlemede Eğilimler*.
- Doğan, G., 2018, *Betonarme kolonların deprem sonrası hasar seviyelerinin akıllı sistem tabanlı bir yöntemle belirlenmesi*. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Dogan, G., 2024, Machine learning-based shear strength prediction of exterior RC beam-column joints. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*.
- Doğan, G., ve Arslan, M. H., 2022, Determination of Punching Shear Capacity of Concrete Slabs Reinforced with FRP Bars Using Machine Learning. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(10), 13111–13137.
- Dong, J., Wang, Q., ve Guan, Z., 2013, Structural behaviour of RC beams with external flexural and flexural-shear strengthening by FRP sheets. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 604–612.
- Doran, B., Yetilmezsoy, K., ve Murtazaoglu, S., 2015, Application of fuzzy logic approach in predicting the lateral confinement coefficient for RC columns wrapped with CFRP. *Engineering Structures*, 88, 74–91.
- Dowaksa, Karbon Lifli Polimer Kompozitler İle Betonarme Yapıların Güçlendirilmesi, 2019.
- Drew P. J., ve Monson J. R. T., 2000, Artificial neural networks, *Surgery*, 127(1), 3–11.
- Eid, R., ve Paultre, P., 2017, Compressive behavior of FRP-confined reinforced concrete columns. *Engineering Structures*, 132, 518–530.
- El-Ghandour, A. A., 2011, Experimental and analytical investigation of CFRP flexural and shear strengthening efficiencies of RC beams. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1419–1429.
- El-Maaddawy, T., ve Chekfeh, Y. (2013, Shear Strengthening of T-Beams with Corroded Stirrups Using Composites. *ACI Structural Journal*, 110(5).
- El-Saikaly, G., Chaallal, O., ve Benmokrane, B., 2017, CoMParison of Anchorage Systems for RC T-beams Strengthened in Shear with EB-CFRP. *6th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures*, 1–5.
- El-Saikaly, G., Godat, A., ve Chaallal, O., 2015, New Anchorage Technique for FRP Shear-Strengthened RC T-Beams Using CFRP Rope. *Journal of Composites for Construction*, 19(4).
- El-Salakawy, E., Soudki, K., ve Polak, M. A., 2004, Punching Shear Behavior of Flat Slabs Strengthened with Fiber Reinforced Polymer Laminates. *Journal of Composites for Construction*, 8(5), 384–392.
- El-Sokkary, H., ve Galal, K., 2019, Performance of Eccentrically Loaded Reinforced-Concrete Masonry Columns Strengthened Using FRP Wraps. *Journal of Composites for Construction*, 23(5).
- Elwan, S. K., 2017, Torsion strengthening of RC beams using CFRP (parametric study). *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(4), 1273–1281.

- Erdogan, H., Binici, B., ve Ozcebe, G., 2010, Punching shear strengthening of flat-slabs with CFRP dowels. *Magazine of Concrete Research*, 62(7), 465–478.
- Erdogan, H., Binici, B., ve Ozcebe, G. (2011). Effect of column rectangularity on CFRP-strengthened RC flat plates. *Magazine of Concrete Research*, 63(7), 511–525.
- Erdogan, H., Zohrevand, P., Asce, M., Mirmiran, A., ve Asce, F., 2013, *Effectiveness of Externally Applied CFRP Stirrups for Rehabilitation of Slab-Column Connections*.
- Esfahani M. R., Kianoush M. R., ve Tajari, A. R., 2007, Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets, *Engineering Structures*, 29(10), 2428–2444.
- Fang, L., Zhou, Y., Yi, D., ve Yi, W., 2020, Experimental Study on Flexural Capacity of Corroded RC Slabs Reinforced with Basalt Fiber Textile. *Appl. Sci*, 2021, 144.
- FarghalO. A., 2012, Shear Strengthening Of R. C. T-Beams By Means Of Cfrp Sheets. In *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 40, Issue 5.
- FIB, 2001, “Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures”, (CEB-FIP) Technical Report, Bulletin 14.
- Foster, R. M., Brindley, M., Lees, J. M., Ibell, T. J., Morley, C. T., Darby, A. P., ve Evernden, M. C., 2017, Experimental Investigation of Reinforced Concrete T-Beams Strengthened in Shear with Externally Bonded CFRP Sheets. *Journal of Composites for Construction*, 21(2).
- Frederick, F. F. R., Sharma, U. K., ve Gupta, V. K., 2015, Effect of end anchorage in external CFRP confinement on shear damaged RC beams. *Procedia Engineering*, 125, 953–958.
- Fu, B., Chen, G. M., ve Teng, J. G. (2017). Mitigation of intermediate crack debonding in FRP-plated RC beams using FRP U-jackets. *Composite Structures*, 176, 883–897.
- Galal, K., ve Mofidi, A. (2010). Shear Strengthening of RC T-Beams Using Mechanically Anchored Unbonded Dry Carbon Fiber Sheets. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24(1), 31–39.
- Gamino, A. L., A O Sousa, J. L., Manzoli, O. L., Bittencourt, T. N., Almeida Prado, A., ve Paulo-SP, S. (2010). *R/C Structures Strengthened With CFRP Part II: Analysis of Shear Models Estruturas de Concreto Reforçadas com PRFC Parte II: Análise dos Modelos de Cisalhamento*.
- Garip, Z. Ş. (2011). *Yapay Sinir Ağları ile Mevcut Yapıların Deprem Riski Açısından Durum Tespiti*. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ghobarah, A., Ghorbel, M. N., ve Chidiac, S. E. (2002). Upgrading Torsional Resistance of Reinforced Concrete Beams Using Fiber-Reinforced Polymer. *Journal of Composites for Construction*, 6(4), 257–263.

- Giovanis, D. G., Fragiadakis, M., ve Papadopoulos, V. (2016). Epistemic uncertainty assessment using Incremental Dynamic Analysis and Neural Networks. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(2), 529–547.
- Godat, A., ve Chaallal, O. (2013). Strut-and-tie method for externally bonded FRP shear-strengthened large-scale RC beams. *Composite Structures*, 99, 327–338.
- Goodfellow I., Bengio Y., ve Courville A., 2017, Deep Learning. Massachusetts, *The MIT Press Cambridge Massachusetts London, England*.
- Gollapudi S., 2016, Practical Machine Learning, Birmingham, U.K.
- González, S., García, S., Del Ser, J., Rokach, L., ve Herrera, F. (2020). A practical tutorial on bagging and boosting based ensembles for machine learning: Algorithms, software tools, performance study, practical perspectives and opportunities. *Information Fusion*, 64, 205–237.
- Grace, N., Sayed, G., Soliman, A., ve Saleh, K. (1999). Strengthening Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Laminates. *ACI Structural Journal*, 96(5).
- Greco, R., Marano, G. C., ve Fiore, A. (2016). Performance–cost optimization of tuned mass damper under low-moderate seismic actions. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 25(18), 1103–1122.
- Habibi, O., Khaloo, A., ve Abdoos, H. (2021). Seismic behavior coMParison of RC shear walls strengthened using FRP composites and steel elements. *Scientia Iranica*, 28(3), 1167–1181.
- Hadhood, A., Gouda, M. G., Agamy M. H., Mohamed, H. M. ve veSherif, A., 2020, Torsion in concrete beams reinforced with GFRP spirals, *Engineering Structures*, 206, 110174.
- Hakim, S. J. S., Abdul Razak H. veve Ravanfar, S. A., 2015, Fault diagnosis on beam-like structures from modal parameters using artificial neural networks, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 76, 45–61.
- Harajli, M. H. veve Soudki K. A., 2003, Shear Strengthening of Interior Slab–Column Connections Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Sheets, *Journal of Composites for Construction*, 7(2), 145–153.
- Harajli M.H. ve Rteil A.A., 2004, Effect of confinement using fibre-reinforced polymer or fibre-reinforced concrete on seismic performance of gravity load-designed columns, *ACI Structural Journal*, 101, 47–56.
- Hashemi, S., ve Al-Mahaidi, R., 2012, Flexural performance of CFRP textile-retrofitted RC beams using cement-based adhesives at high temperature. *Construction and Building Materials*, 28(1), 791–797.
- Hastie, T., Tibshirani, R., ve Friedman, J., 2009, *Unsupervised Learning*

- Hawileh, R. A., Rasheed, H. A., Abdalla, J. A., ve Al-Tamimi, A. K., 2014, Behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded hybrid fiber reinforced polymer systems. *Materials and Design*, 53, 972–982.
- Herwig, A., ve Motavalli, M., 2012, Axial Behavior of Square Reinforced Concrete Columns Strengthened with Lightweight Concrete Elements and Unbonded GFRP Wrapping. *Journal of Composites for Construction*, 16(6), 747–752.
- Hii, A. K. Y., ve Al-Mahaidi, R., 2006, Experimental Investigation on Torsional Behavior of Solid and Box-Section RC Beams Strengthened with CFRP Using Photogrammetry. *Journal of Composites for Construction*, 10(4), 321–329.
- Hiotakis, S., Lau, D., ve Londono, N., 2004, Research on seismic retrofit and rehabilitation of reinforced concrete shear walls using FRP materials. *Carleton University*, 17–26.
- Husain, M., Eisa, A. S., ve Hegazy, M. M., 2019, Strengthening of reinforced concrete shear walls with openings using carbon fiber-reinforced polymers. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 11(2), 129–150.
- Iacobucci, R. D., Sheikh, S. A., ve Bayrak, O., 2003, Retrofit of Square Concrete Columns with Carbon Fiber-Reinforced Polymer for Seismic Resistance. *Structural Journal*, 100(6), 785–794.
- Ibrahim, N., Raja Abdullah, R., ve Saripan, M., 2009, Artificial Neural Network Approach in Radar Target Classification. *Journal of Computer Science*, 5(1), 23–32.
- Ilkhani, M. H., Moradi, E., ve Lavasani, M., 2017, Calculation of Torsion Capacity of the Reinforced Concrete Beams Using Artificial Neural Network. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 1(2), 08–18.
- Ilkhani, M. H., Naderpour, H., ve Kheyroddin, A., 2021, Experimental investigation on behavior of FRP-strengthened RC beams subjected to combined twisting-bending moments. *Engineering Structures*, 242.
- Ilki A., Peker Ö., Karamuk E., Demir C. ve Kumbasar N., 2008, FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns, *J Mater Civil Eng.*, 20, 169–88.
- Inel, M., 2007, Modeling ultimate deformation capacity of RC columns using artificial neural networks. *Engineering Structures*, 29(3), 329–335.
- Islam, M. R., Mansur, M. A., ve Maalej, M., 2005, Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems. *Cement and Concrete Composites*, 27(3), 413–420.
- Jafarian, N., Mostofinejad, D., ve Naderi, A., 2020, Effects of FRP grids on punching shear behavior of reinforced concrete slabs. *Structures*, 28, 2523–2536.

- Janwaen, W., Barros, J. A. O., ve Costa, I. G., 2020, New Hybrid FRP Strengthening Technique for Rectangular RC Columns Subjected to Eccentric Compressive Loading. *Journal of Composites for Construction*, 24(5).
- Jayaprakash, J., Abdulsamed, A., Ashrabort, A., ve Choong, K., 2009, Experimental Investigation on Shear Resistance Behaviour of RC Precracked and Non-Precracked T-Beams using Discrete CFRP Strips. *International Journal of Integrated Engineering*, 1(2), 1–15.
- Jing, M., Raongjant, W., ve Li, Z., 2007, Torsional strengthening of reinforced concrete box beams using carbon fiber reinforced polymer. *Composite Structures*, 78(2), 264–270.
- Jumaat, M. Z., ve Alam, A., 2008, Experimental and Analytical Investigations on the Structural Behaviour of Steel Plate and CFRP Laminate Flexurally Strengthened Reinforced Concrete Beams. *Journal of Applied Sciences*, 8(23), 4383–4389.
- Kabashi, N., Basha, R., Krasniqi, C., ve Nushi, V., 2014, Strengthening the Concrete Columns Wrapped With Fiber Reinforced Polymers. *International Conference on Civil Engineering, Energy and Environment*.
- Kandekar, S. B., ve Talikoti, R. S. (2018). Study of torsional behavior of reinforced concrete beams strengthened with aramid fiber strips. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 10(4), 465–474.
- Kasimzade, A. A., ve Tuhta, S., 2012, Stochastic Parametric System Identification Approach For Validation Of Finite Element Models: Industrial Applications, In *TWMS Jour. Pure Appl. Math.*, Issue 1.
- Keleşoğlu, Ö., 2006, Yapay Sinir Ağları ile Betonarme Kiriş Kesitlerin Analizi. *İMO Teknik Dergi*, 260, 3935–3942.
- Khalaf Mohaisen, S., 2019, Experimental Study of Continuous RC Beams Strengthened with CFRP Fabrics Under Torsion. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(01), 22–36.
- Khalifa, A., ve Nanni, A., 2000, Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites. *Cement and Concrete Composites*, 22(3), 165–174.
- Khan M., Khan A., Khan A. U., Shakeel M., Khan K., Alabduljabbar H., Najeh T., Yaser ve Gamil Y., 2024, Intelligent prediction modeling for flexural capacity of FRP-strengthened reinforced concrete beams using machine learning algorithms, Contents lists available at ScienceDirect, Heliyon 10.
- Kim, Y., Ghannoum, W. M., ve Jirsa, J. O., 2015, Shear behavior of full-scale reinforced concrete T-beams strengthened with CFRP strips and anchors. *Construction and Building Materials*, 94, 1–9.

- Köroğlu, M. A., Ceylan, M., Arslan, M. H., ve Ilki, A., 2012, Estimation of flexural capacity of quadrilateral FRP-confined RC columns using combined artificial neural network. *Engineering Structures*, 42, 23–32.
- Kotynia, R., Lasek, K., ve Staskiewicz, M., 2014, Flexural Behavior of Preloaded RC Slabs Strengthened with Prestressed CFRP Laminates. *Journal of Composites for Construction*, 18(3).
- Koutas, L., Triantafillou, T. C., ve Asce, M., 2013, *Use of Anchors in Shear Strengthening of Reinforced Concrete T-Beams with FRP*.
- Koyun, A., ve Afşin, E., 2017, Derin Öğrenme ile İki Boyutlu Optik Karakter Tanıma. *TBV Journal of Computer Science and Engineering*, 10(1), 11–14.
- Kurtoğlu, A. E., Anil, Ö., ve Çevik, A., 2022, A machine-learning-based constitutive bond-slip model for anchored CFRP strips externally bonded on concrete members. *Structural Concrete*, 23(3), 1828–1844.
- Lee H. K., Cheong S. H., Ha S. K., ve Lee C. G., 2011, Behavior and performance of RC T-section deep beams externally strengthened in shear with CFRP sheets. *Composite Structures*, 93(2), 911–922.
- Lee, S., ve Lee, C., 2014, Prediction of shear strength of FRP-reinforced concrete flexural members without stirrups using artificial neural networks. *Engineering Structures*, 61, 99–112.
- Li, L. J., Guo, Y. C., Liu, F., ve Bungey, J. H., 2006, An experimental and numerical study of the effect of thickness and length of CFRP on performance of repaired reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 20(10), 901–909.
- Lombard, J. C., Lau, D. T., ve Foo, S., 1999, Experimental study of reinforced concrete shear walls strengthened with fibre reinforced plastic sheets. *8th Canadian Conference on Earthquake Engineering*.
- Ma, S., Bunnori, N. M., ve Choong, K. K., 2022, Torsional behaviour of RC box beams strengthened by CFRP under combined shear and torsion. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 175(12), 950–964.
- Mahmoud M. R. Taha ve Nigel G. S., 2003, New Concrete Anchors for Carbon Fiber Reinforced Polymer Post-Tensioning Tendons Part 1: State-of-the-Art Review/Design, *ACI Structural Journal*, 100, S10.
- Mahmoud, H. S., Hawileh, R. A., ve Abdalla, J. A., 2021, Strengthening of high strength reinforced concrete thin slabs with CFRP laminates. *Composite Structures*, 275.
- Makine Öğrenmesi Nedir?, <https://azure.microsoft.com/tr-tr/overview/whatis-machine-learning-platform/>, Ziyaret tarihi: 10 Şubat 2021.

- Makine Öğrenimi Nedir?, Proente Otomasyon, <https://proente.com/makine-ogrenimi-nedir/>, Ziyaret tarihi: 10 Şubat 2021.
- Maraş M.M., 2021, Betonarme Yapıların Güçlendirilmesinde Kullanılan FRP Kompozitin Yapısal Performansa Etkisi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 23, 108-119,
- Memon, M. S., ve Sheikh, S. A., 2005, Seismic Resistance of Square Concrete Columns Retrofitted with Glass Fiber-Reinforced Polymer. *ACI Structural Journal*, 102(5).
- Mertoğlu Ç., Anıl Ö. ve Durucan C., 2016, Bond slip behavior of anchored CFRP strips on concrete surfaces, 123: 553-564.
- Micelli, F., Annaiah, R. H., ve Nanni, A., 2002, Strengthening of Short Shear Span Reinforced Concrete T Joists with Fiber-Reinforced Plastic Composites. *Journal of Composites for Construction*, 6(4), 264–271.
- Mirmiran, A., Zagers, K. ve Yuan, W., 2000, Nonlinear Finite Element Modeling of Concrete Confined by Fiber Composites, *Finite Elements in Analysis and Design*, 35, 79-96.
- Mofidi, A., ve Chaallal, O., 2014, Tests and Design Provisions for Reinforced-Concrete Beams Strengthened in Shear Using FRP Sheets and Strips. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(2), 117–128.
- Mofidi, A., Thivierge, S., Chaallal, O., ve Shao, Y., 2014, Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Shear Using L-Shaped CFRP Plates: Experimental Investigation. *Journal of Composites for Construction*, 18(2).
- Mohammadizadeh, M. R., Fadaee, M. J., ve Ronagh, H. R., 2009, Improving Torsional Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fibre Reinforced Polymer Composite. In *Iranian Polymer Journal* (Vol. 18, Issue 4).
- Mohammed M., Khan M. B. ve Bashier E.B.M., 2016, Machine Learning Algorithms and Applications, 226.
- Morfidis, K., ve Kostinakis, K., 2018, Approaches to the rapid seismic damage prediction of r/c buildings using artificial neural networks. *Engineering Structures*, 165, 120–141.
- Mosallam, A. S., ve Banerjee, S., 2007, Shear enhancement of reinforced concrete beams strengthened with FRP composite laminates. *Composites Part B: Engineering*, 38(5–6), 781–793.
- Moshiri, N., Czaderski, C., Mostofinejad, D., Hosseini, A., Sanginabadi, K., Breveglieri, M., ve Motavalli, M., 2020, Flexural strengthening of RC slabs with nonprestressed and prestressed CFRP strips using EBROG method. *Composites Part B: Engineering*, 201.
- Nguyen-Minh, L., Vo-Le, D., Tran-Thanh, D., Pham, T. M., Ho-Huu, C., ve Rovňák, M., 2018, Shear capacity of unbonded post-tensioned concrete T-beams strengthened with CFRP and GFRP U-wraps. *Composite Structures*, 184, 1011–1029.

- Ni, G., Liu, B., Li, X., ve Yan, W., 2011, Experimental Study on Concrete T-Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets on Three Sides. *Systems Engineering Procedia*, 1, 69–73.
- Nosho K., Stanton J., ve MacRae G., 1996, Retrofit of rectangular re-inforced concrete columns using tonen forca tow sheet carbon fiberwrapping, *Seattle Univ. of Washington*, 96-2.
- Norris, T., Saadatmanesh, H., ve Ehsani, M. R., 1997, Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets. *Journal of Structural Engineering*, 123(7), 903–911.
- Obaidat, Y. T., Ashteyat, A. M., ve Obaidat, A. T., 2020, Performance of RC Beam Strengthened with NSM-CFRP Strip Under Pure Torsion: Experimental and Numerical Study. *International Journal of Civil Engineering*, 18(5), 585–593.
- Obaidat, Y. T., Heyden, S., Dahlblom, O., Abu-Farsakh, G., ve Abdel-Jawad, Y., 2011, Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates. In *Construction and Building Materials* (Vol. 25, Issue 2, pp. 591–597).
- Okay, O. (2003). *Polimerik Malzemelerin Bugünü ve Yarını*.
- Oller, E., Pujol, M., ve Marí, A., 2019, Contribution of externally bonded FRP shear reinforcement to the shear strength of RC beams. *Composites Part B: Engineering*, 164, 235–248.
- Oruç, R., 2019, *Kesme Kapasitesi Yetersiz Betonarme Kirişlerin Karbon Lifli Polimerler ile Güçlendirilmesinin Statik ve Dinamik Olarak İncelenmesi*. Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ozcan, O., Binici, B., ve Ozcebe, G., 2008, Improving seismic performance of deficient reinforced concrete columns using carbon fiber-reinforced polymers. *Engineering Structures*, 30(6), 1632–1646.
- Ozcan, O., Binici, B., ve Ozcebe, G., 2010, Seismic strengthening of rectangular reinforced concrete columns using fiber reinforced polymers. *Engineering Structures*, 32(4), 964–97.
- Ozden, S., Atalay, H. M., Akpınar, E., Erdogan, H., ve Vulaş, Y. Z., 2014, Shear strengthening of reinforced concrete T-beams with fully or partially bonded fibre-reinforced polymer composites. *Structural Concrete*, 15(2), 229–239.
- Öncel C., Polimer malzemeler Bölüm-5, Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü, 2016. <https://slideplayer.biz.tr/slide/6820216/>.
- Öztemel E., 2003, Yapay Sinir Ağları, *Papatya Yayıncılık Eğitim Bilgisayar Sis. San. Ve Tic. A.Ş.*

- Panchacharam, S., ve Belarbi, A., 2002, Torsional behavior of reinforced concrete beams strengthened with FRP composites. *First FIB Congress*, 1–11.
- Panda, K. C., Bhattacharyya, S. K., ve Barai, S. V., 2011, Shear strengthening of RC T-beams with externally side bonded GFRP sheet. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(13), 1139–1154.
- Panda, K. C., Bhattacharyya, S. K., ve Barai, S. V., 2013, Effect of transverse steel on the performance of RC T-beams strengthened in shear zone with GFRP sheet. *Construction and Building Materials*, 41, 79–90.
- Panigrahi, A. K., Biswal, K. C., ve Barik, M. R., 2014, Strengthening of shear deficient RC T-beams with externally bonded GFRP sheets. *Construction and Building Materials*, 57, 81–91.
- Panigrahi, S. K., Deb, A., ve Bhattacharyya, S. K., 2016, Modes of Failure in Shear Deficient RC T-Beams Strengthened with FRP. *Journal of Composites for Construction*, 20(1).
- Pathirage, C. S. N., Li, J., Li, L., Hao, H., ve Liu, W., 2018, Application of deep autoencoder model for structural condition monitoring. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 29(4), 873–880.
- Pham, T. M., ve Hadi, M. N. S., 2014, Predicting Stress and Strain of FRP-Confined Square/Rectangular Columns Using Artificial Neural Networks. *Journal of Composites for Construction*, 18(6).
- Ramesh, B., Eswari, S., ve Sundararajan, T., 2021, Experimental and numerical studies on the flexural behaviour of GFRP laminated hybrid-fibre-reinforced concrete (HFRC) beams. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(1).
- Randl, N., ve Harsányi, P., 2018, Developing optimized strengthening systems for shear-deficient concrete members. *Structural Concrete*, 19(1), 116–128.
- Raviteja, A., ve Vinod, K., 2019, A New Experimental And Analytical Study On Torsional Behaviour of RC Flanged Beams Strengthened with Glass FRP. *International Journal of Innovative Technologies*, 7(2), 88–92.
- Ribeiro, M. H. D. M., ve dos Santos Coelho, L., 2020, Ensemble approach based on bagging, boosting and stacking for short-term prediction in agribusiness time series. *Applied Soft Computing Journal*, 86.
- Saadatmanesh, H., ve Ehsani, M. R., 1991, RC Beams Strengthened with GFRP Plates. I: Experimental Study. *Journal of Structural Engineering*, 117(11), 3417–3433.
- Saatçioğlu M. ve Elnabesy G., 2001, Seismic retrofit of bridge columns with CFRP jackets, *Proceedings, International Conference of FRP Composites in Civil Engineering*, Hong Kong, 833–838.

- Said, A. M. I., ve Al-Shemmari, Q. H., 2020, Behavior of strengthened rc beams with cfrp sheets under combined bending and torsion. *Key Engineering Materials*, 857 KEM, 109–119.
- Sağlam F.Z.,2021, Amazon Web Servisi Altyapısı ile Makine Öğrenmesi Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı*.
- Salom, P. R., Gergely, J., ve Young, D. T., 2004, Torsional Strengthening of Spandrel Beams with Fiber-Reinforced Polymer Laminates. *Journal of Composites for Construction*, 8(2), 157–162.
- Saribiyik, A., Abodan, B., ve Balci, M. T., 2021, Experimental study on shear strengthening of RC beams with basalt FRP strips using different wrapping methods. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(1), 192–204.
- Sato, Y., ve Ko, H., 2008, Modeling of Reinforcement Buckling in RC Columns Confined with FRP. In *Journal of Advanced Concrete Technology* (Vol. 6, Issue 1).
- Sertkaya, M. S., 2017, Betonarme ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Kesme Kapasitelerinin Tahminine Yönelik Bir Araştırma, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Sharaf, M. H., Soudki, K. A., ve Van Dusen, M., 2006, CFRP Strengthening for Punching Shear of Interior Slab–Column Connections. *Journal of Composites for Construction*, 10(5), 410–418.
- Shehata, L. A. E. M., Carneiro, L. A. V., ve Shehata, L. C. D., 2002, Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets. In *Materials and Structures/Matériaux et Constructions* (Vol. 35).
- Sheikh, S. A., 2003, Retrofit of Square Concrete Columns with Carbon Fiber-Reinforced Polymer for Seismic Resistance. *ACI Structural Journal*, 100(6).
- Shen, D., Yang, Q., Huang, C., Cui, Z., ve Zhang, J., 2019, Tests on seismic performance of corroded reinforced concrete shear walls repaired with basalt fiber-reinforced polymers. *Construction and Building Materials*, 209, 508–521.
- Siddiqui, N. A., 2009, *Experimental investigation of RC beams strengthened with externally bonded FRP composites* (Vol. 6).
- Siddiqui, N. A., 2009, Experimental investigation of RC beams strengthened with externally bonded FRP composites. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 6, 343–362.
- Singh, K., ve Sharma, R., 2020, Experimental and Analytical Study on Torsional Behavior of RC Flanged Beams with Strengthened with Glass FRP. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*,3(1), 225–229.
- Sissakis, K., ve Sheikh, S. A. (2007). Strengthening Concrete Slabs for Punching Shear with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates. *Structural Journal*, 104(1), 49–59.

- Slaitas, J., Valivonis, J., ve Rimkus, L., 2020, Evaluation of stress-strain state of FRP strengthened RC elements in bending. Fracture mechanics approach. *Composite Structures*, 233.
- Song, J. H., Lee, E. T., ve Eun, H. C. (2020). Shear strength of reinforced concrete columns retrofitted by glass fiber reinforced polyurea. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 6(10), 1852–1863.
- Soudki, K., El-Sayed, A. K., ve Vanzwol, T. (2012). Strengthening of concrete slab-column connections using CFRP strips. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 24(1), 25–33.
- Sundarraja, M. C., ve Rajamohan, S. (2009). Strengthening of RC beams in shear using GFRP inclined strips - An experimental study. *Construction and Building Materials*, 23(2), 856–864.
- Suryanita, R., Maizir, H., Yuniarto, E., Zulfakar, M., ve Jingga, H., 2017, Damage Level Prediction of Reinforced Concrete Building Based on Earthquake Time History Using Artificial Neural Network. *MATEC Web of Conferences*, 138.
- Suzuki, K., 2011, Artificial Neural Networks- Methodological Advances and Biomedical Applications. In *Artificial Neural Networks- Methodological Advances and Biomedical Applications*. InTech.
- Suzuki, K. (2011b). Artificial Neural Networks: Methodological Advances and Biomedical Applications. In K. Suzuki (Ed.), *InTech*. InTech.
- TS-500/2000,2000, Türk Standartları.
- Tanarslan H. M., Ertutar Y., ve Altin S.,2008, The effects of CFRP strips for improving shear capacity of RC beams. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27(12), 1287–1308.
- Tibhe, S. B., ve Rathi, V. R., 2016, CoMParative Experimental Study on Torsional Behavior of RC Beam Using CFRP and GFRP Fabric Wrapping. *Procedia Technology*, 24, 140–147.
- Tosun B.,2021, Makine Öğrenmesi ile Metin Sınıflandırma: Bakım Yönetim Sistemi Örneği, *Sakarya Üniversitesi İşletme Enstitüsü*.
- Toutanji, H. A., ve Gomez, W., 1997, Durability Characteristics of Concrete Beams Externally Bonded with FRP Composite Sheets. In *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19.
- Tuysuzoglu, G., ve Birant, D., 2020, Enhanced bagging (Bagging): A novel approach for ensemble learning. *International Arab Journal of Information Technology*, 17(4), 515–528.

- TBDY, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*.
- Vojdan, B. M., ve Aghayari, R., 2017, Investigating the seismic behavior of RC shear walls with openings strengthened with FRP sheets using different schemes. In *Scientia Iranica A* (Vol. 24, Issue 4).
- Walkup, S. L., 1988, Rehabilitation of non-ductile reinforced concrete building columns using fiber reinforced polymer jackets, *Lehigh University*.
- Woods, J., ve Shaheen, I., 2014, *Seismic Retrofit of Deficient RC Sear Walls with FRP Tow Sheets*.
- Yazdani, S., Asadollahi, S., Shoaee, P., ve Dehestani, M., 2021, Failure stages in post-tensioned reinforced self-consolidating concrete slab strengthened with CFRP layers. *Engineering Failure Analysis*, 122.
- Ye, J., Becque, J., Hajirasouliha, I., Mojtabaei, S. M., ve Lim, J. B. P., 2018, Development of optimum cold-formed steel sections for maximum energy dissipation in uniaxial bending. *Engineering Structures*, 161, 55–67.
- Ye, L., Yue, Q., Zhao, S., ve Li, Q., 2002, Shear Strength of Reinforced Concrete Columns Strengthened with Carbon-Fiber-Reinforced Plastic Sheet. *Journal of Structural Engineering*, 128(12), 1527–1534.
- Zeng, J. J., Lin, G., Teng, J. G., ve Li, L. J., 2018, Behavior of large-scale FRP-confined rectangular RC columns under axial compression. *Engineering Structures*, 174, 629–645.
- Zhang, S., Yu, T., ve Chen, G., 2017, Reinforced concrete beams strengthened in flexure with near-surface mounted (NSM) CFRP strips: Current status and research needs. In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 131, pp. 30–42). Elsevier Ltd.
- Zhang, X., ve Ding, J., 2016, An improved adaboost face detection algorithm based on the different sample weights, *Proceedings of the 2016 IEEE 20th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, CSCWD 2016*, 436–439.
- Zhang, Z., ve Hsu, C.-T. T., 2005, Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Laminates, *Journal of Composites for Construction*, 9(2), 158–169.
- Zhou, Y., Zheng, S., Huang, Z., Sui, L., ve Chen, Y., 2020, Explicit neural network model for predicting FRP-concrete interfacial bond strength based on a large database, *Composite Structures*, 240.
- Zomorodian, M., Belarbi, A., ve Ayoub, A., 2017, Finite element model for predicting the shear behavior of FRP-strengthened RC members, *Engineering Structures*, 153, 239–253.
- Zor M., 2018, Kompozit malzeme mekaniği ders notları.

10. EKLER

Çizelge 10.1. Kirişte kesme davranışı için veri tabanındaki bilgiler

Referans	Örnek adı	b mm	d mm	L mm	f_c MPa	A_{st}	A_{sv}	$n \cdot t_f$ mm	w_f mm	s_f mm	h_{FRP} mm	E_f GPa	f_{fu} MPa	ε_{fu}	β 0.00	ΣV kN
El-Saikaly et.al.,2015	S0-LS	152	350	4520	28.00	0.04	0.00	1.40	20	175.00	304.00	120.00	2250.00	0.02	90.00	96.00
	S0-LSr	152	350	4520	28.00	0.04	0.00	1.40	20	175.00	304.00	120.00	2250.00	0.02	90.00	164.00
	S1-EB	152	350	4520	28.00	0.04	0.003	0.38	20	175.00	304.00	65.00	894.00	0.01	90.00	215.00
	S1-LS	152	350	4520	28.00	0.04	0.003	1.40	20	175.00	304.00	120.00	2250.00	0.02	90.00	203.00
	S1-LSr	152	350	4520	28.00	0.04	0.003	1.40	20	175.00	304.00	120.00	2250.00	0.02	90.00	253.00
	S3-EB	152	350	4520	28.00	0.04	0.004	0.38	20	175.00	304.00	65.00	894.00	0.01	90.00	254.00
	S3-LS	152	350	4520	28.00	0.04	0.004	1.40	20	175.00	304.00	120.00	2250.00	0.02	90.00	240.00
	S3-LS	152	350	4520	28.00	0.04	0.004	1.40	20	175.00	304.00	120.00	2250.00	0.02	90.00	280.00
Kim et al.,2015	L-S	356	1092	8440	27.00	0.02	0.001	0.28	254	508.00	1016.00	102.00	1062.00	0.01	90.00	747.00
	L-S-W	356	1092	8440	27.00	0.02	0.001	0.28	356	508.00	1016.00	102.00	1062.00	0.01	90.00	858.00
	L-S-I	356	1092	8440	27.00	0.02	0.001	0.28	254	508.00	1016.00	102.00	1062.00	0.01	45.00	858.00
	H-S	356	1092	8440	27.00	0.02	0.002	0.28	254	508.00	1016.00	102.00	1062.00	0.01	90.00	859.00
	H-S-R	356	1092	8440	27.00	0.02	0.002	0.28	254	508.00	1016.00	102.00	1062.00	0.01	90.00	859.00
	H-S-M	356	1092	8440	27.00	0.02	0.002	0.28	254	508.00	1016.00	102.00	1062.00	0.01	90.00	859.00
	H-S-2	356	1092	8440	27.00	0.02	0.002	0.56	254	508.00	1016.00	102.00	1062.00	0.01	90.00	1126.00
Ozden et al.,2014	FBwoA-CFRP	120	339	2750	12.40	0.03	0.001	0.13	20	120.00	285.00	238.00	4300.00	0.02	90.00	69.50
	FBwA-CFRP	120	339	2750	12.40	0.03	0.001	0.13	20	120.00	285.00	238.00	4300.00	0.02	90.00	110.70
	PBwA-CFRP	120	339	2750	12.40	0.03	0.001	0.13	20	120.00	285.00	238.00	4300.00	0.02	90.00	78.70
	FBwoA-GFRP	120	339	2750	12.40	0.03	0.001	0.16	20	120.00	285.00	73.00	3400.00	0.05	90.00	68.10
	FBwA-GFRP	120	339	2750	12.40	0.03	0.001	0.16	20	120.00	285.00	73.00	3400.00	0.05	90.00	100.50
	PBwA-GFRP	120	339	2750	12.40	0.03	0.001	0.16	20	120.00	285.00	73.00	3400.00	0.05	90.00	100.10
	FBwoA-Hi-CFRP	120	339	2750	12.40	0.03	0.001	0.14	20	120.00	285.00	640.00	2600.00	0.00	90.00	55.50

	FBwA-Hi-CFRP	120	339	2750	12.40	0.03	0.001	0.14	20	120.00	285.00	640.00	2600.00	0.00	90.00	69.10
	PBwA-Hi-CFRP	120	339	2750	12.40	0.03	0.001	0.14	20	120.00	285.00	640.00	2600.00	1.00	90.00	86.10
Panda et al.,2011	S0-1L-CT-S-90	100	225	2500	42.60	0.03	0.00	0.36	2500	0.00	200.00	13.20	160.00	0.01	90.00	66.00
	S0-2L-CT-S-90	100	225	2500	42.60	0.03	0.00	0.72	2500	0.00	200.00	13.20	160.00	0.01	90.00	69.00
	S0-3L-CT-S-90	100	225	2500	42.60	0.03	0.00	1.08	2500	0.00	200.00	13.20	160.00	0.01	90.00	75.00
	S300-1L-CT-S-90	100	225	2500	41.10	0.03	0.002	0.36	2500	0.00	200.00	13.20	160.00	0.01	90.00	88.00
	S300-2L-CT-S-90	100	225	2500	41.10	0.03	0.002	0.72	2500	0.00	200.00	13.20	160.00	0.01	90.00	90.00
	S300-3L-CT-S-90	100	225	2500	41.10	0.03	0.002	1.08	2500	0.00	200.00	13.20	160.00	0.01	90.00	91.00
	S200-1L-CT-S-90	100	225	2500	42.90	0.03	0.003	0.36	2500	0.00	200.00	13.20	160.00	0.01	90.00	90.00
	S200-2L-CT-S-90	100	225	2500	42.90	0.03	0.003	0.72	2500	0.00	200.00	13.20	160.00	0.01	90.00	93.00
	S200-3L-CT-S-90	100	225	2500	42.90	0.03	0.003	1.08	2500	0.00	200.00	13.20	160.00	0.01	90.00	98.00
Panda et al.,2013	S0-1L-SZ-S-90	100	225	2500	39.60	0.03	0.000	0.36	2500	0.00	200.00	13.20	160.00	0.012	90.00	65.00
	S0-1L-SZ-UA-90	100	225	2500	39.60	0.03	0.000	0.36	2500	0.00	160.00	13.20	160.00	0.012	90.00	70.00
	S300-1L-SZ-S-90	100	225	2500	42.10	0.03	0.002	0.36	2500	0.00	200.00	13.20	160.00	0.012	90.00	89.00
	S300-1LSZUA-90	100	225	2500	42.10	0.03	0.002	0.36	2500	0.00	200.00	13.20	160.00	0.012	90.00	96.00
	S200-1L-SZ-S-90	100	225	2500	40.40	0.03	0.003	0.36	2500	0.00	200.00	13.20	160.00	0.012	90.00	92.00
	S200-1LSZ-UA90	100	225	2500	40.40	0.03	0.003	0.36	2500	0.00	200.00	13.20	160.00	0.012	90.00	98.00
Randl et al.,2017	CFRP_4-2.aa	200	489	5380	36.60	0.04	0.00	2.60	100	380.00	450.00	100.00	1120.00	0.110	90.00	527.10
	CFRP_4-2	200	489	5380	37.10	0.04	0.00	2.60	100	380.00	450.00	100.00	1120.00	0.110	90.00	620.20
	CFRP_4-2	200	489	5380	34.10	0.04	0.00	2.60	100	380.00	450.00	100.00	1120.00	0.110	90.00	622.70
Belarbi et al.,2012	RC-8-S90-NA	457	831	10675	20.70	0.03	0.001	0.17	254	381.00	762.00	228.00	3792.00	0.017	90.00	191.40
	RC-8-S90-DMA	457	831	10675	23.80	0.03	0.001	0.17	254	381.00	762.00	228.00	3792.00	0.017	90.00	212.00
	RC-12-S90-NA	457	831	10675	28.90	0.03	0.001	0.17	254	381.00	762.00	228.00	3792.00	0.017	90.00	172.00
	RC-12-S90-DMA	457	831	10675	30.50	0.03	0.001	0.17	254	381.00	762.00	228.00	3792.00	0.017	90.00	205.00
	RC12S90SDMAPC	457	831	10675	19.20	0.03	0.001	0.17	254	381.00	762.00	228.00	3792.00	0.017	90.00	214.00
	RC-12-S90-HA-PC	457	831	10675	18.30	0.03	0.001	0.17	254	381.00	762.00	228.00	3792.00	0.017	90.00	187.50
Bae et al.,2013	RC12S90SDMACor	457	831	10058	27.60	0.03	0.001	0.17	254	381.00	756.00	228.00	3792.00	0.017	90.00	1192.00
	RC-12-S45-NA	457	831	10058	27.60	0.03	0.001	0.17	254	381.00	756.00	228.00	3792.00	0.017	90.00	964.00
	RC-12-S45-HS	457	831	10058	27.60	0.03	0.001	0.17	254	381.00	756.00	228.00	3792.00	0.017	90.00	805.00
	RC-12-S45-SDMA	457	831	10058	27.60	0.03	0.001	0.17	254	381.00	756.00	228.00	3792.00	0.017	90.00	902.00

Oller et al.,2018	M1-a	200	493	5800	42.80	0.02	0.001	0.17	50	240.00	400.00	230.00	3400.00	0.015	90.00	182.60
	M1-b	200	493	5800	42.80	0.02	0.001	0.17	50	240.00	400.00	230.00	3400.00	0.015	90.00	195.50
	M1A	200	493	5800	39.00	0.02	0.001	0.17	50	240.00	400.00	230.00	3400.00	0.015	90.00	118.30
	M1B	200	493	5800	38.50	0.02	0.001	0.17	50	240.00	400.00	230.00	3400.00	0.015	90.00	247.30
	M2A	200	493	5800	39.00	0.02	0.001	0.17	100	240.00	400.00	230.00	3400.00	0.015	90.00	207.20
	M2B	200	493	5800	38.50	0.02	0.001	0.17	100	240.00	400.00	230.00	3400.00	0.015	90.00	250.10
	H1-a	200	493	5800	44.40	0.02	0.001	0.17	50	240.00	400.00	230.00	3400.00	0.015	90.00	189.70
	H2-a	200	493	5800	44.40	0.02	0.001	0.17	100	240.00	400.00	230.00	3400.00	0.015	90.00	103.00
	H2-b	200	493	5800	49.70	0.02	0.001	0.17	100	240.00	400.00	230.00	3400.00	0.015	90.00	198.40
	H2A	200	493	5800	44.70	0.02	0.001	0.17	100	240.00	400.00	230.00	3400.00	0.015	90.00	176.10
	H2B	200	493	5800	49.60	0.02	0.001	0.17	100	240.00	400.00	230.00	3400.00	0.015	90.00	230.00
	H3A	200	493	5800	44.70	0.02	0.001	0.17	100	240.00	400.00	230.00	3400.00	0.015	90.00	322.80
	H3B	200	493	5800	49.60	0.02	0.001	0.17	100	240.00	400.00	230.00	3400.00	0.015	90.00	298.60
Nguyen et al.,2017	P-A1-2.3-C	120	406	3500	30.60	0.05	0.002	1.00	75	150.00	400.00	95.80	986.00	0.010	90.00	263.00
	P-A1-2.3-G	120	406	3500	30.60	0.05	0.002	1.30	75	150.00	400.00	26.10	575.00	0.022	90.00	246.00
	P-A1-2.3-G-Cont.	120	406	3500	30.60	0.05	0.002	1.30	75	150.00	400.00	26.10	575.00	0.022	90.00	268.00
	P-A1-2.3-C-Cont.	120	406	3500	30.60	0.05	0.002	1.00	75	150.00	400.00	95.80	986.00	0.010	90.00	301.00
	P-A2-2.3-C	120	406	3500	30.60	0.05	0.002	2.00	75	150.00	400.00	95.80	986.00	0.010	90.00	350.00
	P-B1-2.3-C	120	406	3500	44.40	0.05	0.002	1.00	75	150.00	400.00	95.80	986.00	0.010	90.00	309.00
	P-B1-2.3-G	120	406	3500	44.40	0.05	0.002	1.30	75	150.00	400.00	26.10	575.00	0.022	90.00	278.00
	P-B1-2.3-G-Cont.	120	406	3500	44.40	0.05	0.002	1.30	75	150.00	400.00	26.10	575.00	0.022	90.00	303.00
	P-B1-2.3-C-Cont.	120	406	3500	44.40	0.05	0.002	1.00	75	150.00	400.00	95.80	986.00	0.010	90.00	366.00
	P-B2-2.3-C	120	406	3500	44.40	0.05	0.002	2.00	75	150.00	400.00	95.80	986.00	0.010	90.00	331.00
	P-C1-2.3-C	120	406	3500	58.70	0.05	0.002	1.00	75	150.00	400.00	95.80	986.00	0.010	90.00	352.00
	P-C1-2.3-G	120	406	3500	58.70	0.05	0.002	1.30	75	150.00	400.00	26.10	575.00	0.022	90.00	304.00
	P-C1-2.3-G-Cont.	120	406	3500	58.70	0.05	0.002	1.30	75	150.00	400.00	26.10	575.00	0.022	90.00	332.00
Mofidi and chaallal,2014	P-C1-2.3-C-Cont.	120	406	3500	58.70	0.05	0.002	1.00	75	150.00	400.00	95.80	986.00	0.010	90.00	427.00
	P-C2-2.3-C	120	406	3500	58.70	0.05	0.002	2.00	75	150.00	400.00	95.80	986.00	0.010	90.00	381.00
	NT-ST-35	152	350	4520	31.00	0.04	0.00	0.11	40	115.00	304.00	230.00	3450.00	0.015	90.00	120.90
	NT-ST-50	152	350	4520	31.00	0.04	0.00	0.11	88	175.00	304.00	230.00	3450.00	0.015	90.00	134.50

	NT-SR-60	152	350	4520	31.00	0.04	0.00	0.11	30	50.00	304.00	230.00	3450.00	0.015	90.00	131.10
	NT-ST-61	152	350	4520	31.00	0.04	0.00	0.11	53	87.50	304.00	230.00	3450.00	0.015	90.00	135.70
	NT-ST-70	152	350	4520	31.00	0.04	0.00	0.11	88	125.00	304.00	230.00	3450.00	0.015	90.00	150.50
	NT-SH-100	152	350	4520	31.00	0.04	0.00	0.11	4520	0.00	304.00	230.00	3450.00	0.015	90.00	119.90
	NT-SH-200	152	350	4520	31.00	0.04	0.00	0.11	4520	0.00	304.00	230.00	3450.00	0.015	90.00	121.60
	WT-ST-50	152	350	4520	31.00	0.04	0.004	0.11	88	175.00	304.00	230.00	3450.00	0.015	90.00	246.70
	WT-ST-70	152	350	4520	31.00	0.04	0.004	0.11	88	125.00	304.00	230.00	3450.00	0.015	90.00	253.90
	WT-SH-100	152	350	4520	31.00	0.04	0.004	0.11	4520	0.00	304.00	230.00	3450.00	0.015	90.00	250.60
Godat ve Caahallal,2013	LSB-140-1L	104	343	6095	37.90	0.03	0.010	0.11	6095	0.00	356.00	231.00	3650.00	0.014	90.00	320.00
	LSB-140-2L	104	343	6095	37.90	0.03	0.010	0.21	6095	0.00	356.00	231.00	3650.00	0.014	90.00	343.00
	LSB-203-1L	104	343	6095	37.90	0.03	0.007	0.11	6095	0.00	356.00	231.00	3650.00	0.014	90.00	298.00
	LSB-203-2L	104	343	6095	37.90	0.03	0.007	0.21	6095	0.00	356.00	231.00	3650.00	0.014	90.00	329.00
	LSB-203-3L	104	343	6095	37.90	0.03	0.007	0.32	6095	0.00	356.00	231.00	3650.00	0.014	90.00	352.00
	LSB-406-1L	104	343	6095	37.90	0.03	0.003	0.11	6095	0.00	356.00	231.00	3650.00	0.014	90.00	276.00
	LSB-406-2L	104	343	6095	37.90	0.03	0.003	0.21	6095	0.00	356.00	231.00	3650.00	0.014	90.00	320.00
	LSB-610-1L	104	343	6095	37.90	0.03	0.002	0.11	6095	0.00	356.00	231.00	3650.00	0.014	90.00	258.00
	LSB-610-2L	104	343	6095	37.90	0.03	0.002	0.21	6095	0.00	356.00	231.00	3650.00	0.014	90.00	254.00
	LSB-610-3L	104	343	6095	37.90	0.03	0.002	0.32	6095	0.00	356.00	231.00	3650.00	0.014	90.00	258.00
El-Maaddawy et al.,2013	C1-EB1	120	200	3200	32.00	0.04	0.003	0.38	70	120.00	190.00	65.40	894.00	0.013	90.00	120.00
	C2-EB1	120	200	3200	32.00	0.04	0.003	0.38	70	120.00	190.00	65.40	894.00	0.013	90.00	100.00
	C2-EB2	120	200	3200	32.00	0.04	0.003	0.76	70	120.00	190.00	65.40	894.00	0.013	90.00	107.20
	C2-EB2R	120	200	3200	32.00	0.04	0.003	0.76	70	120.00	190.00	65.40	894.00	0.013	90.00	116.00
	C2-EB3	120	200	3200	32.00	0.04	0.003	1.14	70	120.00	190.00	65.40	894.00	0.013	90.00	120.00
Mofidi et al.,2014	S1-LS-NE	152	350	2500	33.70	0.04	0.004	2.00	40	175.00	304.00	90.00	1350.00	0.013	90.00	275.40
	S1-LS-PE	152	350	2500	33.70	0.04	0.004	2.00	40	175.00	304.00	90.00	1350.00	0.013	90.00	300.30
	S1-EB-NA	152	350	2500	33.70	0.04	0.004	0.110	2500	0.00	304.00	230.00	3450.00	0.015	90.00	294.00
Dirar et al.,2019	F/295/LP1/4.5	105	295	3800	19.20	0.04	0.002	0.13	1125	1000.00	245.00	28.00	350.00	0.013	90.00	135.00
	F/295/LP2/4.5	105	295	3800	21.60	0.04	0.002	0.13	1125	1000.00	245.00	28.00	350.00	0.013	90.00	133.50
	F/215/LP1/4.6	105	215	3800	25.60	0.04	0.002	0.13	820	1000.00	165.00	28.00	350.00	0.013	90.00	102.50
	F/215/LP2/4.6	105	215	3800	20.0	0.04	0.002	0.13	820	1000.00	165.00	28.00	350.00	0.013	90.00	96.50

Koutas et al.,2013	U2C	140	245	1750	18.20	0.03	0.007	0.36	1750	0.00	200.00	102.00	1062.00	0.010	90.00	157.07
	U2C-AN3Ch	140	245	1750	17.80	0.03	0.007	0.36	1750	0.00	200.00	102.00	1062.00	0.010	90.00	169.50
	U2C-AN3Cin	140	245	1750	17.80	0.03	0.007	0.36	1750	0.00	200.00	102.00	1062.00	0.010	90.00	229.39
	U2C-AN5Cin	140	245	1750	18.30	0.03	0.007	0.36	1750	0.00	200.00	102.00	1062.00	0.010	90.00	241.82
	U2G-AN3Gin	140	245	1750	18.30	0.03	0.007	2.34	1750	0.00	200.00	26.10	575.00	0.022	90.00	244.08
Khalifa et al.,2000	BT2	150	360	3050	35.00	0.03	0.010	0.17	3050	0.00	305.00	228.00	3790.00	0.017	90.00	155.00
	BT3	150	360	3050	35.00	0.03	0.010	0.33	3050	0.00	305.00	228.00	3790.00	0.017	90.00	157.50
	BT4	150	360	3050	35.00	0.03	0.010	0.17	50	125.00	305.00	228.00	3790.00	0.017	90.00	162.00
	BT5	150	360	3050	35.00	0.03	0.010	0.17	50	125.00	305.00	228.00	3790.00	0.017	90.00	121.50
El-Saikaly et al.,2017	EBS-BL	152	350	4520	28.00	0.04	0.003	0.38	4520	0.00	304.00	65.00	894.00	0.013	90.00	246.00
	EBL-RF	152	350	4520	28.00	0.04	0.003	0.38	4520	0.00	304.00	90.00	1350.00	0.013	90.00	275.00
Cao et al.,2005	A3	250	150	1600	31.00	0.004	0.004	0.20	30	150.00	250.00	249.00	3635.00	0.04	90.00	187.00
	A5	250	150	1600	31.00	0.005	0.004	0.20	30	100.00	250.00	249.00	3635.00	0.04	90.00	227.00
	A6	250	150	1600	31.00	0.011	0.004	0.20	30	50.00	250.00	249.00	3635.00	0.04	90.00	217.00
	Bb	250	150	1700	30.00	0.005	0.00	1.30	20	40.00	250.00	20.50	260.00	0.04	90.00	136.00
	Bc	250	150	1700	30.00	0.003	0.00	1.30	20	80.00	250.00	20.50	260.00	0.04	90.00	121.00
	Be	250	150	1700	30.00	0.005	0.00	1.30	20	40.00	250.00	20.50	260.00	0.04	90.00	178.00
	Bf	250	150	1700	30.00	0.003	0.00	1.30	20	80.00	250.00	20.50	260.00	0.04	90.00	161.00
	L2	250	150	1700	17.80	0.002	0.00	1.20	25	50.00	250.00	5300.00	112.00	0.04	90.00	104.00
	L3	250	150	1700	17.80	0.001	0.00	1.20	25	100.00	250.00	5300.00	112.00	0.04	90.00	99.00
	L6	250	150	1700	17.80	0.002	0.00	1.20	25	50.00	250.00	5300.00	112.00	0.04	90.00	162.00
	L7	250	150	1700	17.80	0.001	0.00	1.20	25	100.00	250.00	5300.00	112.00	0.04	90.00	150.00
Micelli et al.,2002	JS2A	152	381	2743	21.00	0.005	0.002	0.17	102	508.00	305.00	228.00	3790.00	0.02	90.00	261.00
	JS3A	152	381	2743	21.00	0.005	0.002	0.17	102	508.00	305.00	228.00	3790.00	0.02	90.00	320.00
	JS2B	152	381	2743	21.00	0.005	0.002	0.17	102	508.00	305.00	228.00	3790.00	0.02	90.00	320.00
	JS3B	152	381	2743	21.00	0.005	0.002	0.17	102	508.00	305.00	228.00	3790.00	0.02	90.00	321.00
	JS4A	152	381	2743	21.00	0.005	0.002	0.34	102	508.00	305.00	228.00	3790.00	0.02	90.00	301.00
	JS5A	152	381	2743	21.00	0.005	0.002	0.34	102	508.00	305.00	228.00	3790.00	0.02	90.00	385.00
	JS5B	152	381	2743	21.00	0.005	0.002	0.34	102	508.00	305.00	228.00	3790.00	0.02	90.00	359.00
Kim et al.,2015	L-S	356	1220	8440	27.00	0.025	0.003	0.28	254	508.00	1017.00	102.00	1062.00	0.01	90.00	747.00

Chen et al., 2016	L-S-W	356	1220	8440	27.00	0.025	0.003	0.28	254	508.00	1017.00	102.00	1062.00	0.01	90.00	858.00
	L-S-1	356	1220	8440	27.00	0.025	0.003	0.28	254	508.00	1017.00	102.00	1062.00	0.01	90.00	858.00
	H-S	356	1220	8440	27.00	0.025	0.003	0.28	254	508.00	1017.00	102.00	1062.00	0.01	90.00	859.00
	H-S-R	356	1220	8440	27.00	0.025	0.003	0.28	254	508.00	1017.00	102.00	1062.00	0.01	90.00	859.00
	H-S-M	356	1220	8440	27.00	0.025	0.003	0.28	254	508.00	1017.00	102.00	1062.00	0.01	90.00	859.00
	H-S-2	356	1220	8440	27.00	0.025	0.003	0.56	254	508.00	1017.00	102.00	1062.00	0.01	90.00	1126.00
	S0-UFA1	200	400	2670	43.00	0.033	0.003	0.17	50	100.00	300.00	226.00	2060.00	0.03	90.00	233.90
	S0-UFA2	200	400	2670	43.00	0.033	0.003	0.17	50	100.00	300.00	226.00	2060.00	0.03	90.00	313.51
	S0-UEA1	200	400	2670	43.00	0.033	0.003	0.17	50	100.00	300.00	226.00	2060.00	0.03	90.00	326.70
	S0-UEA2	200	400	2670	43.00	0.033	0.003	0.17	50	100.00	300.00	226.00	2060.00	0.03	90.00	354.53
	S8-U	200	400	2670	46.00	0.033	0.003	0.17	50	100.00	300.00	226.00	2060.00	0.03	90.00	213.73
	S8-UFA1	200	400	2670	46.00	0.033	0.003	0.17	50	100.00	300.00	226.00	2060.00	0.03	90.00	233.90
	S8-UFA2	200	400	2670	46.00	0.033	0.003	0.17	50	100.00	300.00	226.00	2060.00	0.03	90.00	279.16
	S8-UEA1	200	400	2670	46.00	0.033	0.003	0.17	50	100.00	300.00	226.00	2060.00	0.03	90.00	274.77

Çizelge 10.2. Kirişte eğilme davranışı için veri tabanındaki bilgiler

Referans	Örnek Adı	b mm	d mm	L mm	f_c MPa	f_y MPa	ρ_{st}	ρ_{sv}	$n \cdot t_f$ mm	w_f mm	s_f mm	h_{FRP} mm	E_f GPa	f_{lu} MPa	P kN
Nadeem A. et.al.,2009	BFS-1	200	300	2000	35.00	420.00	0.009	0.008	1.00	50	150.00	300	77.28	846.00	241.50
	BFS-2	200	300	2000	35.00	420.00	0.018	0.030	1.00	50	150.00	300	77.28	846.00	255.20
Tarek H. Almusallam et.al.,2001	FG1	150	200	2050	37.50	415.00	0.010	0.007	1.30	2050	0.00	100	27.58	552.00	70.40
	FG2	150	200	2050	37.50	415.00	0.010	0.007	2.60	2050	0.00	100	27.58	552.00	82.40
	FG4	150	200	2050	37.50	415.00	0.010	0.007	5.20	2050	0.00	100	27.58	552.00	105.90
	FC1	150	200	2050	37.50	415.00	0.010	0.007	1.00	2050	0.00	100	68.95	1034.00	81.90
	FC2	150	200	2050	37.50	415.00	0.010	0.007	2.00	2050	0.00	100	68.95	1034.00	103.10
Akbarzadeh ve Maghsoudi, 2010	SC1	150	250	6000	74.60	412.50	0.013	0.010	0.11	150	0.00	200	242.00	3800.00	183.30
	SC3	150	250	6000	74.40	412.50	0.013	0.010	0.33	150	0.00	200	242.00	3800.00	238.00
	SG3	150	250	6000	79.70	412.50	0.013	0.010	0.33	150	0.00	200	242.00	3800.00	180.60
	SC1G1	150	250	6000	49.46	412.50	0.013	0.010	0.31	150	0.00	200	242.00	3800.00	209.30
	SC2G2	150	250	6000	79.34	412.50	0.013	0.010	0.31	150	0.00	200	242.00	3800.00	216.00
A.A. El-Ghandour, 2011	B1	300	120	2000	39.50	400.00	0.019	0.013	0.18	100	400.00	260	240.00	3800.00	155.00
	B1F	300	120	2000	39.50	400.00	0.019	0.013	0.18	100	400.00	260	240.00	3800.00	170.00
	B2S	300	120	2000	39.50	400.00	0.019	0.013	0.18	50	187.50	260	240.00	3800.00	225.00
	B3S	300	120	2000	39.50	400.00	0.019	0.013	0.18	50	187.50	260	240.00	3800.00	150.00
	B3FS	300	120	2000	39.50	400.00	0.019	0.013	0.18	50	400.00	260	240.00	3800.00	155.00
Hamid ve Mohammad, 1991	A	205	455	4725	35.00	456.00	0.003	0.002	6.00	152	0.00	455	37.23	400.00	300.00
	B	205	455	4725	35.00	456.00	0.003	0.009	6.00	152	0.00	455	37.23	400.00	250.00
	C	205	455	4725	35.00	456.00	0.003	0.009	6.00	152	0.00	455	37.23	400.00	182.00
	D	205	455	4725	35.00	456.00	0.003	0.009	6.00	152	0.00	455	37.23	400.00	270.00
	E	205	455	4725	35.00	456.00	0.003	0.009	6.00	152	0.00	455	37.23	400.00	64.00
	F	205	455	4725	35.00	456.00	0.005	0.009	6.00	152	0.00	455	37.23	400.00	300.00
Chiew et al, 2007	A2	200	350	2600	41.40	516.00	0.006	0.005	1.70	200	0.00	350	27.00	525.00	203.50
	A3	200	350	2600	41.40	516.00	0.006	0.005	6.80	200	0.00	350	27.00	525.00	219.25
	A4	200	350	2600	41.40	516.00	0.006	0.005	15.30	200	0.00	350	27.00	525.00	238.50

	A5	200	350	2600	41.40	516.00	0.006	0.005	1.70	200	0.00	350	27.00	525.00	196.00
	A6	200	350	2600	41.40	516.00	0.006	0.005	1.70	200	0.00	350	27.00	525.00	204.75
	B2	200	350	2600	41.40	516.00	0.006	0.005	1.70	200	0.00	350	27.00	525.00	201.00
	B3	200	350	2600	41.40	516.00	0.006	0.005	6.80	200	0.00	350	27.00	525.00	209.00
	B4	200	350	2600	41.40	516.00	0.006	0.005	15.30	200	0.00	350	27.00	525.00	243.25
	B5	200	350	2600	41.40	516.00	0.006	0.005	1.70	200	0.00	350	27.00	525.00	198.00
	B6	200	350	2600	41.40	516.00	0.006	0.005	1.70	200	0.00	350	27.00	525.00	200.25
Yasmeen et al, 2011	RF1	150	300	1560	29.00	512.00	0.006	0.007	1.20	50	100.00	300	165.00	2640.00	166.00
	RF2	150	300	1560	29.00	512.00	0.006	0.007	1.20	50	100.00	300	165.00	2640.00	142.00
	RF3	150	300	1560	29.00	512.00	0.006	0.007	1.20	50	100.00	300	165.00	2640.00	128.00
	RS1	150	300	1560	29.00	512.00	0.013	0.002	1.20	50	100.00	300	165.00	2640.00	270.00
Jiangfeng Dong et al, 2013	CR2	150	250	1500	25.00	410.00	0.004	0.004	0.11	50	100.00	250	242.00	4103.00	76.93
	CR3	150	250	1500	25.00	410.00	0.004	0.004	0.22	50	100.00	250	242.00	4103.00	93.66
	CR4	150	250	1500	25.00	410.00	0.004	0.004	0.22	50	100.00	250	242.00	4103.00	84.39
	CR5	150	250	1500	25.00	410.00	0.004	0.004	0.22	50	100.00	250	242.00	4103.00	121.70
	CR6	150	250	1500	25.00	410.00	0.004	0.004	0.22	50	100.00	250	242.00	4103.00	95.89
	CR7	150	250	1500	35.00	410.00	0.004	0.004	0.22	50	100.00	250	242.00	4103.00	80.45
	SR2	150	300	1500	22.80	410.00	0.004	0.004	0.27	50	100.00	300	73.00	3400.00	146.20
	SR3	150	300	1500	22.80	410.00	0.004	0.004	0.22	50	100.00	300	73.00	3400.00	187.12
	SR4	150	300	1500	22.80	410.00	0.004	0.004	0.22	50	100.00	300	73.00	3400.00	187.74
	SR5	150	250	1500	22.80	410.00	0.004	0.004	0.22	50	100.00	300	73.00	3400.00	158.49
	SR7	150	300	1500	31.30	410.00	0.004	0.004	0.22	50	100.00	300	73.00	3400.00	193.55
Alagusundaramoorthy et al.,2003	CB3-2S	230	380	4880	31.00	414.00	0.012	0.015	1.40	76	150.00	380	138.00	2068.00	263.00
	CB4-2S	230	380	4880	31.00	414.00	0.012	0.015	1.40	76	150.00	380	138.00	2068.00	260.00
	CB5-3S	230	380	4880	31.00	414.00	0.012	0.015	1.40	76	150.00	380	138.00	2068.00	287.00
	CB6-3S	230	380	4880	31.00	414.00	0.012	0.015	1.40	76	150.00	380	138.00	2068.00	275.00
	CB7-1S	230	380	4880	31.00	414.00	0.012	0.015	4.78	102	150.00	380	48.00	552.00	256.00
	CB8-1SB	230	380	4880	31.00	414.00	0.012	0.015	4.78	102	150.00	380	48.00	552.00	273.00
	CB9-1SB	230	380	4880	31.00	414.00	0.012	0.015	4.78	102	150.00	380	48.00	552.00	249.00
	CB10-2SB	230	380	4880	31.00	414.00	0.012	0.015	4.78	102	150.00	380	48.00	552.00	306.00

CB11-1F	230	380	4880	31.00	414.00	0.012	0.015	0.18	102	150.00	380	228.00	490.00	219.00
CB12-1F	230	380	4880	31.00	414.00	0.012	0.015	0.18	102	150.00	380	228.00	490.00	223.00
CB13-2F	230	380	4880	31.00	414.00	0.012	0.015	0.18	102	150.00	380	228.00	490.00	263.00
CB14-2F	230	380	4880	31.00	414.00	0.012	0.015	0.18	102	150.00	380	228.00	490.00	270.00

Çizelge 10.3. Kirişte burulma davranışı için veri tabanındaki bilgiler

Referans	Örnek Adı	b mm	d mm	L mm	f _c MPa	f _y MPa	ρ _{st}	ρ _{sv}	(n*tf) mm	w _f mm	s _f mm	E _f GPa	f _{tu} MPa	Tu kNm
Ghobarah ve diğ.,2002	C1	150.00	350.00	2440	37.00	409.00	0.011	0.006	0.17	1000.00	0.00	252.00	4300	6.80
	C2	150.00	350.00	2440	37.00	409.00	0.011	0.006	0.17	100.00	200.00	252.00	4300	2.90
	C3	150.00	350.00	2440	37.00	409.00	0.011	0.006	0.17	100.00	170.00	252.00	4300	1.30
	C4	150.00	350.00	2440	37.00	409.00	0.011	0.006	0.17	200.00	300.00	252.00	4300	4.70
	C5	150.00	350.00	2440	37.00	409.00	0.011	0.006	0.17	100.00	250.00	252.00	4300	2.40
	C6	150.00	350.00	2440	37.00	409.00	0.011	0.006	0.17	100.00	230.00	252.00	4300	5.80
	G1	150.00	350.00	2440	37.00	409.00	0.011	0.006	0.35	1000.00	0.00	87.00	1317	7.80
	G2	150.00	350.00	2440	37.00	409.00	0.011	0.006	0.35	100.00	200.00	87.00	1317	2.10
Panchacharam ve diğ.,2002	A90W4	279.40	279.40	3960	34.00	460.00	0.010	0.005	1.00	3690.00	0.00	72.00	1520	27.00
	A90S4	279.40	279.40	3960	34.00	460.00	0.010	0.005	1.00	114.30	228.60	72.00	1520	16.00
	A0L4	279.40	279.40	3960	34.00	460.00	0.010	0.005	1.00	3690.00	0.00	72.00	1520	11.00
	A0L3	279.40	279.40	3960	34.00	460.00	0.010	0.005	1.00	3690.00	0.00	72.00	1520	8.00
	B0L4/90S4	279.40	279.40	3960	26.00	460.00	0.010	0.005	2.00	114.30	228.60	72.00	1520	17.00
	B90U3Anch	279.40	279.40	3960	26.00	460.00	0.010	0.005	1.00	3690.00	0.00	72.00	1520	7.00
	C90U3	279.40	279.40	3960	31.00	460.00	0.010	0.005	1.00	3690.00	0.00	72.00	1520	6.00
Hii ve diğ.,2006	FS050D2	350.00	500.00	2500	56.40	426.00	0.006	0.002	0.35	50.00	300.00	240.00	3800	30.90
	FH075D1	350.00	500.00	2500	48.90	426.00	0.027	0.002	0.18	50.00	425.00	240.00	3800	18.10
	FH050D1	350.00	500.00	2500	56.40	426.00	0.027	0.002	0.18	50.00	300.00	240.00	3800	25.40
	FH050D2	350.00	500.00	2500	52.80	426.00	0.027	0.002	0.35	50.00	300.00	240.00	3800	38.30
Ameli ve diğ.,2007	CFE	150.00	350.00	1900	39.00	251.00	0.015	0.005	0.17	1900.00	0.00	244.00	3943	13.00
	CFE2	150.00	350.00	1900	39.00	251.00	0.015	0.005	0.33	1900.00	0.00	244.00	3943	21.50
	CJE	150.00	350.00	1900	39.00	251.00	0.015	0.005	0.17	1900.00	0.00	244.00	3943	5.00
	CFS	150.00	350.00	1900	39.00	251.00	0.015	0.005	0.17	100.00	200.00	244.00	3943	6.70
	CJS	150.00	350.00	1900	39.00	251.00	0.015	0.005	0.17	100.00	200.00	244.00	3943	2.40
	GFE	150.00	350.00	1900	36.00	251.00	0.015	0.005	0.17	1900.00	0.00	73.00	3373	11.50

	GFE2	150.00	350.00	1900	36.00	251.00	0.015	0.005	0.33	1900.00	0.00	73.00	3373	16.30
	GJE	150.00	350.00	1900	36.00	251.00	0.015	0.005	0.17	1900.00	0.00	73.00	3373	4.70
	GFS	150.00	350.00	1900	36.00	251.00	0.015	0.005	0.17	100.00	200.00	73.00	3373	5.10
	GJS	150.00	350.00	1900	36.00	251.00	0.015	0.005	0.17	100.00	200.00	73.00	3373	2.10
Chalioris ve diğ.,2008	Ra-F(1)	100.00	200.00	1600	27.50	560.00	0.010	0.007	0.11	1600.00	0.00	230.00	3900	2.50
	Ra-F(2)	100.00	200.00	1600	27.50	560.00	0.010	0.007	0.22	1600.00	0.00	230.00	3900	4.30
	Ra-F(1)	100.00	200.00	1600	27.50	560.00	0.010	0.007	0.22	150.00	300.00	230.00	3900	0.60
	Ra-F(2)	150.00	300.00	1600	28.80	560.00	0.004	0.007	0.11	1600.00	0.00	230.00	3900	3.10
	Ra-Fs150(2)	150.00	300.00	1600	28.80	560.00	0.004	0.007	0.11	200.00	400.00	230.00	3900	2.40
	Rb-F(1)	150.00	300.00	1600	28.80	560.00	0.004	0.007	0.11	300.00	600.00	230.00	3900	0.60
	Rb-Fs200(1)	150.00	300.00	1600	26.50	560.00	0.007	0.007	0.11	1600.00	0.00	230.00	3900	0.50
	Rb-Fs300(1)	150.00	300.00	1600	26.50	560.00	0.007	0.007	0.22	1600.00	0.00	230.00	3900	1.00
Mohammadizadeh ve diğ.,2009	ACS1	150.00	350.00	2000	74.39	404.00	0.006	0.009	0.18	100.00	200.00	240.00	3800	1.40
	ACUJ-anc.	150.00	350.00	2000	72.67	404.00	0.006	0.009	0.18	2000.00	0.00	240.00	3800	7.60
	ACW1	150.00	350.00	2000	73.18	404.00	0.006	0.009	0.18	2000.00	0.00	240.00	3800	7.00
	ACW2	150.00	350.00	2000	73.24	404.00	0.006	0.009	0.35	2000.00	0.00	240.00	3800	10.90
	BCS1	150.00	350.00	2000	78.52	404.00	0.012	0.009	0.18	100.00	200.00	240.00	3800	1.80
	BCUJ-anc.	150.00	350.00	2000	80.56	404.00	0.012	0.009	0.18	2000.00	0.00	240.00	3800	11.10
	BCW1	150.00	350.00	2000	78.12	404.00	0.012	0.009	0.18	2000.00	0.00	240.00	3800	10.80
	BCW2	150.00	350.00	2000	74.95	404.00	0.012	0.009	0.35	2000.00	0.00	240.00	3800	17.30
	CCW1	150.00	350.00	2000	73.33	404.00	0.015	0.015	0.18	2000.00	0.00	240.00	3800	13.40
	CCW2	150.00	350.00	2000	74.43	404.00	0.015	0.015	0.35	2000.00	0.00	240.00	3800	22.90
Chai ve diğ.,2014	ST-S	250.00	350.00	3000	45.00	402.00	0.016	0.003	0.14	100.00	200.00	230.00	4900	4.00
	ST-T	750.00	350.00	3000	43.00	402.00	0.016	0.002	0.14	100.00	200.00	230.00	4900	17.00
Elwan ,2016	WR1	120.00	400.00	2000	20.00	360.00	0.007	0.004	0.12	50.00	200.00	230.00	4100	2.00
	WR2	120.00	400.00	2000	20.00	360.00	0.007	0.004	0.12	100.00	200.00	230.00	4100	4.10
	WT1	80.00	400.00	2000	20.00	360.00	0.009	0.006	0.12	100.00	200.00	230.00	4100	8.10
	WT2	80.00	400.00	2000	20.00	360.00	0.009	0.006	0.12	100.00	200.00	230.00	4100	15.60

Askandar ve diğ., 2020	100C100	150.00	250.00	2000	48.00	541.00	0.023	0.005	0.17	2000.00	0.00	230.00	3900	25.20
	100C150	150.00	250.00	2000	48.00	541.00	0.023	0.005	0.17	100.00	150.00	230.00	3900	21.90
	100C200	150.00	250.00	2000	48.00	541.00	0.023	0.005	0.17	100.00	200.00	230.00	3900	19.90
	2(100C150)	150.00	250.00	2000	48.00	541.00	0.023	0.005	0.17	100.00	150.00	230.00	3900	25.80
	2(100C200)	150.00	250.00	2000	48.00	541.00	0.023	0.005	0.17	100.00	200.00	230.00	3900	20.00
Saad Khalaf Mohaisen ,2019	BR-fc30-e1	100.00	200.00	2000	30.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	72.50
	BR-fc30-e2	100.00	200.00	2000	30.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	56.50
	BR-fc30-e3	100.00	200.00	2000	30.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	47.50
	BR-fc30-e4	100.00	200.00	2000	30.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	36.50
	BR-fc60-e1	100.00	200.00	2000	60.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	107.50
	BR-fc60-e2	100.00	200.00	2000	60.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	90.00
	BR-fc60-e3	100.00	200.00	2000	60.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	74.00
	BR-fc60-e4	100.00	200.00	2000	60.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	67.50
	BF-fc30-e1	100.00	200.00	2000	30.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	78.00
	BF-fc30-e2	100.00	200.00	2000	30.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	63.00
	BF-fc30-e3	100.00	200.00	2000	30.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	52.00
	BF-fc30-e4	100.00	200.00	2000	30.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	41.00
	BF-fc60-e1	100.00	200.00	2000	60.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	125.00
	BF-fc60-e2	100.00	200.00	2000	60.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	123.00
	BF-fc60-e3	100.00	200.00	2000	60.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	100.00
	BF-fc60-e4	100.00	200.00	2000	60.00	484.00	0.08	0.010	0.17	150.00	100.00	227.00	3800	80.00
Jing ve diğ., 2007	B-6	400.00	600.00	3400	40.00	310.00	0.004	0.001	0.11	200.00	100.00	233.00	4100	160.50
	B-7	400.00	600.00	3400	40.00	310.00	0.004	0.001	0.11	250.00	150.00	233.00	4100	190.68
	B-8	400.00	600.00	3400	40.00	310.00	0.004	0.001	0.11	250.00	150.00	233.00	4100	204.20
İlkhani ve diğ.,2021	C1-S	200.00	300.00	1300	41.00	390.00	0.012	0.008	0.13	100.00	200.00	230.00	4900	25.83
	C1-N	200.00	300.00	1300	41.00	390.00	0.012	0.008	0.26	100.00	200.00	230.00	4900	29.87
	C1-C	200.00	300.00	1300	41.00	390.00	0.012	0.008	0.26	100.00	200.00	230.00	4900	27.75
	C2-S	200.00	300.00	2300	41.00	390.00	0.012	0.008	0.13	100.00	200.00	230.00	4900	25.00
	C2-N	200.00	300.00	2300	41.00	390.00	0.012	0.008	0.26	100.00	200.00	230.00	4900	27.54
	C2-C	200.00	300.00	2300	41.00	390.00	0.012	0.008	0.26	100.00	200.00	230.00	4900	26.96

Ma ve diğ., 2020	2CBS	400.00	350.00	2500	35.00	547.10	0.003	0.005	0.12	100.00	400.00	230.00	4900	38.90
	2CBSL1	400.00	350.00	2500	35.00	547.10	0.003	0.005	0.12	100.00	400.00	230.00	4900	42.50
	2CBSL2	400.00	350.00	2500	35.00	547.10	0.003	0.005	0.23	100.00	400.00	230.00	4900	47.30
	1CBS	400.00	350.00	2500	35.00	547.10	0.003	0.005	0.12	100.00	400.00	230.00	4900	35.10
	1CBSL1	400.00	350.00	2500	35.00	547.10	0.003	0.005	0.12	100.00	400.00	230.00	4900	39.40
	1CBSL2	400.00	350.00	2500	35.00	547.10	0.003	0.005	0.23	100.00	400.00	230.00	4900	45.00
	3CBS	400.00	350.00	2500	35.00	547.10	0.003	0.005	0.12	100.00	400.00	230.00	4900	26.30
	3CBSL1	400.00	350.00	2500	35.00	547.10	0.003	0.005	0.12	100.00	400.00	230.00	4900	32.00
	3CBSL2	400.00	350.00	2500	35.00	547.10	0.003	0.005	0.23	100.00	400.00	230.00	4900	37.00
Obaidat ve diğ., 2019	Bo	250.00	250.00	1600	41.00	420.00	0.004	0.008	2.50	15.00	250.00	165.00	3100	17.47
	B-V-100-N	250.00	250.00	1600	41.00	420.00	0.004	0.008	2.50	15.00	250.00	165.00	3100	18.10
	B-I-100-N	250.00	250.00	1600	41.00	420.00	0.004	0.008	2.50	15.00	250.00	165.00	3100	20.25
	B-I-250-N	250.00	250.00	1600	41.00	420.00	0.004	0.008	2.50	15.00	250.00	165.00	3100	21.50
	B-I-250-Sb	250.00	250.00	1600	41.00	420.00	0.004	0.008	2.50	15.00	250.00	165.00	3100	23.10
	B-V-250-Sb	250.00	250.00	1600	41.00	420.00	0.004	0.008	2.50	15.00	250.00	165.00	3100	22.20
	BV-2502Sw	250.00	250.00	1600	41.00	420.00	0.004	0.008	2.50	15.00	250.00	165.00	3100	20.50
Abduljalil ve Sarsam,2012	B1	450.00	235.00	1800	33.00	530.00	0.004	0.006	0.13	50.00	150.00	230.00	3500	4.20
	B290W	450.00	235.00	1800	34.00	530.00	0.004	0.006	0.13	50.00	150.00	230.00	3500	5.40
	B390WF	450.00	235.00	1800	31.00	530.00	0.004	0.006	0.13	50.00	150.00	230.00	3500	5.40
	B690WFL	450.00	235.00	1800	32.00	530.00	0.004	0.006	0.13	50.00	150.00	230.00	3500	6.60
	B845WF	450.00	235.00	1800	34.00	530.00	0.004	0.006	0.13	50.00	150.00	230.00	3500	4.80

Çizelge 10.4. Döşeme eğilme davranışı için veri tabanındaki bilgiler

Referans	Örnek Adı	b _x mm	b _y mm	t mm	f _y MPa	f _c MPa	A _s mm ²	t _f mm	w _f mm	s _f mm	E _f GPa	ε _f MPa	P kN
Kotynia ve diğ. 2014	B12-asp	500	6000	220	544.40	32.20	159.90	1.20	100	200	173.30	2857.00	52.60
	B12-sp	500	6000	220	511.40	28.70	159.90	1.30	100	200	173.30	2857.00	46.80
	B12-asp-e	500	6000	220	539.60	41.60	162.70	1.40	100	200	173.30	2857.00	48.30
	B12-sp-e	500	6000	220	539.60	40.90	162.70	1.50	100	200	173.30	2857.00	45.10
	B12-a	500	6000	220	539.60	45.30	162.70	1.60	100	200	173.30	2857.00	50.60
	B16-asp	500	6000	220	595.00	49.00	247.90	1.70	100	200	173.30	2857.00	74.40
	B16-asp-e	500	6000	220	595.00	51.00	247.90	1.80	100	200	173.30	2857.00	72.00
Mahmoud ve diğ. 2021	C 70 LR C	300.00	2000	100	550.13	72.80	100.48	1.02	100	200	73.77	1240.00	8.80
	C 70 LR 1L	300	2000	100	550.13	72.80	100.48	1.03	100	200	73.77	1240.00	26.60
	C 70 LR 2L	300	2000	100	550.13	72.80	100.48	1.04	100	200	73.77	1240.00	42.10
	C 70 MR C	300	2000	100	550.13	72.80	226.08	1.05	100	200	73.77	1240.00	26.00
	C 70 MR 1L	300	2000	100	550.13	72.80	226.08	1.06	100	200	73.77	1240.00	45.20
	C 70 MR 2L	300	2000	100	550.13	72.80	226.08	1.07	100	200	73.77	1240.00	47.44
	C 70 HR	300	2000	100	550.13	72.80	401.92	1.08	100	200	73.77	1240.00	33.04
	C 70 HR 1L	300	2000	100	550.13	72.80	401.92	1.09	100	200	73.77	1240.00	56.08
	C 70 HR 2L	300	2000	100	550.13	72.80	401.92	1.10	100	200	73.77	1240.00	59.30
Al-Ghazawi ve Al-Rousan,2020	No 1	600	2440	125	410.00	55.00	126.39	0.17	100	0	228.00	4272.00	108.10
	No 2	600	2440	125	410.00	55.00	126.39	0.33	100	300	228.00	4272.00	136.40
	No 3	600	2440	125	410.00	55.00	126.39	0.50	100	100	228.00	4272.00	154.70
	No 4	600	2440	125	410.00	55.00	126.39	0.66	100	40	228.00	4272.00	170.80
	No 5	600	2440	125	410.00	55.00	126.39	0.83	100	17	228.00	4272.00	186.00
	No 6	600	2440	125	410.00	55.00	126.39	0.99	600	0	228.00	4272.00	200.40
Fang ve diğ.,2021	M-P-3	700	2300	100	446.30	43.50	141.30	1.07	100	150	35.10	725.95	47.80
	M-P-5	700	2300	100	446.30	43.50	141.30	1.07	100	150	35.10	725.95	53.80
	S-P-3	700	2300	100	446.30	43.50	141.30	1.07	100	150	35.10	725.95	33.20

	S-P-5	700	2300	100	446.30	43.50	141.30	1.07	100	150	35.10	725.95	38.00
Nehal ve diğ.,2020	S03	600	3000	120	360.00	24.00	816.40	0.17	600	0	72.00	1500.00	82.50
	S04	600	3000	120	360.00	24.00	816.40	0.17	600	0	72.00	1500.00	92.80
	S06	600	3000	120	360.00	24.00	816.40	0.17	600	0	72.00	1500.00	88.90
	S07	600	3000	120	360.00	24.00	816.40	0.17	600	0	72.00	1500.00	99.00
Moshiri ve diğ.,2020	EBR-U	500	3400	150	548.00	35.00	2160.32	1.40	100	0	160.00	2800.00	30.70
	EBROG-U	500	3400	150	548.00	35.00	2160.32	1.50	100	0	160.00	2800.00	41.10
	EBROG-P	500	3400	150	548.00	35.00	2160.32	1.60	100	0	160.00	2800.00	54.40
Yazdani ve diğ.,2021	S3	500	2000	150	350.00	52.00	722.20	0.50	500	0	130.00	1760.00	84.20
	S4	500	2000	150	350.00	52.00	722.20	0.50	500	0	130.00	1760.00	96.41

Çizelge 10.5. Döşeme zımbalama davranışı için veri tabanındaki bilgiler

Referans	Örnek Adı	b_x mm	b_y mm	t mm	f_c MPa	f_y MPa	A_s mm ²	t_f mm	E_f GPa	ε_f MPa	w_f mm	P kN
Harajli and Soudki, 2003	sA1f5	670	670	55	29.10	487.60	251.20	0.13	230.00	3500	50.00	43.50
	sA1f10	670	670	55	34.30	487.60	251.20	0.13	230.00	3500	100.00	65.20
	sA1f15	670	670	55	23.50	487.60	251.20	0.13	230.00	3500	150.00	53.00
	sA2f10	670	670	55	31.90	487.60	251.20	0.13	230.00	3500	100.00	67.40
	sA2f15	670	670	55	35.50	487.60	251.20	0.13	230.00	3500	150.00	78.80
	sA2f20	670	670	55	23.50	487.60	251.20	0.13	230.00	3500	200.00	66.00
	sB1f10	670	670	75	31.90	488.50	392.50	0.13	230.00	3500	100.00	110.00
	sB1f15	670	670	75	33.00	488.50	392.50	0.13	230.00	3500	150.00	101.70
	sB1f10(2l)	670	670	75	34.30	488.50	392.50	0.13	230.00	3500	100.00	107.20
	sB2f15	670	670	75	29.10	488.50	392.50	0.13	230.00	3500	150.00	130.70
	sB2f20	670	670	75	33.00	488.50	392.50	0.13	230.00	3500	200.00	116.00
	sB2f15(2l)	670	670	75	34.30	488.50	392.50	0.26	230.00	3500	150.00	123.00
El-salakawy ve diğ., 2004	sX-gf	1540	1020	120	32.00	488.50	1334.50	0.26	54.00	1260	100.00	130.00
	sfo	1540	1020	120	31.50	488.50	1334.50	0.36	54.00	1260	100.00	110.00
	sH-gf	1540	1020	120	32.00	488.50	1334.50	0.36	54.00	1260	100.00	135.00
Soudki ve diğ., 2012	s-4-o-o	1220	1220	100	25.80	440.00	1884.00	1.20	155.00	2400	100.00	181.00
	s-4-o-A	1220	1220	100	25.80	440.00	1884.00	1.20	155.00	2400	100.00	163.80
	s-4-s-o	1220	1220	100	25.80	440.00	1884.00	1.20	155.00	2400	100.00	206.90
	s-4-s-A	1220	1220	100	25.80	440.00	1884.00	1.20	155.00	2400	100.00	173.70
	s-8-o-Ao	1220	1220	100	25.80	440.00	1884.00	1.20	155.00	2400	100.00	192.90
Sharaf ve diğ., (2006)	4-o-cfrP	2000	2000	150	25.00	410.00	7536.00	1.20	165.00	2800	0.00	420.00
	4-s-cfrP	2000	2000	150	28.00	410.00	7536.00	1.20	165.00	2800	0.00	451.00
	8-o-cfrP	2000	2000	150	25.00	410.00	7536.00	1.20	165.00	2800	0.00	456.00
	8-s-cfrP	2000	2000	150	25.00	410.00	7536.00	1.20	165.00	2800	0.00	462.00
	8-oves-cfrP	2000	2000	150	28.00	410.00	7536.00	1.20	165.00	2800	0.00	477.00

Abdullah ve diğ., 2013	rs-f7	1800	1800	150	35.50	570.00	904.32	1.20	172.00	2970	100.00	220.00
	rs-f15	1800	1800	150	35.50	570.00	904.32	1.20	172.00	2970	100.00	240.00
	rs-f30	1800	1800	150	35.50	570.00	904.32	1.20	172.00	2970	100.00	307.00
Erdogan ve diğ., 2013	lc	2130	2130	150	15.60	464.00	9068.32	1.02	234.50	3793	25.00	401.00
	lf-r	2130	2130	150	15.60	464.00	9068.32	1.02	234.50	3793	25.00	465.00
	ls	2130	2130	150	15.60	464.00	9068.32	1.02	234.50	3793	25.00	696.00
	nc	2130	2130	150	32.30	464.00	9068.32	1.02	234.50	3793	25.00	547.00
	nf-r	2130	2130	150	32.30	464.00	9068.32	1.02	234.50	3793	25.00	683.00
	n-s	2130	2130	150	32.30	464.00	9068.32	1.02	234.50	3793	25.00	750.00
	nD-r	2130	2130	150	32.30	464.00	9068.32	1.02	234.50	3793	25.00	940.00
Sissakis ve Sheikh, 2007	A4	1500	1500	150	42.60	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	632.00
	A3'	1500	1500	150	36.10	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	591.00
	B3'	1500	1500	150	36.10	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	659.00
	B4'	1500	1500	150	36.10	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	638.00
	c3'	1500	1500	150	36.10	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	612.00
	c4'	1500	1500	150	36.10	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	673.00
	D3'	1500	1500	150	36.10	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	550.00
	D4'	1500	1500	150	36.10	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	605.00
	A3	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	646.00
	A5	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	671.00
	B3	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	744.00
	B5	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	791.00
	c3	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	775.00
	c5	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	858.00
	D3	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	616.00
	D5	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	617.00
	A4	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	595.00
	A6	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	631.00
	B4	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	701.00
	B6	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	791.00

	c4	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	781.00
	c6	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	872.00
	D4	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	634.00
	D6	1500	1500	150	34.50	428.00	500.00	0.89	0.26	3190	0.00	617.00
Erdogan ve diğ., 2010	iP3	2000	2000	150	33.00	448.00	9595.84	0.165	230.00	3450	25.00	601.00
	iP4	2000	2000	150	26.00	448.00	9595.84	0.165	230.00	3450	25.00	571.00
	iP5	2000	2000	150	31.00	448.00	9595.84	0.165	230.00	3450	25.00	657.00
	cWs	2000	2000	150	30.00	448.00	9595.84	0.165	230.00	3450	25.00	592.00
	cWos	2000	2000	150	31.00	448.00	9595.84	0.165	230.00	3450	25.00	594.00
Erdogan ve diğ., 2011	s1–120	2000	2000	150	31.00	448.00	9595.84	0.17	230.00	3450	120.00	657.00
	r2	2000	2000	150	29.00	448.00	9595.84	0.17	230.00	3450	0.00	423.00
	s2–120	2000	2000	150	33.00	448.00	9595.84	0.17	230.00	3450	120.00	649.00
	s2–180	2000	2000	150	30.00	448.00	9595.84	0.17	230.00	3450	180.00	571.00
	r3	2000	2000	150	30.00	448.00	9595.84	0.17	230.00	3450	0.00	414.00
	s3–180	2000	2000	150	30.00	448.00	9595.84	0.17	230.00	3450	180.00	564.00

Çizelge 10.6. Kolon moment taşıma kapasitesi için veri tabanındaki bilgiler

Referans	Örnek Adı	b mm	h mm	H mm	f _c MPa	f _y MPa	qg	qt	qf	E _t GPa	f _{tu} MPa	efu %	t _f mm	r mm	N/N ₀ -	Mr KNm
Nosho ve diğ.,1996	N02	280	280	2.36	41.60	407	0.01	0.003	0.01	261.48	4165	1.60	0.17	13.00	0.35	147.00
	N03	280	280	2.36	41.60	407	0.01	0.003	0.002	267.36	4206	1.57	0.11	13.00	0.36	137.00
	N04	280	280	2.36	42.70	407	0.01	0.003	0.001	267.36	4206	1.57	0.11	13.00	0.36	140.00
Walkup,1998	WA2	458	458	3.05	22.70	460	0.01	0.002	0.01	230.30	3515	1.50	0.17	51.00	0.29	581.00
	WA3	458	458	3.05	24.10	460	0.01	0.002	0.01	230.30	3515	1.50	0.17	51.00	0.27	537.00
	WA4	458	458	3.05	24.10	460	0.01	0.002	0.003	230.30	3515	1.50	0.17	51.00	0.27	556.00
Chaallal ve Shahawy, 2000	CS2-b	200	350	2.10	25.50	414	0.02	0.02	0.02	45.00	540	1.20	0.50	25.00	0.81	145.00
	CS2-c	200	350	2.10	25.50	414	0.02	0.02	0.02	45.00	540	1.20	0.50	25.00	0.50	159.00
	CS2-d	200	350	2.10	25.50	414	0.02	0.02	0.02	45.00	540	1.20	0.50	25.00	0.27	158.00
	CS2-e	200	350	2.10	25.50	414	0.02	0.02	0.02	45.00	540	1.20	0.50	25.00	0.21	179.00
Iacobucci ve diğ.,2003	IA2-a	305	305	1.47	36.50	465	0.03	0.01	0.01	76.35	962	1.26	1.00	16.00	0.37	229.00
	IA3-a	305	305	1.47	36.90	465	0.03	0.01	0.03	76.35	962	1.26	1.00	16.00	0.63	233.00
	IA4-a	305	305	1.47	36.90	465	0.03	0.01	0.01	76.35	962	1.26	1.00	16.00	0.63	218.00
	IA5-a	305	305	1.47	37.00	465	0.03	0.01	0.04	76.35	962	1.26	1.00	16.00	0.63	260.00
	IA6-a	305	305	1.47	37.00	465	0.03	0.01	0.03	76.35	962	1.26	1.00	16.00	0.37	246.00
Bousias ve diğ.,2007	B02-a	250	500	1.60	18.10	560	0.01	0.01	0.00	230.00	3450	1.50	0.13	13.00	0.40	358.00
	B03-a	250	500	1.60	17.90	560	0.01	0.01	0.01	230.00	3450	1.50	0.13	13.00	0.42	379.00
	B04-a	250	500	1.60	18.70	560	0.01	0.01	0.01	70.00	2170	3.10	0.17	13.00	0.39	326.00
	B02-b	500	250	1.60	18.10	560	0.01	0.01	0.00	230.00	3450	1.50	0.13	13.00	0.38	112.00
	B03-b	500	250	1.60	17.90	560	0.01	0.01	0.01	230.00	3450	1.50	0.13	13.00	0.40	122.00
	B04-b	500	250	1.60	18.70	560	0.01	0.01	0.01	70.000	2170	3.10	0.17	13.00	0.36	120.00
Elnabelsy ve Saatcioglu,2001	ES1-S	500	500	1.73	33.00	400	0.01	0.003	0.02	60.00	700	1.17	0.90	13.00	0.13	640.00
	ES2-S	500	500	1.73	38.00	400	0.01	0.003	0.04	60.00	700	1.17	0.90	13.00	0.13	640.00
Harajli ve Rteil, 2004	HR2-a	150	300	1.12	21.10	534	0.02	0.01	0.003	230.00	3500	1.50	0.13	13.00	0.21	65.00
	HR3-a	150	300	1.12	21.70	534	0.02	0.01	0.004	230.00	3500	1.50	0.13	13.00	0.21	70.00
	HR2-b	150	300	1.12	21.10	565	0.03	0.01	0.003	230.00	3500	1.50	0.13	13.00	0.24	94.00

	HR3-b	150	300	1.12	21.70	565	0.03	0.01	0.004	230.00	3500	1.50	0.13	13.00	0.23	94.00
Memon ve Sheikh, 2005	MS2	305	305	1.48	42.50	465	0.03	0.01	0.03	19.75	450	2.28	1.25	16.00	0.36	250.00
	MS3	305	305	1.48	42.70	465	0.03	0.01	0.07	19.75	450	2.28	1.25	16.00	0.61	252.00
	MS4	305	305	1.48	43.30	465	0.03	0.01	0.03	19.75	450	2.28	1.25	16.00	0.60	232.00
	MS5	305	305	1.48	43.70	465	0.03	0.01	0.02	19.75	450	2.28	1.25	16.00	0.36	235.00
	MS6	305	305	1.48	44.20	465	0.03	0.01	0.05	19.75	450	2.28	1.25	16.00	0.60	286.00
Ozcan ve diğ.,2008	OZ2	350	350	2.00	19.40	287	0.02	0.01	0.002	230.00	3430	1.50	0.17	30.00	0.27	171.00
	OZ3	350	350	2.00	14.00	287	0.02	0.01	0.002	230.00	3430	1.50	0.17	30.00	0.34	150.00
	OZ4	350	350	2.00	11.40	287	0.02	0.01	0.004	230.00	3430	1.50	0.33	30.00	0.40	134.00
	OZ5	350	350	2.00	15.60	287	0.02	0.01	0.004	230.00	3430	1.50	0.33	30.00	0.32	167.00
	OZ7	200	400	2.00	10.00	287	0.02	0.01	0.003	230.00	3430	1.50	0.17	30.00	0.35	92.00
	OZ8	200	400	2.00	10.50	287	0.02	0.01	0.003	230.00	3430	1.50	0.17	30.00	0.35	101.00
	OZ9	200	400	2.00	9.00	287	0.02	0.01	0.003	230.00	3430	1.50	0.17	30.00	0.35	100.00
	OZ10	200	400	2.00	15.50	287	0.02	0.01	0.003	230.00	3430	1.50	0.17	30.00	0.35	131.00
Ilki ve diğ.,2008	IK2	200	300	1.20	13.40	336	0.01	0.01	0.01	230.00	3430	1.50	0.17	40.00	0.37	51.00
	IK3	200	300	1.20	13.40	336	0.01	0.01	0.02	230.00	3430	1.50	0.17	40.00	0.37	48.00

Çizelge 10.7. Kolon eksenel yük taşıma kapasitesi için veri tabanındaki bilgiler

Referens	Örnek Adı	b mm	h mm	H mm	f _c MPa	f _y MPa	ps	psw	E _f GPa	ε _f MPa	w _f mm	s _f mm	t _f mm	r mm	P KN
Worajak ve diğ.,2020	λ1-HSC-1L	120	120	1080	21.00	452.00	0.03	0.002	240.00	3800	100	100.00	0.12	25.00	349.00
	λ1-HSC-2L-1	120	120	1080	21.00	452.00	0.03	0.002	240.00	3800	100	100.00	0.12	25.00	428.00
	λ1-HSC-2L-2	120	120	1080	21.00	452.00	0.03	0.002	240.00	3800	100	100.00	0.12	25.00	432.00
	λ2-HSC-1L	120	240	1080	21.00	452.00	0.03	0.002	240.00	3800	100	100.00	0.12	25.00	697.00
	λ2-HSC-2L-1	120	240	1080	21.00	452.00	0.03	0.002	240.00	3800	100	100.00	0.12	25.00	762.00
	λ2-HSC-2L-2	120	240	1080	21.00	452.00	0.03	0.002	240.00	3800	100	100.00	0.12	25.00	778.00
	λ4-HSC-1L	120	480	1080	21.00	452.00	0.03	0.002	240.00	3800	100	100.00	0.12	25.00	1062.00
	λ4-HSC-2L-1	120	480	1080	21.00	452.00	0.03	0.002	240.00	3800	100	100.00	0.12	25.00	1123.00
	λ4-HSC-2L-2	120	480	1080	21.00	452.00	0.03	0.002	240.00	3800	100	100.00	0.12	25.00	1072.00
Diegoa ve diğ., 2019	C_8.8	150	150	600	8.80	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	21.70
	C_13	150	150	600	13.00	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	23.20
	C_16.3	150	150	600	16.30	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	31.40
	C_16.5	150	150	600	16.70	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	28.40
	C_16.7	150	150	600	17.50	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	29.60
	C_17.5	150	150	600	26.40	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	25.80
	C_26.4	150	150	600	8.80	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	41.30
	G_8.8	150	150	600	13.00	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	20.80
	G_13	150	150	600	16.50	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	20.30
	G_16.5	150	150	600	16.70	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	24.60
	G_16.7	150	150	600	17.50	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	25.30
	G_17.5	150	150	600	40.80	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	24.60
	0_a	150	150	600	41.27	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	35.70
	0_b	150	150	600	40.79	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	35.30
	1_20_a	150	150	600	40.59	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	41.20
	1_20_b	150	150	600	41.10	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	44.80
	1_40_a	150	150	600	41.01	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	52.50
	1_40_b	150	150	600	40.87	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	51.50

	2_20_a	150	150	600	41.12	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	51.40
	2_20_b	150	150	600	43.62	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	58.90
	2_40_a	150	150	600	40.95	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	77.00
	2_40_b	150	150	600	41.03	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	75.10
	3_20_a	150	150	600	41.02	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	84.10
	3_20_b	150	150	600	41.12	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	73.20
	3_40_a	150	150	600	40.95	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	94.60
	3_40_b	150	150	600	40.97	500.00	0.01	0.01	237.00	4161	600	0.00	0.11	25.00	92.60
Zeng ve diğ., 2018	R1Lr25	290	435	1300	40.80	491.40	0.02	0.00	245.60	3993	1300	0.00	0.33	25.00	46.50
	R2Lr25	290	435	1300	35.20	491.40	0.02	0.00	245.60	3993	1300	0.00	0.67	25.00	42.10
	R0Lr25	290	435	1300	39.60	491.40	0.02	0.00	245.60	3993	1300	0.00	0.67	25.00	39.60
	R2Lr45	290	435	1300	32.10	491.40	0.02	0.00	245.60	3993	1300	0.00	0.67	45.00	42.20
	R2Lr65	290	435	1300	32.10	491.40	0.02	0.00	245.60	3993	1300	0.00	0.67	65.00	44.90
	R4Lr45	290	435	1300	28.90	491.40	0.02	0.00	245.60	3993	1300	0.00	1.34	45.00	45.20
	R4Lr65	290	435	1300	28.90	491.40	0.02	0.00	245.60	3993	1300	0.00	1.34	65.00	51.10
	R6Lr45	290	435	1300	32.10	491.40	0.02	0.00	245.60	3993	1300	0.00	2.00	45.00	63.90
	R6Lr65	290	435	1300	32.10	491.40	0.02	0.00	245.60	3993	1300	0.00	2.00	65.00	64.80
Herwig ve Motavalli, 2012	Col. 5	400	400	1640	70.00	500.00	0.01	0.00	80.00	1233	1640	0.00	1.50	25.00	5031.00
	Col. 6	400	400	1640	70.00	500.00	0.03	0.00	80.00	1233	1640	0.00	1.50	25.00	7222.00
	Col. 7	400	400	1640	70.00	500.00	0.04	0.00	80.00	1233	1640	0.00	1.50	25.00	8512.00
De Luca ve diğ., 2011	S-1-2GB	610	610	3048	37.10	420.00	0.01	0.00	77.00	3399	3048	0.00	0.48	20.00	9790.00
	R-0,5-5GA	356	508	3048	53.80	420.00	0.01	0.00	89.00	4840	3048	0.00	0.28	20.00	6490.00
	R-0,5-2GB	356	508	3048	46.40	420.00	0.01	0.00	89.00	4840	3048	0.00	0.28	20.00	5360.00
	R-0,5-5GB	356	508	3048	49.70	420.00	0.01	0.00	89.00	4840	3048	0.00	0.28	20.00	6860.00
Eid ve Paultre, 2017	C30S100N0	150	150	300	33.70	513.00	0.01	0.00	65.40	894	300	0.00	0.76	15.00	664.00
	C30S100N2	150	150	300	33.70	513.00	0.01	0.00	65.40	894	300	0.00	0.76	15.00	985.00
	C30S100N4	150	150	300	33.70	513.00	0.01	0.00	65.40	894	300	0.00	1.52	15.00	1373.00
	C30S50N0	150	150	300	33.70	513.00	0.01	0.00	65.40	894	300	0.00	1.52	15.00	803.00
	C30S50N2	150	150	300	33.70	513.00	0.01	0.00	65.40	894	300	0.00	0.76	15.00	1098.00
	C30S50N4	150	150	300	33.70	513.00	0.01	0.00	65.40	894	300	0.00	1.52	15.00	1379.00
Song ve diğ.,2020	PG-E	300	300	1660	22.60	636.00	0.01	0.01	80.00	30	1660	0.00	5.00	0.00	130.59

	PG-A	300	300	1660	22.60	636.00	0.01	0.01	80.00	30	1660	0.00	5.00	0.00	131.79
	PG-A	300	300	1660	22.60	636.00	0.01	0.01	80.00	30	1660	0.00	5.00	0.00	131.79
Kabashi ve diğ., 2014	MA1	100	100	400	38.50	420.00	0.01	0.00	230.00	4800	400	0.00	0.11	0.00	14.02
	MA2	100	100	400	38.50	420.00	0.01	0.00	230.00	4800	400	0.00	0.11	0.00	14.02
	MA3	100	100	400	38.50	420.00	0.01	0.00	230.00	4800	400	0.00	0.11	0.00	14.02
	MB1	100	100	400	38.50	420.00	0.01	0.00	230.00	4800	400	0.00	0.11	0.00	14.02
	MB2	100	100	400	38.50	420.00	0.01	0.00	230.00	4800	400	0.00	0.11	0.00	14.02
	MB3	100	100	400	38.50	420.00	0.01	0.00	230.00	4800	400	0.00	0.11	0.00	14.02
	MC1	100	100	400	38.50	420.00	0.01	0.00	230.00	4800	400	0.00	0.11	0.00	14.02
	MC2	100	100	400	38.50	420.00	0.01	0.00	230.00	4800	400	0.00	0.11	0.00	14.02
	MC3	100	100	400	38.50	420.00	0.01	0.00	230.00	4800	400	0.00	0.11	0.00	14.02
Özcan ve diğ., 2010	S1	200	400	2000	12.00	287.00	0.03	0.01	230.00	4100	2000	0.00	0.17	30.00	55.60
	S2	200	400	2000	10.00	287.00	0.03	0.01	230.00	4100	2000	0.00	0.17	30.00	46.00
	S3	200	400	2000	10.50	287.00	0.03	0.01	230.00	4100	2000	0.00	0.17	30.00	50.50
	S4	200	400	2000	9.00	287.00	0.03	0.01	230.00	4100	2000	0.00	0.17	30.00	50.00
	S5	200	400	2000	15.50	287.00	0.03	0.01	230.00	4100	2000	0.00	0.17	30.00	65.60
Colomb ve diğ., 2008	SC-PW-2C	200	200	600	32.50	420.00	0.04	0.00	80.00	880	100	100.00	0.11	15.00	217.90
	SC-PW-3C-1	200	200	600	32.50	420.00	0.04	0.00	80.00	880	100	100.00	0.11	15.00	211.56
	SC-PW-3C-2	200	200	600	32.50	420.00	0.04	0.00	80.00	880	50	50.00	0.11	15.00	199.11
	SC-PW-3C-3	200	200	600	32.50	420.00	0.04	0.00	80.00	880	150	100.00	0.11	15.00	218.66
	SC-PW-9G	200	200	600	32.50	420.00	0.04	0.00	80.00	880	100	100.00	0.11	15.00	223.47
Lieping Ye ve diğ., 2002	CS20-1-15	200	200	700	48.20	381.00	0.00	0.00	235.00	3500	200	200.00	0.11	0.00	177.50
	CS15-3-15	200	200	700	32.10	381.00	0.00	0.00	235.00	3500	200	200.00	0.11	0.00	171.00

Çizelge 10.8. Perde eksenel yük taşıma kapasitesi için veri tabanındaki bilgiler

Referans	Örnek Adı	b_w mm	l_w mm	H_w mm	ρ_l	ρ_s	f_c MPa	f_{yl} MPa	E_f GPa	ϵ_f MPa	w_f mm	s_f mm	t_f mm	P KN
Shen ve diğ., 2019	SHW0	1000	120	1600	0.006	0.001	31.00	335.00	105.00	2300	1600	0.00	0.121	272.70
Habibi ve diğ., 2020	SSW-CF1-1L	800	125	1500	0.008	0.004	25.00	400.00	130.00	1721	1500	0.00	0.20	121.80
	SSW-CF1-2L	800	125	1500	0.008	0.004	25.00	400.00	130.00	1721	1500	0.00	0.20	127.30
	SSW-CF2-1L	800	125	1500	0.008	0.004	25.00	400.00	130.00	1721	400	700	0.20	122.50
Altın ve diğ., 2013	Örnek 2	1000	100	1500	0.018	0.002	17.70	425.00	231.00	4100	100	200	0.12	249.00
	Örnek 3	1000	100	1500	0.018	0.002	15.00	425.00	231.00	4100	200	0.00	0.12	230.00
	Örnek 4	1000	100	1500	0.018	0.002	15.90	425.00	231.00	4100	200	0.00	0.12	247.00
	Örnek 5	1000	100	1500	0.018	0.002	15.60	425.00	231.00	4100	100	0.00	0.12	249.00
Vojdan ve Aghayari, 2016	SSW1-T1	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	504.70
	SSW1-T2	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	507.90
	SSW2-T1	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	526.60
	SSW2-T2	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	527.20
	SSW3-T1	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	538.20
	SSW3-T2	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	542.60
	SSW4-T1	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	522.10
	SSW4-T2	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	540.40
	SSW5-T1	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	518.60
	SSW5-T2	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	5214.00
	SSW6-T1	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	538.20
	SSW6-T2	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	547.50
	SSW7-T1	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	540.60
	SSW7-T2	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	536.80
	SSW8-T1	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	508.10
	SSW8-T2	3000	250	3000	0.008	0.005	40.00	400.00	169.00	1000	3000	0.00	0.20	514.50
Husain ve diğ.,2019	CW	1250	80	2600	0.008	0.005	50.00	386.00	230.00	3500	2600	0.00	0.13	113.63

Delnavaz ve Hamidnia, 2016	SW4	1250	80	2600	0.008	0.005	50.00	386.00	230.00	3500	2600	0.00	0.13	88.00
	SW8	1250	80	2600	0.008	0.005	50.00	386.00	230.00	3500	2600	0.00	0.13	71.00
	R-SW8-1	1250	80	2600	0.008	0.005	50.00	386.00	230.00	3500	2600	0.00	0.13	77.74
	R-SW8-2	1250	80	2600	0.008	0.005	50.00	386.00	230.00	3500	2600	0.00	0.13	79.40
	R-SW8-3	1250	80	2600	0.008	0.005	50.00	386.00	230.00	3500	2600	0.00	0.13	77.80
	R-SW8-4	1250	80	2600	0.008	0.005	50.00	386.00	230.00	3500	2600	0.00	0.13	77.17
	R-SW8-5	1250	80	2600	0.008	0.005	50.00	386.00	230.00	3500	2600	0.00	0.13	78.62
	R-SW8-6	1250	80	2600	0.008	0.005	50.00	386.00	230.00	3500	2600	0.00	0.13	76.77
	R-SW4-1	1250	80	2600	0.008	0.005	50.00	386.00	230.00	3500	2600	0.00	0.13	94.85
	R-SW4-2	1250	80	2600	0.008	0.005	50.00	386.00	230.00	3500	2600	0.00	0.13	91.12
	R-SW4-3	1250	80	2600	0.008	0.005	50.00	386.00	230.00	3500	2600	0.00	0.13	93.92
	R-SW4-4	1250	80	2600	0.008	0.005	50.00	386.00	230.00	3500	2600	0.00	0.13	93.82
	C-1-15-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	1500	0.00	0.12	197.50
	C-1-15-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	1500	0.00	0.24	205.00
	C-1-15-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	1500	0.00	0.36	216.20
	C-1-25-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	1500	0.00	0.12	249.00
	C-1-25-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	1500	0.00	0.24	249.90
	C-1-25-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	1500	0.00	0.36	255.40
	C-1-45-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	1500	0.00	0.12	352.70
	C-1-45-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	1500	0.00	0.24	357.60
	C-1-45-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	1500	0.00	0.36	367.10
	C-2-15-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.12	199.60
	C-2-15-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.24	213.00
	C-2-15-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.36	214.70
	C-2-25-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.12	243.30
	C-2-25-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.24	262.50
	C-2-25-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.36	280.20
	C-2-45-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.12	346.70
	C-2-45-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.24	374.80
	C-2-45-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.36	402.50

C-3-15-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.12	187.60
C-3-15-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.24	213.20
C-3-15-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.36	241.90
C-3-25-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.12	211.50
C-3-25-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.24	230.90
C-3-25-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.36	249.40
C-3-45-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.12	303.40
C-3-45-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.24	330.50
C-3-45-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	0.00	0.36	368.10
C-4-15-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.12	229.00
C-4-15-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.24	236.50
C-4-15-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.36	249.70
C-4-25-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.12	273.00
C-4-25-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.24	288.00
C-4-25-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.36	297.00
C-4-45-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.12	343.00
C-4-45-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.24	361.60
C-4-45-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.36	375.00
C-5-15-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	150	0.12	154.00
C-5-15-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	150	0.24	157.00
C-5-15-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	150	0.36	159.30
C-5-25-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	150	0.12	194.90
C-5-25-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	150	0.24	199.00
C-5-25-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	150	0.36	202.90
C-5-45-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	150	0.12	283.80
C-5-45-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	150	0.24	288.70
C-5-45-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	150	0.36	293.00
C-6-15-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.12	282.00
C-6-15-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.24	332.80
C-6-15-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.36	339.40

C-6-25-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.12	249.90
C-6-25-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.24	343.00
C-6-25-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.36	353.80
C-6-45-1 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.12	374.80
C-6-45-2 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.24	424.60
C-6-45-3 layer	1000	100	1500	0.018	0.002	15.50	430.00	231.00	4100	100	200	0.36	490.20
