



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**CAM ELYAF KATKILI GEOPOLİMER İLE İYİLEŞTİRİLEN
ZEMİNLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE
İSTATİSTİKSEL MODELLEMESİ**

ADNAN NASIR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Şanlıurfa
2025**



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**CAM ELYAF KATKILI GEOPOLİMER İLE İYİLEŞTİRİLEN
ZEMİNLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE
İSTATİSTİKSEL MODELLEMESİ**

ADNAN NASIR

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Tez Danışmanı: Doç. Dr. ARDA BURAK EKMEN**

**Şanlıurfa
2025**

TEŐEKKÖR

Yüksek lisans eğitiminin her aşamasında bilgi ve desteğini esirgemeyip her zaman yanımda olan kıymetli danışmanım Doç. Dr. Arda Burak EKMEN 'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam süresince her zaman maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan kıymetli arkadaşlarıma ve aileme de gönülden teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	iv
SİMGELER	v
KISALTMALAR	vi
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
3. GEREÇ VE YÖNTEM	10
3.1. Materyal	10
3.2. Yöntem	13
3.2.1. Cam Elyaf Katkısız Numunelerinin Hazırlanması ve Deney Yöntemi	13
3.2.2. Çoklu Doğrusal Regresyon	18
3.2.3. Genetik Algoritma Kullanarak Regresyon	18
3.2.4. Yapay Sinir Ağları Yöntemi	19
3.2.5. Cam Elyaf Katkılı Numunelerin Hazırlanması ve Deney Yöntemi	19
3.2.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	25
4. BULGULAR	27
4.1. Cam Elyaf Katkısız Numunelerinin Deney Sonuçları	27
4.2. Çoklu Doğrusal Regresyon Bulguları	27
4.3. Genetik Algoritma Tabanlı Regresyon Bulguları	31
4.4. Yapay Sinir Ağları Bulguları	38
4.5. Cam Elyaf Katkılı Numunelerin Deney Sonuçları	50
4.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları	63
5. TARTIŞMA	65
6. SONUÇLAR	66
7. ÖNERİLER	70
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	76

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CAM ELYAF KATKILI GEOPOLİMER İLE İYİLEŞTİRİLEN ZEMİNLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE İSTATİSTİKSEL MODELLEMESİ

ADNAN NASIR

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışman: Doç. Dr. ARDA BURAK EKMEN
Yıl: 2025, Sayfa : 76

Çevre dostu olarak tanımlanan geopolimerlerin geoteknik mühendisliğinde kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bu tez çalışmasında cam elyaf katkıli geopolimer kullanılarak iyileştirilen zeminlerin mekanik özellikleri incelenmiş olup elde edilen verilerin istatistiksel modellemesi gerçekleştirilmiştir. Yürütülen iyileştirme metodu çimento kullanımı ile salınan karbondioksit gazının azaltılmasını teşvik etmektedir. Bu çalışmada çevreci bir yaklaşımla çimento kullanmadan zemin iyileştirme çalışmalarının gerçekleştirilebileceği vurgulanmıştır. Çalışmanın amacı dahilinde cam elyaf katkısı olmadan hazırlanan kontrol karışımlarındaki sodyum silikat, sodyum hidroksit, uçucu kül ve benzeri diğer malzemelerin oransal dağılımı için literatürdeki çalışmalar referans alınmıştır. Cam elyaf katkısız kontrol karışımlarının eğilme ve basınç dayanımı test sonuçları elde edildikten sonra kontrol karışımlarına çeşitli boy ve oranlarda eklenen cam elyaf katkıları ile birçok farklı kombinasyon elde edilmiştir. Oluşturulan karışımlar için belirlenen kürleme sürelerinin ardından elde edilen numuneler serbest basınç ve eğilme testlerine tabi tutulmuş olup cam elyaf katkısının eğilme ve serbest basınç dayanımına olan etkisi araştırılmıştır. Numunelerdeki elyaf dağılımı taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile de ayrıca ele alınmıştır. Elde edilen veriler için çeşitli istatistiksel yöntemler kullanılarak veriler arasındaki korelasyonlar incelenip karışım oranlarına bağlı olarak tahmin denklemleri oluşturulmuştur. Böylece cam elyaf katkıli geopolimer kullanılarak iyileştirilen zeminler için sonraki araştırmacılara yol gösterebilecek fonksiyonlar sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELELER: Cam elyaf, Atık malzeme, Geopolimer ile zemin iyileştirme, İstatistiksel modelleme

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION AND STATISTICAL MODELLING OF MECHANICAL PROPERTIES OF SOILS IMPROVED WITH GLASS FIBER REINFORCED GEOPOLYMER

ADNAN NASIR

**HARRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE EDUCATION
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT**

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. ARDA BURAK EKMEN

Year: 2025, Page : 76

The use of geopolymers, which are defined as environmentally friendly, is becoming increasingly widespread in geotechnical engineering. In this thesis, the mechanical properties of soils enhanced with glass fiber-reinforced geopolymer were investigated, and the resulting data were statistically modeled. The conducted method promotes the reduction of carbon dioxide gas emitted by using cement. This study underscores that soil improvement can be accomplished without the use of cement, adopting an environmentally sustainable approach. Within the scope of the study, the proportional distribution of materials such as sodium silicate, sodium hydroxide, fly ash, and other similar components in the control mixtures prepared without glass fiber reinforcement was determined with reference to existing literature. Following the acquisition of flexural and compressive strength test results of the control mixtures without glass fiber reinforcement, various combinations were generated by incorporating glass fiber in different lengths and proportions into the control mixtures. The specimens obtained after the designated curing periods for the prepared mixtures were subjected to unconfined compression and flexural strength tests, and the effects of glass fiber reinforcement on both flexural and unconfined compressive strength were investigated. The fiber distribution in the specimens was also examined using a Scanning Electron Microscope(SEM) analysis. The obtained data were analyzed using various statistical methods to examine the correlations between variables, and predictive equations were developed based on the mixture proportions. Consequently, functions that may guide future researchers have been proposed for soils improved using glass fiber-reinforced geopolymer.

KEYWORDS: Glass fiber, Waste material, Geopolymer soil improvement, Statistical modeling

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	F sınıfı uçucu kül	10
Şekil 3.2.	Cam elyaf boyları; a) 6 mm, b) 12 mm, c) 24 mm	11
Şekil 3.3.	Geopolimer reaksiyonunda kullanılan kimyasallar; a) sodyum hidroksit (kristal form) ve b) sodyum silikat (sıvı form)	12
Şekil 3.4.	Killi zemin numunesi	13
Şekil 3.5.	Silindir ve kiriş biçimindeki kalıplara yerleştirilen kontrol numuneleri görünüşleri	14
Şekil 3.6.	Silindir ve kiriş numune kapları	15
Şekil 3.7.	Kürleme öncesi kalıplardan çıkarılan silindir ve kiriş kontrol numuneleri.....	16
Şekil 3.8.	Silindir ve kiriş biçimindeki numunelerin kürleme işlemleri	16
Şekil 3.9.	Kiriş kontrol numunelerinin eğilme deneyleri.....	17
Şekil 3.10.	Silindir kontrol numunelerinin serbest basınç deneyleri	17
Şekil 3.11.	Silindir ve kiriş kontrol numunelerinin serbest basınç ve eğilme deneyleri sonrasındaki görünümü.....	18
Şekil 3.12.	Killi zemin, cam elyaf ve uçucu kül karışımı görünümü.....	21
Şekil 3.13.	Silindir ve kiriş formundaki cam elyaf katkılı numuneler	22
Şekil 3.14.	Kürlemeye alınmak üzere kalıplardan çıkarılan silindir ve kiriş biçimindeki cam elyaf katkılı numuneler.....	22
Şekil 3.15.	Kürlemeye alınan silindir ve kiriş biçimindeki cam elyaf katkılı numuneler	23
Şekil 3.16.	Cam elyaf katkılı numunelerin eğilme deneyleri.....	24
Şekil 3.17.	Cam elyaf katkılı numunelerin serbest basınç deneyleri	24
Şekil 3.18.	Silindir ve kiriş biçimindeki cam elyaf katkılı numunelerin serbest basınç ve eğilme deneyleri sonrasındaki görünüşleri.....	25
Şekil 3.19.	SEM analizi işlemleri	26
Şekil 4.1.	Serbest basınç dayanımı deney sonuçları ve ÇDR model tahmini arasındaki ilişki.....	28
Şekil 4.2.	Serbest basınç dayanımı ÇDR Modeli için regresyon grafikleri; a) artık değerlerin normal grafiği, b) artık değerlere karşı tahmin edilenin uyum grafiği, c) artık değerlerin sıklık grafiği, d) sıralı artık değer karşılaştırma grafiği.....	29
Şekil 4.3.	Eğilme dayanımı deney sonuçları ve ÇDR model tahmini arasındaki ilişki	30
Şekil 4.4.	Eğilme dayanımı ÇDR modeli için regresyon grafikleri; a) artık değerlerin normal grafiği, b) artık değerlere karşı tahmin edilenin uyum grafiği, c) artık değerlerin sıklık grafiği, d) sıralı artık değer karşılaştırma grafiği.....	31
Şekil 4.5.	Serbest basınç dayanımı numuneleri için oluşturulan GEP modeli simgeleyen ağaç gösterimi	33
Şekil 4.6.	Serbest basınç numuneleri için oluşturulan GEP modeli ile tahmin edilen dayanım değerleri ve serbest basınç deney sonuçları arasındaki ilişki	35
Şekil 4.7.	Eğilme dayanımı numuneleri için oluşturulan GEP modeli simgeleyen ağaç gösterimi	36
Şekil 4.8.	Eğilme dayanımı deneyi numuneleri için oluşturulan GEP modeli ile tahmin edilen dayanım değerleri ve eğilme dayanım deney sonuçları arasındaki ilişki	38
Şekil 4.9.	Serbest basınç dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulmuş modelin iterasyon sayısına bağlı olarak hesaplanan MSE değerleri	39
Şekil 4.10.	Serbest basınç dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulan modelin hata histogramı	40
Şekil 4.11.	Serbest basınç dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulan modelin fonksiyonunun analiz çıktıları ve uygunluk eğrisi ile karşılaştırılması.....	41
Şekil 4.12.	Serbest basınç dayanımı için yapay sinir ağları modeli oluşturulurken dikkate alınan parametreler	42
Şekil 4.13.	Serbest basınç dayanımı deney sonuçları ve YSA modelinin tahmini arasındaki ilişki	43
Şekil 4.14.	Eğilme dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulmuş modelin, iterasyon sayısına bağlı olarak hesaplanan MSE değerleri	44
Şekil 4.15.	Eğilme dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulan modelin hata histogramı	45

Şekil 4.16. Eğilme dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulan modelin fonksiyonunun analiz çıktıları ve uygunluk eğrisi ile karşılaştırılması.....	46
Şekil 4.17. Eğilme dayanımı için yapay sinir ağları modeli oluşturulurken dikkate alınan parametreler	47
Şekil 4.18. Eğilme dayanımı deney sonuçları ve YSA modelinin tahmini arasındaki ilişki.....	48
Şekil 4.19. Cam elyaf lif uzunluğu 6 mm olan numunelerin farklı cam elyaf katkı oranlarına göre serbest basınç dayanımı değişimi ve numunelerin hata sınırları.....	50
Şekil 4.20. Cam elyaf lif uzunluğu 12 mm olan numunelerin farklı cam elyaf katkı oranlarına göre serbest basınç dayanımı değişimi ve numunelerin hata sınırları.....	51
Şekil 4.21. Cam elyaf lif uzunluğu 24 mm olan numunelerin farklı cam elyaf katkı oranlarına göre serbest basınç dayanımı değişimi ve numunelerin hata sınırları.....	51
Şekil 4.22. Cam elyaf lif uzunluğu 6 mm olan numunelerin farklı cam elyaf katkı oranlarına göre eğilme dayanımı değişimi ve numunelerin hata sınırları.....	57
Şekil 4.23. Cam elyaf lif uzunluğu 12 mm olan numunelerin farklı cam elyaf katkı oranlarına göre eğilme dayanımı değişimi ve numunelerin hata sınırları.....	57
Şekil 4.24. Cam elyaf lif uzunluğu 24 mm olan numunelerin farklı cam elyaf katkı oranlarına göre eğilme dayanımı değişimi ve numunelerin hata sınırları.....	58
Şekil 4.25. Sem analizi görüntüleri; a) kontrol numunesinde gözlemlenen boşluklu yapı ve çatlaklar, b) reaksiyona girmemiş uçucu kül yapısının kontrol numunesi içerisindeki görünümü, c) cam elyaf katkılı numunenin kompakt ve yoğun mikro yapısı, d) matrisle bütünleşmiş ve zemin ile özdeşleşmiş cam elyaf yapısı, e) basınç etkisiyle kopmuş cam elyaf yapısı ve çatlaklar, f) uçucu kül partikülleri ile zemin ile özdeşleşmiş cam elyafın birlikte yer aldığı mikro yapı	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. F sınıfı uçucu külün kimyasal bileşimi	10
Çizelge 3.2. Kimyasal malzemelerin özellikleri	12
Çizelge 3.3. Dikkate alınan karışım oranları (Özçınar, 2024)	14
Çizelge 3.4. Cam elyaf katkılı karışım kombinasyonları	20
Çizelge 4.1. Serbest basınç dayanımı için ÇDR modeli oluşturulurken kullanılan veriler ve ÇDR modeli tahmin sonuçları	28
Çizelge 4.2. Eğilme dayanımı için ÇDR modeli oluşturulurken kullanılan veriler ve ÇDR model tahmin sonuçları	30
Çizelge 4.3. ÇDR model istatistiksel değerler	31
Çizelge 4.4. Silindir numuneler için GEP modeli oluşturulurken kullanılan veriler ve GEP modeli tahmin sonuçları	32
Çizelge 4.5. Kiriş numuneler için GEP modeli oluşturulurken kullanılan veriler ve GEP model tahmin sonuçları	35
Çizelge 4.6. GEP model istatistiksel değerler	38
Çizelge 4.7. Serbest basınç dayanımı için YSA modeli oluşturulurken kullanılan veriler ve YSA modeli tahmin sonuçları	43
Çizelge 4.8. Eğilme dayanımı için YSA modeli oluşturulurken kullanılan veriler ve YSA modeli tahmin sonuçları	48
Çizelge 4.9. YSA modeli istatistiksel değerleri	49
Çizelge 4.10. YSA, GEP ve ÇDR modellerinin istatistiksel değerlerinin karşılaştırılması	49
Çizelge 4.11. %0.2 oranında cam elyaf katkılı silindir numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin serbest basınç dayanımlarına kıyaslamalı etkisi	52
Çizelge 4.12. %0.4 oranında cam elyaf katkılı silindir numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin serbest basınç dayanımlarına kıyaslamalı etkisi	52
Çizelge 4.13. %0.6 oranında cam elyaf katkılı silindir numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin serbest basınç dayanımlarına kıyaslamalı etkisi	53
Çizelge 4.14. %0.8 oranında cam elyaf katkılı silindir numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin serbest basınç dayanımlarına kıyaslamalı etkisi	54
Çizelge 4.15. Cam elyaf lif uzunluğu 6 mm olan numunelerde farklı cam elyaf katkı oranlarının serbest basınç dayanımı üzerindeki karşılaştırmalı etkisi	55
Çizelge 4.16. Cam elyaf lif uzunluğu 12 mm olan numunelerde farklı cam elyaf katkı oranlarının serbest basınç dayanımı üzerindeki karşılaştırmalı etkisi	55
Çizelge 4.17. Cam elyaf lif uzunluğu 24 mm olan numunelerde farklı cam elyaf katkı oranlarının serbest basınç dayanımı üzerindeki karşılaştırmalı etkisi	56
Çizelge 4.18. %0,2 oranında cam elyaf katkılı kiriş numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin eğilme dayanımlarına kıyaslamalı etkisi	58
Çizelge 4.19. %0,4 oranında cam elyaf katkılı kiriş numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin eğilme dayanımlarına kıyaslamalı etkisi	59
Çizelge 4.20. %0,6 oranında cam elyaf katkılı kiriş numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin eğilme dayanımlarına kıyaslamalı etkisi	60
Çizelge 4.21. %0,8 oranında cam elyaf katkılı kiriş numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin eğilme dayanımlarına kıyaslamalı etkisi	60
Çizelge 4.22. Cam elyaf lif uzunluğu 6 mm olan numunelerde farklı cam elyaf katkı oranlarının eğilme dayanımı üzerindeki karşılaştırmalı etkisi	61
Çizelge 4.23. Cam elyaf lif uzunluğu 12 mm olan numunelerde farklı cam elyaf katkı oranlarının eğilme dayanımı üzerindeki karşılaştırmalı etkisi	62
Çizelge 4.24. Cam elyaf lif uzunluğu 24 mm olan numunelerde farklı cam elyaf katkı oranlarının eğilme dayanımı üzerindeki karşılaştırmalı etkisi	62

SİMGELER

p	İstatistiksel Anlamlılığı Gösteren Değer
R	Korelasyon Katsayısı
σ	Serbest Basınç Dayanımı

KISALTMALAR

FHWA	The Federal Highway Administration-Amerika Birleşik Devletleri Federal Karayolu İdaresi
ÇDR	Çoklu Doğrusal Regresyon
GA	Genetik Algoritma
GEP	Genetik Ekspresyon Programlama
HÜBTAM :	Harran Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
KK	Kızdırma Kaybı
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzde Hata
MSE	Ortalama Karesel Hata
RMSE	Root Mean Square Error (Kök Ortalama Kare Hatası)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SH	Sodyum Hidroksit
SS	Sodyum Silikat
XRF	X-Işını Floresansı
YSA	Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

Dünya genelinde artan nüfusun barınma olanaklarına erişim imkanları günümüz koşullarında git gide azalmaktadır. Bu sebeple boş alan sorunu yaşanan bölgelerde yapı inşa etmek için elverişsiz arazilerin iyileştirilerek konut yapımında kullanılması söz konusu olmaktadır. Yapılaşmanın düşünüldüğü elverişsiz arazilerin taşıma gücü, aşırı oturma, sıvılaşma gibi geoteknik açıdan sorun teşkil edebilecek problemleri olabilmektedir. Bu ihtiyaç doğrultusunda sahada uygulanan çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemler projenin niteliğine, dinamik yüklere, projenin oturma alanına ve oturma alanı içerisindeki yapıların etkisi gibi özelliklere göre farklılık göstermektedir. Zemin iyileştirme yöntemleri yapının maliyetine doğrudan etki ettiğinden hem ekonomik hem de güvenli bir yöntemin seçilmesi önem arz etmektedir.

Sık kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan derin karıştırma kolonları çimento esaslı olarak üretilmektedir. Bu yöntem bir alternatif olarak geopolimerler ile yapılan zemin iyileştirme çalışmaları göze çarpmaktadır. Taşıma gücü yetersizliği durumunda bir yapı inşaatında ilk aşamalardan olan zemin iyileştirmede kullanılan malzemelerinin çevre dostu olma ve maliyet açısından uygunluğu başarılı bir proje elde etmede önemli rol almaktadır. Geopolimer karışım malzemelerinin özellikle çevreci bir yapıda olması bu konuda oldukça dikkat çekici olarak görülmektedir. Geopolimerler, alümino-silikat kaynaklı inorganik polimerler olup, portland çimentosuna nazaran daha az enerji harcayarak daha çevre dostu bir malzeme olarak bilinirler. Bu özellikleriyle geopolimerler, çevreye daha duyarlı bir zemin iyileştirme çözümü sunmaktadır. Bu bağlamda literatürde birçok güncel çalışmaya rastlanmıştır. Eskisar ve Aksu (2020), çalışmalarında kil, killi kum ve kum zeminlerde yapılan deneyler ile tek fazlı geopolimerizasyon sonucunda oluşan mukavemet değişkenliklerini incelemişlerdir. Numuneler en az 7 gün ve en fazla 90 gün olmak üzere her numune farklı sürelerde küre alınarak incelemelerde bulunulmuştur. Kütleme işlemlerinin sonunda 90 gün kürede bekletilen geopolimersiz zeminin serbest basınç dayanımı 315 kPa olarak elde edilirken geopolimerli zemin numunesinin serbest basınç dayanımının 1114 kPa değerine ulaşarak zeminde ciddi iyileşmeler sağlandığı görülmüştür. Çınar ve Erbaşı (2022), çevre kirliliğini azaltmak için zemin iyileştirmesinde çimento yerine çevreci olan geopolimer kullanılması ile ilgili araştırmalar yapmışlardır. Alkali aktivite molaritesi 14 M iken en iyi basınç dayanımlarının elde edildiği bu çalışmada belirtilmiştir. Ayrıca silis dumanının %5'e kadar ilave edilmesinin ve nanopartiküllerin %2'ye kadar eklenmesinin, cüruf ve uçucu külün yarı yarıya ilavesiyle birlikte genelde en yüksek basınç dayanımının

sağlayacağı bildirilmiştir. Abbas ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada, geopolimer ve cam elyaf ilave edilerek 15x15x15 cm ve 15x30 cm beton numuneleri hazırlanarak çekme ve basınç deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda geopolimer ve cam elyaf ilave edilerek hazırlanan numunelerin basınç ve çekme dayanımı incelenmiştir. Parthiban ve ark. (2022), taşıma kapasitesi düşük olan zeminlerin geopolimer çeşitleriyle iyileştirilmesinin mümkün olduğunu belirtmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda geopolimer kullanımının zemin iyileştirmede etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Zemin iyileştirme çalışmalarında geopolimersiz ve geopolimer ile birlikte fiber kullanımı da güncel literatürde yer almaktadır. Rabab'ah ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada, mukavemeti düşük zeminlerden dolayı yolların zarar gördüğünü ve bina zeminlerinde çökmelerin oluştuğunu bildirmişlerdir. Buna karşın son yıllarda zeminlerin liflerle güçlendirilmesinin dünya çapında birçok araştırmacının ilgisini çektiği belirtilmiştir. Zeminlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini geliştirmek için sentetik veya doğal lifler kullanıldığı açıklanmıştır. Yapılan çalışmada cam elyafın zeminin kuru ağırlığına yüzdesel olarak dâhil edilmesi, zeminin mukavemetini ve sertliğini arttırmış olup zeminin dağılma potansiyelini azaltmıştır. Zeminin mukavemetindeki bu artış ve zeminin dağılma eğilimindeki azalma, orantılı olarak kullanılan lif yüzdesine bağlı olmuştur. Singh ve ark. (2023), siyah pamuk toprağına %2 ve %8 oranlarında cam elyaf ekleyerek tek eksenli basınç ve kayma direnci deneyleri yapmışlardır. Bu deneyler sonucunda cam elyaf kullanılan siyah pamuk toprağında tek eksenli basınç dayanımının düşük çıktığı buna kıyasla kayma direnç değerinin yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Yuan ve ark. (2021), cam elyaf ve SH polimer ile güçlendirilmiş granit kalıntı zemin numunelerinin mikroskobik etkileşim mekanizmasını ve basınç dayanımını incelemek için analizler gerçekleştirmiştir. Yapılan deneyler sonucunda SH polimer numunenin cam elyaf içeriği %2.8, %3.0 ve %3.2 olduğunda numunelerin basınç dayanımlarının sırasıyla 26,37 kN, 32,16 kN ve 30,21 kN olarak elde edildiği ve ideal olan cam elyaf miktarının %3 olduğu bulunmuştur. Baruah (2015), yaptığı çalışmada, düşük maliyet ile mukavemeti yüksek elemanlar kullanarak zeminleri güçlendirmenin cazip hale geldiğini bildirmiştir. Cam liflerin zemin iyileştirmede kullanımının zemin bütünlüğünü koruduğunu belirtmiştir. Cam elyaf katkısının zemine etkisini görmek için ürettiği numunelerin basınç değerlerini ölçmüş ve %0.5 oranında cam elyaf içeren numune için basınç dayanımının kontrol karışımına göre 146 kPa'dan 171 kPa' ya, %1 cam elyaf içeren karışımın 180 kPa' ya ve %1.5'luk karışımdan elde edilmiş numunenin dayanımının ise 204 kPa' ya yükseldiğini bildirmiştir. Abdeldjouad ve ark. (2019), alkali ile aktifleştirilen karışımlarda

mukavemet davranışının artmasına katkıda bulunan en önemli faktörün, geopolimer ile fiber yüzeyi arasındaki etkileşim olduğunu ortaya çıkarmıştır. Mevcut çalışma, cam elyafların eklenmesi yoluyla POFA'nın (düşük değerli bir tarımsal atık yan ürünü) alkali aktivasyonu ile işlenen zeminin özelliklerini geliştirmek için etkili bir yöntem sağlayarak zemin stabilizasyon endüstrisine yeni anlayışlar getirmiştir. Mikro yapısal analizde, cam elyaf yüzeyi ile alkaliyle aktifleştirilen matris arasındaki etkileşiminin, güçlendirilmiş zeminin davranışının artmasına katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma konusuna paralel olan uçucu kül ve karbon fiber katkılı derin karıştırma kolonlarının optimizasyonu konulu çalışmalar son yıllarda artış göstermiştir (Ekmen ve ark. 2020; Ekmen ve Algin 2023). Bu çalışmadaki istatistiksel yöntemlerin seçiminde güncel yöntemler kullanarak geoteknik mühendisliğine katkı sunan çalışmalar (Alesmael ve Ekmen, 2025; Ekmen ve Avcı, 2024, Ekmen, 2023; Ekmen ve Avcı, 2023; Avcı ve Ekmen, 2023; Algin vd., 2022; Güneş ve Ekmen, 2022; Aykat ve Ekmen 2022; Ekmen ve Güllü 2022; Algin vd., 2019; Algin vd., 2018; Algin vd., 2017; Algin vd., 2016) dikkate alınmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında, cam elyaf katkılı geopolimerle iyileştirilmiş zeminlerin serbest basınç ve eğilme dayanımı incelenmiş, elde edilen veriler istatistiksel modelleme ile değerlendirilmiştir. Kontrol karışımlarında cam elyaf katkısı kullanılmamış olup, karışımların hazırlanmasında sodyum silikat, sodyum hidroksit, uçucu kül ve benzeri malzemelerin oranları literatürdeki çalışmalardan yararlanılarak belirlenmiştir. Bu çalışmada çimento kullanılmadan çevreci bir iyileştirme yöntemi benimsenmiştir. Kontrol karışımlarının eğilme ve basınç dayanımı test sonuçları elde edildikten sonra, bu karışımlara farklı boyut ve oranlarda cam elyaf numune eklenerek toplamda 72 adet numuneden oluşan çeşitli kombinasyonlar oluşturulmuştur. Hazırlanan karışımlar, belirli kütleme süreleri sonunda serbest basınç ve eğilme dayanımı testlerine tabi tutulmuş ve cam elyaf katkısının mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca, numunelerdeki elyaf dağılımı taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleriyle araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek veriler arasındaki korelasyonlar ortaya konmuş ve karışım oranlarına dayalı tahmin denklemleri oluşturulmuştur. Zemin iyileştirmesi kapsamında elde edilen sonuçlar, FHWA (Amerika Birleşik Devletleri Federal Karayolu İdaresi) kılavuzundaki (Bruce ve ark., 2013), referanslara göre değerlendirilmiştir. Bu çalışma kapsamındaki iyileştirilmiş numunelerin serbest basınç dayanımının dikkate alınan uluslararası kılavuzlara göre zeminlerde sıvılaşma riski olan projelerde uygulanabileceği öngörülmüştür.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Phear ve ark. (2008) tarafından yapılan çalışmada, zemin iyileştirme yöntemleri ile ilgili literatür özeti sunulmuş olup geopolimer ile güçlendirme de dahil olmak üzere 30 yakın zemin iyileştirme yönteminden söz edilmiştir.

Alkaya ve ark. (2009), termik santrallerde oluşan uçucu külün diğer ülkelerdeki gibi yapı alanında yaygın kullanımının Türkiye’de de artırılmasına katkı sağlamak için uçucu külün mühendislik ve uygulama alanları üzerine araştırma yapmışlardır.

Yıldız ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada cam elyaf katkısının beton dayanımı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Beton üretiminde 5 kg/m^3 ve 10 kg/m^3 cam elyaf katkısı kullanılarak 300-350 dozlu C30 betonunda dayanım artışı ve ultra ses geçişlerinde azalma olduğu deneylerle belirlenmiştir.

Sümer ve ark. (2012), silis dumanı kullanarak beton dayanımını artırmayı ve silis dumanının beton karışımındaki geçirimsizliği artırıcı etkisini azaltmak için propilen liflerin kullanımını araştırmıştır. Sonuç olarak, silis dumanının beton üzerindeki olumsuz etkilerinin propilen liflerle giderilebileceği belirtilmiştir.

Topal ve ark. (2014), kompozit plakaların deliklerinde cam elyaf takviyeli kompozit malzeme kullanarak burkulma durumlarını deneysel olarak incelemiştir. Deney sonuçları, sayısal analizlerle karşılaştırılmış ve burkulma oluşumunda önemli bir azalma gözlemlenmiştir.

Ahooee ve ark. (2015), cam elyafın plaj kumunun kayma dayanımı üzerine olan etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmada, cam elyaf %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında kullanılarak kesme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, cam elyaf miktarı arttıkça kayma dayanımının azaldığı, ancak yalnızca %0,5 oranında cam elyaf kullanımının kayma dayanımını artırdığı tespit edilmiştir.

Kalem ve ark. (2015), kentsel dönüşüm projeleri kapsamında oluşan inşaat ve yıkıntı atıklarının killi zeminlerde etkili bir zemin stabilizasyonu olarak kullanılabilirliğini deneylerle araştırmıştır. Sonuç olarak, inşaat ve yıkıntı atıklarının killi zeminlerde taşıma gücünü artırdığı ve ilave uçucu kül katkısıyla bu artış oranının %52’ye kadar çıkabildiği gözlemlenmiştir.

Görgün ve ark. (2018), kesimhanelerde oluşan atık tavuk tüyünün siltli zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğini deneysel olarak araştırmıştır. Sonuç olarak, tavuk tüyünün pahalı lifli malzemelere karşı bir alternatif olarak kullanılabileceğini, ancak deneylerin farklı boyutlarda yapılması gerektiğini gözlemlemiştir.

Arulrajah ve ark. (2018), derin karıştırma yöntemi ile yüksek ve orta yüklü yapılar için zemin iyileştirmede çevre dostu geopolimerin kullanılabilirliğini deneylerle gözlemlemiştir. Deneylerde, yumuşak deniz kiline çimento ve geopolimerin oransal karışımları kullanılarak zemin iyileştirilmesi yapılmıştır. Bağlayıcı olarak %20 ve %30 oranında geopolimer ile %30 oranında çimento kullanılmış, bu karışımlarla yapılan deneylerde basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir.

Ramya ve ark. (2018), killi zeminlerde çökme oranının fazla olması nedeniyle çevreye zarar vermeyen geopolimer kullanarak zeminde kolonlar oluşturulması ve bu yöntemin zemin iyileştirmedeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Oluşturulan kolonlar 7, 14 ve 28 günlük kürlemeye alınmış, kürlenme sonrasında dayanım testleri ve çökme deneyleri yapılarak çökme eğrileri karşılaştırılmıştır. Zemin çökme değerlerinde dikkate alınacak düzeyde iyileşmeler gözlemlenmiştir.

Özcan ve ark. (2019), zemin iyileştirme ve inşaat yapı malzemesi olarak geopolimerlerin kullanılmasıyla sera gazı salınımının minimuma indirilerek çevreye ve doğaya verilen zararların azaltılabileceğini gözlemlemiştir.

Öztürk ve ark. (2019), cam elyaf ve beton karışımının bulunduğu kutu profillerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Oluşturulan örnek kutu profilleri fiziksel ve mekanik testlere tabi tutarak basınç ve eğilme dayanımında yüksek performanslı sonuçlara ulaşmışlardır.

Özen ve ark. (2019), kumlu zeminlerde doymamış polyesterin zemin iyileştirme katkı maddesi olarak kullanılmasının etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışma sonucunda, kumlu zeminlerde kullanılan polyester miktarına bağlı olarak basınç mukavemetinin arttığı ve yapılan deneylerle %95 oranında doğruluk sağlandığı tespit edilmiştir.

Aydoğdu ve ark. (2019), betonların iyileştirilmesinde sentetik fiber donatı ve uçucu külün kullanılmasını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, betonda uçucu

kül ve sentetik fiber donatılar %10, %20 ve %30 oranlarında kullanılmış ve yapılan deneyler sonucunda betonun dayanıklılığının arttığı tespit edilmiştir.

Görhan ve ark. (2020), yaptıkları çalışmada geopolimerlerin, yoğun alkali hidroksit ya da silikat eriyik katı alüminosilikat kaynaklarının polimerik reaksiyonları sonucu oluşan üç boyutlu inorganik polimerler olarak düşünülebileceğini belirtmiştir. Çeşitli sıcaklıklarda yapılan basınç deneylerinde, 700 °C’de ısıtılma tabi tutulan geopolimer harçlarda basınç dayanımı 59.7 MPa olarak ölçülürken, en düşük basınç dayanımı 27.8 MPa ile 900 °C’de elde edilmiştir.

Ahmed ve ark. (2020), plastik atıkların zemin iyileştirme katkı maddesi olarak basınç mukavemeti ve zemin taşıma kapasitesine etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Sonuç olarak, plastik şeritler eklenen killi zemin ile normal killi zemin kıyaslandığında, plastik şerit eklenen killi zeminde bütülmenin azaldığı ve taşıma kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir.

Aysu ve ark. (2020), yüksek plastisiteli kil zeminlerde zemin taşıma gücünü artırma ve zemin oturmalarını azaltmak için cam lifi kullanılmasını deneysel olarak araştırmıştır. Yapılan deneylerde, killi zemine farklı oranlarda cam lifi karıştırılarak hazırlanan numuneler incelenmiştir. Taşıma gücü ve geçirgenlik deneyleri sonucunda cam lifinin zemin özelliklerine etkisi belirlenmiştir.

Eskisar ve Aksu (2020), sıvı aktiflerle yapılan tek fazlı geopolimerizasyon sonucu kil, killi kum ve kum zeminlerde mukavemet değişimlerini deneysel olarak araştırmıştır. Numuneler, en az 7 gün ve en fazla 90 gün kürlenme sürecine alınarak incelenmiştir. Kürlenme sonunda, 90 gün kürede bekletilen geopolimersiz zeminin serbest basınç dayanımı 315 kPa olarak ölçülürken, geopolimerli zemin numunesinin serbest basınç dayanımı 1114 kPa olarak belirlenmiş ve zeminde ciddi iyileşmeler sağlandığı görülmüştür.

Lori ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada, portland çimentosu yerine geopolimerin kullanılabilirliğini deneysel olarak araştırmıştır. Yapılan deneylerde, %10, %15 ve %20 oranlarında bakır madeni atık baraj tortuları (CMTDS) ve 1M, 4M, 7M ve 10M konsantrasyonları ile kumlu zemini stabilize etmişlerdir. Geopolimerin performansını artırmak için farklı oranlarda silis dumanı kullanılmıştır. Hazırlanan numunelere basınç dayanımı, FTIR, SEM, XRD ve TCLP testleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda, CMTDS bazlı geopolimerin çevreye zararı olmadan basınç dayanımını artırdığı, silis dumanının numunelerin mikroyapı

yoğunluğunu artırdığı ve basınç dayanımında en iyi parametrenin potasyum hidroksit konsantrasyonu olduğu gözlemlenmiştir.

Atabey ve ark. (2021) araştırmalarında, seramik üretimi esnasında ortaya çıkan hatalı seramiklerin öğütülmesi ile üretilen atık halindeki tozları alkali ile karıştırarak geopolimer harçlar üretmiştir. İmal edilen bu harçlar için farklı sıvı/bağlayıcı karışım oranlarının ve aktivatör molaritesinin etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, sıvı/bağlayıcı oranı 0,45 ve 0,50 olarak belirlenmiş ve 10, 12, 14, 16 M NaOH çözeltilerinde karışımlar hazırlanmıştır. İmal edilen bu harç karışımlarına 80°C'de 1 gün ısıtma kürü ve 28 gün havada kür uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, 0,45 sıvı/bağlayıcı oranının, 0,50 sıvı/bağlayıcı oranına göre daha az işlenebilir olmasına rağmen, mekanik olarak basınç dayanımında 34 MPa elde edildiği tespit edilmiştir.

Ekmen ve ark. (2022), doğal kaynak tüketimini ve CO₂ salınımını azaltmak için çimento yerine üretilen geopolimer kompozitlerin basınç dayanımı ve rötre testleri ile gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler genetik ekspresyon programlama (GEP) ve çoklu doğrusal regresyon (ÇDR) kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analizlerle GEP modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan GEP modellerinin laboratuvar verilerine benzer değerlerde sonuçlar verdiği ve istatistiksel analizlerle doğrulandığı belirtilmiştir.

Erbaşı ve ark. (2022), zemin iyileştirme yöntemlerinde küresel ısınmaya sebebiyet veren çimento gibi malzemelerin yerine çevreci malzemeler olarak bilinen geopolimerlerin kullanılmasının, üretilen betonlarda yeterli dayanım kazandırdığını deneysel olarak ispatlamıştır.

Çirkin ve ark. (2022), yüksek sıcaklık altında kum-kaolin zeminlerin, cam elyaf, perlit ve ponza gibi malzemelerle karıştırılarak kayma dayanımı ve sıkışabilirliğini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışma sonucunda, kum-kaolin zeminlerin kayma dayanımının arttığı, ancak cam elyaf, perlit ve ponza ile karıştırılan katkılı kum-kaolin zeminlerin kayma dayanımına etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.

Bingöl ve ark. (2022) yaptıkları çalışmalarında, çimento yerine alternatif malzeme olarak cürufun kullanılabilirliğini araştırmıştır. Yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu, farklı oranlarda karıştırılarak geopolimer harç üretilmiştir. Bu harçların, 28 günlük kürlenme sonunda basınç dayanımı test edilmiş ve yüksek

dayanım gücüne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, cürufllu geopolimer harçların çimento yerine bağlayıcı madde olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Güntekin ve ark. (2023), geopolimer kullanarak daha çevreci bir yaklaşım amaçlamıştır. Yaptıkları araştırmalar sonucunda, diğer bağlayıcı malzemelerin üretimi esnasında çevreye CO₂ gazı salındığını ve geopolimerlerin bu anlamda çevreci bir alternatif olduğunu ifade etmişlerdir.

Şengül ve ark. (2023), doğal zeminlerin taşıma kapasitelerini ve mühendislik özelliklerini iyileştirmek için kimyasal, mekanik ve termal yöntemlerle gerçekleştirilen zemin stabilizasyonunun su geçirgenliğini ve hacim değişimini azalttığını, zemin dayanıklılığını artırdığını belirtmiştir. Kireç, uçucu kül, çimento ve diğer katkı malzemeleri incelenerek, literatürdeki deneysel araştırmalar değerlendirilmiştir.

Uray ve ark. (2023), zemin iyileştirme kapsamında, CO₂ salınımı yüksek olan çimento gibi malzemeler yerine cüruf, uçucu kül ve silis dumanı gibi daha çevreci malzemelerin kullanılmasını araştırmıştır. Yaptıkları araştırmalar sonucunda, cüruf, uçucu kül ve silis dumanı kullanımının düşük maliyet ve enerji tasarrufu sağladığını ifade etmişlerdir.

Almahmodi ve ark. (2023), killi zeminlerin stabilizasyonu için en etkili kimyasal yöntemlerden birinin çimento ile zemin iyileştirme yöntemi olduğunu belirtmiştir. Yaptıkları çalışmada, deneylerde harcanan emek ve geçen süreden tasarruf etmek için killi zeminlerin basınç dayanımını veren bir model geliştirmiştir. Model oluşturulurken, yapay sinir ağı tekniği kullanılarak gerekli veriler toplanmıştır. Çalışmada geliştirilen modelin performansını değerlendirmek için karesel ortalama hata, istatistiksel analiz ve etkinlik katsayısı kullanılmıştır.

Sümbül ve ark. (2023), ince daneli zeminin iyileştirilmesinde derin karıştırma yöntemiyle cam elyaf takviyeli polyester boru atıklarının kullanılmasının taşıma gücüne etkisini araştırmıştır. Araştırmalarını saha ve laboratuvar çalışmaları ile desteklemiştir. Yapılan deneylerde, %3 oranında eklenen cam elyaf takviyeli polyester boru atıklarının kullanıldığı kil zeminde maksimum dayanım elde edilmiştir. Sonuç olarak, cam elyaf takviyeli polyester boru atıklarının ince daneli zeminlerde derin karıştırma yöntemiyle dayanımı artırdığı gözlemlenmiştir.

Ngo ve ark. (2023), farklı geopolimerlerle çeşitli kohezyonlu zeminlerin 28

günlük basınç dayanımını tahmin etmek için dört makine modeli (RF, ANN, XGB ve GB) geliştirmeyi planlamıştır. Model geliştirmek için literatürde bulunan alkali aktive edilmiş uçucu kül bazlı geopolimer, cüruf bazlı çimentolu geopolimer ve cüruf/uçucu kül bazlı geopolimer kullanılarak stabilize edilmiş üç farklı kohezyonlu zeminle oluşturulan 282 veri seti kullanılmıştır. Yapılan karşılaştırma ve duyarlılık analizleri sonucunda, ANN modelinin doğruluk oranının en yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Kalkan ve ark. (2024), kerpiç üretiminde cam lifi ve benzeri liflerin kullanımına ilişkin literatür araştırması yapmıştır. Araştırma sonucunda, cam elyaf ve benzeri liflerin kerpiç üretiminde çatlakları azalttığı ve dayanımı artırdığı tespit edilmiştir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu tez çalışmasında kullanılan F sınıfı uçucu kül, Hatay İskenderun Termik Santrali'nden temin edilmiş olup, kömürün yakılması sırasında santral bacasında biriken tozların toplanmasıyla elde edilmiştir. Kullanılan uçucu külün XRF analizi sonucunda elde edilmiş, Çizelge 3.1'de verilen kimyasal bileşimler ve kızdırma kaybı değerine göre, SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oksitlerinin toplam oranının %70'i aştığı belirlenmiştir. Bu özellikler doğrultusunda, uçucu kül ASTM C-618 standartlarına göre F sınıfı alüminosilikat kaynağı olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.1. F sınıfı uçucu külün kimyasal bileşimi

F Sınıfı Uçucu Kül									
Oksit	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	Cl	KK
Yüzdesi (%)	59,07	22,88	7,358	4,04	1,932	0,389	1,678	0,08	2,69

KK*: Kızdırma Kaybı

Özgül ağırlığı 2.20 g/cm^3 ve yüzey alanı $3.345 \text{ cm}^2/\text{kg}$ olan Şekil 3.1'de gösterilen F sınıfı uçucu kül deney aşamasına kadar oda sıcaklığında nemli hava ile teması engelleyen hava geçirmez bir çuvalda muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.1. F sınıfı uçucu kül

Bu çalışmada kullanılan ikinci bir materyal olan cam elyaf ise 6 mm, 12 mm ve 24 mm olarak uygun niteliklere sahip bir tedarik noktasından temin edilmiştir. Kullanılan cam elyaf; yoğunluğu 2.6 g/cm^3 olan $800 \text{ }^\circ\text{C}$ üzerinde erime noktasına sahip, beyaz renkli, alkali ve asite karşı dayanıklı, su geçirmez katı bir malzeme olarak tanımlanmıştır. Deneylerde kullanılan cam elyaf lif uzunluğuna göre Şekil 3.2. a.), b.) ve c.)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Cam elyaf boyları; a) 6 mm, b) 12 mm, c) 24 mm

Geopolimer reaksiyonlarında kullanılan kimyasallardan biri olan %99 saflık oranında kristal formdaki bu çalışmada kullanılan Sodyum Hidroksit (SH) Şekil 3.3.a'da gösterilmiştir. Bu çalışmadaki geopolimer reaksiyonlarında kullanılan diğer bir kimyasal olan Sodyum Silikat (SS) alkali aktivatörü sırasıyla %27.56 ve %10.94 oranında katı SiO_2 ve Na_2O oksitini içermektedir. Bu malzeme şekil 3.3.b'de gösterildiği gibi 85 kg'lık kimyasal etiketi bulunan bidon içerisinde sıvı formda muhafaza edilmiştir.

deney çalışmalarında kullanılıncaya kadar hava ile temasını engelleyen çuvalda muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.4. Killi zemin numunesi

3.2. Yöntem

Bu tez çalışmasında, kontrol karışımları Özçınar (2024) tarafından sunulan optimum değerler dikkate alınarak hazırlanmıştır. Geopolimer teknolojisi kullanılarak silindir ve kırış numuneleri belirli oranlarda sodyum hidroksit, sodyum silikat ve uçucu kül karışımı ile oluşturulmuştur. Bruce ve ark. (2013) tarafından referans alınan FHWA (The Federal Highway Administration-Amerika Birleşik Devletleri Federal Karayolu İdaresi) kılavuzunda yer alan sıvılaşma projelerinde kullanılabilecek serbest basınç dayanım değerlerine ulaşmak hedeflenmiştir. Sonraki aşamada kontrol karışımlarına; 6 mm, 12 mm ve 24 mm uzunluğunda ve %0.2, %0.4, %0.6 ve %0.8 oranlarında cam elyaf ilave edilerek tüm kombinasyonlarda karışımlar hazırlanmıştır.

3.2.1. Cam Elyaf Katkısız Numunelerinin Hazırlanması ve Deney Yöntemi

Bu tez çalışmasında çevreci bir yaklaşımla cam elyaf ve geopolimer kullanılarak geliştirilen bir zemin iyileştirme yöntemleri incelenmiştir. İlk aşamada cam elyaf katkısız kontrol karışımlarını üretmek için Özçınar (2024) tarafından sunulan optimum değerler dikkate alınarak üç adet silindir ve üç adet kırış olmak üzere altı adet kontrol numunesi hazırlanmıştır. Çizelge 3.3'te kontrol karışımları için kullanılan oranlar sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Dikkate alınan karışım oranları (Özçınar, 2024)

Numune adı	Uçucu Kül Oranı (%)	Sıvı Muhtevası (%)
Kontrol	23,8	32,4

Sıvı formda olan sodyum silikat ve kristal formda olan sodyum hidroksitin saf suda çözünmüş halinin karışımıyla ana sıvı karışım elde edilmiştir. Ekmen (2021) tarafından önerilen oranlar dikkate alınarak kimyasalların kütlece oranı belirlenmiştir. Sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanırken 1000 ml’lik joje içerisine 400 gram kristal yapıda parçacık konulup karışıma 10 molar olacak şekilde saf su ilavesi yapılarak çözündürülme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Katı halden sıvı hale geçerken ısı açığa çıktığından hazırlanan sıvı, genel karışımda kullanılmak üzere 24 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır.

Hazırlanan kontrol karışımı ile 10x10x40 cm boyutunda üç adet kiriş numunesi ve yüksekliği 20 cm, çapı 10 cm olan üç adet silindir numunesi üretilmiştir (Şekil 3.5).

**Şekil 3.5.** Silindir ve kiriş biçimindeki kalıplara yerleştirilen kontrol numuneleri görünüşleri

Malzeme hesaplarında, üretim esnasında olabilecek muhtemel kayıp miktarı göz önünde bulundurularak 1.2 malzeme miktarı artırma güvenlik katsayısı kullanılarak güvenli tarafta kalınmıştır. Bu katsayı, numune hazırlama aşamasındaki

taşıma sırasında dökülmeler, numune kalıplarında oluşabilecek kayıplar ve mikserlerdeki malzeme kalıntıları düşünülerek seçilmiştir. Numune hazırlanırken öncelikle kuru malzemeler olan killi zemin ve uçucu kül mikser yardımı ile homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır. Daha sonra genel karışım sıvısı olarak adlandırılan sodyum hidroksit ve sodyum silikat eş zamanlı dökülerek mikserde homojen harç elde edilene kadar karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6'da silindir ve kiriş numune üretimi için kullanılan kalıplar gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Silindir ve kiriş numune kapları

Numune üretim aşamasında hazırlanan homojen harç, kalıplara yerleştirilmiş olup 24 saat bekleme süreci sonrasında Şekil 3.7'de gösterildiği gibi kalıplardan çıkarılmıştır. Numuneler %97 nem oranında 25 °C de kürleme aşamasına tabi tutulmak üzere plastik poşet ile havayla temas etmeyecek şekilde kapatılıp Şekil 3.8'de gösterildiği gibi 28 günlük kürleme süreci başlatılmıştır.



Şekil 3.7. Kırılma öncesi kalıplardan çıkarılan silindirik ve priz kontrol numuneleri

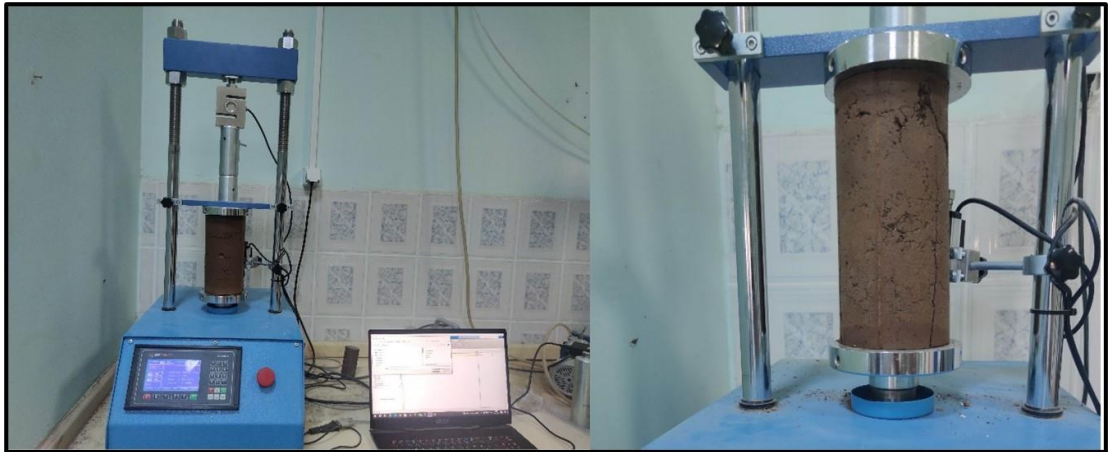


Şekil 3.8. Silindirik ve priz biçimindeki numunelerin kılma işlemleri

28 günlük kılma süreci sonunda eğilme dayanımı deneyleri Şekil 3.9’da gösterildiği gibi ASTM C1609/C1609M-19 standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Silindirik numuneleri için serbest basınç deneyleri 1 mm/dk deformasyon oranı kullanılarak Şekil 3.10’da sunulduğu gibi ASTM D2166 standardına uygun şekilde yürütülmüştür.



Şekil 3.9. Kiriş kontrol numunelerinin eğilme deneyleri



Şekil 3.10. Silindir kontrol numunelerinin serbest basınç deneyleri

Üç adet silindir ve kiriş kontrol numunesinin basınç ve eğilme deneyleri sonrası oluşan görünüşleri Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Silindir ve kiriş kontrol numunelerinin serbest basınç ve eğilme deneyleri sonrasındaki görünümü

3.2.2. Çoklu Doğrusal Regresyon

Bu çalışmada verilerin değerlendirilmesi için kullanılan istatistiksel yöntemlerden biri olan çoklu doğrusal regresyon (ÇDR), bir çıktı parametresinin birden fazla bağımsız değişkenle öngörülmesine olanak sağlayan ve sık kullanılan bir istatistiksel analiz yöntemidir. Bu yöntem; verilerin yönlülüğünü ve korelasyonunu analiz etme, eğriyi uydurma ve modelin geçerliliğini denetleme şeklinde üç evreden oluşmaktadır. Bağlantılı değişkenlerin modelde yer almasının uygun görülmesi için istatistiksel anlamlılığı gösteren p değerinin 0.05’ten küçük olması gerekmektedir.

3.2.3. Genetik Algoritma Kullanarak Regresyon

Verileri temsil eden denklemleri elde etmek için çoklu doğrusal regresyon dışında bu çalışmada kullanılan genetik algoritma (GA), alışlagelmiş metotlarla çözümü zaman alan karmaşık problemleri daha kısa zamanda optimize etmek için kullanılan, biyolojik süreçlerden ilham alarak gelişim sürecini kaynak alan bir

metottur. Bu yöntemi çaprazlama, seçim ve mutasyon gibi olayları ilham kaynağı alan operatörlerle yüksek kaliteli çözümler oluşturarak problemleri optimize etmek için kullanılır. Genetik algoritmanın çalışma şekli; öncelikle algoritma rastgele bir başlangıç popülasyonu oluşturarak başlar ve sonrasında bir seri yeni popülasyon oluşturur ve her basamakta mevcut nesildeki bireyleri kullanarak yeni popülasyonlar üretir. Bu süreç kısa zamanda kabul edilebilir sonuçlar verir.

3.2.4. Yapay Sinir Ağları Yöntemi

Bu tez kapsamında genetik algoritma ve çoklu doğrusal regresyon haricinde üçüncü bir veri tahmin yöntemi olarak Matlab (2017) programı aracılığıyla yapay sinir ağları kullanılmıştır. Tek gizli katman içerisinde hangi nöron sayısının uygun olduğunu belirlemek için nöron sayısı 1'den 20'ye kadar değiştirilmiştir. Hem serbest basınç hem de eğilme dayanımı için istatistiksel olarak en iyi sonucu veren fonksiyon kullanılmıştır. Tüm verilerin %70'i eğitim %15'i validasyon, %15'i ise test olarak belirlenmiştir. Kullanılan veriler rastgele ayrılmıştır. Veri eğitiminde veri sayısı ve anlamlı çözüm dengesi gözetilerek Levenberg-Marquardt yöntemi seçilmiştir. Ortalama karasel hata (MSE) değerleri üzerinde çalışılan yapay sinir ağlarının performansını iyileştirmek için kullanılmıştır.

3.2.5. Cam Elyaf Katkılı Numunelerin Hazırlanması ve Deney Yöntemi

Bu çalışmada cam elyaf katkılı numunelerin hazırlanması için kontrol karışımlarına farklı lif boyutlarında ve oranlarda cam elyaf katılmıştır. Böylece geopolimer ile birlikte cam elyaf kullanımının, numunelerin serbest basınç ve eğilme dayanımına olan etkisi araştırılmıştır. Çizelge 3.4'te cam elyaf katkılı karışım kombinasyonları sunulmuştur.

Çizelge 3.4. Cam elyaf katkılı karışım kombinasyonları

Grup Numarası	Cam Elyaf Lif Boyutu(mm)	Cam Elyaf Oranı (%)	Uçucu Kül Oranı (%)	Sıvı Muhtevası (%)
1. Grup (Kiriş/Silindir)	6 mm	0,2	23,8	32,4
2. Grup (Kiriş/Silindir)	6 mm	0,4	23,8	32,4
3. Grup (Kiriş/Silindir)	6 mm	0,6	23,8	32,4
4. Grup (Kiriş/Silindir)	6 mm	0,8	23,8	32,4
5. Grup (Kiriş/Silindir)	12 mm	0,2	23,8	32,4
6. Grup (Kiriş/Silindir)	12 mm	0,4	23,8	32,4
7. Grup (Kiriş/Silindir)	12 mm	0,6	23,8	32,4
8. Grup (Kiriş/Silindir)	12 mm	0,8	23,8	32,4
9. Grup (Kiriş/Silindir)	24 mm	0,2	23,8	32,4
10. Grup (Kiriş/Silindir)	24 mm	0,4	23,8	32,4
11. Grup (Kiriş/Silindir)	24 mm	0,6	23,8	32,4
12. Grup (Kiriş/Silindir)	24 mm	0,8	23,8	32,4

Bölüm 3.2.1’de anlatılan deneysel prosedür bu kısımda da benzer şekilde uygulanarak karışıma cam elyaf katkıları eklenmiştir.

Çizelge 3.4’te verilen her bir grup cam elyaf lif uzunluğu ve oranına göre belirlenmiştir. Her bir grup için üç kiriş ve üç silindir numunesi olmak üzere toplamda 72 adet numune hazırlanmıştır. Kontrol karışımlarında hesaplandığı gibi deney esnasında oluşabilecek muhtemel kayıp miktarı göz önünde bulundurularak 1.2 malzeme miktarı artırma güvenlik katsayısı kullanılarak güvenli tarafta kalınmıştır.

Cam elyaf katkılı numune karışım kombinasyonları dikkate alınarak öncelikle Şekil 3.12’de gösterildiği gibi killi zemin, cam elyaf ve uçucu kül mikser yardımı ile homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır. Daha sonra sodyum hidroksit ve sodyum silikat eş zamanlı dökülerek mikserde homojen harç elde edilene kadar karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12. Killi zemin, cam elyaf ve uçucu kül karışımı görünümü

Homojen harç, numune kalıplarına Şekil 3.13'te gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Numuneler 24 saat bekletildikten sonra Şekil 3.14'te gösterildiği gibi kalıplardan çıkarılıp %97 nem oranına sahip olarak 25 °C'de plastik poşet ile havayla teması engellenecek şekilde kapatılıp Şekil 3.15'te gösterildiği gibi 28 günlük küremeye alınmıştır.



Şekil 3.13. Silindir ve kiriş formundaki cam elyaf katkılı numuneler



Şekil 3.14. Kürlemeye alınmak üzere kalıplardan çıkarılan silindir ve kiriş biçimindeki cam elyaf katkılı numuneler



Şekil 3.15. Kürlemeye alınan silindir ve kırış biçimindeki cam elyaf katkılı numuneler

28 günlük kürleme süreci sonunda eğilme dayanımı deneyleri Şekil 3.16’da gösterildiği gibi ASTM C1609/C1609M-19 standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Silindir numuneleri için serbest basınç deneyleri 1 mm/dk deformasyon oranı kullanılarak Şekil 3.17’de sunulduğu gibi ASTM D2166 standardına uygun şekilde yürütülmüştür.



Şekil 3.16. Cam elyaf katkılı numunelerin eğilme deneyleri



Şekil 3.17. Cam elyaf katkılı numunelerin serbest basınç deneyleri

Cam elyaf katkılı numunelerin yapılan basınç ve eğilme deneyleri sonrası oluşan görünüşleri Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.18. Silindir ve kiriş biçimindeki cam elyaf katkılı numunelerin serbest basınç ve eğilme deneyleri sonrasındaki görünüşleri

3.2.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Bu tez çalışması kapsamındaki kontrol numunelerinin ve cam elyaf katkılı numunelerin fiziksel iç yapıları, Harran Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezine (HÜBTAM) ait laboratuvarında taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. SEM analizinde işlemler sırasıyla, numunenin parçalanması, oluşan küçük parçacıkların hazneye alınması ve altın kaplama işlemleri sonucunda mikroskobik görüntünün alınması şeklinde olmuştur. Şekil 3.19'da SEM analizi

aşamaları verilmiştir. Bu analiz ile cam elyaf dağılımları, numunelerin geopolimerizasyonu, uçucu külün kil zemin ile oluşturduğu bağlar ve boşluk yapıları incelenmiştir.



Şekil 3.19. SEM analizi işlemleri

4. BULGULAR

Bu bölümde Materyal ve Yöntem kısmında gerçekleştirilen deney, analiz ve araştırma konularına ait elde edilen bulgulara yer verilmiş olup bu bulgular mevcut literatürle kıyaslamalı bir şekilde tartışılmış ve değerlendirilmiştir.

4.1. Cam Elyaf Katkısız Numunelerinin Deney Sonuçları

Cam elyaf katkısız olarak hazırlanan silindir ve kiriş kontrol numuneleri Özçınar (2024) tarafından sunulan optimum değerler dikkate alınarak hazırlanmıştır. Silindir kontrol numunesi için yapılan serbest basınç deney sonucuna göre serbest basınç dayanımı 3.47 MPa olarak gözlemlenmiştir. Kiriş kontrol numunesi için yapılan eğilme deney sonucuna göre eğilme dayanımı 0.9201 MPa olarak gözlenmiştir.

Elde edilen serbest basınç dayanımı (3.47 MPa) ve eğilme dayanımı (0.9201 MPa) değerleri, Özçınar (2024) tarafından optimizasyon algoritması kullanılarak belirlenen en uygun karışım oranı ile gerçekleştirilen doğrulama deneyi sonuçlarıyla (serbest basınç dayanımı; 3.44 MPa; eğilme dayanımı; 0.916 MPa) yüksek düzeyde uyum göstermiştir.

4.2. Çoklu Doğrusal Regresyon Bulguları

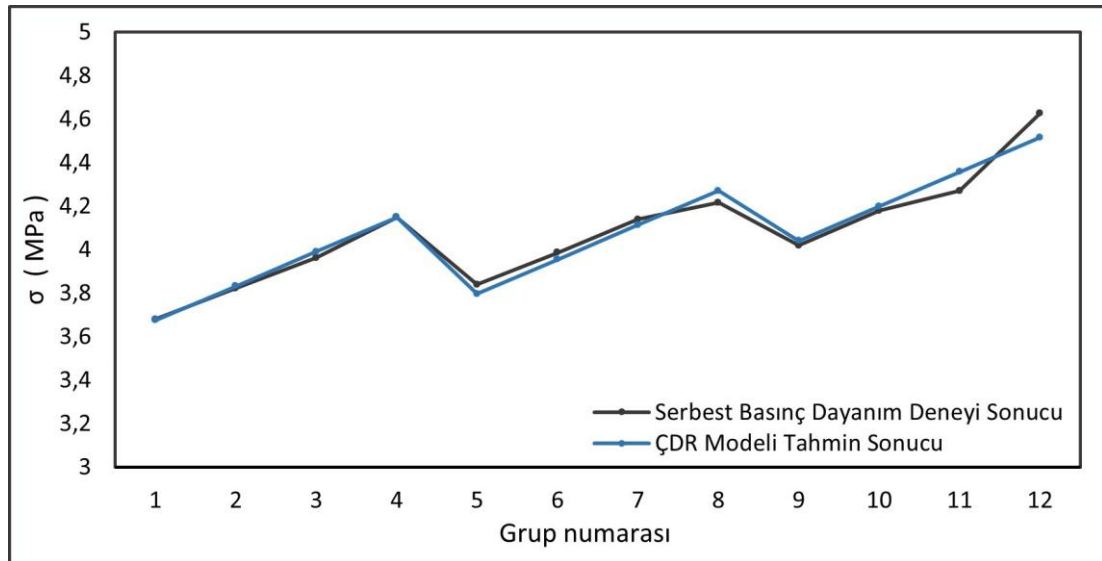
DeneySEL prosedürlerin uygulanması sonucunda elde edilen serbest basınç ve eğilme dayanımları için çoklu doğrusal regresyon (ÇDR) ile öngörü modeli oluşturulmuştur. Bu model ile elde edilen değerlerin hedeflenen sonuçlarla uyumu kıyaslanmıştır.

Çizelge 4.1’de, cam elyaf oranı (d_1) ve cam elyaf lif uzunluğu (d_2) girdi parametreleri olarak kullanılarak, deneySEL çalışma sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı verileri ile çoklu doğrusal regresyon (ÇDR) modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen modelin matematiksel ifadesi Denklem 4.1’de sunulmuştur. Söz konusu modelin doğruluğunu temsil eden korelasyon katsayısı (R), 0.979 olarak hesaplanmış ve modelin yüksek düzeyde güvenilir sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Şekil 4.1’de serbest basınç dayanımı deney sonuçları ve ÇDR model tahmin sonuçları arasındaki ilişki verilmiştir. Şekil 4.2’de ise serbest basınç dayanımı ÇDR Modeli için istatistiksel değerlendirme sonuçları verilmiştir. Bu veriler regresyon uyumunun iyi derecede olduğunu gösterir niteliktedir.

$$y = 3,3945 + 0,7908xd_1 + 0,02035xd_2 \quad (4.1)$$

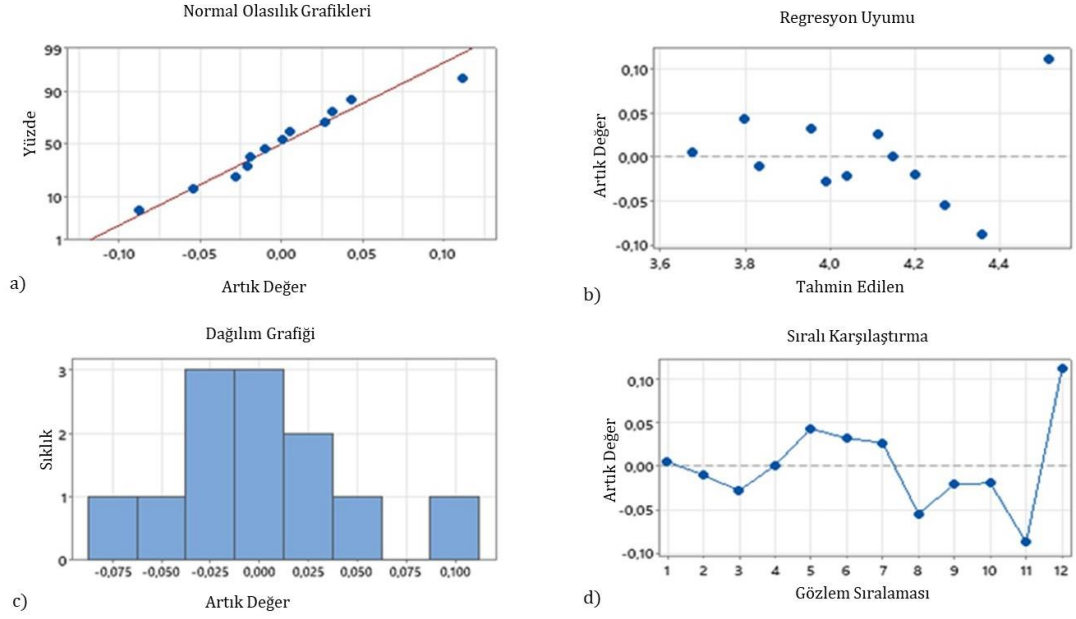
Çizelge 4.1. Serbest basınç dayanımı için ÇDR modeli oluşturulurken kullanılan veriler ve ÇDR modeli tahmin sonuçları

Grup Numarası	Cam Elyaf Lif Boyutu (mm)	Cam Elyaf Oranı (%)	Serbest Basınç Dayanım Deneyi Sonucu (MPa)	ÇDR Modeli Tahmin Sonucu (MPa)
1. Grup (Silindir)	6 mm	0,2	3,68	3,67476
2. Grup (Silindir)	6 mm	0,4	3,823	3,83292
3. Grup (Silindir)	6 mm	0,6	3,963	3,99108
4. Grup (Silindir)	6 mm	0,8	4,15	4,14924
5. Grup (Silindir)	12 mm	0,2	3,84	3,79686
6. Grup (Silindir)	12 mm	0,4	3,987	3,95502
7. Grup (Silindir)	12 mm	0,6	4,14	4,11318
8. Grup (Silindir)	12 mm	0,8	4,217	4,27134
9. Grup (Silindir)	24 mm	0,2	4,02	4,04106
10. Grup (Silindir)	24 mm	0,4	4,18	4,19922
11. Grup (Silindir)	24 mm	0,6	4,27	4,35738
12. Grup (Silindir)	24 mm	0,8	4,627	4,51554



Şekil 4.1. Serbest basınç dayanımı deney sonuçları ve ÇDR model tahmini arasındaki ilişki

Serbest Basınç Dayanım Sonuçları İçin Artık Grafikleri



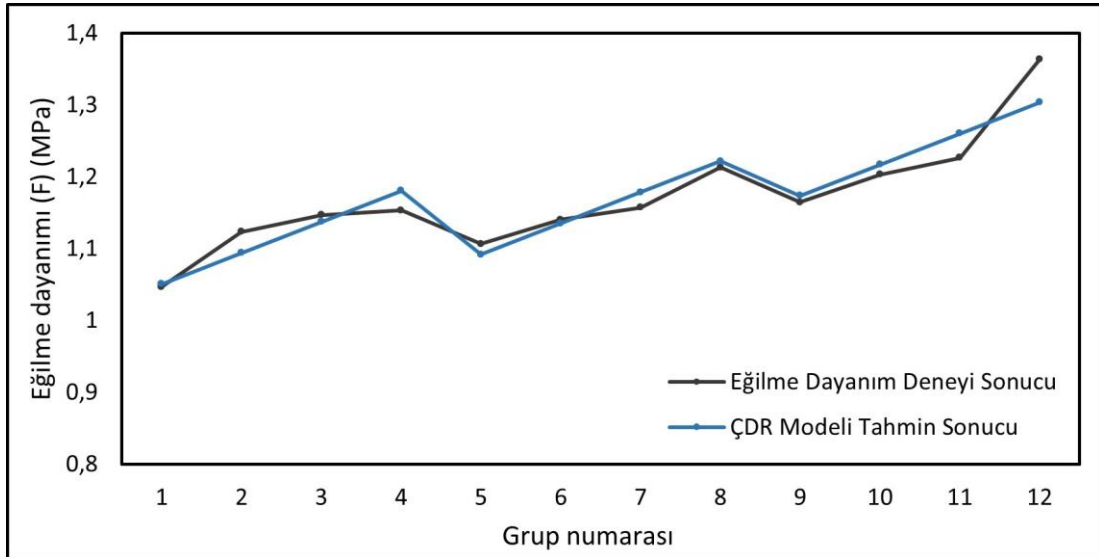
Şekil 4.2. Serbest basınç dayanımı ÇDR Modeli için regresyon grafikleri; a) artık değerlerin normal grafiği, b) artık değerlere karşı tahmin edilenin uyum grafiği, c) artık değerlerin sıklık grafiği, d) sıralı artık değer karşılaştırma grafiği

Çizelge 4.2’de, cam elyaf oranı (d_1) ve cam elyaf lif uzunluğu (d_2) girdi parametreleri olarak kullanılarak, deneysel çalışma sonucunda elde edilen eğilme dayanımı verilerine dayalı olarak oluşturulan çoklu doğrusal regresyon (ÇDR) modeline ilişkin sonuçlar sunulmuştur. Geliştirilen modelin matematiksel ifadesi Denklem 4.2’de verilmiştir. Söz konusu denklemin korelasyon katsayısı (R), 0.943 olarak hesaplanmış olup, modelin eğilme dayanımının öngörülmesinde yüksek düzeyde doğruluk sağladığı görülmüştür. Şekil 4.3’te eğilme dayanımı deney sonuçları ve ÇDR model tahmin sonuçları arasındaki ilişki verilmiştir. Şekil 4.4’te ise serbest basınç dayanımı ÇDR modeli için istatistiksel değerlendirme sonuçları verilmiştir. Bu veriler regresyon uyumunun iyi derecede olduğunu gösterir niteliktedir.

$$y = 0,9667 + 0,2165xd_1 + 0,00682xd_2 \quad (4.2)$$

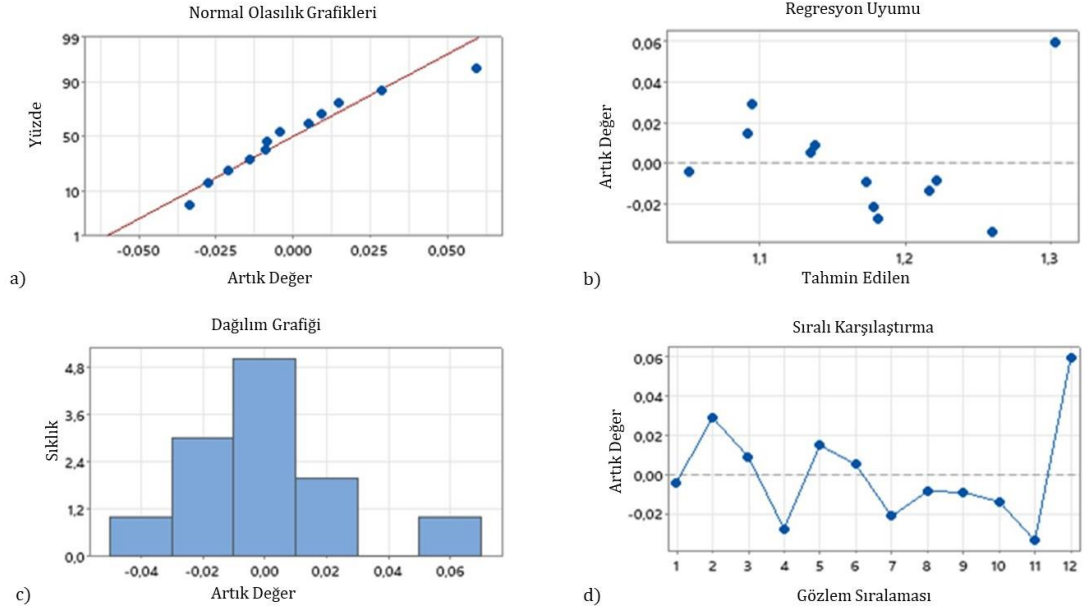
Çizelge 4.2. Eğilme dayanımı için ÇDR modeli oluşturulurken kullanılan veriler ve ÇDR model tahmin sonuçları

Grup Numarası	Cam Elyaf Lif Boyutu (mm)	Cam Elyaf Oranı (%)	Eğilme Dayanım Deneyi Sonucu (MPa)	ÇDR Modeli Tahmin Sonucu (MPa)
1. Grup (Kiriş)	6 mm	0,2	1,0467	1,05092
2. Grup (Kiriş)	6 mm	0,4	1,1233	1,09422
3. Grup (Kiriş)	6 mm	0,6	1,1467	1,13752
4. Grup (Kiriş)	6 mm	0,8	1,1533	1,18082
5. Grup (Kiriş)	12 mm	0,2	1,1068	1,09184
6. Grup (Kiriş)	12 mm	0,4	1,1403	1,13514
7. Grup (Kiriş)	12 mm	0,6	1,1573	1,17844
8. Grup (Kiriş)	12 mm	0,8	1,2133	1,22174
9. Grup (Kiriş)	24 mm	0,2	1,1647	1,17368
10. Grup (Kiriş)	24 mm	0,4	1,2033	1,21698
11. Grup (Kiriş)	24 mm	0,6	1,2267	1,26028
12. Grup (Kiriş)	24 mm	0,8	1,3633	1,30358



Şekil 4.3. Eğilme dayanımı deney sonuçları ve ÇDR model tahmini arasındaki ilişki

Eğilme Dayanım Sonuçları İçin Artık Grafikleri



Şekil 4.4. Eğilme dayanımı ÇDR modeli için regresyon grafikleri; a) artık değerlerin normal grafiği, b) artık değerlere karşı tahmin edilenin uyum grafiği, c) artık değerlerin sıklık grafiği, d) sıralı artık değer karşılaştırma grafiği

Çizelge 4.3'te, serbest basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarına ilişkin olarak çoklu doğrusal regresyon (ÇDR) yöntemiyle oluşturulan tahmin modellerine ait korelasyon katsayısı (R), ortalama karesel hata (MSE), kök ortalama kare hata (RMSE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) parametreleri sunulmuştur. Bu parametreler aracılığıyla, ÇDR tahmin modellerinden elde edilen verilerin, deneysel sonuçlarla olan uyumu değerlendirilmektedir. Özellikle MSE, RMSE ve MAPE değerlerinin düşük olması, modelin tahmin doğruluğunun yüksek olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.3. ÇDR model istatistiksel değerler

Model	R	R ²	MSE	RMSE	MAPE
ÇDR serbest basınç	0.979	0.958	0.00236	0.0486	0.0087
ÇDR eğilme dayanımı	0.943	0.889	0.00062	0.0249	0.0163

4.3. Genetik Algoritma Tabanlı Regresyon Bulguları

Deneysel prosedürlerin uygulanması sonucunda elde edilen serbest basınç ve eğilme dayanımı sonuçları için genetik ekspresyon programlama (GEP) kullanarak Genexprotools (2013) aracılığıyla tahmin modeli oluşturulmuştur. Bu model ile elde

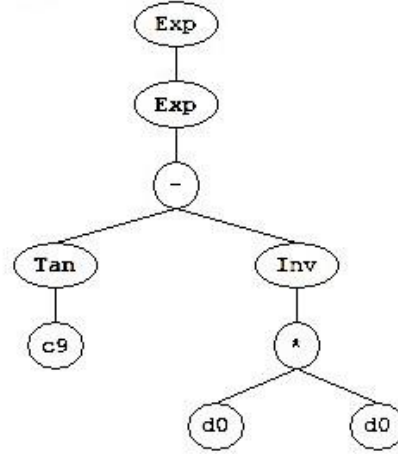
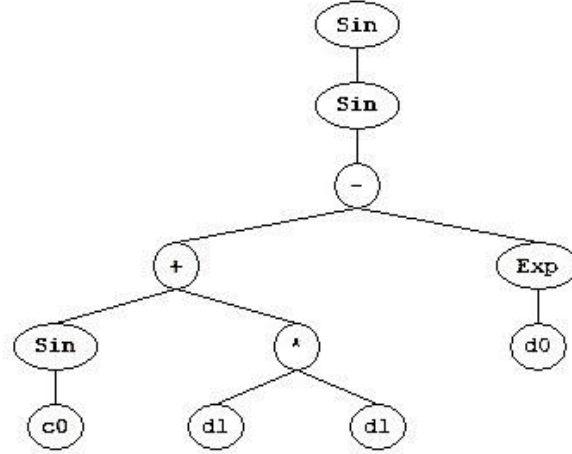
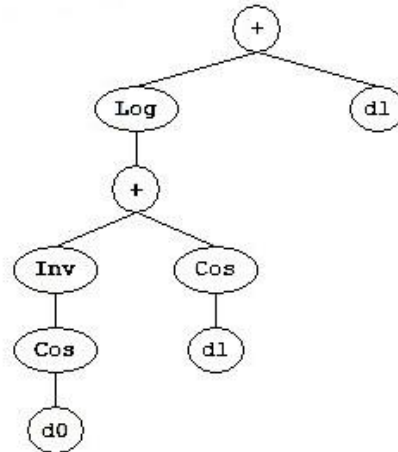
edilen değerlerin hedeflenen sonuçlarla uyumu incelenerek kıyaslanmıştır.

Çizelge 4.4'te, genetik ekspresyon programlama (GEP) modeli için cam elyaf oranı ve cam elyaf lif uzunluğu girdi parametreleri olarak kullanılmış; deneysel çalışma sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı değerleri ise hedef değişken olarak modele tanımlanmıştır. Bu veriler, modelin eğitilmesinde kullanılan veri tabanını oluşturmuştur. Geliştirilen GEP modeli ile serbest basınç dayanımı değerlerinin öngörülmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 4.4. Silindir numuneler için GEP modeli oluşturulurken kullanılan veriler ve GEP modeli tahmin sonuçları

Grup Numarası	Cam Elyaf Lif Boyutu (mm)	Cam Elyaf Oranı (%)	Serbest Basınç Dayanım Deneyi Sonucu (MPa)	GEP Modeli Tahmin Sonucu (MPa)
1. Grup (Silindir)	6 mm	0,2	3,68	3,6581
2. Grup (Silindir)	6 mm	0,4	3,823	3,8111
3. Grup (Silindir)	6 mm	0,6	3,963	3,9539
4. Grup (Silindir)	6 mm	0,8	4,15	4,1122
5. Grup (Silindir)	12 mm	0,2	3,84	3,8544
6. Grup (Silindir)	12 mm	0,4	3,987	3,9957
7. Grup (Silindir)	12 mm	0,6	4,14	4,1217
8. Grup (Silindir)	12 mm	0,8	4,217	4,2605
9. Grup (Silindir)	24 mm	0,2	4,02	3,938
10. Grup (Silindir)	24 mm	0,4	4,18	4,1316
11. Grup (Silindir)	24 mm	0,6	4,27	4,3389
12. Grup (Silindir)	24 mm	0,8	4,627	4,5916

GEP kullanılarak oluşturulan modelin ağaç yapısı Şekil 4.5'te sunulmuştur. Modeli temsil eden matematiksel denkliliklerde, d_0 cam elyaf lif uzunluğunu, d_1 ise cam elyaf oranını ifade etmektedir. Ayrıca, denklemlerde yer alan $G1C9 = -9.099$ ve $G2C0 = -0.989$ sabit katsayılar olarak belirlenmiştir.

y_1  y_2  y_3 

Şekil 4.5. Serbest basınç dayanımı numuneleri için oluşturulan GEP modeli simgeleyen ağaç gösterimi

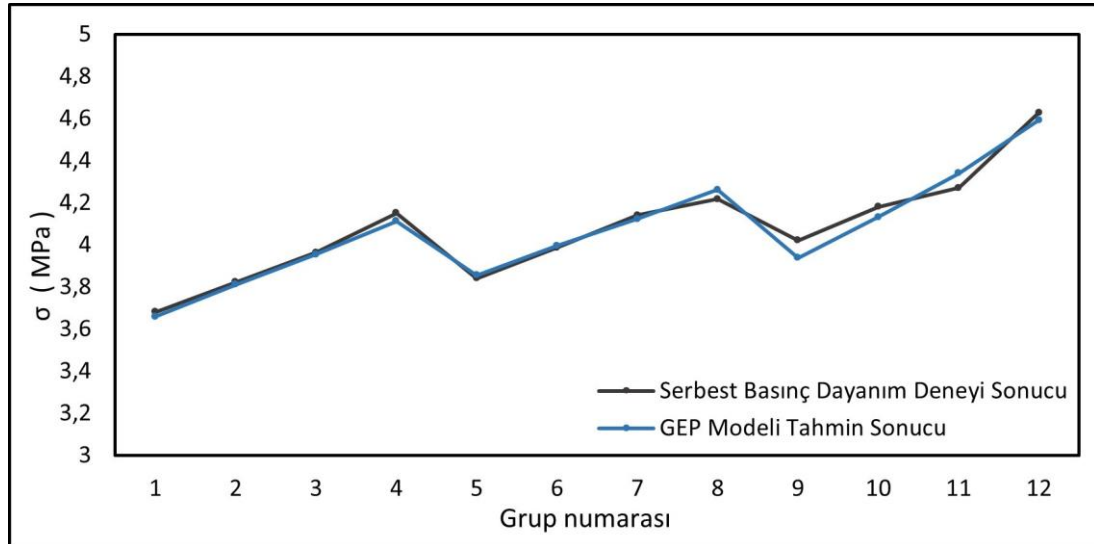
Oluşturulan GEP modeline ait ara denklemler ve kesin sonuç denklemi sırasıyla Denklem 4.3-4.6'da sunulmuştur. Modeli temsil eden denklemlerde, d_0 cam elyaf lif uzunluğunu, d_1 ise cam elyaf oranını ifade etmektedir. Ayrıca, $G1C9 = -9.099$ ve $G2C0 = -0.989$ sabit katsayılar olarak tanımlanmıştır. Kesin sonuç denklemi olan Denklem 4.6 için elde edilen korelasyon katsayısı (R), 0.987 olarak hesaplanmış olup, modelin yüksek doğrulukta öngörüler sunduğu belirlenmiştir. Şekil 4.6'da serbest basınç numuneleri için oluşturulan GEP modeli ile tahmin edilen dayanım değerleri ve serbest basınç deney sonuçları arasındaki ilişki gösterilmiştir. Tahminlerin gerçek deney verileriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

$$y_1 = \exp(\exp((\tan(G1C9) - (1.0/((d(0) * d(0))))))) \quad (4.3)$$

$$y_2 = \sin(\sin(((\sin(G2C0) + (d(1) * d(1))) - \exp(d(0))))) \quad (4.4)$$

$$y_3 = ((\text{reallog}(((1.0/(\cos(d(0)))) + \cos(d(1))))/\text{reallog}(10)) + d(1)) \quad (4.5)$$

$$y(\text{GEP SERBEST BASINC DAYANIMI}) = y_1 + y_2 + y_3 \quad (4.6)$$



Şekil 4.6. Serbest basınç numuneleri için oluşturulan GEP modeli ile tahmin edilen dayanım değerleri ve serbest basınç deney sonuçları arasındaki ilişki

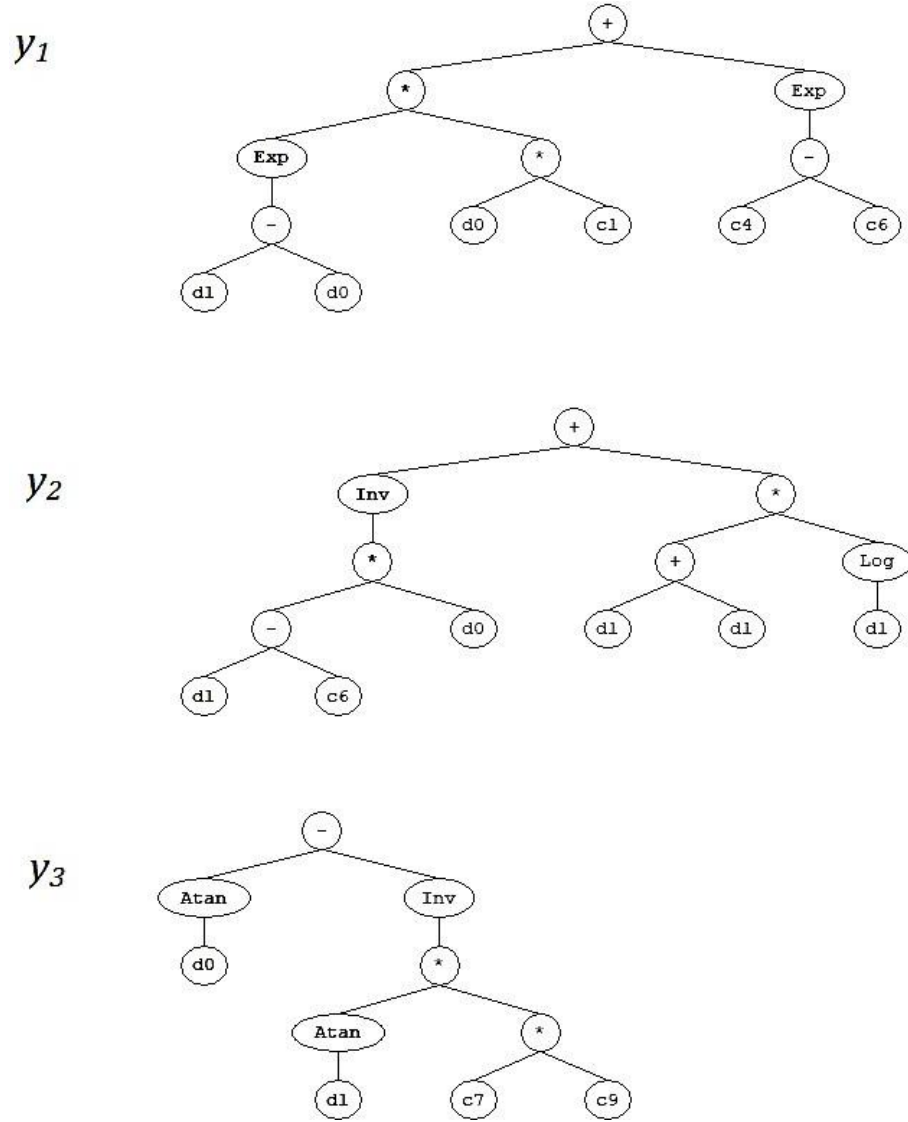
Çizelge 4.5'te GEP modeli için cam elyaf oranı ve cam elyaf lif uzunluğu girdi parametreleri olarak kullanılmış; deneysel çalışma sonucunda elde edilen eğilme dayanımı değerleri ise hedef değişken olarak modele tanımlanmıştır. Bu veriler, modelin eğitilmesinde kullanılan veri tabanını oluşturmuştur. Geliştirilen GEP modeli ile eğilme dayanımı değerlerinin öngörülmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 4.5. Kiriş numuneler için GEP modeli oluşturulurken kullanılan veriler ve GEP model tahmin sonuçları

Grup Numarası	Cam Elyaf Lif Boyutu (mm)	Cam Elyaf Oranı (%)	Eğilme Dayanım Deneyi Sonucu (MPa)	GEP Modeli Tahmin Sonucu (MPa)
1. Grup (Kiriş)	6 mm	0,2	1,0467	1,0620
2. Grup (Kiriş)	6 mm	0,4	1,1233	1,1068
3. Grup (Kiriş)	6 mm	0,6	1,1467	1,1502
4. Grup (Kiriş)	6 mm	0,8	1,1533	1,1565
5. Grup (Kiriş)	12 mm	0,2	1,1068	1,0876
6. Grup (Kiriş)	12 mm	0,4	1,1403	1,1236
7. Grup (Kiriş)	12 mm	0,6	1,1573	1,1676
8. Grup (Kiriş)	12 mm	0,8	1,2133	1,2102
9. Grup (Kiriş)	24 mm	0,2	1,1647	1,1719
10. Grup (Kiriş)	24 mm	0,4	1,2033	1,2193
11. Grup (Kiriş)	24 mm	0,6	1,2267	1,2828
12. Grup (Kiriş)	24 mm	0,8	1,3633	1,3669

GEP kullanılarak tasarlanan modele ait ağaç yapısı Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Modeli temsil eden denklemlerde, d_0 cam elyaf lif uzunluğunu, d_1 ise cam elyaf oranını ifade etmektedir. Ayrıca, modelde kullanılan sabit katsayılar $G1C1 = 7.936$,

$G1C4 = 8.184$, $G1C6 = 9.964$, $G2C6 = 1.158$, $G3C7 = -5.919$ ve $G3C9 = -4.220$ şeklindedir.



Şekil 4.7. Eğilme dayanımı numuneleri için oluşturulan GEP modeli simgeleyen ağaç gösterimi

Oluşturulan GEP modeline ait ara denklemler ve kesin sonuç denklemi, sırasıyla Denklem 4.7–4.10 arasında sunulmuştur. Bu denklemlerde, d_0 cam elyaf lif uzunluğunu, d_1 ise cam elyaf oranını temsil etmektedir. Ayrıca modelde yer alan sabit katsayılar şu şekildedir: $G1C1 = 7.936$, $G1C4 = 8.184$, $G1C6 = 9.964$, $G2C6 =$

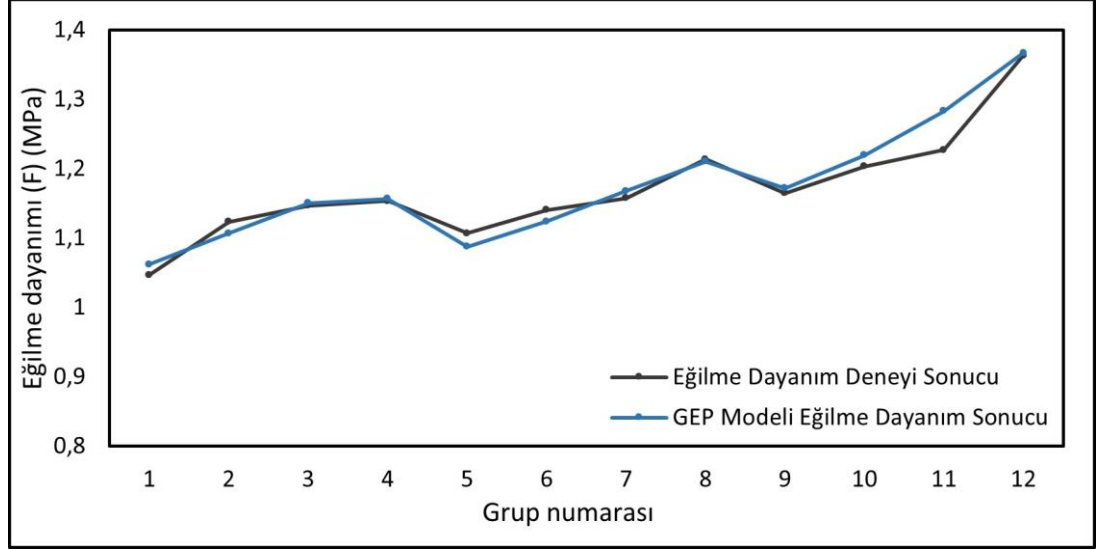
1.158, $G3C7 = -5.919$ ve $G3C9 = -4.220$. Kesin sonuç denklemi olan Denklem 4.10 için hesaplanan korelasyon katsayısı (R) 0.974 olup, modelin yüksek doğrulukta tahminler ürettiğini göstermektedir. Şekil 4.8’de eğilme dayanımı deneyi numuneleri için oluşturulan GEP modeli ile tahmin edilen dayanım değerleri ve eğilme dayanım deney sonuçları arasındaki ilişki gösterilmiştir. Tahminlerin gerçek deney verileriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

$$y_1 = ((\exp((d(1) - d(0))) * (d(0) * G1C1)) + \exp((G1C4 - G1C6))) \quad (4.7)$$

$$y_2 = ((1.0/(((d(1) - G2C6) * d(0)))) + ((d(1) + d(1)) * (\text{reallog}(d(1))/\text{reallog}(10)))) \quad (4.8)$$

$$y_3 = (\text{atan}(d(0)) - (1.0/((\text{atan}(d(1)) * (G3C7 * G3C9)))))) \quad (4.9)$$

$$y(\text{GEP EGİLME DAYANIMI}) = y_1 + y_2 + y_3 \quad (4.10)$$



Şekil 4.8. Eğilme dayanımı deneyi numuneleri için oluşturulan GEP modeli ile tahmin edilen dayanım değerleri ve eğilme dayanım deney sonuçları arasındaki ilişki

Çizelge 4.6’da, serbest basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarına ilişkin olarak genetik ekspresyon programlama (GEP) yöntemiyle oluşturulan tahmin modellerine ait korelasyon katsayısı (R), ortalama kare hata (MSE), kök ortalama kare hata (RMSE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) parametreleri sunulmuştur. Bu performans göstergeleri, GEP modeli ile elde edilen tahmin sonuçlarının deneysel verilerle ne ölçüde uyumlu olduğunu değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Özellikle MSE, RMSE ve MAPE değerleri, modelin tahmin doğruluğunu belirlemede önemli rol oynamaktadır. Bu değerlerin istatistiksel olarak düşük olması modelin yüksek doğrulukta sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Çizelge 4.6. GEP model istatistiksel değerler

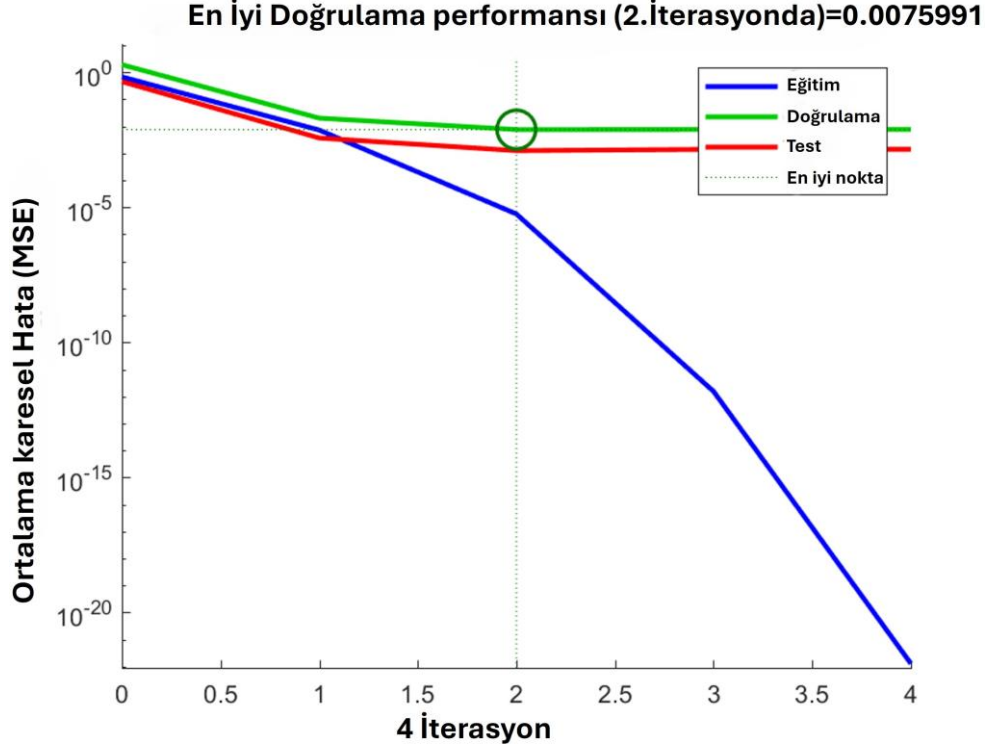
Model	R	R ²	MSE	RMSE	MAPE
GEP serbest basınç	0.987	0.974	0.00164	0.0405	0.0081
GEP eğilme dayanımı	0.974	0.948	0.00040	0.0199	0.0122

4.4. Yapay Sinir Ağları Bulguları

Deneysel uygulamalar sonucunda elde edilen serbest basınç ve eğilme dayanımı çıktıları için cam elyaf boyu ile cam elyaf oranı girdileri kullanılarak yapay sinir ağları tahmin modeli oluşturulmuştur.

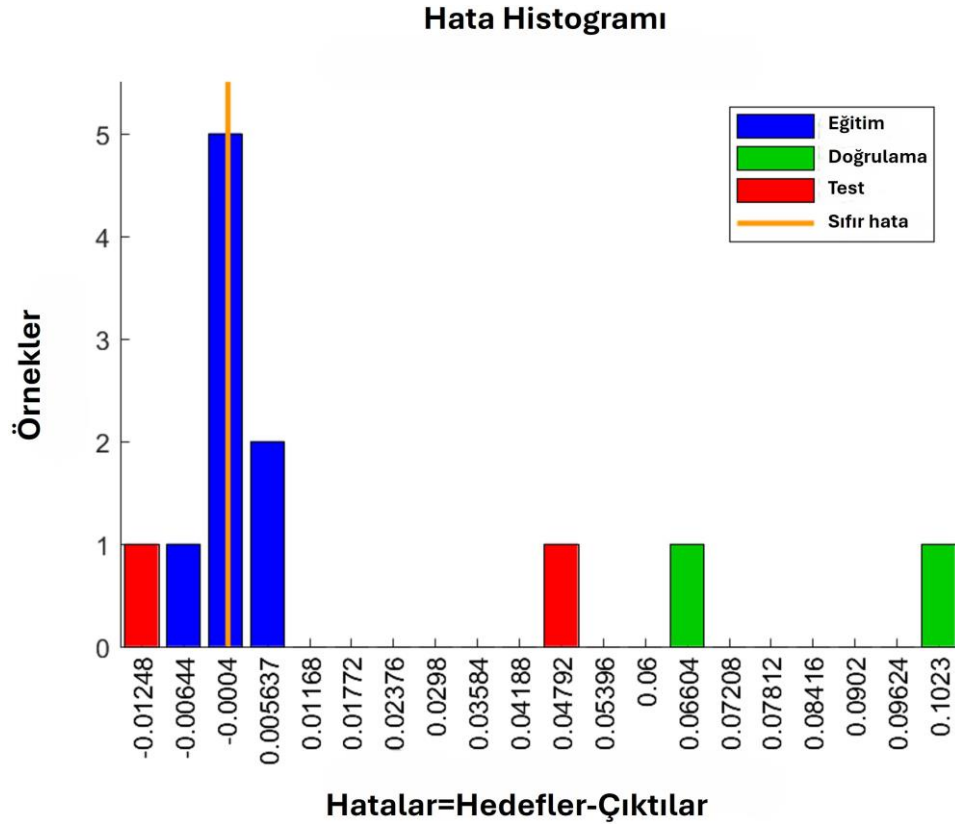
Serbest basınç dayanımı çıktısı için istatistiksel değerlendirme ve ilgili diğer detaylar Şekil 4.9-4.12 arasında sunulan grafikler ile gösterilmiştir.

Eğilme dayanımı dayanımı çıktısı için istatistiksel değerlendirme ve ilgili diğer detaylar Şekil 4.14-4.17 arasında sunulan grafikler ile gösterilmiştir.



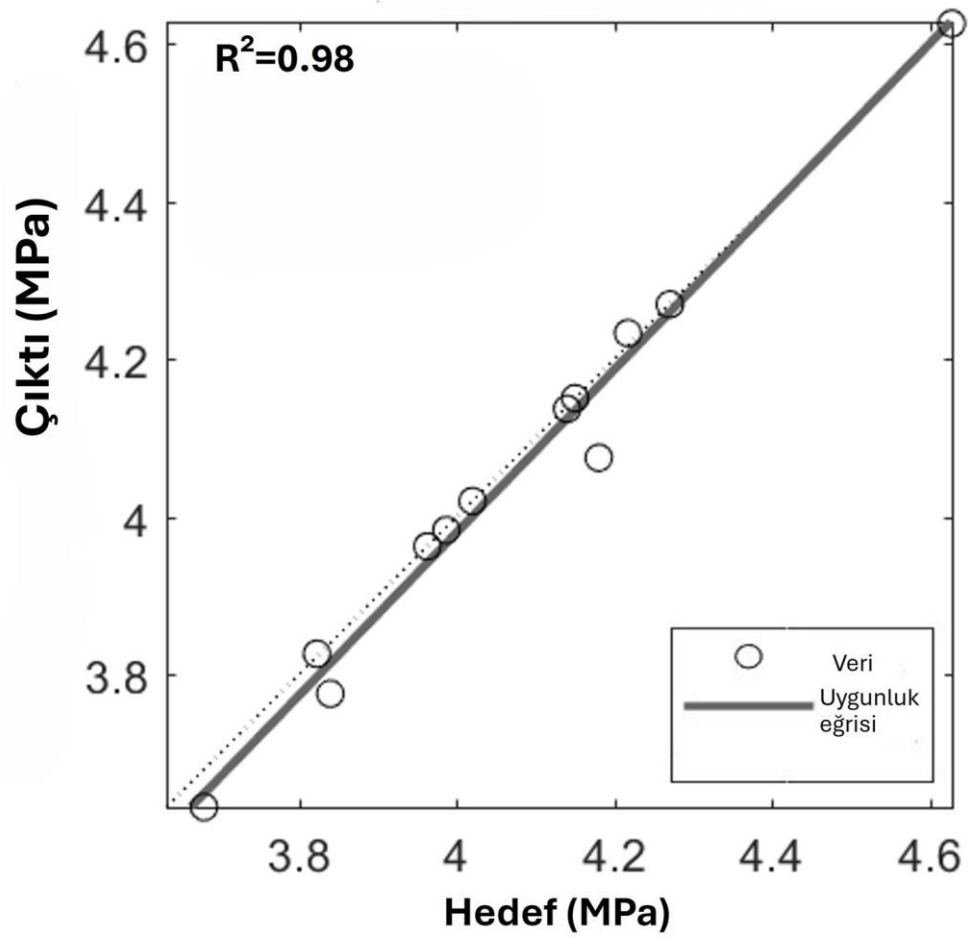
Şekil 4.9. Serbest basınç dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulmuş modelin iterasyon sayısına bağlı olarak hesaplanan MSE değerleri

Şekil 4.9’da serbest basınç dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulmuş iterasyon sayısına bağlı olarak hesaplanan MSE değerleri sunulmuştur. Şekilde de görüldüğü gibi en iyi doğrulama performansının 2. iterasyonda olduğu ve 2. iterasyondan sonra hatalı tahmini önlemek için sistemin durdurulduğu görülmüştür.



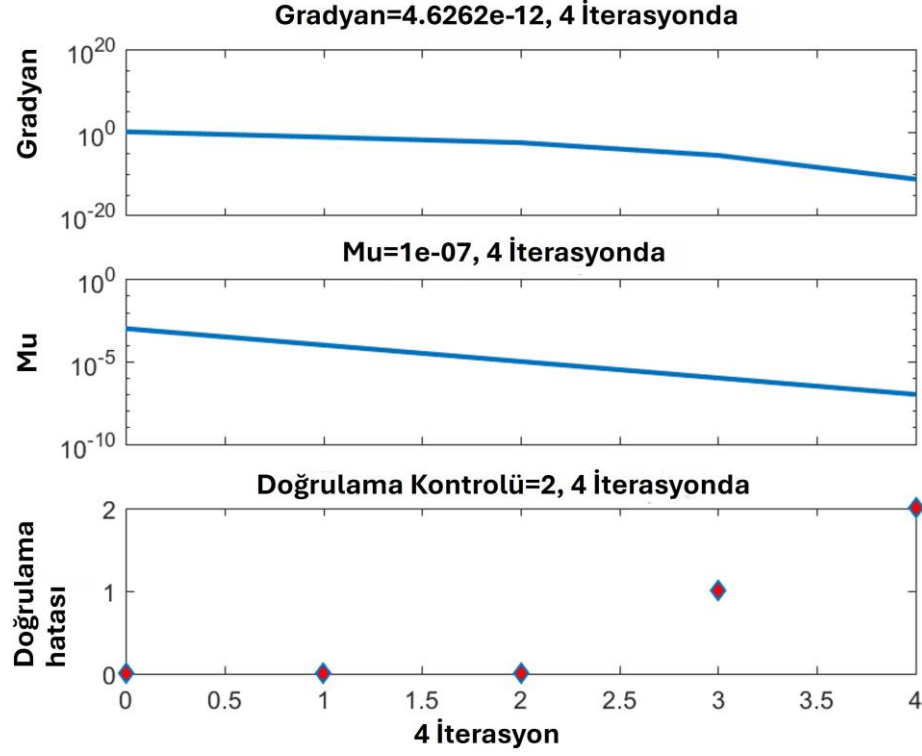
Şekil 4.10. Serbest basınç dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulan modelin hata histogramı

Şekil 4.10’da yapay sinir ağları ile oluşturulmuş modelin performansı ile ilgili hata histogramı test, eğitim ve validasyon verileri için sunulmuştur.



Şekil 4.11. Serbest basınç dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulan modelin fonksiyonunun analiz çıktıları ve uygunluk eğrisi ile karşılaştırılması

Şekil 4.11’de serbest basınç dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulan modelin fonksiyonuna ait R^2 değeri sunulmuştur. Elde edilen istatistiksel değer, fonksiyonun verileri yüksek düzeyde temsil ettiğini ifade etmektedir.



Şekil 4.12. Serbest basınç dayanımı için yapay sinir ağları modeli oluşturulurken dikkate alınan parametreler

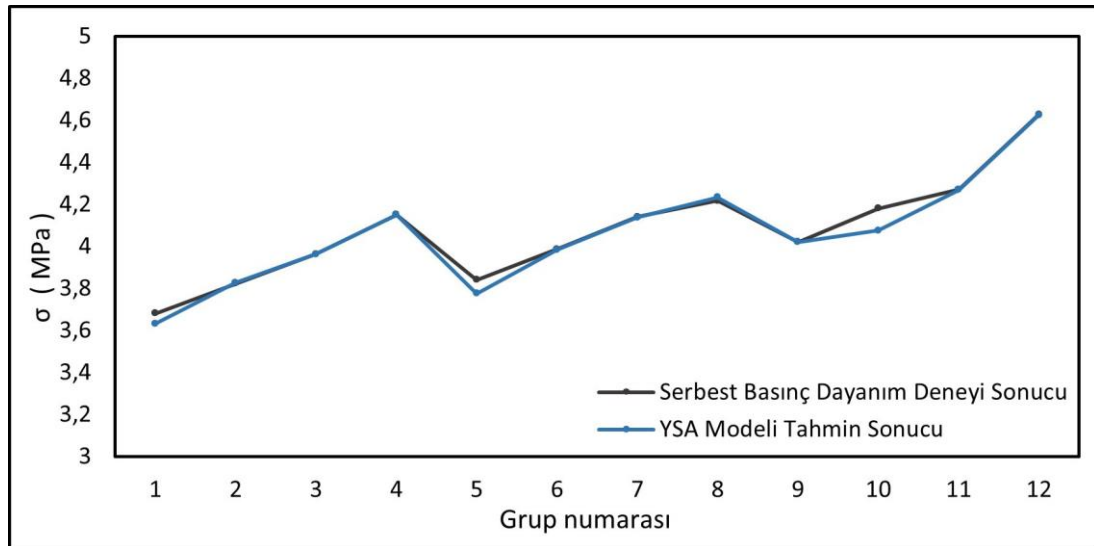
Şekil 4.12’de serbest basınç dayanımı için yapay sinir ağları modeli oluşturulurken dikkate alınan parametreler sunulmuştur. Hatalı tahmini önlemek için validasyon kontrol değerleri gösterilmiştir. Ayrıca, modelin yakınsama performansını ve hata fonksiyonlarını organize eden MU-Gradyan değerleri incelenmiştir.

Çizelge 4.7’de, yapay sinir ağları (YSA) modeli için cam elyaf oranı ve cam elyaf lif uzunluğu girdi parametreleri olarak kullanılmış; deneysel çalışma sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı değerleri ise hedef değişken olarak modele tanımlanmıştır. Bu veriler, modelin eğitilmesinde kullanılan veri tabanını oluşturmuştur. Geliştirilen YSA modeli ile serbest basınç dayanımı değerlerinin öngörülmesi amaçlanmıştır.

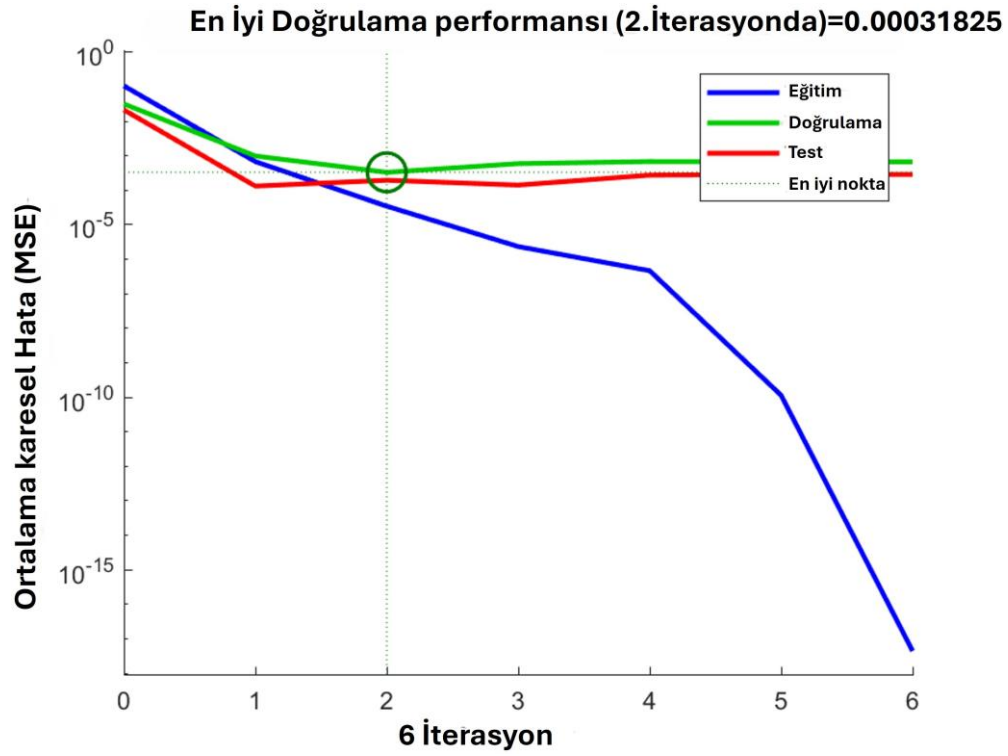
Şekil 4.13’te serbest basınç numuneleri için oluşturulan YSA modeli ile tahmin edilen dayanım değerleri ve serbest basınç deney sonuçları arasındaki ilişki gösterilmiştir. Tahminlerin gerçek deney verileriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.7. Serbest basınç dayanımı için YSA modeli oluşturulurken kullanılan veriler ve YSA modeli tahmin sonuçları

Grup Numarası	Cam Elyaf Lif Boyutu (mm)	Cam Elyaf Oranı (%)	Serbest Basınç Dayanım Deneyi Sonucu (MPa)	YSA Modeli Tahmin Sonucu (MPa)
1. Grup (Silindir)	6 mm	0,2	3,68	3,6323
2. Grup (Silindir)	6 mm	0,4	3,823	3,8265
3. Grup (Silindir)	6 mm	0,6	3,963	3,9625
4. Grup (Silindir)	6 mm	0,8	4,15	4,1500
5. Grup (Silindir)	12 mm	0,2	3,84	3,7759
6. Grup (Silindir)	12 mm	0,4	3,987	3,9831
7. Grup (Silindir)	12 mm	0,6	4,14	4,1367
8. Grup (Silindir)	12 mm	0,8	4,217	4,2325
9. Grup (Silindir)	24 mm	0,2	4,02	4,0199
10. Grup (Silindir)	24 mm	0,4	4,18	4,0747
11. Grup (Silindir)	24 mm	0,6	4,27	4,2690
12. Grup (Silindir)	24 mm	0,8	4,627	4,6246

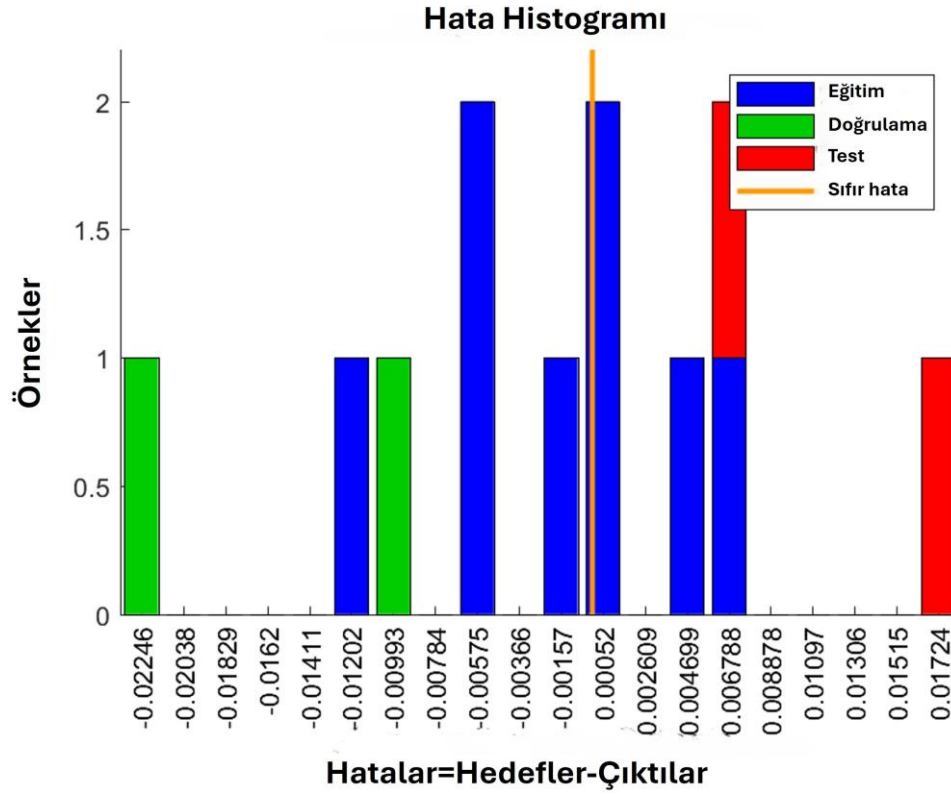


Şekil 4.13. Serbest basınç dayanımı deney sonuçları ve YSA modelinin tahmini arasındaki ilişki



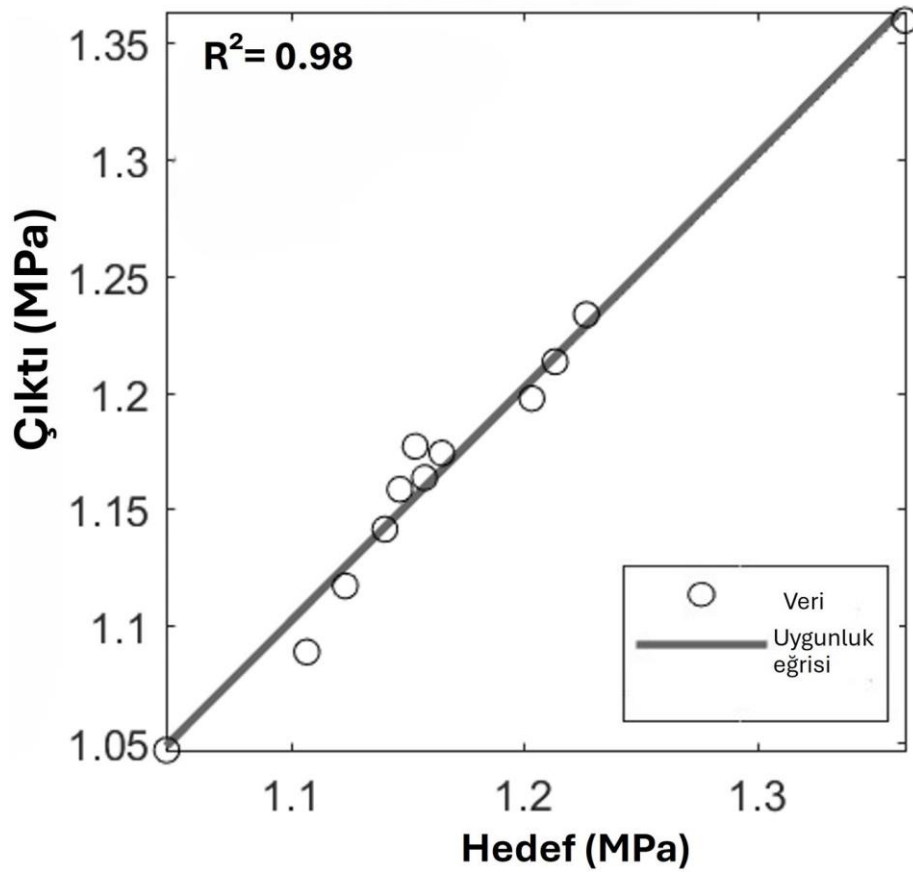
Şekil 4.14. Eğilme dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulmuş modelin, iterasyon sayısına bağlı olarak hesaplanan MSE değerleri

Şekil 4.14'te eğilme dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulmuş iterasyon sayısına bağlı olarak hesaplanan MSE değerleri sunulmuştur. En iyi doğrulama performansının 2. iterasyonda olduğu ve 2. iterasyondan sonra hatalı tahmini önlemek için sistemin durdurulduğu görülmüştür.



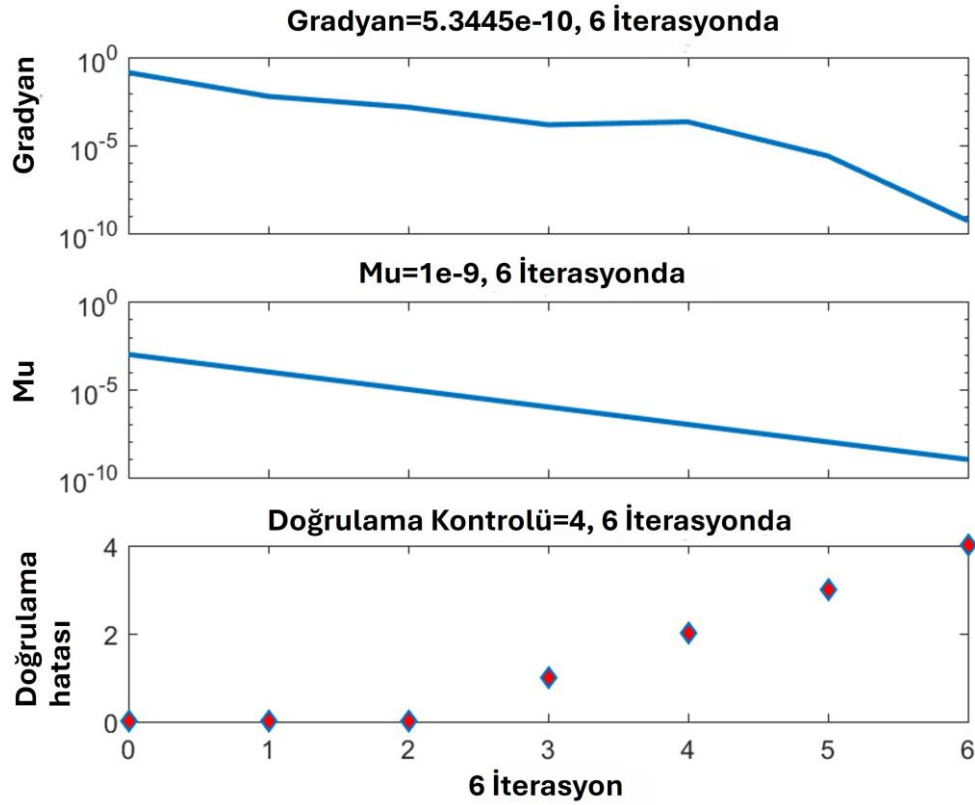
Şekil 4.15. Eğilme dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulan modelin hata histogramı

Şekil 4.15'te yapay sinir ağları ile oluşturulmuş modelin performansı ile ilgili hata histogramı test, eğitim ve validasyon verileri için sunulmuştur.



Şekil 4.16. Eğilme dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulan modelin fonksiyonunun analiz çıktıları ve uygunluk eğrisi ile karşılaştırılması

Şekil 4.16’da eğilme dayanımı için yapay sinir ağları ile oluşturulan modelin fonksiyonuna ait R^2 değeri sunulmuştur. Elde edilen istatistiksel değer, fonksiyonun verileri yüksek düzeyde temsil ettiğini ifade etmektedir.

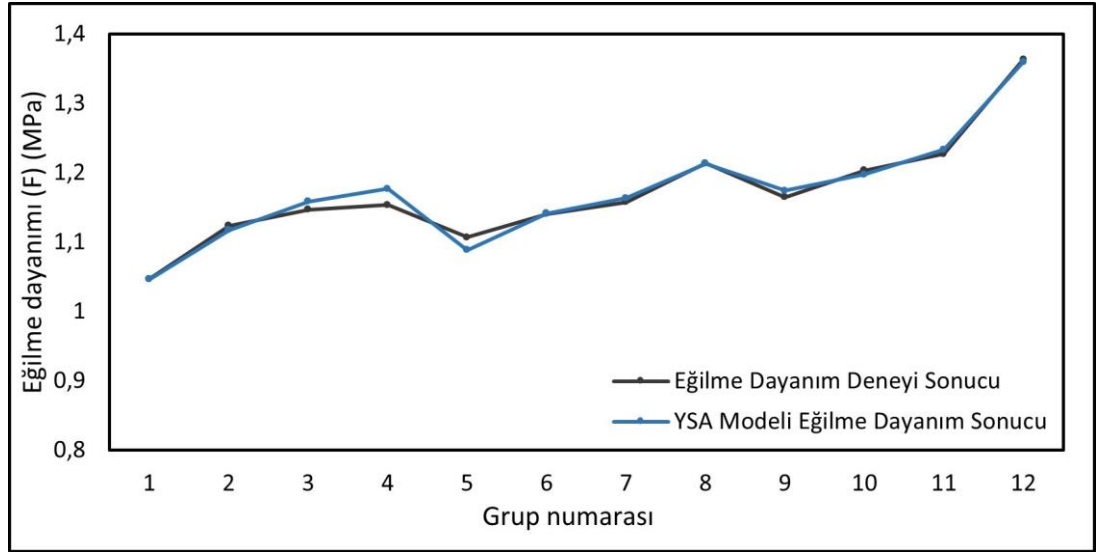


Şekil 4.17. Eğilme dayanımı için yapay sinir ağı modeli oluşturulurken dikkate alınan parametreler

Şekil 4.17’de eğilme dayanımı için yapay sinir ağı modeli oluşturulurken dikkate alınan parametreler sunulmuştur. Hatalı tahmini önlemek için validasyon kontrol değerleri gösterilmiştir. Ayrıca, modelin yakınsama performansını ve hata fonksiyonlarını organize eden MU-Gradyan değerleri incelenmiştir.

Çizelge 4.8. Eğilme dayanımı için YSA modeli oluşturulurken kullanılan veriler ve YSA modeli tahmin sonuçları

Grup Numarası	Cam Elyaf Lif Boyutu (mm)	Cam Elyaf Oranı (%)	Eğilme Dayanım Deneyi Sonucu (MPa)	YSA Modeli Tahmin Sonucu (MPa)
1. Grup (Kiriş)	6 mm	0,2	1,0467	1,0464
2. Grup (Kiriş)	6 mm	0,4	1,1233	1,1168
3. Grup (Kiriş)	6 mm	0,6	1,1467	1,1583
4. Grup (Kiriş)	6 mm	0,8	1,1533	1,1768
5. Grup (Kiriş)	12 mm	0,2	1,1068	1,0885
6. Grup (Kiriş)	12 mm	0,4	1,1403	1,1412
7. Grup (Kiriş)	12 mm	0,6	1,1573	1,1633
8. Grup (Kiriş)	12 mm	0,8	1,2133	1,2131
9. Grup (Kiriş)	24 mm	0,2	1,1647	1,1739
10. Grup (Kiriş)	24 mm	0,4	1,2033	1,1973
11. Grup (Kiriş)	24 mm	0,6	1,2267	1,2333
12. Grup (Kiriş)	24 mm	0,8	1,3633	1,3596



Şekil 4.18. Eğilme dayanımı deney sonuçları ve YSA modelinin tahmini arasındaki ilişki

Çizelge 4.8’de, yapay sinir ağları (YSA) modeli için cam elyaf oranı ve cam elyaf lif uzunluğu girdi parametreleri olarak kullanılmış; deneysel çalışma sonucunda elde edilen eğilme dayanımı değerleri ise hedef değişken olarak modele tanımlanmıştır. Bu veriler, modelin eğitilmesinde kullanılan veri tabanını oluşturmuştur. Geliştirilen YSA modeli ile eğilme dayanımı değerlerinin öngörülmesi amaçlanmıştır.

Şekil 4.18’de eğilme dayanımı deneyi numuneleri için oluşturulan YSA

modeli ile tahmin edilen dayanım değerleri ve eğilme dayanımı deney sonuçları arasındaki ilişki gösterilmiştir. Tahminlerin gerçek deney verileriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.9. YSA modeli istatistiksel değerleri

Model	R	R ²	MSE	RMSE	MAPE
YSA serbest basınç	0.991	0.982	0.0015	0.0385	0.0052
YSA eğilme dayanımı	0.991	0.982	0.00011	0.0103	0.0067

Çizelge 4.9’da, serbest basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarına ilişkin olarak yapay sinir ağları (YSA) yöntemiyle oluşturulan tahmin modellerine ait korelasyon katsayısı (R), ortalama kare hata (MSE), kök ortalama kare hata (RMSE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) parametreleri sunulmuştur. Bu performans göstergeleri, YSA modeli ile elde edilen tahmin sonuçlarının deneysel verilerle ne ölçüde uyumlu olduğunu değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Özellikle MSE, RMSE ve MAPE değerleri, modelin tahmin doğruluğunu belirlemede önemli rol oynamaktadır. Bu değerlerin istatistiksel olarak düşük olması modelin yüksek doğrulukta sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Çizelge 4.10. YSA, GEP ve ÇDR modellerinin istatistiksel değerlerinin karşılaştırılması

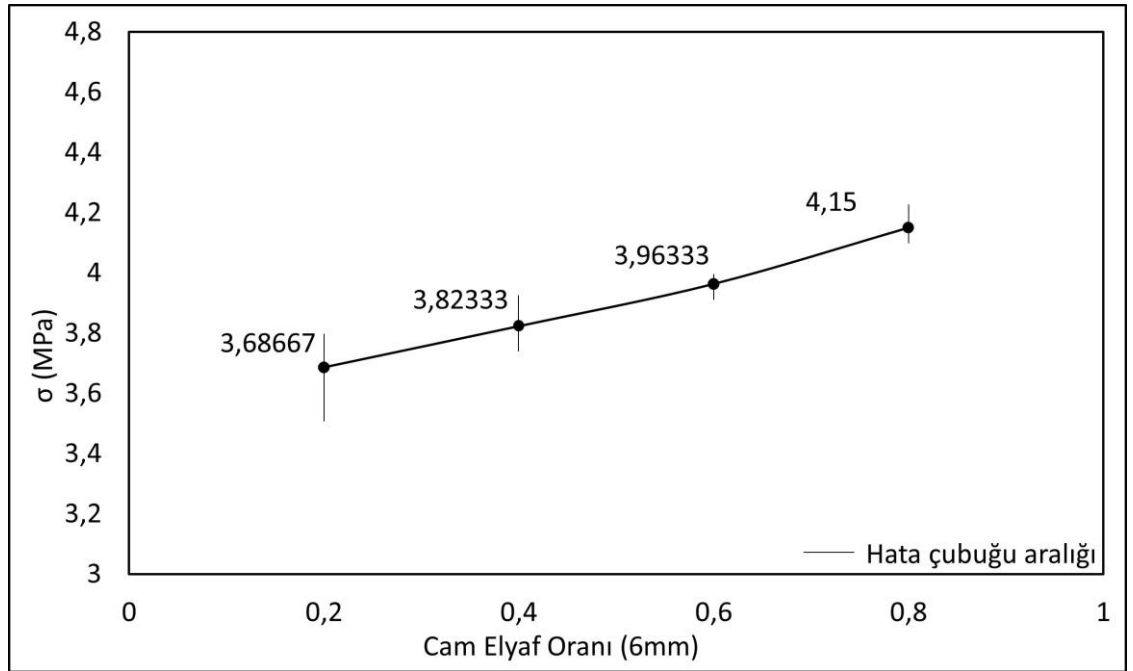
Model	R	R ²	MSE	RMSE	MAPE
GEP serbest basınç	0.987	0.974	0.00164	0.0405	0.0081
GEP eğilme dayanımı	0.974	0.948	0.00040	0.0199	0.0122
ÇDR serbest basınç	0.979	0.958	0.00236	0.0486	0.0087
ÇDR eğilme dayanımı	0.943	0.889	0.00062	0.0249	0.0163
YSA serbest basınç	0.991	0.982	0.0015	0.0385	0.0052
YSA eğilme dayanımı	0.991	0.982	0.00011	0.0103	0.0067

Serbest basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarına ilişkin olarak ÇDR yöntemi, YSA yöntemi ve GEP yöntemiyle oluşturulan tahmin modellerine ait korelasyon katsayısı (R), ortalama karesel hata (MSE), kök ortalama kare hata (RMSE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) parametreleri Çizelge 4.10’da sunulduğu gibi hesaplanmıştır. Bu parametreler aracılığıyla, kullanılan tahmin modellerinden elde

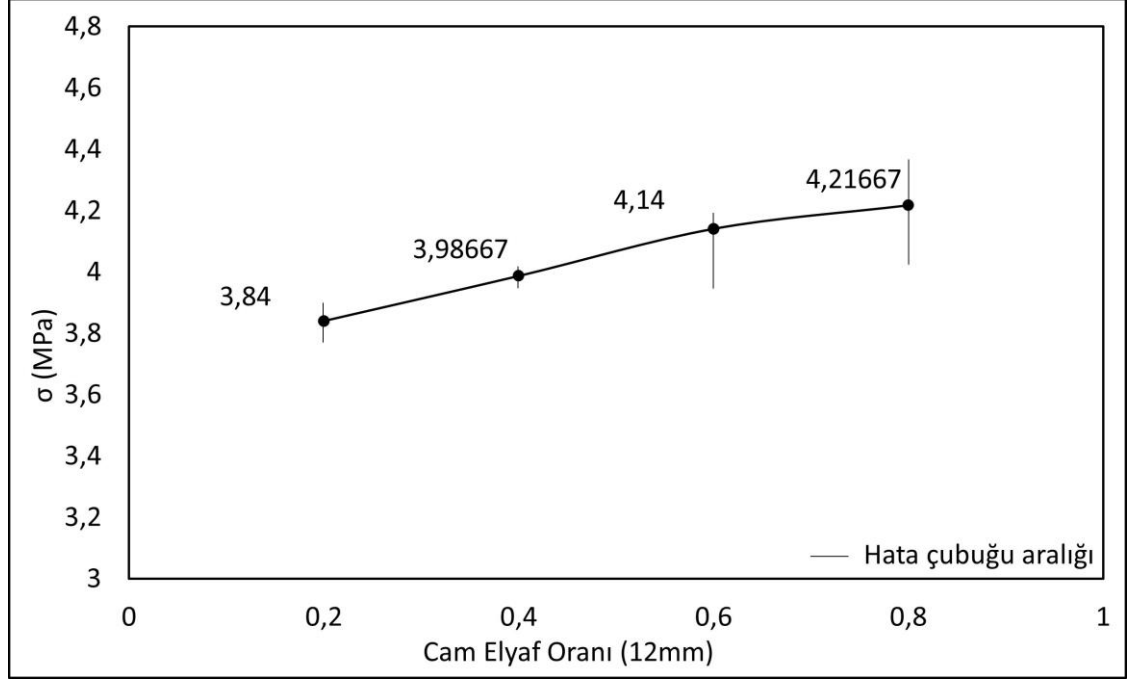
edilen verilerin, deneysel sonuçlarla olan uyumu değerlendirilmiştir. Bu veriler YSA ile yapılan tahminlerin GEP ve ÇDR'ye göre daha anlamlı ve deneysel sonuçlara daha yakın çıktılar verdiğini göstermektedir.

4.5. Cam Elyaf Katkılı Numunelerin Deney Sonuçları

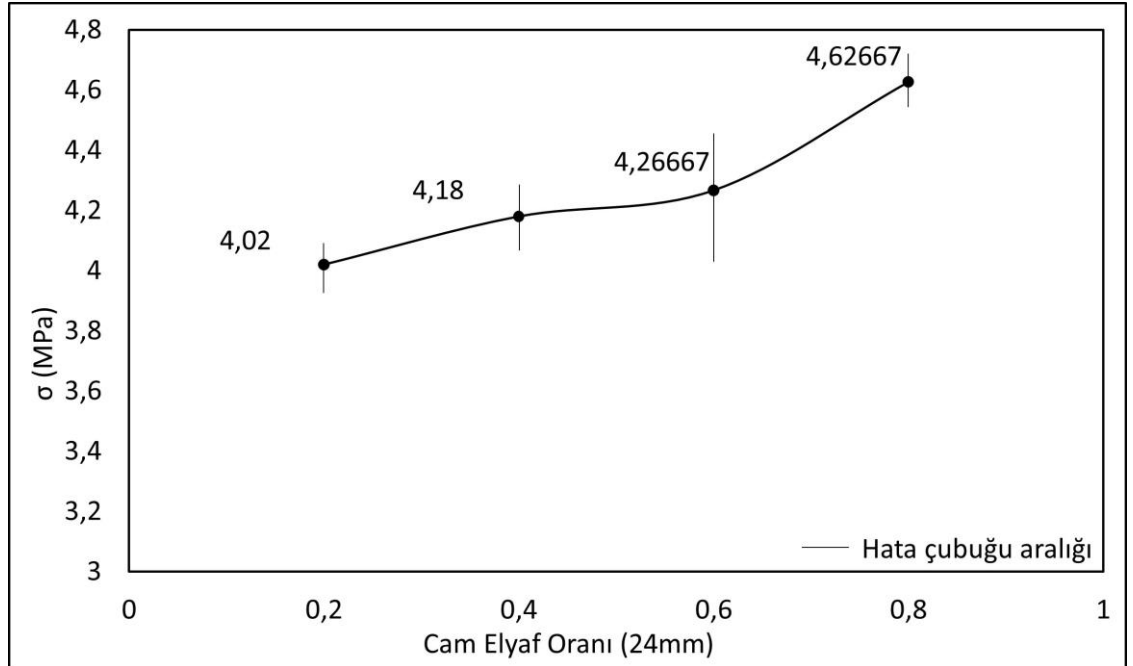
Bu kısımda, Bölüm 3.2.5'te açıklanan deneysel prosedürler doğrultusunda hazırlanan ve Çizelge 3.4'te cam elyaf uzunluğu ile oranlarına göre sınıflandırılmış 12 grup halinde adlandırılan silindir ve kiriş numunelerine ait eğilme ve serbest basınç deney sonuçları sunulmuştur.



Şekil 4.19. Cam elyaf lif uzunluğu 6 mm olan numunelerin farklı cam elyaf katkı oranlarına göre serbest basınç dayanımı değişimi ve numunelerin hata sınırları



Şekil 4.20. Cam elyaf lif uzunluğu 12 mm olan numunelerin farklı cam elyaf katkı oranlarına göre serbest basınç dayanımı değişimi ve numunelerin hata sınırları



Şekil 4.21. Cam elyaf lif uzunluğu 24 mm olan numunelerin farklı cam elyaf katkı oranlarına göre serbest basınç dayanımı değişimi ve numunelerin hata sınırları

Şekil 4.19 ile Şekil 4.21 arasında sunulan grafiklerden de anlaşılacağı üzere, silindir numunelere ait serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde en düşük serbest basınç dayanımı 3.687 MPa, en yüksek serbest basınç dayanımı ise 4.627 MPa olarak elde edilmiştir. Cam elyaf katkılı silindir numunelerde, kontrol numunesi karışım oranları sabit tutulmuş; cam elyaf lif uzunluğu ve oranları değiştirilerek bu

parametrelerin serbest basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, serbest basınç dayanımlarının kıyaslamalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlayan tablolar, Çizelge 4.11 ile Çizelge 4.17 arasında detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Çizelge 4.11. %0.2 oranında cam elyaf katkılı silindir numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin serbest basınç dayanımlarına kıyaslamalı etkisi

Sıvı muhtevası (%)	Uçucu kül (%)	Cam elyafı fiber uzunluğu (mm)	Cam elyafı fiber oranı (%)	Serbest basınç dayanımı (MPa)
32,4	24,8	6	0,2	3,68
		12	0,2	3,84
		24	0,2	4,02

Çizelge 4.11’de cam elyaf katkı oranları %0.2 oranında sabit iken, yalnızca cam elyaf lif uzunluğundaki değişimin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çizelge 4.11’de görüldüğü üzere, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm’den 12 mm’ye çıkarılması durumunda, ortalama serbest basınç dayanımı 3.687 MPa’dan 3.840 MPa’ya yükselmiş ve bu durum, serbest basınç dayanımında yaklaşık %4.16 oranında bir artışa karşılık gelmiştir. Benzer şekilde, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm’den 24 mm’ye çıkarılması durumunda, ortalama serbest basınç dayanımı 3.687 MPa’dan 4.020 MPa’ya ulaşmış ve bu değişimle birlikte serbest basınç dayanımında yaklaşık %9.04 oranında bir artış gözlenmiştir.

Çizelge genel olarak değerlendirildiğinde, cam elyaf katkısının 24 mm lif uzunluğu ile uygulandığı durumda, en yüksek serbest basınç dayanımı değerinin elde edildiği görülmektedir. Sonuç olarak, cam elyaf katkılı numunelerde lif uzunluğundaki artışın, serbest basınç dayanımı üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğu ve dayanım değerlerini artırdığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.12. %0.4 oranında cam elyaf katkılı silindir numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin serbest basınç dayanımlarına kıyaslamalı etkisi

Sıvı muhtevası (%)	Uçucu kül (%)	Cam elyafı fiber uzunluğu (mm)	Cam elyafı fiber oranı (%)	Serbest basınç dayanımı (MPa)
32,4	24,8	6	0,4	3,823
		12	0,4	3,987
		24	0,4	4,18

Çizelge 4.12’de cam elyaf katkı oranları %0.4 oranında sabit iken, yalnızca cam elyaf lif uzunluğundaki değişimin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çizelge 4.12’de görüldüğü üzere, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm’den 12 mm’ye çıkarılması durumunda, ortalama serbest basınç dayanımı 3.823 MPa’dan 3.987 MPa’ya yükselmiştir. Bu artış, yaklaşık olarak %4.27’lik bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. Benzer şekilde, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm’den 24 mm’ye yükseltilmesi sonucunda ortalama serbest basınç dayanımı 4.180 MPa olarak ölçülmüş; bu durumda başlangıç değeri olan 3.823 MPa’ya kıyasla yaklaşık %9.33 oranında bir artış elde edilmiştir.

Çizelge genel olarak değerlendirildiğinde, ilgili oran için cam elyaf katkısının 24 mm lif uzunluğu ile uygulandığı durumda en yüksek serbest basınç dayanımı değerinin elde edildiği görülmektedir. Bu sonuçlar, cam elyaf katkılı numunelerde lif uzunluğunun artmasının serbest basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etki yarattığını göstermektedir.

Çizelge 4.13. %0.6 oranında cam elyaf katkılı silindir numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin serbest basınç dayanımlarına kıyaslamalı etkisi

Sıvı muhtevası (%)	Uçucu kül (%)	Cam elyafı fiber uzunluğu (mm)	Cam elyafı fiber oranı (%)	Serbest basınç dayanımı (MPa)
32,4	24,8	6	0,6	3,963
		12	0,6	4,14
		24	0,6	4,27

Çizelge 4.13’te cam elyaf katkı oranları %0.6 oranında sabit tutulurken, yalnızca cam elyaf lif uzunluğundaki değişimin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çizelge 4.13’te görüldüğü üzere, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm’den 12 mm’ye yükseltilmesi durumunda, ortalama serbest basınç dayanımı 3.963 MPa’dan 4.140 MPa’ya artmıştır. Bu durum, serbest basınç dayanımında yaklaşık %4.46 oranında bir artışı ifade etmektedir. Benzer şekilde, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm’den 24 mm’ye çıkarılması durumunda, ortalama serbest basınç dayanımı 4.267 MPa olarak ölçülmüş ve bu da başlangıç değeri olan 3.963 MPa’ya göre yaklaşık %7.65 oranında bir artışa karşılık gelmiştir.

Çizelge genel olarak değerlendirildiğinde, ilgili oran için cam elyaf katkısının 24 mm lif uzunluğuyla uygulandığı numunelerin en yüksek serbest basınç dayanımı değerini gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu bulgular, cam elyaf katkılı numunelerde lif

uzunluğundaki artışın, serbest basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.14. %0.8 oranında cam elyaf katkılı silindir numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin serbest basınç dayanımlarına kıyaslamalı etkisi

Sıvı muhtevası (%)	Uçucu kül (%)	Cam elyafı fiber uzunluğu (mm)	Cam elyafı fiber oranı (%)	Serbest basınç dayanımı (MPa)
32,4	24,8	6	0,8	4,15
		12	0,8	4,217
		24	0,8	4,627

Çizelge 4.14'te cam elyaf katkı oranları %0.8 oranında sabit tutulurken, yalnızca cam elyaf lif uzunluğundaki değişimin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çizelge 4.14 incelendiğinde, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm'den 12 mm'ye çıkarılması durumunda ortalama serbest basınç dayanımı 4.150 MPa'dan 4.217 MPa'ya yükselmiştir. Bu artış, yaklaşık olarak %1.61 oranında bir iyileşmeyi ifade etmektedir. Benzer şekilde, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm'den 24 mm'ye çıkarılması sonucunda ortalama serbest basınç dayanımı 4.627 MPa olarak ölçülmüş ve bu durum, başlangıç değeri olan 4.150 MPa'ya göre yaklaşık %11.49 oranında bir artışa karşılık gelmiştir. Çizelgeler genel olarak değerlendirildiğinde, cam elyaf katkısının 24 mm lif uzunluğuyla kullanıldığı numunelerin en yüksek serbest basınç dayanımına sahip olduğu görülmektedir.

Cam elyaf katkılı silindir numunelerin cam elyaf lif uzunluğu sabit iken yalnızca cam elyaf katkı oranı değiştirildiğinde bu parametrenin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı cam elyaf katkı oranlarına göre elde edilen serbest basınç dayanımlarının karşılaştırmalı değerlendirilmesine olanak sağlayan tablolar, Çizelge 4.15 ile Çizelge 4.17 arasında sunulmuştur.

Çizelge 4.15. Cam elyaf lif uzunluğu 6 mm olan numunelerde farklı cam elyaf katkı oranlarının serbest basınç dayanımı üzerindeki karşılaştırmalı etkisi

Sıvı muhtevası (%)	Uçucu kül (%)	Cam elyafı fiber uzunluğu (mm)	Cam elyafı fiber oranı (%)	Serbest basınç dayanımı (MPa)
32,4	24,8	6	0,2	3,68
		6	0,4	3,823
		6	0,6	3,963
		6	0,8	4,15

Çizelge 4.15'te cam elyaf lif uzunluğu sabit iken, yalnızca cam elyaf katkı oranının serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çizelge 4.15'te görüldüğü üzere, cam elyaf katkı oranının %0.2'den %0.4'e yükseltilmesi durumunda, ortalama serbest basınç dayanımı 3.687 MPa'dan 3.823 MPa'ya artmıştır. Bu değişim, serbest basınç dayanımında yaklaşık %3.71 oranında bir artışa karşılık gelmektedir. Benzer şekilde, katkı oranının %0.6'ya çıkarılmasıyla, ortalama serbest basınç dayanımı 3.963 MPa olarak elde edilmiş ve bu da %0.2 katkı oranına göre yaklaşık %7.50 oranında bir artışı ifade etmiştir. Katkı oranının %0.8'e yükseltilmesi durumunda ise ortalama serbest basınç dayanımı 4.150 MPa'ya ulaşmış ve başlangıç değeri olan 3.687 MPa'ya göre yaklaşık %12.57 oranında bir artış sağlanmıştır. Çizelge genel olarak değerlendirildiğinde, ilgili fiber boyu için cam elyaf katkı oranı %0.8 olan numunelerin en yüksek serbest basınç dayanımı değerini verdiği görülmektedir. Bu sonuçlar, cam elyaf katkı oranındaki artışın, serbest basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ve dayanımı anlamlı şekilde artırdığını göstermektedir.

Çizelge 4.16. Cam elyaf lif uzunluğu 12 mm olan numunelerde farklı cam elyaf katkı oranlarının serbest basınç dayanımı üzerindeki karşılaştırmalı etkisi

Sıvı muhtevası (%)	Uçucu kül (%)	Cam elyafı fiber uzunluğu (mm)	Cam elyafı fiber oranı (%)	Serbest basınç dayanımı (MPa)
32,4	24,8	12	0,2	3,84
		12	0,4	3,987
		12	0,6	4,14
		12	0,8	4,217

Çizelge 4.16'da cam elyaf lif uzunluğu sabit iken, yalnızca cam elyaf katkı oranının serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çizelge

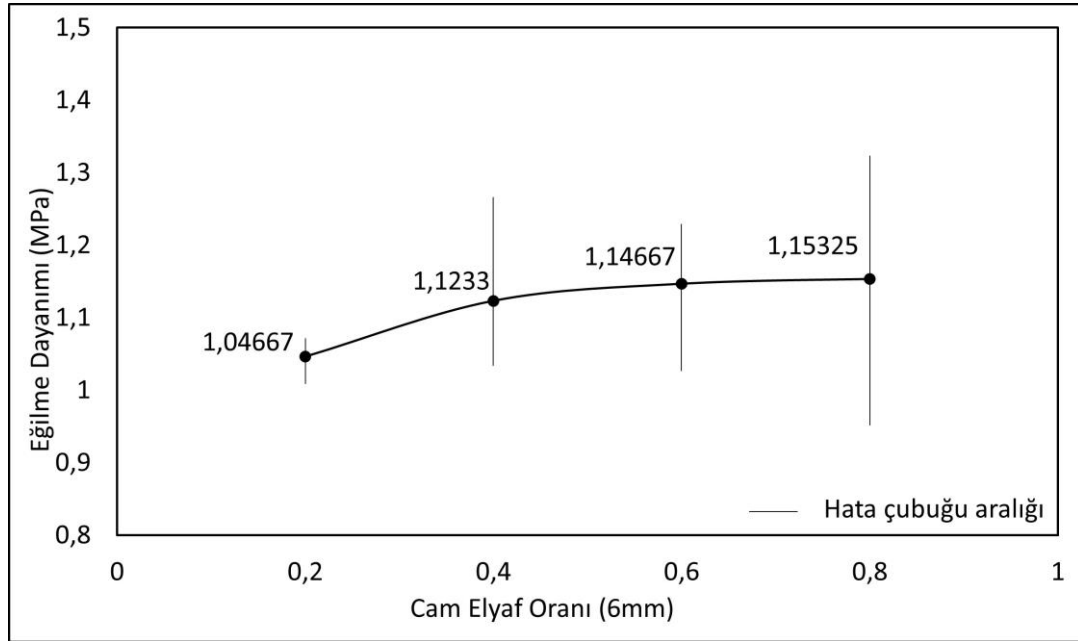
4.16 incelendiğinde, cam elyaf katkı oranının %0.2'den %0.4'e çıkarılması durumunda, ortalama serbest basınç dayanımı 3.840 MPa'dan 3.987 MPa'ya yükselmiş ve bu değişim yaklaşık %3.82 oranında bir artışa karşılık gelmiştir. Katkı oranının %0.6'ya yükseltilmesiyle, serbest basınç dayanımı 4.140 MPa seviyesine ulaşarak, başlangıç değerine kıyasla yaklaşık %7.81 oranında bir artış göstermiştir. Katkı oranı %0.8 seviyesine çıkarıldığında ise ortalama serbest basınç dayanımı 4.217 MPa olarak ölçülmüş ve bu durum, %0.2 katkı oranına göre yaklaşık %9.81 oranında bir artışa karşılık gelmiştir. Çizelge genel olarak değerlendirildiğinde, ilgili fiber boyu için %0.8 cam elyaf katkı oranına sahip numunelerin en yüksek serbest basınç dayanımına ulaştığı görülmektedir. Bu bulgular, cam elyaf katkı oranındaki artışın, serbest basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.17. Cam elyaf lif uzunluğu 24 mm olan numunelerde farklı cam elyaf katkı oranlarının serbest basınç dayanımı üzerindeki karşılaştırmalı etkisi

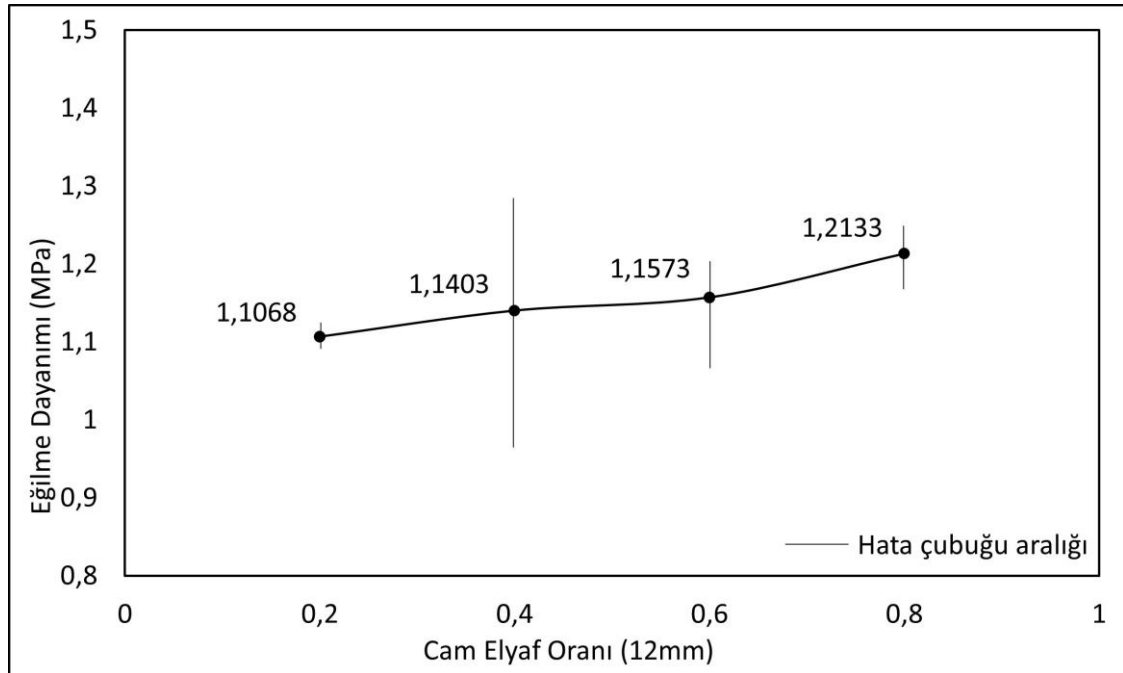
Sıvı muhtevası (%)	Uçucu kül (%)	Cam elyafı fiber uzunluğu (mm)	Cam elyafı fiber oranı (%)	Serbest basınç dayanımı (MPa)
32,4	24,8	24	0,2	4,02
		24	0,4	4,18
		24	0,6	4,27
		24	0,8	4,627

Çizelge 4.17'de cam elyaf lif uzunluğu sabit iken, yalnızca cam elyaf katkı oranındaki değişimin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çizelge 4.17 incelendiğinde, cam elyaf katkı oranının %0.2'den %0.4'e yükseltilmesiyle, ortalama serbest basınç dayanımı 4.020 MPa'dan 4.180 MPa'ya artmış ve bu değişim yaklaşık %3.98 oranında bir artışa karşılık gelmiştir. Katkı oranının %0.6 seviyesine çıkarılması durumunda ise dayanım değeri 4.267 MPa'ya ulaşarak, başlangıç değerine kıyasla yaklaşık %6.14 oranında artış göstermiştir. Katkı oranının %0.8'e yükseltilmesiyle elde edilen ortalama serbest basınç dayanımı 4.627 MPa olmuş ve %0.2 katkı oranına göre yaklaşık %15.09 oranında bir artış kaydedilmiştir. Çizelge genel olarak değerlendirildiğinde, ilgili fiber boyu için cam elyaf katkı oranı %0.8 olan numunelerin en yüksek serbest basınç dayanımını sağladığı görülmektedir. Bu bulgular, cam elyaf katkı oranlarındaki artışın, serbest basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etki yarattığını açıkça ortaya koymaktadır.

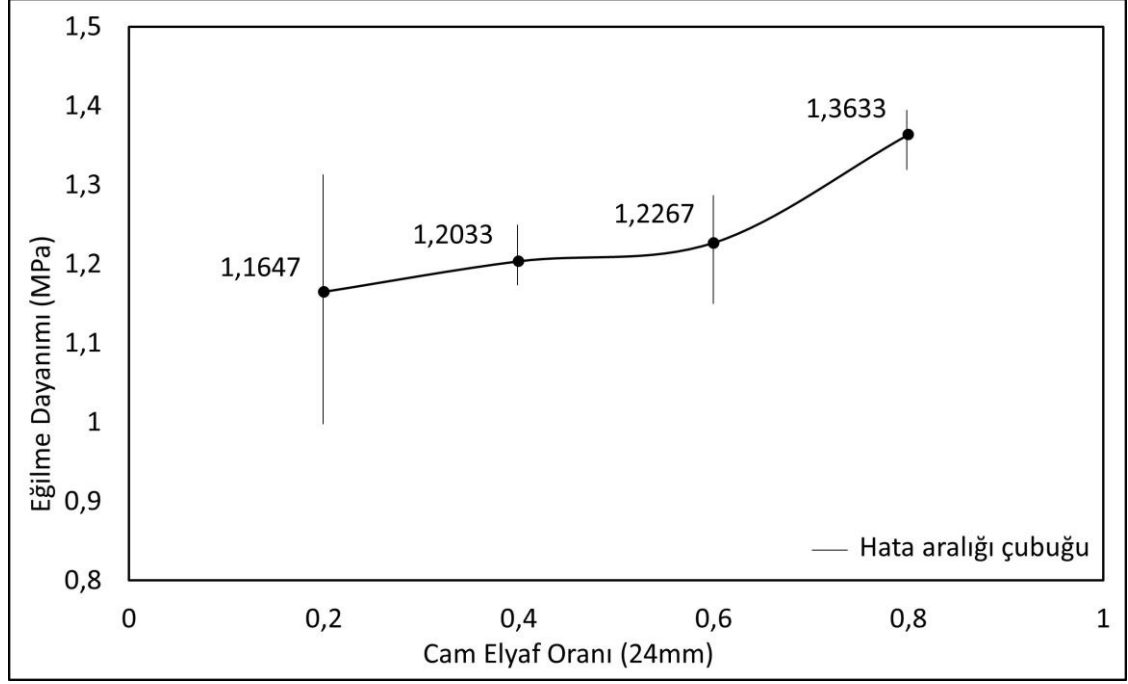
Eğilme deney sonuçlarının detaylı olarak incelenebilmesi amacıyla, Şekil 4.22 ile Şekil 4.24 arasında kiriş numunelerine ait deney sonuçları grafikler halinde ayrı ayrı sunulmuştur.



Şekil 4.22. Cam elyaf lif uzunluğu 6 mm olan numunelerin farklı cam elyaf katkı oranlarına göre eğilme dayanımı değişimi ve numunelerin hata sınırları



Şekil 4.23. Cam elyaf lif uzunluğu 12 mm olan numunelerin farklı cam elyaf katkı oranlarına göre eğilme dayanımı değişimi ve numunelerin hata sınırları



Şekil 4.24. Cam elyaf lif uzunluğu 24 mm olan numunelerin farklı cam elyaf katkı oranlarına göre eğilme dayanımı değişimi ve numunelerin hata sınırları

Grafiklerin sunulduğu Şekil 4.22 ile Şekil 4.24 arasında kiriş numunelerin eğilme deney sonuçlarından da anlaşılacağı üzere en küçük eğilme dayanımı 1.0467 MPa'ya karşılık gelmekteyken en büyük eğilme dayanımı 1.3633 MPa olarak elde edilmiştir.

Cam elyaf katkılı kiriş numunelerde, kontrol numunesi karışım oranları sabit tutulmuş; cam elyaf lif uzunluğu ve oranları değiştirilerek bu parametrelerin eğilme dayanımına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, eğilme dayanımlarının kıyaslamalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlayan tablolar, Çizelge 4.18 ile Çizelge 4.24 arasında detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Çizelge 4.18. %0,2 oranında cam elyaf katkılı kiriş numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin eğilme dayanımlarına kıyaslamalı etkisi

Sıvı muhtevası (%)	Uçucu kül (%)	Cam elyafı fiber uzunluğu (mm)	Cam elyafı fiber oranı (%)	Eğilme dayanımı (MPa)
32,4	24,8	6	0,2	1,0467
		12	0,2	1,1068
		24	0,2	1,1647

Çizelge 4.18'de cam elyaf katkı oranları sabit iken, yalnızca cam elyaf lif uzunluğundaki değişimin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çizelge

4.18’de görüldüğü üzere, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm’den 12 mm’ye yükseltilmesi durumunda, ortalama eğilme dayanımı 1.0467 MPa’dan 1.1068 MPa’ya yükselmiş ve bu değişim yaklaşık %5.74 oranında bir artışa karşılık gelmiştir. Benzer şekilde, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm’den 24 mm’ye çıkarılması durumunda, ortalama eğilme dayanımı 1.1647 MPa olarak ölçülmüş ve bu durum, başlangıç değeri olan 1.0467 MPa’ya göre yaklaşık %11.27 oranında bir artışa denk gelmiştir.

Çizelge genel olarak değerlendirildiğinde, cam elyaf katkısının ilgili oran için 24 mm lif uzunluğu ile uygulandığı numunelerin en yüksek eğilme dayanımı değerine ulaştığı görülmektedir. Bu sonuçlar, cam elyaf katkılı numunelerde lif uzunluğundaki artışın eğilme dayanımı üzerinde olumlu ve istatistiksel olarak anlamlı bir etki yarattığını göstermektedir.

Çizelge 4.19. %0,4 oranında cam elyaf katkılı kiriş numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin eğilme dayanımlarına kıyaslamalı etkisi

Sıvı muhtevası (%)	Uçucu kül (%)	Cam elyafı fiber uzunluğu (mm)	Cam elyafı fiber oranı (%)	Eğilme dayanımı (MPa)
32,4	24,8	6	0,4	1,1233
		12	0,4	1,1403
		24	0,4	1,2033

Çizelge 4.19’da cam elyaf katkı oranları sabit iken, yalnızca cam elyaf lif uzunluğundaki değişimin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çizelge 4.19’da görüldüğü üzere, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm’den 12 mm’ye yükseltilmesi durumunda, ortalama eğilme dayanımı 1.1233 MPa’dan 1.1403 MPa’ya yükselmiş ve bu artış yaklaşık %1.51 oranında gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm’den 24 mm’ye çıkarılması durumunda ise ortalama eğilme dayanımı 1.2033 MPa olarak ölçülmüştür ve bu, başlangıç değerine kıyasla yaklaşık %7.12 oranında bir artışa denk gelmektedir.

Çizelge genel olarak değerlendirildiğinde, cam elyaf katkısının ilgili oran için 24 mm lif uzunluğu ile kullanıldığı numunelerin en yüksek eğilme dayanımını sağladığı görülmektedir. Bu sonuçlar, ilgili oranlar için de cam elyaf katkılı numunelerde lif uzunluğundaki artışın, eğilme dayanımı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.20. %0,6 oranında cam elyaf katkılı kiriş numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin eğilme dayanımlarına kıyaslamalı etkisi

Sıvı muhtevası (%)	Uçucu kül (%)	Cam elyafı fiber uzunluğu (mm)	Cam elyafı fiber oranı (%)	Eğilme dayanımı (MPa)
32,4	24,8	6	0,6	1,1467
		12	0,6	1,1573
		24	0,6	1,2267

Çizelge 4.20’de cam elyaf katkı oranları sabit iken, yalnızca cam elyaf lif uzunluğundaki değişimin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çizelge 4.20 gözlemlendiğinde, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm’den 12 mm’ye yükseltilmesi durumunda ortalama eğilme dayanımı 1.1467 MPa’dan 1.1573 MPa’ya artmış ve bu değişim yaklaşık %0.92 oranında bir artışa karşılık gelmiştir. Benzer şekilde, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm’den 24 mm’ye yükseltilmesi durumunda, ortalama eğilme dayanımı 1.2267 MPa olarak ölçülmüş ve başlangıç değerine kıyasla yaklaşık %6.98 oranında bir artış görülmüştür. Çizelge genel olarak değerlendirildiğinde, ilgili oran için cam elyaf katkısının 24 mm lif uzunluğu ile uygulandığı numunelerin en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Bu bulgular, cam elyaf katkılı numunelerde lif uzunluğundaki artışın eğilme dayanımı üzerinde pozitif bir etki yarattığını göstermektedir.

Çizelge 4.21. %0,8 oranında cam elyaf katkılı kiriş numunelerinin 6-12-24 mm lif uzunluklarındaki değişimin eğilme dayanımlarına kıyaslamalı etkisi

Sıvı muhtevası (%)	Uçucu kül (%)	Cam elyafı fiber uzunluğu (mm)	Cam elyafı fiber oranı (%)	Eğilme dayanımı (MPa)
32,4	24,8	6	0,8	1,1533
		12	0,8	1,2133
		24	0,8	1,3633

Çizelge 4.21’de cam elyaf katkı oranları sabit tutulurken, yalnızca cam elyaf lif uzunluğundaki değişimin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çizelge 4.21’de görüldüğü üzere, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm’den 12 mm’ye yükseltilmesi durumunda, ortalama eğilme dayanımı 1.1533 MPa’dan 1.2133 MPa’ya yükselmiş ve bu artış yaklaşık %5.20 oranında gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, cam elyaf lif uzunluğunun 6 mm’den 24 mm’ye çıkarılması durumunda, ortalama eğilme dayanımı 1.3633 MPa olarak ölçülmüş ve bu da başlangıç değerine

kıyasla yaklaşık %18.21 oranında bir artışı ifade etmektedir. Çizelge genel olarak değerlendirildiğinde, ilgili oran için cam elyaf katkısının 24 mm lif uzunluğu ile uygulandığı numunelerin en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Bu bulgular, cam elyaf katkılı numunelerde lif uzunluğundaki artışın eğilme dayanımı üzerinde pozitif bir etki yarattığını göstermektedir.

Cam elyaf katkılı kiriş numunelerin cam elyaf lif uzunluğu sabit iken yalnızca cam elyaf katkı oranı değiştirildiğinde bu parametrenin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı cam elyaf katkı oranlarına göre elde edilen eğilme dayanımlarının karşılaştırmalı değerlendirilmesine olanak sağlanmıştır.

Çizelge 4.22. Cam elyaf lif uzunluğu 6 mm olan numunelerde farklı cam elyaf katkı oranlarının eğilme dayanımı üzerindeki karşılaştırmalı etkisi

Sıvı muhtevası (%)	Uçucu kül (%)	Cam elyafı fiber uzunluğu (mm)	Cam elyafı fiber oranı (%)	Eğilme dayanımı (MPa)
32,4	24,8	6	0,2	1,0467
		6	0,4	1,1233
		6	0,6	1,1467
		6	0,8	1,1533

Çizelge 4.22’de cam elyaf lif uzunluğu sabit iken, yalnızca cam elyaf katkı oranındaki değişimin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çizelge 4.22’de görüldüğü üzere, cam elyaf katkı oranının %0.2’den %0.4’e yükseltilmesi durumunda, ortalama eğilme dayanımı 1.0467 MPa’dan 1.1233 MPa’ya yükselmiş ve bu artış yaklaşık %7.32 oranında gerçekleşmiştir. Katkı oranının %0.6’ya yükseltilmesiyle ortalama eğilme dayanımı 1.1467 MPa olarak ölçülmüş ve başlangıç değerine kıyasla yaklaşık %9.55 oranında bir artış gözlenmiştir. Cam elyaf katkı oranının %0.8’e çıkarılması durumunda ise ortalama eğilme dayanımı 1.1533 MPa seviyesine ulaşmış ve bu değer, %0.2 katkı oranına göre yaklaşık %10.18 oranında bir artışı ifade etmektedir. Çizelge genel olarak değerlendirildiğinde, 6mm elyaf boyunda cam elyaf katkı oranının %0.8 olduğu numunelerin en yüksek eğilme dayanımı değerine ulaştığı görülmektedir. Bu bulgular, cam elyaf katkı oranındaki artışın eğilme dayanımı üzerinde olumlu bir etki yarattığını göstermektedir.

Çizelge 4.23. Cam elyaf lif uzunluğu 12 mm olan numunelerde farklı cam elyaf katkı oranlarının eğilme dayanımı üzerindeki karşılaştırmalı etkisi

Sıvı muhtevası (%)	Uçucu kül (%)	Cam elyafı fiber uzunluğu (mm)	Cam elyafı fiber oranı (%)	Eğilme dayanımı (MPa)
32,4	24,8	12	0,2	1,1068
		12	0,4	1,1403
		12	0,6	1,1573
		12	0,8	1,2133

Çizelge 4.23'te cam elyaf lif uzunluğu sabit iken, yalnızca cam elyaf katkı oranındaki değişimin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çizelge 4.23 gözlemlendiğinde, cam elyaf katkı oranının %0.2'den %0.4'e yükseltilmesi durumunda ortalama eğilme dayanımı 1.1068 MPa'dan 1.1403 MPa'ya yükselmiş ve bu artış yaklaşık %3.03 oranında gerçekleşmiştir. Katkı oranının %0.6'ya çıkarılması durumunda, ortalama eğilme dayanımı 1.1573 MPa olarak ölçülmüş ve bu da başlangıç değerine kıyasla yaklaşık %4.56 oranında bir artışa karşılık gelmiştir. Cam elyaf katkı oranının %0.8 seviyesine yükseltilmesiyle birlikte, ortalama eğilme dayanımı 1.2133 MPa'ya ulaşmış ve bu, %0.2 katkı oranına göre yaklaşık %9.62 oranında bir artışı ifade etmektedir. Çizelge genel olarak değerlendirildiğinde, 12 mm elyaf boyundaki cam elyaf katkı oranı %0.8 olan numunelerin en yüksek eğilme dayanımı değerine ulaştığı görülmektedir. Bu bulgular, cam elyaf katkı oranlarındaki artışın eğilme dayanımı üzerinde olumlu bir etki oluşturduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.24. Cam elyaf lif uzunluğu 24 mm olan numunelerde farklı cam elyaf katkı oranlarının eğilme dayanımı üzerindeki karşılaştırmalı etkisi

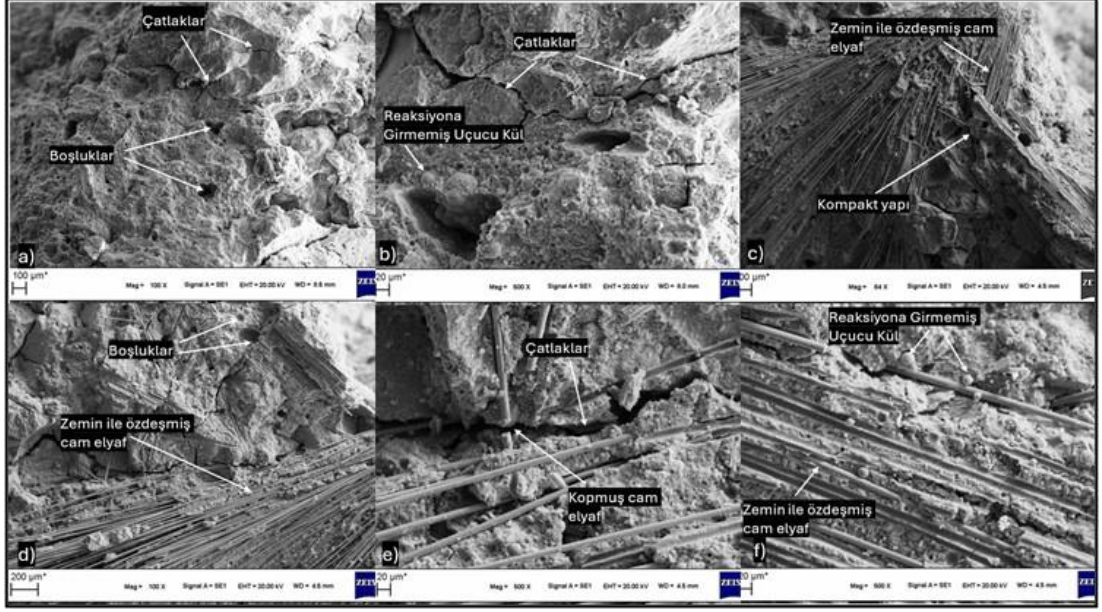
Sıvı muhtevası (%)	Uçucu kül (%)	Cam elyafı fiber uzunluğu (mm)	Cam elyafı fiber oranı (%)	Eğilme dayanımı (MPa)
32,4	24,8	24	0,2	1,1647
		24	0,4	1,2033
		24	0,6	1,2267
		24	0,8	1,3633

Çizelge 4.24'te cam elyaf lif uzunluğu sabit iken, yalnızca cam elyaf katkı oranındaki değişimin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çizelge 4.24 incelendiğinde, cam elyaf katkı oranının %0.2'den %0.4'e yükseltilmesi

durumunda, ortalama eğilme dayanımı 1.1647 MPa'dan 1.2033 MPa'ya artmış ve bu artış yaklaşık %3.31 oranında gerçekleşmiştir. Katkı oranının %0.6'ya yükseltilmesi durumunda ise ortalama eğilme dayanımı 1.2267 MPa olarak ölçülmüş ve bu da başlangıç değerine göre yaklaşık %5.32 oranında bir artışı ifade etmektedir. Cam elyaf katkı oranının %0.8'e çıkarılmasıyla birlikte ortalama eğilme dayanımı 1.3633 MPa seviyesine ulaşmış ve %0.2 katkı oranına göre yaklaşık %17.05 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Çizelge genel olarak değerlendirildiğinde, 24 mm elyaf boyunda cam elyaf katkısının %0.8 oranında kullanıldığı numunelerin en yüksek eğilme dayanımı değerine ulaştığı görülmektedir. Bu bulgular, cam elyaf katkı oranlarındaki artışın eğilme dayanımı üzerinde diğer boy durumlarında olduğu gibi bu fiber boyu için de olumlu bir etki yarattığını ortaya koymaktadır.

4.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları

Cam elyaf katkısız kontrol numuneleri ile cam elyaf katkılı numunelere ait kütleme işlemi sonrasında elde edilen yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 4.25'te sunulmuştur. SEM analizlerinden elde edilen görüntüler doğrultusunda; numunelerin iç yapısındaki bileşen dağılımlarının homojen olduğu, geopolimerizasyon bağlarının başarıyla kurulduğu, cam elyafının matris içerisinde iyi bir şekilde dağıldığı ve tutunduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yüzeydeki çatlak ve boşluk oranlarının düşük olduğu, reaksiyona girmemiş uçucu kül miktarının az olduğu ve istenen başarılı bir şekilde sağlandığı belirlenmiştir.



Şekil 4.25. Sem analizi görüntüleri; a) kontrol numunesinde gözlemlenen boşluklu yapı ve çatlaklar, b) reaksiyona girmemiş uçucu kül yapısının kontrol numunesi içerisindeki görünümü, c) cam elyaf katkılı numunenin kompakt ve yoğun mikro yapısı, d) matrisle bütünleşmiş ve zemin ile özdeşleşmiş cam elyaf yapısı, e) basınç etkisiyle kopmuş cam elyaf yapısı ve çatlaklar, f) uçucu kül partikülleri ile zemin ile özdeşleşmiş cam elyafın birlikte yer aldığı mikro yapı

SEM görüntüleri, cam elyaf katkısının yalnızca makroskobik mekanik özelliklerde değil, aynı zamanda mikroskobik düzeyde de bağ yapısı, malzeme bütünlüğü ve homojenlik üzerinde olumlu etkiler yarattığını göstermektedir. Bu bulgular, cam elyaf katkılı geopolimer malzemelerin hem dayanım hem de mikro yapı bakımından daha üstün performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

5. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, deneysel yöntem temel alınarak cam elyaf katkısı ve geopolimer teknolojisi kullanılarak geliştirilen bir zemin iyileştirme yöntemi sunulmuştur. Çevreci bir yaklaşımla çimento kullanımından kaçınılmıştır. Bu bağlamda, endüstriyel atık yönetiminin etkin şekilde uygulanmasıyla doğal kaynakların korunması sağlanmış ve çevresel etkisi düşük, sürdürülebilir bir zemin iyileştirme yaklaşımının uygulanabilirliği ortaya konmuştur. Çalışmanın ilk aşamasında, laboratuvar ortamında farklı lif uzunluklarına ve oranlarına sahip cam elyaf kullanılarak, Özçınar (2024) tarafından sunulan optimum parametreler esas alınarak sodyum hidroksit, sodyum silikat ve uçucu kül içeren geopolimer esaslı karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımlardan silindir ve kırış formunda numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde serbest basınç ve eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler kullanılarak, yapay sinir ağları (YSA), çoklu doğrusal regresyon (ÇDR) ve genetik ekspresyon programlama (GEP) tabanlı tahmin modelleri oluşturulmuştur. Modellerin doğrulukları; ortalama karesel hata (MSE), kök ortalama kare hatası (RMSE), ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve korelasyon katsayısı (R) parametreleriyle değerlendirilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, ÇDR ve GEP modeline kıyasla YSA modelinin deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Cam elyaf katkısız kontrol numunelerinde, serbest basınç dayanımı 3.47 MPa, eğilme dayanımı ise 0.9201 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değerlerin, Özçınar (2024) tarafından optimizasyon algoritmasıyla elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Cam elyaf katkılı numunelerde, silindir biçimindeki örneklerin serbest basınç dayanımı değerleri 3.687 MPa ile 4.627 MPa arasında değişmiş; kırış numunelerinde ise eğilme dayanımı değerleri 1.047 MPa ile 1.363 MPa arasında elde edilmiştir. Kontrol karışım oranları ve cam elyaf boyutu sabit iken, cam elyaf katkı oranındaki artış hem serbest basınç hem de eğilme dayanımı üzerinde pozitif bir etki yaratmıştır. Benzer şekilde, cam elyaf katkı oranları sabit iken, cam elyaf lif uzunluğundaki artış da dayanım değerlerini artırıcı yönde etki göstermiştir. En yüksek serbest basınç ve eğilme dayanımı değerleri, 24 mm lif uzunluğuna ve %0.8 cam elyaf oranına sahip numunelerden elde edilmiştir. Böylece bu tip zemin iyileştirme uygulamalarında ihtiyaç duyulabilecek karışım oranları denklemler ile temsil edilip proje uygulayıcıları için bir referans oluşturmuştur.

6. SONUÇLAR

Bu araştırmada, cam elyaf katkılı geopolimer ile iyileştirilmiş zeminlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen verilerin GEP, ÇDR ve YSA yardımıyla istatistiksel modellemesi gerçekleştirilmiş ve karışım oranlarına bağlı tahmin fonksiyonları oluşturulmuştur.

Literatürdeki çalışmalar referans alınarak belirlenen optimum oranlarla hazırlanan cam elyaf katkısız kontrol numunelerinin mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Serbest basınç dayanımı 3.47 MPa ve eğilme dayanımı 0.9201 MPa olarak elde edilen değerlerin, Özçınar (2024) tarafından optimizasyon algoritması ile belirlenen değerler ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Cam elyaf katkılı geopolimerin zemin iyileştirmesinde kullanılmasına katkı sağlamak ve literatüre katkı sunacak veriler üretmek amacıyla, kontrol karışımlarına çeşitli boy ve oranlarda cam elyaf katkıları eklenerek farklı kombinasyonlar elde edilmiştir. Her bir kombinasyon için oluşturulan numuneler, serbest basınç ve eğilme deneyleri için 28 günlük kürlenme sürecine tabi tutulmuştur. Kürlenme süreci tamamlanan numuneler üzerinde serbest basınç ve eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiş ve dayanım değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler, GEP, ÇDR ve YSA modellerine hedef değer olarak girilmiş ve tahmin modeli fonksiyonları ile tahmin sonuçları elde edilmiştir.

Cam elyaf katkılı silindir numunelerde, kontrol numunesine ait karışım oranları sabit tutulmuş; cam elyaf lif uzunluğu ve oranları değiştirilerek bu parametrelerin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Silindir biçiminde oluşturulan cam elyaf katkılı numunelere ait serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde, en düşük serbest basınç dayanımı 3.687 MPa, en yüksek serbest basınç dayanımı ise 4.627 MPa olarak belirlenmiştir.

Cam elyaf katkı oranları sabit iken, yalnızca cam elyaf lif uzunluğundaki değişimin serbest basınç dayanımına etkisi ayrıca değerlendirilmiştir. Cam elyaf katkı oranı %0.2 olduğunda, 6-12-24 mm lif uzunluğu değişimine bağlı olarak en yüksek serbest basınç dayanımı %9,04 oranında artış ile 24 mm lif uzunluğunda elde edilmiştir. Cam elyaf katkı oranı %0.4 olduğunda, aynı lif uzunluğu değişimine göre en yüksek artış %9,33 oranında 24 mm lif uzunluğunda kaydedilmiştir. Benzer şekilde cam elyaf katkı oranı %0.6 oranında olduğunda, lif uzunluğundaki değişime bağlı olarak en yüksek artış %7,65 oranında 24 mm lif uzunluğunda gerçekleşmiştir.

Cam elyaf katkı oranı %0.8 olduğunda, lif uzunluğu değişimine bağlı olarak en yüksek dayanım artışı %11,49 oranında 24 mm lif uzunluğunda elde edilmiştir. Bu kapsamda değerlendirilen numuneler içerisinde %0.8 katkı oranında ve 24 mm cam elyaf lif uzunluğu kullanımında en yüksek artış oranına ulaşılmıştır. Bu bulgular doğrultusunda, cam elyaf katkılı numuneler için incelenen lif uzunluklarındaki artışların serbest basınç dayanımı üzerinde pozitif bir etki yarattığı ve dayanım değerlerini anlamlı şekilde artırdığı açıkça ortaya konulmuştur.

Cam elyaf lif uzunluğu sabit iken, yalnızca cam elyaf katkı oranındaki değişimin serbest basınç dayanımına etkisi değerlendirilmiştir. Cam elyaf lif uzunluğu 6 mm olduğunda, katkı oranındaki değişime bağlı olarak en yüksek serbest basınç dayanımı %12,57 oranında artış ile %0.8 cam elyaf katkı oranında elde edilmiştir. Cam elyaf lif uzunluğu 12 mm olduğunda, katkı oranı değişimine göre en yüksek artış %9,81 oranında yine %0.8 katkı oranında kaydedilmiştir. Benzer şekilde, cam elyaf lif uzunluğu 24 mm olduğunda, katkı oranındaki değişime bağlı olarak en yüksek artış %15,09 oranında %0.8 katkı oranında gerçekleşmiştir. Bu kapsamda değerlendirilen numuneler içerisinde %0.8 katkı oranında ve 24 mm cam elyaf lif uzunluğu kullanımında en yüksek artış oranına ulaşılmıştır. Bu bulgular doğrultusunda, cam elyaf katkı oranlarındaki artışların serbest basınç dayanımı üzerinde pozitif bir etki yarattığı ve dayanım değerlerini anlamlı şekilde artırdığı açıkça ortaya konulmuştur.

Kiriş biçiminde oluşturulan numunelere ait eğilme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde ise en küçük eğilme dayanımı 1.0467 MPa olarak bulunurken en büyük eğilme dayanımı 1.3633 MPa olarak elde edilmiştir. Cam elyaf katkılı kiriş numunelerde de, kontrol numunesine ait karışım oranları sabit tutulmuş; cam elyaf lif uzunluğu ve katkı oranları değiştirilerek bu parametrelerin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Cam elyaf katkı oranları sabit iken, yalnızca cam elyaf lif uzunluğundaki değişimin eğilme dayanımına etkisi değerlendirilmiştir. Cam elyaf katkı oranı %0.2 olduğunda, 6-12-24 mm lif uzunluğu değişimine bağlı olarak en yüksek eğilme dayanımı %11,27 oranında artış ile 24 mm lif uzunluğunda elde edilmiştir. Cam elyaf katkı oranı %0.4 olduğunda, aynı lif uzunluğu değişimine göre en yüksek artış %7,12 oranında 24 mm lif uzunluğunda kaydedilmiştir. Benzer şekilde, cam elyaf katkı oranı %0.6 olduğunda, lif uzunluğundaki değişime bağlı olarak en yüksek artış %6,98 oranında 24 mm lif uzunluğunda gerçekleşmiştir. Son olarak, cam elyaf katkı oranı %0.8 olduğunda, lif uzunluğu değişimine bağlı olarak en yüksek eğilme dayanımı artışı %18,21 oranında 24 mm lif uzunluğunda elde edilmiştir. Bu kapsamda değerlendirilen numuneler içerisinde, %0.8 katkı oranında

ve 24 mm cam elyaf lif uzunluğu kullanımında en yüksek artış oranına ulaşılmıştır. Bu bulgular doğrultusunda, cam elyaf katkılı numunelerde lif uzunluğundaki artışların eğilme dayanımı üzerinde de pozitif bir etki yarattığı ve dayanım değerlerini anlamlı şekilde artırdığı açıkça gösterilmiştir.

Cam elyaf lif uzunluğu sabit tutularak yalnızca cam elyaf katkı oranındaki değişimin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Cam elyaf lif uzunluğu 6 mm olduğunda, katkı oranındaki değişime bağlı olarak en yüksek eğilme dayanımı, %10,18 oranında artış ile %0,8 cam elyaf katkı oranı uygulandığında elde edilmiştir. Lif uzunluğu 12 mm'ye çıkarıldığında, en yüksek eğilme dayanımı yine %0,8 katkı oranında elde edilmiş olup, bu durumda dayanım artışı %9,62 olarak gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, cam elyaf lif uzunluğu 24 mm olduğunda da en yüksek eğilme dayanımı değeri, %17,05 oranındaki artış ile %0,8 katkı oranı uygulandığında gözlenmiştir. Özetle, cam elyaf lif uzunluğu sabit tutularak %0,2, %0,4, %0,6 ve %0,8 oranlarında katkı uygulanmış ve en yüksek eğilme dayanımı, 24 mm cam elyaf lif uzunluğu ile %0,8 katkı oranı kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, cam elyaf katkı oranındaki artışın eğilme dayanımı üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğu ve dayanım değerlerini anlamlı şekilde artırdığı açıkça ortaya konulmuştur.

Serbest basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarına ilişkin olarak, ÇDR yöntemi, GEP yöntemi ve YSA yöntemiyle oluşturulan tahmin modellerine ait korelasyon katsayısı (R), ortalama karesel hata (MSE), kök ortalama kare hata (RMSE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) parametreleri hesaplanmıştır. Bu parametreler aracılığıyla, oluşturulan tahmin modellerinden elde edilen verilerin deneysel sonuçlarla olan uyumu değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda gerçekleştirilen analitik tahmin modellemelerinde, ÇDR ve GEP yöntemi ile oluşturulan tahminlerin gerçek deney verilerine YSA yöntemine kıyasla daha uzak olduğu, buna karşın YSA yöntemi ile oluşturulan tahminlerin hedeflenen deneysel verilere daha yakın ve daha anlamlı sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Böylece, cam elyaf katkılı geopolimer ile gerçekleştirilecek zemin iyileştirme çalışmalarında, YSA yöntemiyle elde edilen tahmin denklemlerinin, proje uygulayıcıları açısından istatistiksel olarak daha anlamlı ve güvenilir bir referans olabileceği ortaya konulmuştur.

Sonuç olarak, cam elyaf katkılı geopolimer kullanımının zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmede önemli bir katkı sağladığı belirlenmiştir. Numunelerdeki cam elyaf katkı oranının yanı sıra, lif uzunluğunun da artırılmasının belirli sınırlar

dâhilinde hem eğilme hem de serbest basınç dayanımını artırdığı ortaya konulmuştur. Çevre dostu bir malzeme olarak tanımlanan geopolimerin kullanıldığı zemin iyileştirme uygulamalarında, çimento kullanımına bağlı karbondioksit salınımının azaltılmasına da katkı sağlandığı vurgulanmıştır. Bu çevreci yaklaşım dikkate alınarak, ileride yapılacak çalışmalara rehberlik edebilecek nitelikte cam elyaf lif uzunluğu ve karışım oranları belirlenmiştir. Ayrıca proje uygulayıcılarına katkı sağlayabilecek belirlenen oranlara ilişkin istatistiksel tahmin modelleri ayrıntılı biçimde sunulmuştur.

7. ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, geopolimer ve cam elyaf kullanılarak, zemin iyileştirme yöntemlerinde çimento kullanımına bağlı karbondioksit salınımının azaltılmasını teşvik eden çevreci bir yaklaşım sunulmuştur. İstatistiksel yöntemler aracılığıyla veriler arasındaki korelasyonlar incelenmiş; farklı karışım oranlarına bağlı olarak oluşturulan tahmin denklemleri tanıtılmıştır. Bu sayede, kontrol karışım oranlarına değişken olarak eklenen cam elyaf lif uzunluğu ve katkı oranlarının zeminin mekanik özelliklerine etkileri detaylı şekilde ortaya konmuş ve sonraki araştırmalar için yol gösterici veriler elde edilmiştir. Sürdürülebilirlik odaklı yaklaşım çerçevesinde, gelecekte gerçekleştirilecek araştırmalara yön verebilecek cam elyaf lif uzunlukları ile karışım oranları sistematik biçimde belirlenmiştir. Buna ek olarak, saha uygulamalarında karar vericilere yol gösterebilmesi amacıyla, belirlenen oranlara ilişkin kapsamlı istatistiksel tahmin modelleri geliştirilmiş ve detaylı olarak raporlanmıştır. İlgili tasarımlar için bu tez kapsamında sunulan modellerin dikkate alınması önerilmektedir.

Çimento üretimi sırasında atmosfere salınan CO₂ gazının çevreye olan olumsuz etkileri göz önünde bulundurulduğunda, önerilen bu yöntem hava kirliliğini azaltabilecek çevresel bir avantaj sunmaktadır. Ayrıca bu yöntemle, endüstriyel tesisler ve termik santrallerin bacalarında biriken atık tozlardan biri olan uçucu külün zemin iyileştirme uygulamalarında değerlendirilmesi ile çevresel sürdürülebilirlik esas alınarak uçucu külün kontrollü şekilde yeniden kullanımı teşvik edilebilir.

KAYNAKLAR

- Abbas, S. N., Qureshi, M. I., Abid, M. M., ZIA, A., & Tariq, M. A. U. R. (2022). An investigation of mechanical properties of fly ash based geopolymer and glass fibers concrete. *Sustainability*, 14(17), 10489.
- Abdeldjouad, L., Asadi, A., Ball, R. J., Nahazanan, H., & Huat, B. B. (2019). Application of alkali-activated palm oil fuel ash reinforced with glass fibers in soil stabilization. *Soils and Foundations*, 59(5), 1552-1561.
- Ahmed, I. U. D. (2020). Usage of plastic bags as soil stabilizer: an environmental friendly solution (Doctoral dissertation, Near East University).
- Ahooee, F. (2015). Fiberglasın Kumun Kesme Dayanımı ve Genleşme Karakteristikleri Üzerine Etkisi (Yüksek Lisans tezi, Doğu Akdeniz Üniversitesi (DAÜ)-Doğu Akdeniz Üniversitesi (DAÜ)).
- Alesmael, A., & Ekmen, A. B. (2025, July). Artificial intelligence supported optimization of piled raft foundations based on three-dimensional finite element analyses. In *Structures* (Vol. 77, p. 109210). Elsevier.
- Algın, H. M., & Ekmen, A. B. (2017). Üniform Olmayan Düşey Yüklemeler Altındaki Jet-Grout Destekli Radye Temellerin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 2(3), 10-16.
- Algın, H. M., Can, S., & Ekmen, A. B. (2016). Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarı Tasarımında Donatı Uzunluğunun Tahmini. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 1(2), 35-44.
- Algın, H. M., Ekmen, A. B., & Kaya, E. (2022). 3D seismic response assessment of barrette piled high-rise building with comprehensive subsurface modelling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 163, 107488.
- Algın, H. M., Ekmen, A. B., & Kaya, E. (2018). Kazı Aşamaları Dikkate Alınarak Derin Kazı Sistemlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 102-111.
- Algın, H. M., Ekmen, A. B., & Yenmez, L. (2019). Baret kazıklı radye temellerin üç boyutlu sonlu elemanlar analizi. *Teknik Dergi*, 30(5), 9443-9458.
- Alkaya, D. (2009). Uçucu küllerin zemin iyileştirmesinde kullanılmasının incelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(1), 61-72.
- Almahmodi, Z. R. A. (2023). Yapay sinir ağları (YSA) modeli kullanılarak çimento ile stabilize edilmiş kilin serbest basınç dayanımının tahmini (Master's thesis, İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- Arulrajah, A., Yaghoubi, M., Disfani, M., Horpibulsuk, S., Bo, M. ve Leong, M. (2018). Derin toprak karıştırma ile yumuşak deniz kilinin iyileştirilmesi için uçucu kül ve cüruf bazlı jeopolimerlerin değerlendirilmesi. *Topraklar ve Temeller*. <https://doi.org/10.1016/J.SANDE.2018.07.005>.
- ASTM C 618, 2001. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, ASTM

International, West Conshohocken, Pa., 4.

ASTM C1609 / C1609M-19., 2019. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D2166 / D2166M-16., 2016. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Atabey, İ. İ., & Oztürk, Z. B. (2021). Seramik Sağlık Gereci Atıklarının Geopolimer Harç Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *International Journal Of Engineering Research And Development*, 13(1), 212-219

Avci, Y., & Ekmen, A. B. (2023, October). Artificial Intelligence Assisted Optimization of Rammed Aggregate Pier Supported Raft Foundation Systems Based on Parametric Three-Dimensional Finite Element Analysis. In *Structures* (Vol. 56, p. 105031). Elsevier.

Aydoğdu, A. (2019). Mikro ve makro sentetik fiber donatılı Kangal Termik Santrali uçucu kül ikameli betonların bazı mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi (Master's thesis, Konya Teknik Üniversitesi).

Aykat, F., & Ekmen, A. B. (2022). Haydarpaşa Limanı Proje Alanının Doğrusal Olmayan Sismik Yerel İvme Değişimlerine Bağlı Sıvılaşma Analizi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(3), 1155-1171.

Aysu, Ş. (2020). Yüksek plastisiteli kil zeminlerde cam lifi katkısının zeminin mukavemet, permeabilite ve konsolidasyon özelliklerine etkisi (Master's thesis, Konya Teknik Üniversitesi).

Baruah, H. (2015). Effect of glass fibers on red soil. *International journal of advanced technology in engineering and science*, 3(1), 217-223.

Bingöl, Ş. (2022). Farklı Cüruf Türlerinden Geopolimer Harç Üretimi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 173-178. <https://doi.org/10.46387/bjesr.1121881>

Bruce, M. E. C., Berg, R. R., Collin, J. G., Filz, G. M., Terashi, M., ve Yang, D. S., (2013). Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support. United States. Federal Highway Administration. Offices of Research & Development, Washington, p.248.

Çınar, M., & Erbaşı, B. (2022). Geoteknik uygulamalarda geopolimerlerin kullanılabilirliğinin incelenmesi, literatür çalışması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4), 774-789.

Çirkin, İ., & Yukselen Aksoy, Y. (2022). Pomza, Perlit ve Cam Elyaf Katkılarının Yüksek Sıcaklık Altındaki Kum-Kaolin Karışımlarının Kayma Dayanımı Davranışına Etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(71), 657-663. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2022247128>

- Ekmen, A. B. (2023) Evaluation of SPT-N Values and Internal Friction Angle Correlation Using Artificial Intelligence Methods in Granular Soils. *Soil Research*, 61(5), 495-509. <https://doi.org/10.1071/SR22226>
- Ekmen, A. B., & Güllü, F. (2022). Farklı Sonlu Elemanlar Yaklaşımları Kullanılarak Radye Temel Parametrelerinin Temel Oturması Üzerine Etkisinin Araştırılması. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 193-203.
- Ekmen, A. B., Avci, Y. (2023) Artificial Intelligence-Assisted Optimization of 69Tunnel Support Systems Based on the Multiple Three-Dimensional Finite Element Analyses Considering the Excavation Stages. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47, 1725–1747. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01109-7>
- Ekmen, A. B., Avci, Y. (2024) Development of Novel Artificial Intelligence Functions Based on 3D Finite Element Method Using February 6 Kahramanmaraş Seismic Records for Earthquake Effects Prediction in Various Soils. *Engineering Geology*, 336(107570), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107570>
- Ekmen, A. B., & Algin, H. M. (2023). Optimization of Fiber-Reinforced Deep Cement-Fly Ash Mixing Column Materials. *Revista De La Construcción*, 22(3), 707-728. <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.22.3.707>
- Ekmen, A.B., Algin, H.M., Özen, M. (2020). Strength and Stiffness Optimisation of Fly Ash-Admixed DCM Columns Constructed in Clayey Silty Sand. *Transportation Geotechnics*, 24, 100364. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100364>
- Ekmen, Ş., (2021). Uçucu kül esaslı hafif geopolimer harçların taze ve sertleşmiş özelliklerinin incelenmesi, modellenmesi ve optimizasyonu (Doktora tezi, Harran Üniversitesi, 129).
- Ekmen, Ş., Mermerdaş, K., & Algin, Z. (2022). Uçucu kül esaslı hafif geopolimer harçların basınç ve rötre sonuçlarının istatistiksel analizi ve modellenmesi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(17), 304-318. <https://doi.org/10.54365/adyumbd.1053825>
- Erbaşı, (2022) b. Geoteknik uygulamalarda geopolimerlerin kullanılabilirliğinin incelenmesi: literatür çalışması investigation of the usability of geopolymers in geotechnical applications: a review.
- Eskisar, T., & Aksu, G. (2020). Zeminlerde tek fazlı geopolimerizasyon uygulaması ve geopolimerizasyonun serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8(3), 466-478.
- Gepsoft 2013, Genexprotools, Portugal
- Görgün, B., Bozkurt, E., Kuru, D., Borazan, A. A., & Ural, N. (2018). Atık tavuk tüyünün zemin iyileştirmesinde değerlendirilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 89-96.
- Görhan, G. (2020). Geopolimer Harç Özelliklerine Metakaolin Kalsinasyon

- Sıcaklığının Etkisi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(1), 83-89.
- Güneş, M., & Ekmen, A. B. (2022). Yalova ili süleymanbey mahallesinde bulunan proje alanının nonlinear sismik saha tepkisi kullanılarak sıvılaşma potansiyelinin incelenmesi. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(17), 319-332.
- Güntekin, E., & Arpacı, S. S. (2023). Geopolimer Esaslı Ahşap Kompozitleri. Ağaç ve Orman, 3(2), 6-13.
- Kalem, Z. (2015). Kentsel dönüşümdeki inşaat ve yıkıntı atıklarının killi zeminlerde iyileştirmeye etkilerinin araştırılması.
- Kalkan, S., & Engin, N. (2024). Geleneksel Kerpicin Katkı Maddeleri ile Özelliklerinin İyileştirilmesi Üzerine Bir İnceleme. International Journal of Engineering Research and Development, 16(2), 722-735.
- Lori, I., Toufigh, M. ve Toufigh, V. (2021). Bakır madeni atık barajı tortuları bazlı jeopolimer ve silika dumanı kullanılarak zayıf dereceli kumlu toprağın iyileştirilmesi. İnşaat ve Yapı Malzemeleri, 281, 122591. <https://doi.org/10.1016/J.Conbuildmat.2021.122591> .
- Ngo, A., Nguyen, L. ve Tran, V. (2023). Jeopolimerle stabilize edilmiş kohezyonlu zeminlerin sınırsız basınç dayanımı için yorumlanabilir makine öğrenimi-Shapley katkısız açıklama modelinin geliştirilmesi. PLOS ONE, 18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286950> .
- Özcan, U., & Güngör, S. (2019). Sürdürülebilir Bir Yöntem/Betonda Puzolan Kullanımı. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (15), 176-182.
- Özçınar, (2024). Geopolimer ile iyileştirilen atık lastik katkılı zeminlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi ve yapay zeka destekli optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Şanlıurfa.
- Özen, E. S. (2019). Kumlu zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde doymamış polyester kullanımı (Master's thesis, Konya Teknik Üniversitesi).
- Öztürk, Ö. (2019). Kare kesitli gfrp kutu profillerin içerisine polimer beton doldurularak mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi (Master's thesis, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi).
- Parthiban, D., Vijayan, D. S., Koda, E., Vaverkova, M. D., Piechowicz, K., Osinski, P., & Van Duc, B. (2022). Role of industrial based precursors in the stabilization of weak soils with geopolymer—A review. Case Studies in Construction Materials, 16, e00886.
- Phear, A. ve Harris, S. (2008). Géotechnique 1948–2008'e Katkılar: Zemin iyileştirme. Geotechnique, 58, 399-404. <https://doi.org/10.1680/GEOT.2008.58.5.399> .
- Rabab'ah, S., Al Hattamleh, O., Aldeeky, H., & Alfoul, B. A. (2021). Effect of glass

fiber on the properties of expansive soil and its utilization as subgrade reinforcement in pavement applications. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00485.

- Ramya, M. ve Jeyapriya, S. (2018). Topraktaki Jeopolimer Kolon Üzerine Davranışsal Çalışma. *İnşaat Mühendisliğinde Ders Notları*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0559-7_1.
- Singh, D., Kumar, V. ve Tiwari, R. (2023). Cam Elyafının Siyah Pamuk Toprağının Jeoteknik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi. *IOP Konferans Serisi: Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, 1273. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1273/1/012019>.
- Sümbül, M. (2023). Cam elyaf takviyeli polyester (CTP) katkısının ince daneli zemin özelliklerine etkisi= Effect of glass fiber reinforced polyester (GRP) additive on fine grain soil properties (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi).
- Sümer, B. (2012). Silis dumanı katkılı betonlarda polipropilen lif kullanımının beton özelliklerine etkilerinin araştırılması.
- Şengül, T., & Vitoşoğlu, Y. (2023). Zeminlerde Kimyasal Stabilizasyon Uygulamaları ve Kullanılan Malzemeler. *Geoteknik Mühendisliğinde Yenilikçi Araştırmalar*, 121.
- The MathWorks, Inc., MATLAB, Version R2017a, Natick, Massachusetts, USA, 2017
- Topal, E. (2014). Kompozit delikli kare levhalarda iki yönlü yükleme altında mekanik burkulmalarının incelenmesi (Master's thesis, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Uray, K., Koçer, M., Uray, E., & Açikel, H. (2023). İnşaat Mühendisliği Deneysel ve Analitik Tasarımlarında Taguchi Yönteminin Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 15(2), 429-445
- Yıldız, S., Bölükbaş, Y., & Keleştemur, O. (2010). Cam Elyaf Katkısının Betonun Basınç ve Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 13(3), 239-243.
- Yuan, B., Li, Z., Chen, Y., Ni, H., Zhao, Z., Chen, W., & Zhao, J. (2022). Mechanical and microstructural properties of recycling granite residual soil reinforced with glass fiber and liquid-modified polyvinyl alcohol polymer. *Chemosphere*, 286, 131652.