

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİF TAKVİYELİ GEOPOLİMER KOLONLARIN ZEMİN
STABİLİZASYONUNDA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bahadır EKİNCİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yaşar AYZ

AĞUSTOS 2024

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİF TAKVİYELİ GEOPOLİMER KOLONLARIN ZEMİN
STABİLİZASYONUNDA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bahadır EKİNCİ
(36213621010)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yaşar AYAZ
Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Talha SARICI

AĞUSTOS 2024

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocalarım Sayın Doç. Dr. Yaşar AYAZ'a, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Talha SARICI'ya, ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Enes Ekinci'ye,

Çalışmalarında ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme,

teşekkür ederim.



ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Lif Takviyeli Geopolimer Kolonların Zemin Stabilizasyonunda Kullanımının Araştırılması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Bahadır EKİNCİ



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT	vii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	4
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
2.1 Geopolimer	6
2.2. Beton üretiminde lif kullanımı.....	8
2.3. Zemin Stabilizasyonu	10
3. MATERYAL ve METOD.....	14
3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler	14
3.1.1. Yüksek fırın cürufu.....	14
3.1.2. Çelik lif.....	15
3.1.3. Sodyum hidroksit (NaOH)	16
3.1.4. Silis dumanı	18
3.1.5. Kum zemin	19
3.1.6. Plaka Yükleme Deneyi	21
3.2.3. Geopolimer örneklerinin üretimi	24
3.2.5. Deney Süreci	27
3.2.5.1. Basınç dayanımı deneyi.....	27
3.2.5.2. Eğilme dayanımı deneyi	27
3.2.5.3. Model yükleme deneyi	28
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	34
4.1. Geopolimer Örneklerin Basınç Dayanımı	34
4.2. Lif Takviyeli Geopolimer Örneklerin Eğilme Dayanımı	36
4.3. Zemin Deneyleri	37
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	41
KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2. 1 : Lif takviyeli betonların bazı mekanik özelliklerinin değişimi	10
Çizelge 3. 1 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal içeriği	15
Çizelge 3. 2 : Çelik liflerin karakteristik özellikleri.	16
Çizelge 3. 3 : Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	17
Çizelge 3. 4 : Silis dumanının kimyasal kompozisyonu	18
Çizelge 3. 5 : Kum Zeminin Özellikleri.....	20
Çizelge 3. 6 : Zemin stabilizasyonu işleminde dikkate alınan değişkenler.....	23
Çizelge 3. 7 : Geopolimer hamur numunelerinin karışım oranları	24



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 : Çeşitli zemin stabilizasyonu uygulamaları.....	12
Şekil 3.1 :Yüksek fırın cürufu.....	15
Şekil 3.2 : Çelik Lif.....	16
Şekil 3.3 : Tez çalışmasında kullanılan NaOH	17
Şekil 3.4 : Silis dumanı	18
Şekil 3.5 : Kum.....	19
Şekil 3.6 : Kum zeminin dane çapı dağılımı eğrisi, (Özcan,2024)	19
Şekil 3.7 : Plaka Yükleme Deney Seti	21
Şekil 3.8 : Lif takviyeli geopolimer kompozitler	25
Şekil 3.9 : Farklı boyutlardaki lif takviyeli geopolimer kazıklar	26
Şekil 3.10 : Basınç dayanımı test cihazı.....	27
Şekil 3.11 : Eğilme dayanımı deneyi	28
Şekil 3.12 : El penetrometresi ile sıkılaşma kontrolünün yapılması.....	29
Şekil 3.13 : Model temel için deplasman ölçer yerleşimi	30
Şekil 3.14 : Model temel için deney seti parçaları	30
Şekil 3.15 : Yerinde dökme geopolimer kazığın deney seti parçaları.....	32
Şekil 3.16 : Yerinde dökme geopolimer kazığın deplasman ölçer yerleşimi.....	32
Şekil 3.17 : Çakma geopolimer kazığın deney seti parçaları	33
Şekil 3.18 : Çakma geopolimer kazığın deplasman ölçer yerleşimi	33
Şekil 4.1 : 7 Günlük geopolimer numunelerin basınç dayanımı değerleri.....	35
Şekil 4.2 : 28 günlük geopolimer numunelerin basınç dayanımı değerleri	35
Şekil 4.3 : Lif takviyesinin 28 günlük basınç dayanımı değerlerine etkisi	36
Şekil 4.4 : Model temel ve yerinde dökme geopolimer kazıkların gerilme deplasman eğrileri.....	37
Şekil 4.5 : Model temel ve çakma geopolimer kazıkların gerilme deplasman eğrileri.....	38
Şekil 4.6 : Tüm deneyler için hesaplanmış BCR değerleri	40

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LİF TAKVİYELİ GEOPOLİMER KOLONLARIN ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Bahadır EKİNCİ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

47+vii sayfa

2024

Danışman: Doç. Dr. Yaşar AYZ
Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Talha SARICI

Bu tez çalışmasında yüksek fırın cürufu ve silis dumanının bağlayıcı malzeme olarak kullanıldığı çelik lif ilave edilmiş geopolimer kompozitlerin zemin stabilizasyonunda kullanımı araştırılmıştır. Tezin ilk aşamasında, yüksek fırın cürufuna üç farklı oranda (%5, %10 ve %15) silis dumanı ikame edilmiştir. Bağlayıcı kısmı bu şekilde üretilen geopolimer hamur numuneleri 8 , 10 ve 12 M NaOH çözeltisi hazırlanarak aktive edilmiştir. Alkali /bağlayıcı oranları ise karışım normal kıvamda olacak şekilde belirlenmiştir. Bu şekilde üretilen geopolimer hamur numuneleri üzerinde 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiş ve en yüksek basınç dayanımına sahip olan numune grubunun belirlenmesinin ardından tezin ikinci aşamasına geçilmiştir. Tezin ikinci aşamasında ise, yüksek fırın cürufuna % 10 oranında silis dumanı ikamesi ile hazırlanan ve 8 M NaOH ile aktive edilen numune grubuna % 0.5, % 1 ve % 1.5 oranlarında çelik lif ilave edilmiştir. Bu şekilde üretilen numuneler üzerinde ise 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı değerleri incelenmiştir. En yüksek eğilme dayanımının gözlendiği %1.5 çelik lif ilave edilen numune grubu belirlendikten sonra, tezin son aşamasına geçilmiştir. Tezin son aşamasında, çapı 50 mm olan üç farklı uzunluğa (100 mm, 150 mm ve 200 mm) sahip geopolimer kazıklar üretilmiş ve bu geopolimer kazıkların zemin stabilizasyonu işleminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Tezin üçüncü aşamasında ise elde edilen optimum karışım oranına sahip geopolimer hamur hazırlanarak farklı boylara sahip geopolimer kazıklar oluşturulmuştur. Zemin yükleme deneylerine tabi tutulan model temel, yerinde dökme geopolimer kazık ve çakma geopolimer kazıkların zemin stabilizasyonu değerleri araştırılmıştır. Model temel ve yerinde döküm geopolimer kazıkların zemin yükleme deneyleri sonucunda yerinde dökme geopolimer kazıkların model temele nazaran daha iyi zemin taşıma gücüne sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca çakma geopolimer kazıkların zemin taşıma gücü ise yerinde dökme geopolimer kazıklara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Çakma ve yerinde döküm geopolimer kazıkların zemin taşıma gücünü arttırmasının başlıca sebeplerinden biri, zemin üzerine gelen yüklerin daha derine aktarımının sağlanmasıdır. Ayrıca kazık yan yüzeylerin de oluşan sürtünme kuvvetleri ve uç dirençleri sayesinde yüke karşı koymaları durumları da zemin taşıma gücünü arttıran diğer faktörlerdir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, çelik lif, zemin stabilizasyonu, basınç dayanımı

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE USE OF FIBER-REINFORCED GEOPOLYMER COLUMNS IN SOIL STABILIZATION

Bahadır EKİNCİ

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

47+vii pages

2024

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yaşar AYAZ
Co-Supervisor : Asst. Prof. Dr. Talha SARICI

In this thesis, the use of steel fiber-reinforced geopolymer composites, in which blast furnace slag and silica fume were used as binding materials, in soil stabilization was investigated. In the first stage of the thesis, silica fume was substituted into blast furnace slag at three different rates (5%, 10% and 15%). Geopolymer paste samples, the binder part of which was produced in this way, were activated by preparing 8, 10 and 12 M NaOH solutions. Alkali/binder ratios were determined so that the mixture had normal consistency. 7 and 28-day compressive strength tests were carried out on the geopolymer paste samples produced in this way, and after determining the sample group with the highest compressive strength, the second phase of the thesis was started. In the second stage of the thesis, 0.5%, 1% and 1.5% steel fiber was added to the sample group prepared by substituting 10% silica fume into blast furnace slag and activated with 8 M NaOH. 7 and 28 day bending strength values were examined on the samples produced in this way. After determining the sample group with 1.5% steel fiber addition in which the highest bending strength was observed, the final phase of the thesis was started. In the final stage of the thesis, geopolymer piles with a diameter of 50 mm and three different lengths (100 mm, 150 mm and 200 mm) were produced and the usability of these geopolymer piles in the ground stabilization process was investigated. In the third stage of the thesis, geopolymer dough with the optimum mixture ratio was prepared and geopolymer piles of different lengths were formed. Ground stabilization values of model foundation, cast-in-place geopolymer piles and driven geopolymer piles subjected to ground loading tests were investigated. As a result of the ground loading tests of the model foundation and cast-in-situ geopolymer piles, it was concluded that the cast-in-situ geopolymer piles had better soil bearing capacity than the model foundation. In addition, it has been observed that the ground bearing capacity of driven geopolymer piles is higher than cast-in-place geopolymer piles. One of the main reasons why driven and cast-in-place geopolymer piles increase the ground bearing capacity is that they enable the loads on the ground to be transferred deeper. In addition, the friction forces on the side surfaces of the piles and their ability to resist the load thanks to their end resistance are other factors that increase the soil bearing capacity.

Keywords: Geopolymer, steel fiber, soil stabilization, compressive strength

1. GİRİŞ

Dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesi olan betonun ham maddesi geleneksel Portland çimentosudur. Yakın bir zamana kadar, insanlığın modern hayatını sürdürülebilmesi ve gelecek hedeflerine ulaşılabilmesi için kullanması gereken en önemli malzemelerden biri olarak Portland çimentosu görülmekte idi. Çimentonun ham maddelerine kolay erişim imkanı, gelişmiş sanayi girişimleri, yüksek dayanım seviyelerine erişebilmesi ve dünya çapında kabul gören standartlara sahip olması çimentoyu popüler bir yapı malzemesi haline getirmiştir. Küresel nüfusun artması, kentleşme faaliyetlerin çok hızlı ve düzensiz şekilde gelişmesi çimentoya olan talebi de günden güne arttırmıştır.

Bilim dünyası, küresel ısınmaya sebep olan antropojenik CO₂ gazı emisyonlarının azaltılması amacıyla uzun süredir önemli çalışmalar üretmektedir. Bu çalışma alanları, temel olarak, insanlığın farklı sektörlerde kullandığı çevre üzerinde olumsuz etkileri bulunan malzemelerin yerine daha çevre dostu malzemelerin kullanımının araştırılmasıdır. İnşaat sektöründe bu girişimlerin en önemli çıktılarından biri ise geopolimer bağlayıcılar olarak ön plana çıkmaktadır.

Geopolimer bağlayıcılar, oksijen atomlarını paylaşarak tetrahedral silika ve alüminanın polikondenzasyonu ile oluşan inorganik bir alüminosilikat malzemesidir. Geleneksel Portland çimentosu kullanılarak üretilen muadillerine göre birçok avantajı bulunan geopolimer bağlayıcılar literatürde sıklıkla araştırılan bir konu haline gelmiştir. Sahip olduğu üstün dayanıklılık özellikleri, yüksek erken dayanımın gözlenmesi ve düşük büzülme oranları geopolimerleri üstün kılan avantajların başında gelmektedir. Özellikle son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar, geopolimer betonların mühendislik, termal, mikro yapısal özellikleri bakımından geleneksel Portland çimentosuna önemli bir alternatif olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Her ne kadar birçok avantaja sahip olsa da, geopolimer bağlayıcılar, düşük çekme dayanımı özelliği göstermeleri bu malzemelerin yüksek durabilite özellikleri göstermesine önemli bir kısıtlayıcı etki oluşturmaktadır. Bu nedenle, geopolimer bağlayıcıların üretiminde birçok lif türü kullanılmaktadır. Geopolimer kompozitlere ilave edilen lifler yardımıyla basınç dayanımı, eğilme dayanımı, tokluğu gibi birçok parametre önemli ölçüde iyileşmektedir .

Yapılan bu tez 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. Tezin ilk aşamasında yüksek fırın cürufu ve silis dumanı bağlayıcılarının, NaOH ile aktive edilmesiyle geopolimer hamur elde edilmeye çalışılmıştır. Farklı karışım oranlarında kullanılan NaOH aktivatörü, yine farklı miktarlarda yüksek fırın cürufuna ikame edilen silis dumanı ile birleştirilip optimum karışımın bulunması amaçlanmıştır. Yapılan dökümler ve basınç deneyleri sonucunda, 8M NaOH ile aktive edilmiş % 10 silis dumanı ikameli örnek optimum sonuçlara ulaşmış örnek olarak karşımıza çıkmıştır.

Tezin ilk aşamasının tamamlanmasıyla birlikte, en yüksek basınç dayanımına sahip geopolimer numunelere farklı oranlarda çelik lif ilavesi (% 0.5, % 1 ve % 1.5) yapılmıştır. Hazırlanan numune grupları üzerine 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, en yüksek eğilme ve basınç dayanımı değerlerine sahip numune grubunun %1.5 çelik lif takviye edilerek oluşturulan geopolimer numunelerden elde edildiğini göstermiştir.

Son aşama da ise elde edilen optimum karışım oranlarına sahip lif takviyeli geopolimer, farklı boy/çap oranlarında üretilerek geopolimer kolonlar üretilmiştir. 50 mm çapında ve 100 mm, 150 mm, 200 mm yüksekliğinde geopolimer kazıklar kullanılmıştır. Böylelikle farklı narinliğe sahip geopolimer kazıklar üretilmiştir. Üretilen bu geopolimer kazıklar zayıf taşıma kapasitesine sahip kum zeminin stabilizasyonunda kullanılmıştır.

Üç farklı boy/çap (100 mm, 150 mm, 200 mm /50 mm) oranına sahip geopolimer kazıklar üretilerek zemin stabilizasyonu için deneylere tabi tutulmuştur. Bu deneylerin ilki model temel üzerinde gerçekleştirilmiş ve akabinde yerinde dökme geopolimer kazıklar ile çakma geopolimer kazıkların zemin stabilizasyonu deneyleri olarak devam ettirilmiştir. Yapılan zemin deneyleri sonucunda, yerinde dökme geopolimer kazıkların model temele nazaran daha yüksek taşıma gücüne sahip okduğu gözlemlenmiştir. Gözlemlenen bu sonuçlarla

beraber, geopolimer kazık boyunun arttırılmasıyla zemin taşıma gücü değerlerinin arttığı da belirlenmiştir.

Çakma geopolimer kazıklar ile model temel üzerinde de plaka yükleme deneyleri yapılmış ve yine aynı boy/çap oranına sahip geopolimer kazıklar kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, yerinde dökme geopolimer kazıklar da olduğu gibi, çakma geopolimer kazıkların taşıma gücü değerleri model temele nazaran yine yüksek çıkmış ve çakma geopolimer kazığın boyu arttıkça taşıma gücü değerlerinde de belirgin bir artış gözlemlenmiştir.

Yerinde döküm geopolimer kazık ve çakma geopolimer kazıkların taşıma gücü değerlerinin model temelin taşıma gücü değerlerinden yüksek çıkmasının nedeni ise, üzerlerine gelen yükleri daha derine aktarabilmesi ve yan yüzeylerinde oluşan sürtünme kuvvetleri ve uç dirençleriyle yüke karşı koymaları olarak açıklanabilir.

Yerinde dökme geopolimer kazıklar ile çakma geopolimer kazıkların zeminde ki davranışlarını kıyaslamak için taşıma gücü oranı (BCR) tanımlanmıştır. Elde edilen BCR değerleri sonucunda çakma geopolimer kazıkların, yerinde dökme geopolimer kazıklara nazaran oldukça yüksek nihai taşıma gücü değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, yüksek fırın cürufu (YFC) ve silis dumanı (SD) kullanılarak üretilen lif takviyeli geopolimer kolonların zemin stabilizasyonu işleminde kullanılabilirliğini araştırmaktır. İlk olarak, yüksek fırın cürufuna farklı oranlarda (% 0, 5, 10 ve 15) silis dumanı ikamesinin etkileri araştırılmıştır. Katı kısmın bu şekilde hazırlanmasının ardından, geopolimer hamur numuneleri farklı konsantrasyonlarda NaOH çözeltisi (8, 10 ve 12M) hazırlanarak aktive edilmiştir. Geopolimer hamur numunelerinin üretiminde alkali sıvı/bağlayıcı oranları normal kıvamda olacak şekilde hazırlanmıştır. Bu şekilde üretilen geopolimer numuneler üzerinde 7 ve 28 günlük basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiş ve en yüksek basınç dayanımına sahip numune belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımına sahip numune 8M NaOH ile aktive edilmiş % 10 silis dumanı ikame edilmiş örnek olarak karşımıza çıkmıştır.

Tezin ilk aşamanın tamamlanmasının ardından, en yüksek basınç dayanımına sahip geopolimer numunelere farklı oranlarda çelik lif ilavesi (%0.5, %1 ve %1.5) gerçekleştirilmiştir. Farklı oranlarda çelik lif ilave edilen örnekler üzerinde 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen test sonuçları, en yüksek basınç ve eğilme dayanımı değerlerinin %1.5 çelik lif ilave edilerek üretilen geopolimer örneklerden elde edildiğini göstermiştir.

Son olarak, belirlenen optimum karışım parametreleri kullanılarak farklı boy/çap oranlarında lif takviyeli geopolimer kazıklar üretilmiştir. 50 mm çapındaki geopolimer kazıkların boyları ise 100 mm, 150 mm, 200 mm olarak seçilmiştir. Böylelikle üç farklı narinliğe sahip geopolimer kazıkların üretimi gerçekleştirilmiştir. Boy/çap oranı 2, 3 ve 4 olmak üzere üç farklı narinlik oranında üretilen geopolimer kazıklar zayıf taşıma kapasitesine sahip kum zeminin stabilizasyonunda kullanılmıştır.

Yapılan bu tez kapsamında, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı ile NaOH aktivatörünün karıştırılmasıyla elde edilen geopolimer hamurun yüksek dayanımlara sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca karışımında çimentonun olmaması sebebiyle çimento üretiminden kaynaklı oluşan karbon salınımını azaltması nedeniyle çevreci bir yapısı olduğu ortaya çıkmıştır. Karışıma giren yüksek fırın cürufu ve silis dumanı yapı malzemeleri de endüstriyel

malzemelerin üretimi sonucu oluşan atık malzemeler olarak nitelendirilebilir. Bu malzemelerin yapı malzemelerinde kullanılmasıyla geri dönüşümü sağlanmış ve çevreye olan olumlu etkileri ön plana çıkmıştır.

Ayrıca hazırlanan optimum geopolimer hamurun basınç dayanımı her ne kadar yüksek sonuçlar ortaya koysa da çekme gerilmeleri altında aynı performansı sergileyememiştir. Bu nedenle düşük çekme dayanımına sahip geopolimer hamura farklı oranlar da çelik lif takviye edilmiştir. Yapılan çelik lif takviyesiyle geopolimer hamurun çekme dayanımında gözle görülür artışlar deneyler sonucu ortaya konulmuştur. Böylece hazırlanan geopolimer hamurun hem basınç hem de çekme dayanımı değerlerinde artışlar meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Yapılan tüm bu deneyler ve araştırmalar sonucunda optimum karışım oranlarına sahip geopolimer hamur elde edilmiştir. Bu optimum hamur farklı boy/çap oranlarına sahip kalıplara dökülerek geopolimer kazıkların üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen geopolimer kazıklar ise zayıf taşıma kapasitesine sahip kumun zemin stabilizasyonunda kullanılmıştır. Hazırlanan deney setlerinde model temel, yerinde dökme geopolimer kazık ve çakma geopolimer kazığın zemindeki stabilizasyonu gerçekleştirilmiş ve bu örneklerin kendi aralarındaki taşıma gücü değerlerindeki artışlar kıyaslanmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda yerinde dökme geopolimer kazıkların taşıma kapasitesinde ki artış model temele göre oldukça fazladır. Çakma geopolimer kazıkların zeminde ki taşıma kapasitesine sağladığı artış ise yerinde dökme geopolimer kazığa göre daha fazladır. Yapılan deneyler sonucu geopolimer kazığın boyunun artmasıyla birlikte taşıma gücü değerlerinin de arttığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca taşıma gücü değerlerinde ki artışın sebebi kazıkların üzerlerine gelen yükleri daha derine aktarabilmesi olarak açıklanabilmektedir. Bununla beraber yan yüzeylerinde oluşan sürtünme kuvvetleri ve uç dirençleriyle beraber yüke karşı koymaları da taşıma gücü değerlerini artıran faktörler arasında yer almaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Geopolimer

Beton endüstrisinin temel taşı olarak görülen geleneksel Portland çimentosunun üretim işleminin, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %10'undan sorumlu olduğu bilinmektedir (Zakka ve diğ., 2021). 2019 yılı itibariyle yıllık üretim kapasitesi 4 milyar tonun üzerinde olan geleneksel Portland çimentosunun çevre üzerindeki oluşturduğu olumsuz etkilerin minimize edilmesi amacıyla, bilim insanları çimentoya alternatif olabilecek çevre dostu bir bağlayıcı arayışına girmiştir (Ganesh ve Muthukannan, 2021). Bu arayışların bir sonucu olarak, 1970'lerin sonunda Fransız bilim adamı Joseph Davidovits tarafından geopolimer terimi literatüre girmiştir.

Geleneksel betonların sahip oldukları karakteristik özelliklere benzerlik gösteren geopolimerlerin üretimi ile çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ gazı emisyonlarının yaklaşık % 80 oranında azaltılabileceği belirtilmiştir (Zakka ve diğ., 2021).

Özellikle son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar, geopolimer betonların mühendislik, termal, mikro yapısal özellikleri bakımından geleneksel Portland çimentosuna önemli bir alternatif olduğunu ortaya çıkarmıştır (Neupane ve diğ., 2018).

Geopolimer malzemeler, yüksek oranda silis ve alümin içeren uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi puzolanik malzemeler ile NaOH, Na₂SiO₃, KOH ve K₂SiO₃ gibi alkali çözeltilerin aktivasyonu sonucu üretilmektedir (De silva ve diğ., 2007; Xu ve Deventer, 2000).

Polimerizasyon işlemi silis ve alüminin yüksek alkali koşullar altında reaksiyona girmeleri ve bu reaksiyon sonucunda Si-O-Al-O bağlarının üç boyutlu bir polimerizasyon zinciri oluşturmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu polimerizasyon işleminde ise kullanılan alkali aktivatör türleri geopolimer betonun özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Hadigheh ve diğ., 2022; Wang ve diğ., 2023).

Ayrıca, geopolimer üretiminde yaygın olarak kullanılan bir aktivatör olan sodyum hidroksitin geopolimerizasyon sürecindeki etkinliğinin sahip olduğu konsantrasyon değerine önemli ölçüde bağlı olduğu belirtilmiştir (Pavithra ve diğ., 2016; Matsimbe ve diğ., 2022).

Chindapasirt ve Chalee (2014) deniz ortamına maruz kalan uçucu kül esaslı geopolimer betonların mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerine NaOH konsantrasyonunun etkilerini incelemiştir. Döküm işleminden sonra 28 gün boyunca laboratuvar şartlarında kür edilen numuneler, 3 yıl boyunca Tayland Körfezi'ndeki deniz ortamının gelgit bölgesinde agresif çevre koşullarına maruz bırakılmıştır. Test sonuçları, NaOH konsantrasyonunun artmasıyla beton içerisinde gömülü çeliğin klorür penetrasyonunun ve korozyonunun azaldığını ortaya çıkarmıştır.

Memon ve diğ., (2013) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise NaOH konsantrasyonunun kendiliğinden yerleşen geopolimer kompozitlerin taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Deney sonuçları, 8 ile 14 M arasında değişen NaOH konsantrasyonlarının kendiliğinden yerleşen geopolimer betonların taze özellikleri üzerinde küçük bir etkisi olduğunu gösterse de NaOH konsantrasyonunun artmasıyla taze beton işlenebilirliğinin azaldığı gözlenmiştir. Son olarak, en yüksek basınç dayanımına sahip numune gruplarının ise 12 M NaOH konsantrasyonu kullanılarak elde edildiği ortaya çıkmıştır (Memon ve diğ., 2013).

De Silva ve diğ., (2007) geopolimer malzemelerin priz süresinin ham madde içerisindeki Al tarafından kontrol edildiğini, SiO_2 ve Al_2O_3 oranlarının ise geopolimer kompozitlerin nihai dayanım özelliklerini etkilediğini belirtmiştir.

Geopolimerizasyon süreci, üretim işleminde kullanılan alkali aktivatörlerin de etkisiyle ekzotermik bir özellik göstermektedir. Her ne kadar alkali konsantrasyonu gibi faktörler geopolimer özelliklerini önemli ölçüde etkilese de, karışımda tercih edilen ham maddelerin mineral kompozisyonu ve inceliği geopolimer malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir (Zeybek, 2009).

Sahip oldukları üstün kimyasal ve fiziksel özellikler nedeniyle, geopolimer malzemeler, prefabrik yapı elemanları üretimi, yol kaplamaları, zemin iyileştirme uygulamaları başta

olmak üzere birçok farklı uygulama alanında kullanım potansiyeline sahiptir (Zeybek, 2009; Davidovits, 2008; Pinto ve Viera, 2005).

Geopolimer beton kullanımının sadece çimentoyu azaltmak suretiyle çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumlu etkileri ile değil, aynı zamanda tarım toprakları üzerinde tehlike oluşturabilecek endüstriyel yan ürünlerin (yüksek fırın cürufu, uçucu kül vb.) verimli bir şekilde üretime kazandırılmasına katkı sağladığını gerçeği ile birlikte düşünülmesi gerektiğinin altı çizilmiştir (Assi ve diğ., 2018; Saeed ve diğ., 2022). Çünkü endüstriyel yan ürünlerin atık çöp depo sahalarında depolanması, yer altı suyunun kirlenmesi ve ağır metal sızıntısından oluşan önemli çevre sorunlarına yol açmaktadır (Cao ve diğ., 2021; Dwivedi ve Jain, 2014; Matsimbe ve diğ., 2022).

2.2. Beton üretiminde lif kullanımı

Lifler, düşük maliyetleri ve olumlu özellikleri sebebiyle son yıllarda beton üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir. Lif kullanımı ile betonun oldukça düşük olan çekme dayanımının artırılması ve böylece çatlak direncinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır (Kantarıcı, 2021).

Beton üretiminde en çok kullanılan lif türleri ise cam elyaf, polipropilen, bazalt, karbon ve çelik liflerdir. Bu lif tipleri, yalnız başlarına veya birlikte kullanılarak beton hacminin belirli yüzdelerinde taze karışıma ilave edilmektedir (Dawood ve Ramli., 2011; Sabu ve Karthi, 2018).

Taze beton karışımı içerisinde rastgele dağılım gösterecek şekilde ilave edilen farklı türdeki lifler sayesinde üretilen betonda oluşabilecek çatlakların genişlemesi zorlaşmaktadır. Ayrıca, gevrek bir özellik gösteren betonun kırılgan yapısı da lif kullanımı ile azaltılmaktadır. Mekanik özelliklerin artırılmasının yanı sıra (Branston ve diğ., 2016), betonun tokluk ve yorulma dayanımının da lif kullanımı ile arttırılabileceği bilinmektedir (Nili ve Afroughsabet., 2010).

Zhang ve diğ., (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, çelik liflerin geopolimer betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. %0 ile % 2.5 arasında farklı oranlarda kullanılan çelik lifler uçucu kül ve metakaolin esaslı geopolimer beton karışımlarına ilave edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geopolimer betonun tüm mekanik özelliklerinin optimum çelik lif oranı kullanılması halinde önemli ölçüde arttığını ortaya çıkarmıştır.

Al-mashhadani ve diğ., (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, üç farklı lif türünün uçucu kül esaslı geopolimer harçların mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular, çelik ve polivinil alkol liflerinin ilave edilmesinin geopolimer kompozitlerin eğilme dayanımı değerlerini sırasıyla yaklaşık %31.45 ve %39.84 oranlarında arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, tüm lif türlerinin büzülme performansı açısından olumlu etkileri gözlenmiştir.

Benzer şekilde, Bhutta ve diğ., (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, çelik ve polipropilen liflerin kullanımının uçucu kül esaslı geopolimer kompozitlerin eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonunda elde edilen sonuçlar ısıtma işleminin makro fiber ilave edilmiş kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, polipropilen liflerin ise basınç dayanımı açısından olumlu bir etkisinin olmamasına rağmen, çekme ve eğilme performansı açısından az da olsa olumlu bir sonuçta yol açtığını göstermiştir.

Lif çeşitlerinden biri olan çelik lifin betona eklenmesi sonucu beton özelliklerinde önemli değişiklikler gözlenmektedir. Kurt, (2006), tarafından yapılan çalışmada, çelik lifin beton özelliklerine etkisinin kullanılan lifin boy/çap oranına, lif miktarına ve beton özelliklerini etkileyen tüm parametreler ile yakından ilgili olduğunun altı çizilmiştir. Ayrıca, üretilen betonlara lif özelliklerinin etkisinin betona uygulanan ısıtma işleme doğrudan bağlı olduğu da belirtilmiştir (Kurt, 2006). Her ne kadar, liflerin beton özelliklerine etkileri, belirtilen birçok parametreye bağlı olsa da, lif kullanımının beton özelliklerine etkileri genel olarak Çizelge 2.1’de verilmiştir (Ersoy, 2001).

Çizelge 2. 1 : Lif takviyeli betonların bazı mekanik özelliklerinin değişimi

Değişken	Artış, (%)
Tokluk	100-1200
Darbe Dayanımı	100-1200
İlk Çatlak Dayanımı	25-100
Çekme Dayanımı	25-100
Basınç Dayanımı	±25
Yorulma Dayanımı	50-100
Şekil Değiştirme Oranı	50-300
Eğilme Çekme Dayanımı	25-200
Kavitasyon-Erozyon Direnci	200-300
Elastisite Modülü	±25

2.3. Zemin Stabilizasyonu

Taşıma kapasitesi düşük olan zeminler üzerinde inşa edilecek yapılar oldukça önemli riskler barındırmaktadır. Yapıların ekonomik ömrü boyunca güvenli bir şekilde hizmet edebilmelerini sağlamak amacıyla zemin güçlendirme işlemleri vazgeçilmez bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

Sıklıkla tercih edilen zemin satabilizasyonu işlemleri; zayıf zeminin kimyasal stabilizasyonu, geleneksel Portland çimentosu ve kireç kullanılarak stabilizasyon işlemi yapılması olarak sıralanabilir (Yi ve diğ., 2015).

Zemin stabilizasyonu işlemlerinde en çok tercih edilen malzeme geleneksel Portland çimentosudur. Yeterli mekanik özellikleri, ham madde temininin kolay olması ve maliyet gibi etkenler nedeniyle Portland çimentosu kullanımı yaygın bir durumda olmasına rağmen, çimento üretiminden kaynaklanan yüksek miktardaki CO₂ emisyonu, ham madde temini

işlemlerinde doğal kaynakların tüketilmesi ve çimentonun çeşitli durabilite problemleri gibi nedenler daha çevre dostu bir yapı malzemesinin tercih edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur (Ghadir ve Ranjbar, 2018; Bushlaibi ve Alshamsi, 2002).

Her ne kadar inşaat öncesinde zemin stabilizasyonu işlemleri yüksek gider kalemi olarak düşünülse de, başarılı bir stabilizasyon işlemi sonrasında yapının daha güvenli bir yüzeye oturtulması ve böylelikle ekonomik ömrü daha uzun bir yapının inşası mümkün olabilmektedir..

Zemin stabilizasyonu uygulamalarının başlıca amaçları ise şu şekilde sıralanabilir (Sarıcı, 2019):

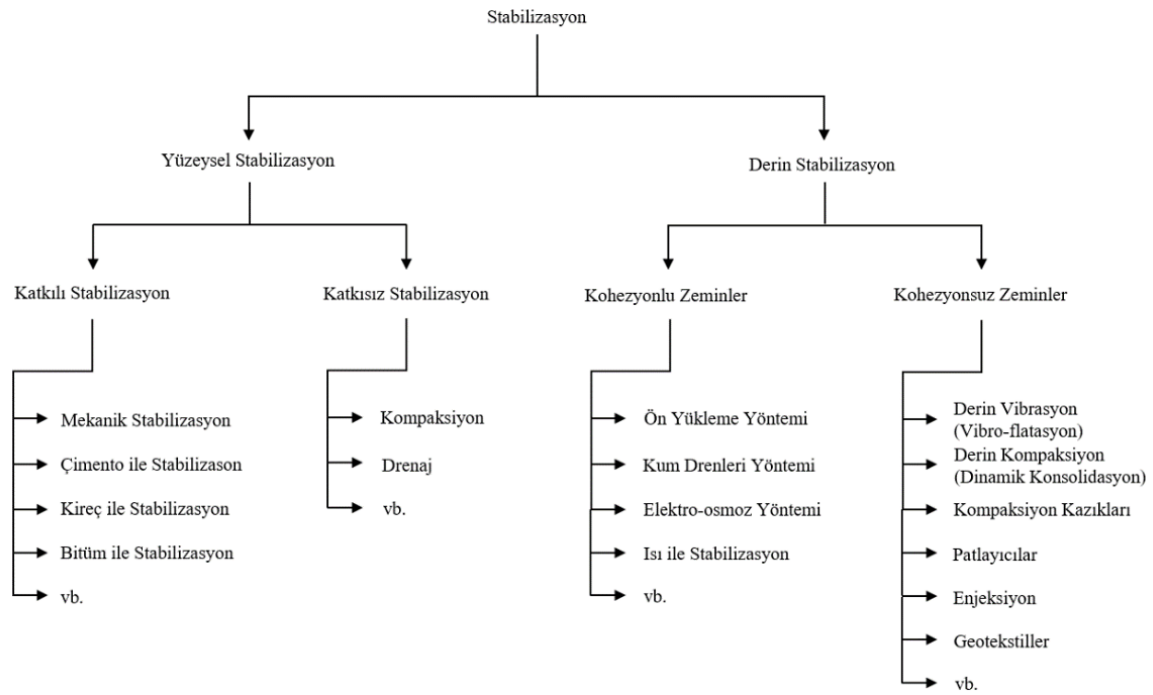
- Zayıf zeminlerin taşıma gücünün yükseltilmesi,
- Zeminin sahip olduğu farklı oturma değerlerini kabul edilebilir değerlere getirilmesi,
- Zeminin geçirimsizlik katsayısının azaltılması,
- Olası bir zemin sıvılaşması riskinin ortadan kaldırılması,
- İnşa edilecek istinat duvarlarının dayanımının ve durabilitesinin artırılması,
- Yapılan dolgu ve şevlerin stabilitesinin artırılması.

Çalık, 2012 tarafından yapılan bir çalışmada, yukarıda bahsedilen farklı amaçlardan herhangi biri için uygulanacak zemin stabilizasyonu işlemlerinin birtakım avantajları da beraberinde getireceği belirtilmiştir.

Bu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Zeminin taşıma gücünün artırılması,
- Zeminin oturma potansiyelinin azaltılması ve buna bağlı olarak yapıda oluşabilecek hasarların minimize edilmesi,
- Su geçirimsizliğinin ve boşluk suyu basıncının azaltılması,
- Yeraltı suyunun drenaj işleminin daha kolay yapılabilmesi,
- Zeminlerin şişme ve büzülme risklerinin azaltılması,
- Dolgu, eğimli arazi, toprak baraj gibi yapıların stabilitesinin artırılması.

Uzuner, (2016) tarafından yapılan bir çalışmada uygulanacak stabilizasyon işlemleri ile ilgili birçok yöntemin varlığından bahsedilmiştir. Bu çalışmada da görüleceği gibi, zemin stabilizasyon tekniklerinin tercih edilmesi işleminde uygulanacak zeminin türü ve yapılacak stabilizasyon işleminin amacı net bir şekilde belirlenmelidir. Zayıf zeminler üzerinde yapılan çeşitli stabilizasyon teknikleri Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1 : Çeşitli zemin stabilizasyonu uygulamaları, (Uzuner, 2016; Sarıcı, 2019)

Zemin stabilizasyonu işlemleri içerisinde sıklıkla tercih edilen uygulamalardan biri de zemin ortamı içerisine çeşitli yöntemlerle bir kolon (kazık) formatı oluşturmaktır. Bu uygulamalardan bazıları ise jet grout, derin karıştırma metodu, taş kolon, plastik kazık (donatısız fore kazık) vb. olarak sıralanabilir. Bu kolonların oluşturulmasının temel amaçları ise çeşitli yükleri daha derinlere güvenli bir şekilde aktarmak, zemin oturmalarının istenilen sınır değerler içerisinde kalmasını sağlamak ve sıvılaşma problemlerinin önüne geçmektir.

Öte yandan, Birand, (2001) tarafından yapılan bir çalışmada, zemin üst yüzeylerinde oyulma oluşması ihtimali, yapı temelini su içerisinde olma zorunluluğu, yüksek yanal yüklere maruz kalınması durumu, yapıya çok yakın konumlarda derin kazıların yapılabilmesi veya

çok büyük yapısal yüklerin oluşması durumlarında da yüklerin daha derinlere güvenle aktarılmasının gerekli olduğu vurgulanmıştır.

Zemin ortamı içerisinde oluşturulan kolonlar (kazıklar), yapı yüklerinin uçları ve/veya yan yüzeylerinin sürtünmeleri ile gelen çeşitli yüklere karşı koymaktadırlar. Kazıklar, üretildikleri malzeme türlerine göre; ahşap kazıklar, beton/betonarme/ön germeli beton kazıklar, çelik kazıklar ve kompozit kazıklar olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır. İnşa metotlarına göre ise, çakma kazıklar, sondaj (fore) kazıklar, franki kazıklar, çakma-dökme kazıklar, mini kazıklar, itme kazıklar, titreşim kazıkları, yıkamalı kazıklar ve kompozit kazıklar olmak üzere farklı gruplara ayrılır. Son olarak, inşa amacı açısından kazıklar da; yük taşıyıcı kazıklar, kompaksiyon (sıkıştırma) kazıkları, koruyucu kazıklar, stabilizasyon kazıkları olarak sıralanmıştır (Sivrikaya, 2021).

3. MATERYAL ve METOD

3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufu, işlenmemiş demirlerin üretiminde kullanılan yüksek fırınlarda meydana gelen yüksek sıcaklıkların etkisiyle oluşan endüstriyel yan ürünlerdir. İşlenmemiş demirlerin üretiminde kullanılan, demir kömür ve kireçtaşının yüksek sıcaklıklara sahip endüstriyel fırınlarda pişirilmesi sonucu yoğunluğu işlenmemiş demire oranla daha az öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu işlenmemiş demirin üzerinde erimiş halde elde edilir.

Yüksek oranda silis ve alümin içeren ve amorf yapıda bulunan yüksek fırın cürufu ince taneli formda puzolanik özellik göstermektedir. Yüksek fırın cürufları birçok karışım da bağlayıcı olarak görev yapmaktadır. Beton karışımlarında ise mineral katkı maddesi olarak kullanılır. Bu kullanımının sayesinde beton karışımında son yıllarda oldukça fazla tercih edilmektedir (Öner, 2001; Erdoğan, 2003).

Katkı maddesi olarak betonda yer alan puzolan, beton içerisindeki çimentonun hidratasyonu sonucu kalsiyum hidroksit ortaya çıkmaktadır. Katkı maddesi olarak kullanılan puzolan beton içerisindeki çimentonun daha az oranlarda kullanılmasını sağlamakta ve betonun işlenebilirlik özelliklerini artırmaktadır. Ayrıca beton karışımı esnasında oluşan hidratasyon ısını düşürmekte ve betonun geçirimsizlik özelliğini artırmaktadır (Binici, 2002; Binici ve diğ., (2010).

Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufuna ait kimyasal özellikler Çizelge 3.1’de verilmiştir. Şekil 3.1’de ise yüksek fırın cürufunun görseli sunulmuştur.

Çizelge 3. 1 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal içeriği, (Ekinci, 2022)

Element	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
%	32.47	9.94	1.25	32.45	9.31	0.31
Element	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Mn ₂ O ₃	Cl ⁻	
%	0.85	1.16	0.82	3.51	0.015	



Şekil 3.1 : Yüksek fırın cürufu

3.1.2. Çelik lif

Bu tez çalışmasında üretilen geopolimer kompozitlerin dayanım değerlerini iyileştirmek için Bekaert Çelik Kord işletmesinden temin edilen çelik lifler tercih edilmiştir. Uzunluğu 6 mm, narinliği 40, çapı ise 16 µm olan çelik lifler geopolimer karışımlarına hacimce %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında ilave edilmiştir.

Üretilen kompozitlerin eğilme dayanımı ve tokluk özelliklerinde önemli artışlara yol açan çelik liflere ait mekanik özellikler Çizelge 3.2’de sunulmuştur. Çalışmada kullanılan çelik lifler ise Şekil 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Çelik liflerin karakteristik özellikleri.

Uzunluk, (mm)	Çap, (μm)	Çekme Dayanımı, (gr/cm^3)	Young Modülü, (MPa)
6.00	16	7.20	3000



Şekil 3.2 : Çelik lif

3.1.3. Sodyum hidroksit (NaOH)

Çalışmada geopolimer örneklerinin aktivasyonu için üç farklı konsantrasyonda (8, 10 ve 12M) NaOH kullanılmıştır. Üretilen geopolimer örneklerinde alkali konsantrasyonunun mekanik özellikleri nasıl etkilediğinin belirlenmesi amacıyla üç farklı konsantrasyonda hazırlanan NaOH solüsyonları yüksek fırın cürufu ile karıştırılmıştır. Tüm geopolimer örneklerde alkali sıvı/bağlayıcı oranları normal kıvama göre belirlenmiştir.

Tez çalışmasında kullanılan NaOH Şekil 3.3'te verilmiş olup, Çizelge 3.3'de ise NaOH'ın kimyasal ve fiziksel özellikleri sunulmuştur.



Şekil 3. 3 : Tez çalışmasında kullanılan NaOH

Çizelge 3. 3 : Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri, (Kantarcı, 2018)

Özellik	Sodyum Hidroksit
Molekül formülü	NaOH
Molekül kütlesi, (g/mol)	40.00
Renk	Beyaz
pH	13-14
Yoğunluk, (g/cm ³)	2.13
Na ₂ O, (%)	-
SiO ₂ , (%)	-
H ₂ O, (%)	-

3.1.4. Silis dumanı

Silis dumanı, silikon metalinin üretimi sırasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutulması sonucu elde edilen ve çok yüksek oranda silis içeren bir endüstriyel yan üründür. Ortalama çapı 1 µm'den küçük olan amorf ve küresel bir yapıya sahip olan silis dumanı diğer puzolanik malzemelere kıyasla üst düzeyde puzolanik reaktiviteye sahip bir malzemedir. Bu çalışmada, mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yüksek fırın cürufuna %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı ikame edilmiştir. Çalışmada kullanılan silis dumanının özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiş olup, silis dumanına ait görsel ise Şekil 3.4'te sunulmuştur.

Çizelge 3.4 : Silis dumanının kimyasal kompozisyonu, (Sağır ve diğ., 2023)

Element	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
%	83.40	1.20	0.60	0.40	0.80
Element	K ₂ O	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	SO ₃	LOI
%	1.40	-	-	0.60	5.80



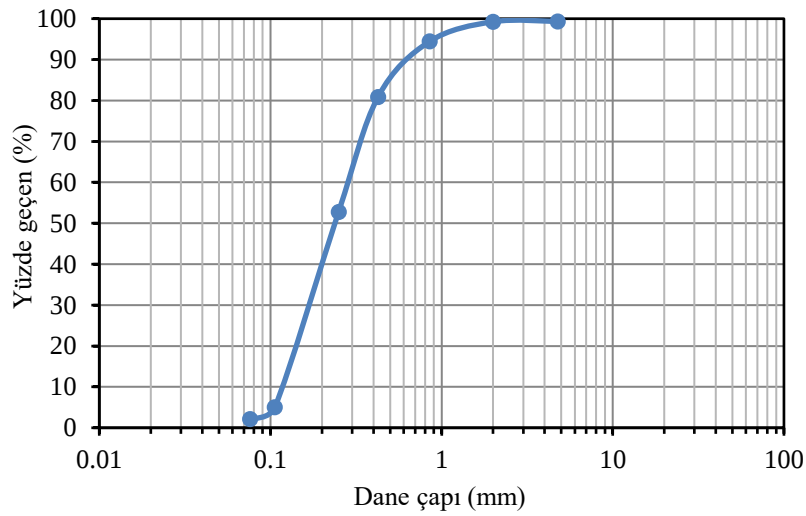
Şekil 3. 4 : Silis dumanı

3.1.5. Kum zemin

Kum zemin plaka yükleme deneylerinde, zayıf zemin ortamı oluşturmak için kullanılmıştır. Kuma ait görüntü Şekil 3.5’ de gösterilmiştir. Kum zeminin özelliklerini belirlemek için çeşitli laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Öncelikle kumun dane dağılımını belirlemek için, elek analizi yapılmıştır. Elek analizi yapılan kumun dane çapı dağılımı grafiği Şekil 3.6’ da verilmiştir. Yapılan elek analizi deneyi sonucuna göre birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre kötü derecelendirilmiş kum olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 3. 5 : Kum



Şekil 3.6 : Kum zeminin dane çapı dağılımı eğrisi, (Özcan, 2024)

Kum zeminin özgül ağırlığını belirlemek için piknometre deneyi yapılmıştır. Zeminin maksimum ve minimum birim hacim ağırlıklarını belirlemek üzere deneyler yapılmıştır. Kum zemin üzerinde Kalifornia taşıma gücü oranı deneyi yapılarak, kum zeminin bu deney sonucunda oluşan yük-deplasman grafiği belirlenmiştir. Kum zeminin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerini belirlemek içinde, direkt kesme kutusu deneyi yapılmıştır.

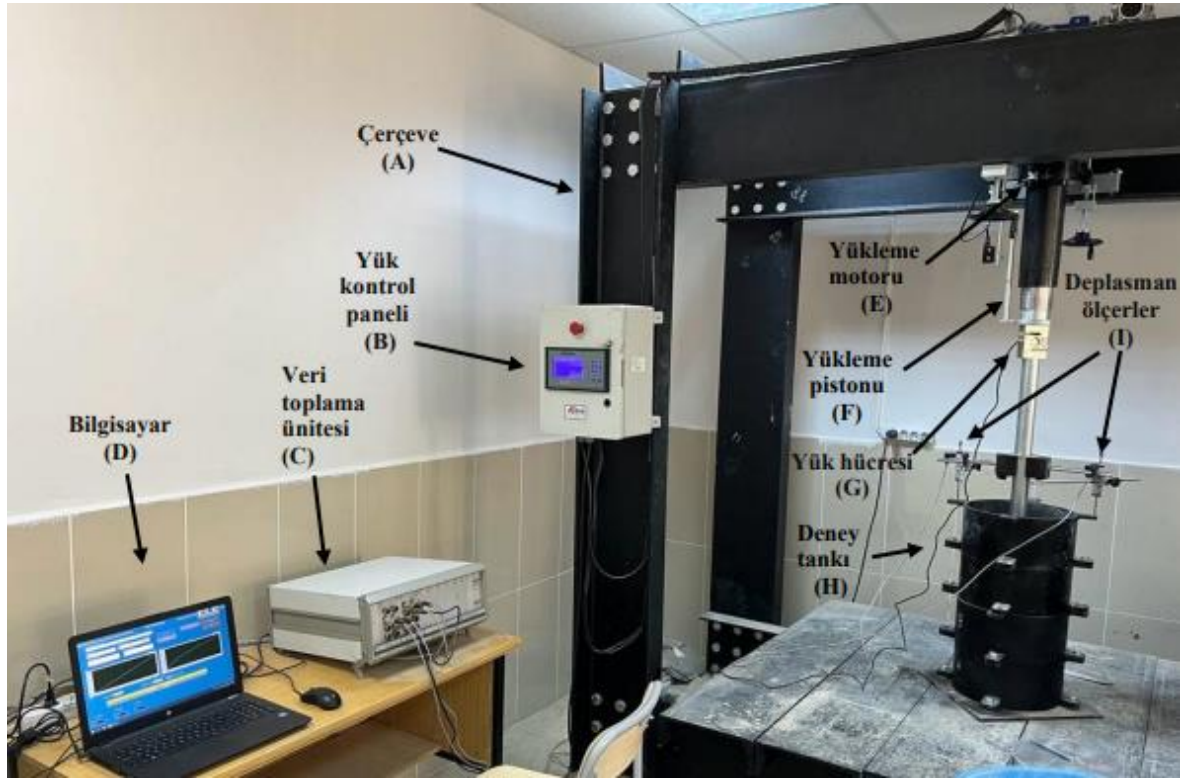
Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, kum zeminin özellikleri yorumlanmış ve Çizelge 3.5’ de özetlenmiştir.

Çizelge 3.5 : Kum zeminin özellikleri (Özcan, 2024)

Değişken	Birim	Değer	Standart
Dane Yoğunluğu	kN/m ³	27.46	ASTM-D854
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık	kN/m ³	16.58	ASTM-D4254
Minimum Kuru Birim Hacim Ağırlık	kN/m ³	14.52	ASTM-D4254
Üniformluk Katsayısı	-	2.375	ASTM-D422
Eğrilik Katsayısı	-	0.926	ASTM-D422
Sınıflandırma	-	SP	ASTM-D4287
CBR değeri	%	1	ASTM D1883-21
İçsel sürtünme açısı	Derece	40	ASTM-D3080

3.1.6. Plaka Yükleme Deneyi

Tez kapsamında belirlenen optimum geopolimer karışımında imal edilen geopolimer kazıkların zayıf zemin ortamındaki yük deformasyon davranışını araştırmak için plaka yükleme deneyi yapılmıştır. Bu amaçla İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'nda bulunan plaka yükleme deney seti kullanılmıştır. İlgili deney setinin görünüşü Şekil 3.7 de verilmiştir.



Şekil 3.7 : Plaka Yükleme Deney Seti (Özcan, 2019)

Plaka yükleme deney setinde oluşan deplasmanları ölçmek için iki adet deplasman ölçer, oluşan yükü ölçmek için bir adet yük hücresi, yük hücresi ve deplasman ölçerlerden gelen verileri toplamak ve işlemek için, veri toplama sistemi ve bilgisayar, zemin ortamı oluşturmak için deney tankı, yükleme motoru ve deney ortamı sağlamak için rijit çelik profillerden imal edilmiş çerçeve kullanılmıştır.

Plaka yükleme deneyinde, deney ortamını oluşturan yükleme çerçevesinin kapasitesi 20 tondur. Yükleme sağlayan servo motor yükleme çerçevesinin üst kısmında bulunmaktadır. Bu servo motor sabit bir deplasman hızında hareket etmekte olup, hız değeri 0 ile 10 mm/dk hızında ayarlanabilmektedir. Deney başlatmak, durdurmak ve yükleme hızı değerini ayarlamak için kontrol paneli bulunmaktadır. Plaka yükleme deneylerinde zayıf zemin ortamı hazırlamak için kullanılan deney tankının çapı 30 cm ve yüksekliği 60 cm dir. Deney tankının içi 5 cm aralıklarla işaretlenerek kumun tanka yerleştirilmesi sırasında yoğunluğunun kontrolü kolaylaştırılmıştır. Plaka yükleme deneylerinde kullanılan yük hücresi 5 kN kapasiteye sahiptir. Deplasman ölçerlerin kapasitesi ise 50 mm dir. Yük hücresi ve deplasman ölçerlerin kalibresi deneyler başlamadan önce üretici firma tarafından yapılmıştır.

Plaka Yükleme Deneyinin Gerçekleştirilmesi

Plaka yükleme deneyleri kum zeminde bulunan geopolimer kolonların yük-deformasyon davranışını belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Plaka yükleme deneyi üç ana seriden (Seri A, Seri B ve SERİ C) oluşmaktadır. Tüm deney serilerinde zemin ortamının oluşturulması aynıdır. Ancak SERİ B ve SERİ C deneylerinde kazıkların yerleşimi farklılık göstermektedir. SERİ A deneyinde 5 cm çapında model temel kum zemin üzerine yerleştirilerek model temelin yük-deformasyon davranışı belirlenmiştir. Böylece geopolimer kazıkların performansını yorumlamak için referans olarak kullanılmıştır.

Seri B deneylerinde geopolimer kolonlar yerinde dökme metoduyla zemin içerisine uygulanmıştır. Seri C deneylerinde ise geopolimer kolonlar çakma yöntemiyle zemin içerisine yerleştirilmiştir. Zemin stabilizasyonu işleminde dikkate alınan değişkenler Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Zemin stabilizasyonu işleminde dikkate alınan değişkenler

Deney No	Seri No	Geopolimer Kolonun Yerleştirme Yöntemi	Geopolimer Kolon Yüksekliği (mm)
1	Seri A	-	-
2	Seri B	Yerinde Döküm	100
3			150
4			200
5	Seri C	Çakma	100
6			150
7			200

3.2.3. Geopolimer örneklerinin üretimi

Bu çalışmanın ilk aşamasında, geopolimer hamur numunelerinin üretiminde bağlayıcı malzeme olarak yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanılmıştır. Silis dumanı yüksek fırın cürufuna üç farklı oranda (%5, %10 ve %15) ikame edilmiştir. Bağlayıcı kısmı tarif edildiği şekilde elde edilen geopolimer hamur karışımlarının aktivasyon işlemi ise NaOH çözeltisi kullanılarak yapılmıştır. NaOH konsantrasyonunun geopolimer hamur örneklerinin basınç dayanımı değerleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 8, 10 ve 12 M NaOH çözeltileri normal kıvamda olacak şekilde karışıma dahil edilmiştir. Taze geopolimer karışımı 5 dk boyunca karıştırıldıktan sonra, boyutları 50 x 50 x 50 mm olan çelik küp kalıplara dökülmüştür. Dökümden 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan numuneler, 7 ve 28 gün boyunca laboratuvar koşullarında bekletilmiş ve 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları incelenmiştir. 50 x 50 x 50 mm boyutlarında üretilen geopolimer hamur örneklerinin karışım oranları Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3. 7 : Geopolimer hamur numunelerinin karışım oranları

Numune	YFC, (g)	SD, (g)	NaOH, (M)
1	270	-	8
2	256.5	13.5	
3	243	27	
4	229.5	40.5	
5	270	-	10
6	256.5	13.5	
7	243	27	
8	229.5	40.5	
9	270	-	12
10	256.5	13.5	
11	243	27	
12	229.5	40.5	

Tezin ilk aşamasında yapılan optimizasyon çalışmaları sonrasında maksimum basınç dayanımının elde edildiği % 10 silis dumanı ikame edilen, 8 M NaOH ile aktive edilen örneklerle % 0.5, % 1 ve % 1.5 olmak üzere üç farklı oranlarda çelik lif ilave edilmiştir. Bu şekilde üretilen lif takviyeli geopolimer örnekler üzerinde 7 ve 28 günlük basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. 40x40x160 mm boyutlarındaki kalıplara dökümü yapılan geopolimer kompozitler Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

Tezin üçüncü aşamasında ise, % 1.5 çelik lif ilave edilmiş geopolimer kompozitler üç farklı boy/çap (50/100, 50/150 ve 50/200 mm) oranına sahip silindirik kalıplara dökülmüştür. Bu şekilde üretilen geopolimer kazıkların zayıf zemin stabilizasyonunda kullanılmak üzere İnönü Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı’nda plaka yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Üç farklı boyutta üretilen lif takviyeli geopolimer kazıklar Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.8 : Lif takviyeli geopolimer kompozitler



Şekil 3.9 : Farklı boyutlardaki lif takviyeli geopolimer kazıklar

3.2.5. Deney Süreci

3.2.5.1. Basınç dayanımı deneyi

Geopolimer hamur numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deneyleri İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda ASTM C109 standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Her bir karışımdan üçer adet numune üretilmiş ve bu üç değerın ortalaması alınarak basınç dayanımı değerleri kayıt altına alınmıştır. Basınç dayanımı test cihazı Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3. 10 : Basınç dayanımı test cihazı

3.2.5.2. Eğilme dayanımı deneyi

Farklı lif oranları kullanılarak üretilen geopolimer kompozitlerin eğilme dayanımı testleri ASTM C348-14 standardına uygun bir şekilde 7 ve 28. günlerde belirlenmiştir. Eğilme dayanımı testlerinde kullanılan numunelerin boyutları 40 x 40 x 160 mm olup, her bir karışım için üçer adet numune üretilmiş ve bu üç değerin ortalaması alınarak eğilme dayanımı değerleri belirlenmiştir. Eğilme dayanımı test cihazı Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3. 11 : Eğilme dayanımı deneyi

3.2.5.3. Model yükleme deneyi

Seri A Deneyi: Kum zemine yerleştirilen model temelin (MT) yükleme deneyinde basınç etkisi altında yük-deformasyon eğrilerini oluşturmak için deneyler gerçekleştirilmiştir. 30 cm çapında ve 60 cm yüksekliğinde tanklar hazırlanmış ve birbirine vidalar ile sabitlenmiştir. Deney öncesi tankın içi yağlanarak kum zeminle tank arasındaki sürtünmenin azaltılması hedeflenmiştir. Tankların içi 5'er cm arayla işaretlenmiş ve kum 5'er cm gelecek şekilde tartılıp tanka yerleştirilmiştir. Toplamda tank içindeki kum seviyesi 50 cm'e getirilmiş ve tabakalar halinde kumun tank içerisine yerleşimi gerçekleştirilmiştir. Deney yapılırken ki aşamaları şu şekilde sıralanabilir;

- Kum zeminin laboratuvar deneyleri ile zayıf zemin elde edebilmek için sıklık değeri %30 alınmıştır. Kum zeminin %30 sıklık değerine karşılık gelen kuru yoğunluk değeriyle tankın 5 cm'lik kısmının hacmi çarpılarak tabaka için gereken kum miktarı belirlenmiş olup, kum tankın içerisine tabakalar halinde yerleştirilmiştir. Zemin tabakalar halinde yerleştirilirken sıkılaştırma işlemi, yüksekliği sabit olan elek tarafından aktararak gerçekleştirilmiştir. Kumun tabakalar halinde yerleştirilmesi işlemi gerçekleştirilirken, kumun sıklığının tahkiki ise el penetrometresi yardımıyla sağlanmıştır.

- Tabakalar halinde yerleştirilen kumun yüzey düzgünlüğü su terazisi yardımıyla kontrol edilmiştir. Daha sonra tankın merkezinin bulunabilmesi için kum zeminin yüzeyi 8 eşit parçaya bölünmüştür. Tank merkezi zeminin merkezine çakılıp 3HSP, 5 HSP ve 7 HSP ise döndürülerek montaj sağlanmıştır. Montaj işleminin akabinde deney yükleme pistonuna yük hücresi ve piston parçalarının bağlantısı yapılmıştır. Tüm montajların yapılmasının ardından deplasman ölçer de pistonu sabitlenmiştir. Tüm bağlantıların yapıldığı deney testi aşağıda ki resimlerde görülmektedir.

Zemin tank içerisine tabakalar halinde yerleştirilirken yan yüzeylerin sıkılaşmadığı el penetrometresi yardımıyla Şekil 3.12’de gösterildiği gibi belirlenmiştir. Bu sayede, ölçek etkisinin olmadığı kanısına varılmıştır. Ayrıca, model temel için deney seti parçaları ve deplasman ölçer yerleşimi Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’de verilmiştir.



Şekil 3.12 : El penetrometresi ile sıkılaşma kontrolünün yapılması



Şekil 3. 13 : Model temel için deplasman ölçer yerleşimi



Şekil 3. 14 : Model temel için deney seti parçaları

Seri B Deneyi: Kum zemine yerleştirilen geopolimer kazığının yükleme deneyinde basınç etkisi altında yük-deformasyon eğrilerini oluşturmak için deneyler gerçekleştirilmiştir. 30 cm çapında ve 60 cm yüksekliğinde tanklar hazırlanmış ve birbirine vidalarla sabitlenmiştir. Deney öncesi tankın içi yağlanarak kum ile tank arasındaki sürtünmenin azaltılması sağlanmıştır. Tankların içi 5'er cm arayla işaretlenmiş ve kum 5'er cm gelecek şekilde tartılıp tanka yerleştirilmiştir. Toplam da tank içindeki kum seviyesi 50 cm'e getirilmiş ve tabakalar halinde kumun tank içerisine yerleşimi gerçekleştirilmiştir.

- Kum zeminin laboratuvar deneyleri ile zayıf zemin elde edebilmek için sıklık değeri %30 alınmıştır. Kum zeminin %30 sıklık değerine karşılık gelen kuru yoğunluk değeriyle tankın 5 cm'lik kısmının hacmi çarpılarak tabaka için gereken kum miktarı belirlenmiş olup, kum tankın içerisine tabakalar halinde yerleştirilmiştir. Zemin tabakalar halinde yerleştirilirken sıkılaştırma işlemi, yüksekliği sabit olan elek tarafından aktararak gerçekleştirilmiştir. Kumun tabakalar halinde yerleştirilmesi işlemi gerçekleştirilirken, kumun sıklığının tahkiki ise el penetrometresi yardımıyla sağlanmıştır.

- Tabakalar halinde yerleştirilen kumun yüzey düzgünlüğü su terazisi yardımıyla kontrol edilmiştir. Daha sonra tankın merkezinin bulunabilmesi için kum zeminin yüzeyi 8 eşit parçaya bölünmüştür. Tank merkezi zeminin merkezinin montajı sağlanmıştır. Montaj işleminin akabinde deney yükleme pistonuna yük hücresi ve piston parçalarının bağlantısı yapılmıştır. Tüm montajların yapılmasının ardından deplasman ölçer de pistonu sabitlenmiştir. Yerinde dökme geopolimer kazığının deney seti parçaları ve deplasman ölçer yerleşimi Şekil 3.14'de verilmiştir.



Şekil 3. 15 : Yerinde dökme geopolimer kazığının deney seti parçaları



Şekil 3. 16 : Yerinde dökme geopolimer kazığının deplasman ölçer yerleşimi

Deplasman ölçer montajının sonrasında bilgisayar üzerinden gerekli ayarlamalar yapılarak deneyler başlatılmış ve tamamlanmıştır.

Seri C Deneyi: Kum zemine yerleştirilen çakma geopolimer kazığının yükleme deneyinde basınç etkisi altında yük-deformasyon eğrilerini oluşturmak için deneyler gerçekleştirilmiştir. Seri C deneylerinde zemin ortamı Seri B deneylerinde yapıldığı gibi hazırlanmıştır.

İlgili deney setinin resimleri Şekil 3.17 ve 3.18’ de görülmektedir.



Şekil 3. 17 : Çakma geopolimer kazığının deney seti parçaları



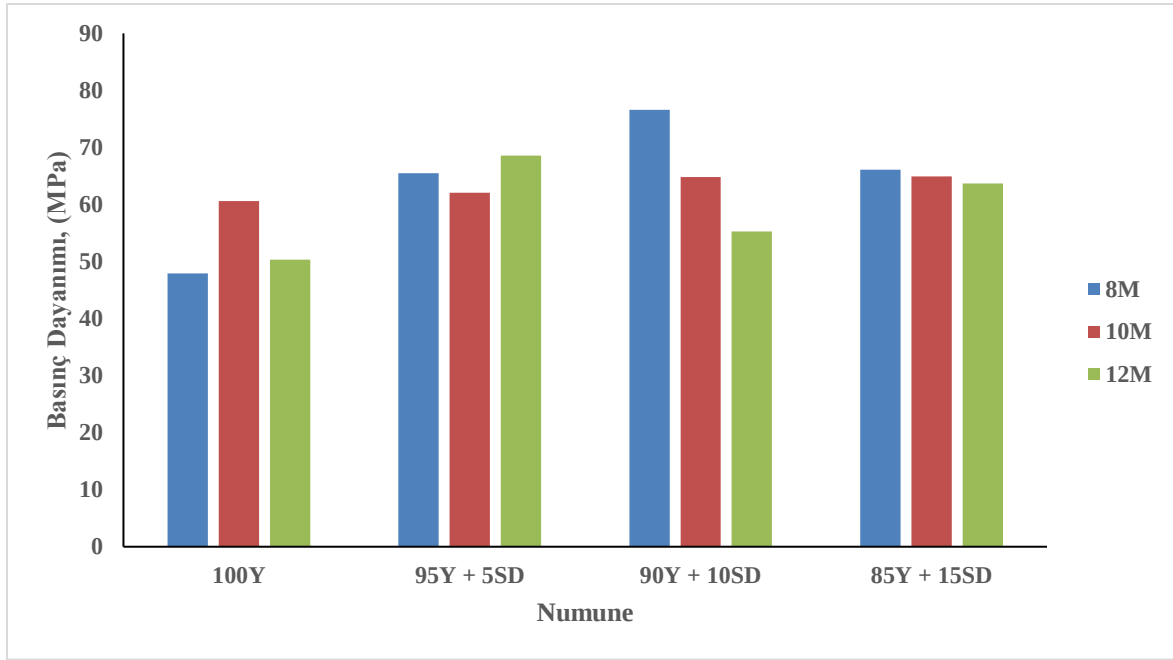
Şekil 3.18 : Çakma geopolimer kazığının deplasman ölçer yerleşimi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

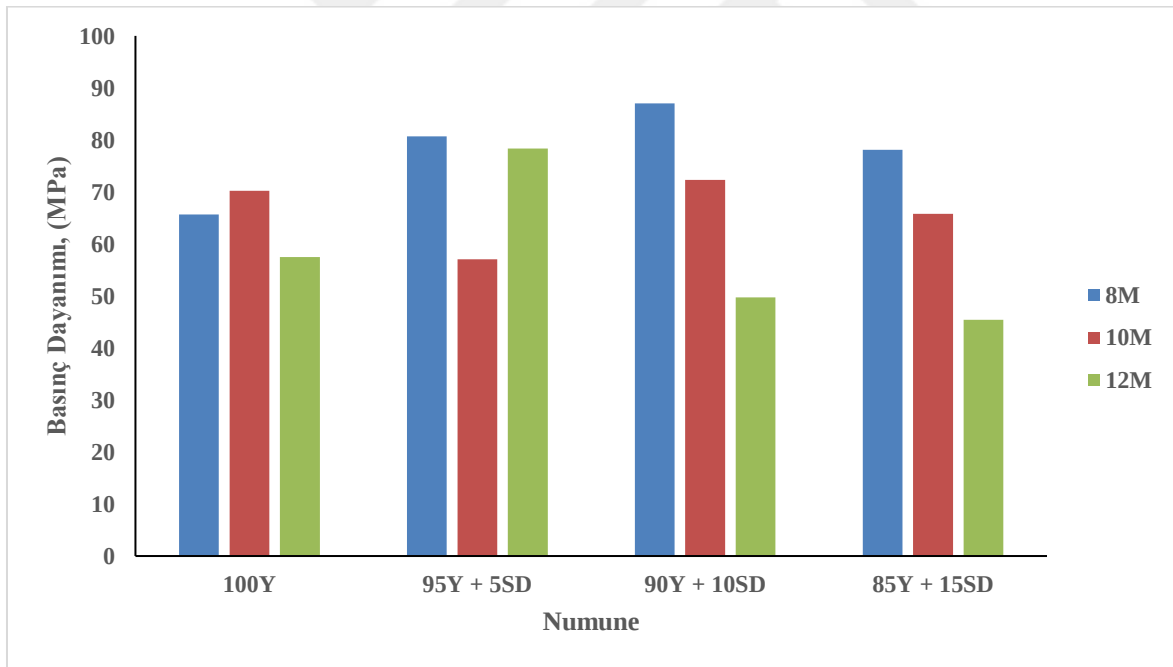
4.1. Geopolimer Örneklerin Basınç Dayanımı

Dört farklı bağlayıcı içeriği ve üç farklı NaOH konsantrasyonu dikkate alınarak üretilen geopolimer hamur numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de sunulmuştur. Şekil 4.1’de görüleceği üzere, 7 günlük numuneler arasında en yüksek basınç dayanımı değerleri %10 silis dumanı ikame edilen ve 8 M NaOH ile aktive edilen geopolimer numunelerden elde edilmiştir. Ayrıca, en düşük basınç dayanımına sahip numune grubunun ise 8 M NaOH ile aktive edilen %100 YFC kullanılarak üretilen örnekler olduğu belirlenmiştir. Bu durum, silis dumanı ikamesinin geopolimer hamur numunelerinin erken dayanımı üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Şöyle ki, silis dumanı ikamesinin %0’dan %10’a çıkması halinde 7 günlük basınç dayanımı değerlerinin yaklaşık % 60 oranında artış gösterdiği görülmektedir. Benzer şekilde, geopolimerizasyon süreci üzerinde bağlayıcı içeriği kadar bir diğer önemli parametrenin de NaOH konsantrasyonu olduğu Şekil 4.1’de gözlenmektedir. Örneğin, %10 silis dumanı ikamesi yapılan örnek gruplarının (90Y+10SD) 7 günlük basınç dayanımı değerleri NaOH konsantrasyonunun 8 M’den 12 M değerine yükseltilmesiyle birlikte yaklaşık %30 oranında azalmıştır. Benzer sonuçlar diğer numune gruplarında da gözlenmiş fakat 7 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde NaOH konsantrasyonunun basınç dayanımı üzerindeki etkisi ile ilgili doğrusal bir çıkarım elde edilememiştir.

Şekil 4.2 farklı bağlayıcı içerikleri ve NaOH molariteleri dikkate alınarak üretilen geopolimer örneklerin 28 günlük basınç dayanımı değerlerini göstermektedir. 7 günlük basınç dayanımı değerlerine benzer olarak, 28 günlük numuneler içerisinde de en yüksek basınç dayanımına sahip olan numune grubu %10 silis dumanı ikame edilen ve 8 M NaOH çözeltisi kullanılarak aktive edilen örnek olarak karşımıza çıkmaktadır. %10 silis dumanı ikamesi yapılan örnek grupları incelendiğinde, NaOH molaritesinin 8 M’den 12 M seviyesine yükselmesi basınç dayanımı değerlerini yaklaşık % 40 oranında azaltmıştır. Benzer düşüşler, %15 silis dumanı ikame edilen örnek gruplarında da gözlenmiştir. Bu örnek gruplarında da NaOH molaritesinin 8 M’den 12 M seviyesine yükselmesi basınç dayanımı değerlerini yaklaşık %42 oranında azaltmıştır. 28 günlük basınç dayanımı değerleri maksimum basınç dayanımı elde etmek için kullanılması gereken optimum NaOH konsantrasyonunun numunelerin bağlayıcı içeriğine göre değişiklik gösterdiğini ortaya çıkarmıştır.



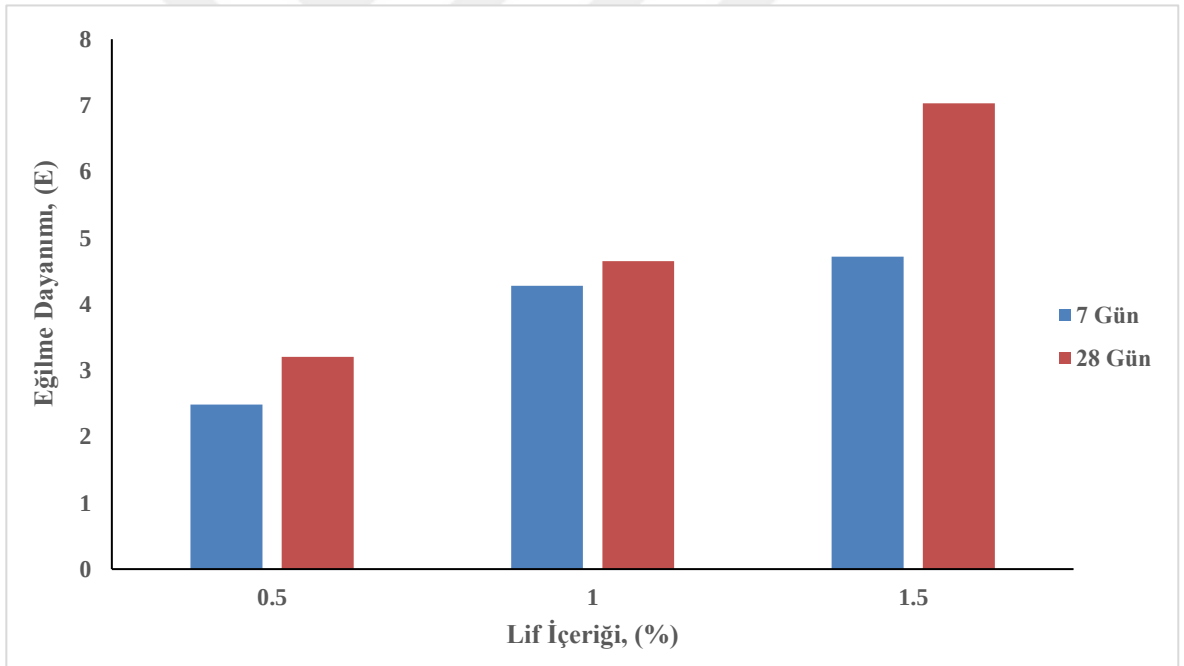
Şekil 4. 1 : 7 Günlük geopolimer numunelerin basınç dayanımı değerleri



Şekil 4. 2 : 28 günlük geopolimer numunelerin basınç dayanımı değerleri

4.2. Lif Takviyeli Geopolimer Örneklerin Eğilme Dayanımı

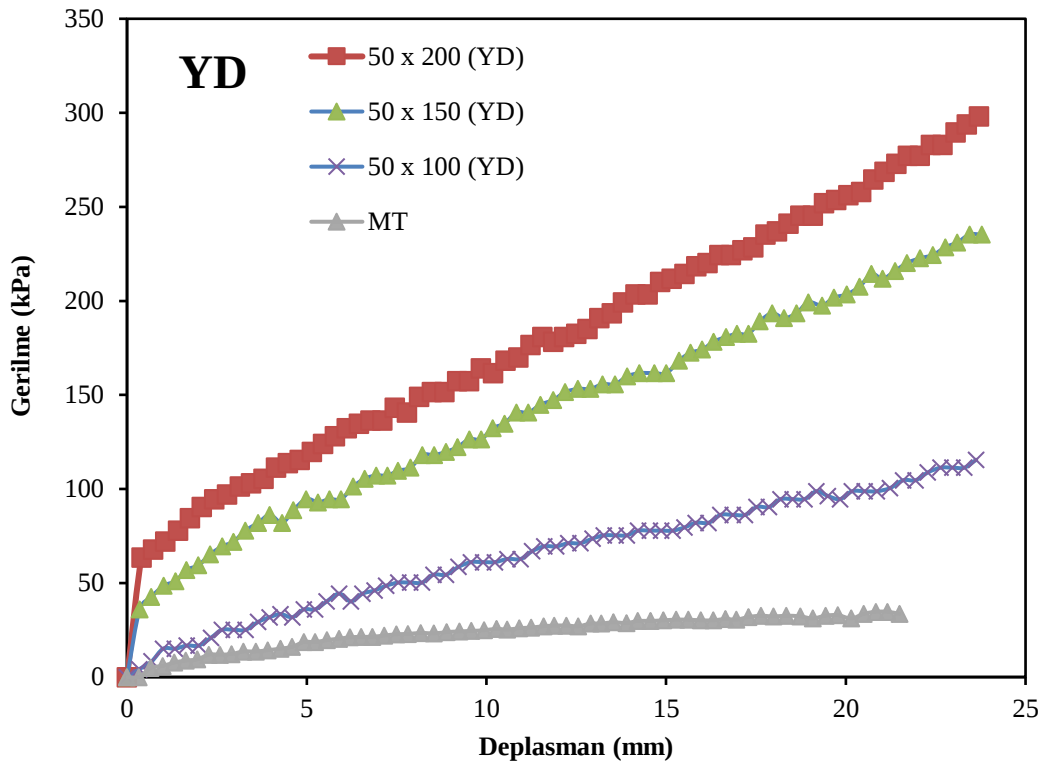
Üç farklı oranda çelik lif ilave edilen geopolimer kompozitlerin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı değerleri belirlenmiş ve Şekil 4.3'te sunulmuştur. Şekil 4.3 lif takviyesi oranının artmasıyla birlikte eğilme dayanımı değerlerinin büyük bir oranda artmasına neden olmuştur. 7 günlük eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde, lif takviyesinin % 0.5'ten % 1.5 değerine çıkmasının eğilme dayanımı değerlerini yaklaşık % 90 oranında arttırdığı gözlenmektedir. Benzer şekilde, 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları da, lif oranının % 0.5'ten % 1.5 seviyesine yükselmesiyle birlikte eğilme dayanımı değerlerinin yaklaşık % 120 oranında arttırmıştır. Ayrıca, kür süresinin artışın da geopolimer kompozitlerin eğilme dayanımları üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.3, kür süresinin 7 günden 28 güne artmasının lif oranının % 0.5, % 1 ve % 1.5 oranlarında kullanılması halinde sırasıyla yaklaşık % 30, % 10 ve % 50 oranlarında artışlara neden olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. 3 : Lif takviyesinin 28 günlük basınç dayanımı değerlerine etkisi

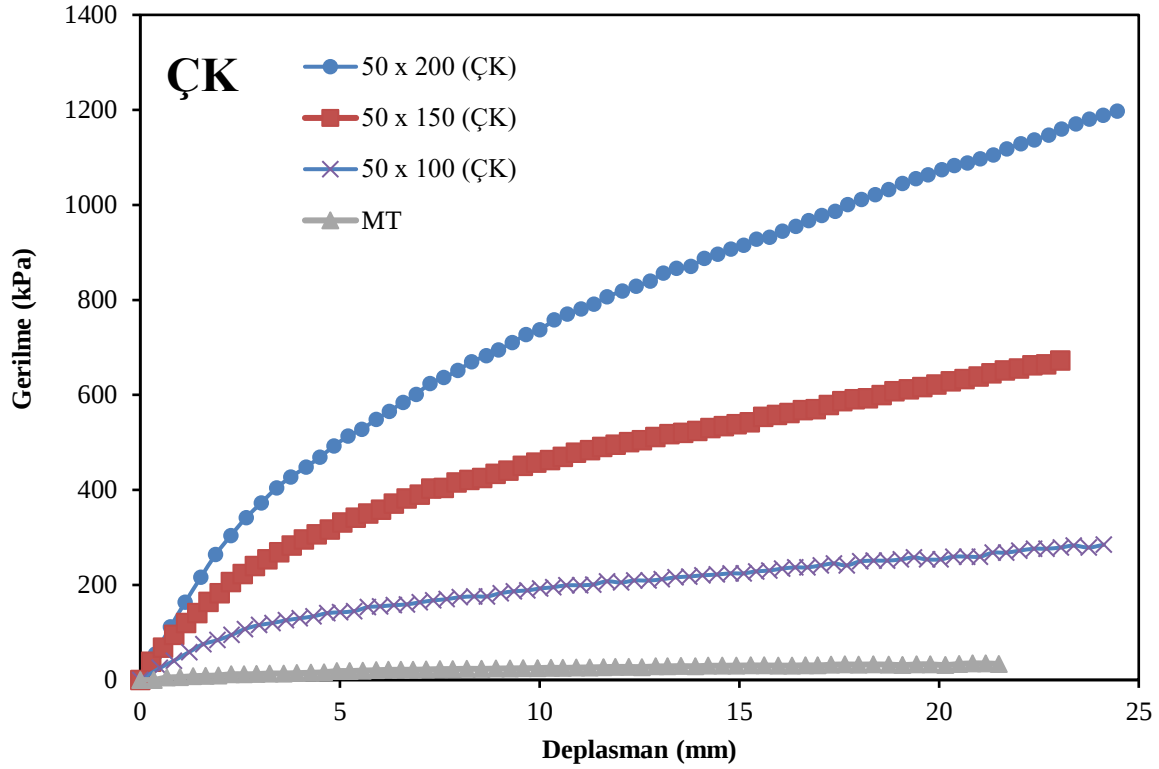
4.3. Zemin Deneyleri

Yerinde dökme geopolimer kazıklar ile model temel üzerinde yapılan plaka yükleme deney sonuçları Şekil 4.4’ de sunulmuştur. Yerinde dökme geopolimer kazıklar 3 farklı boyutta üretilmiştir (100 mm, 150 mm, 200 mm). Bununla birlikte tüm geopolimer kazıkların ve model temelin çapı 50 mm’dir. Şekil 4.4’de açıkça görüldüğü gibi yerinde dökme geopolimer kazıkların hepsi model temelden daha yüksek taşıma gücüne sahiptir. Ayrıca, geopolimer kazığın boyunun artmasıyla birlikte taşıma gücünün arttığı gözlenmiştir.



Şekil 4. 4 : Model temel ve yerinde dökme geopolimer kazıkların gerilme deplasman eğrileri

Çakma geopolimer kazıklar ile model temel üzerinde yapılan plaka yükleme deney sonuçları Şekil 4.5’de sunulmuştur. Çakma geopolimer kazıklar 3 farklı boydadır. (100 mm, 150 mm, 200 mm). Bununla birlikte tüm çakma geopolimer kazıkların ve model temelin çapı 50 mm’dir. Şekil 4.5’de de açıkça görüldüğü gibi çakma geopolimer kazıkların hepsi model temelden daha yüksek taşıma gücüne sahiptir. Ayrıca kazığın boyu arttıkça taşıma gücü artmaktadır.



Şekil 4. 5 : Model temel ve çakma geopolimer kazıkların gerilme deplasman eğrileri

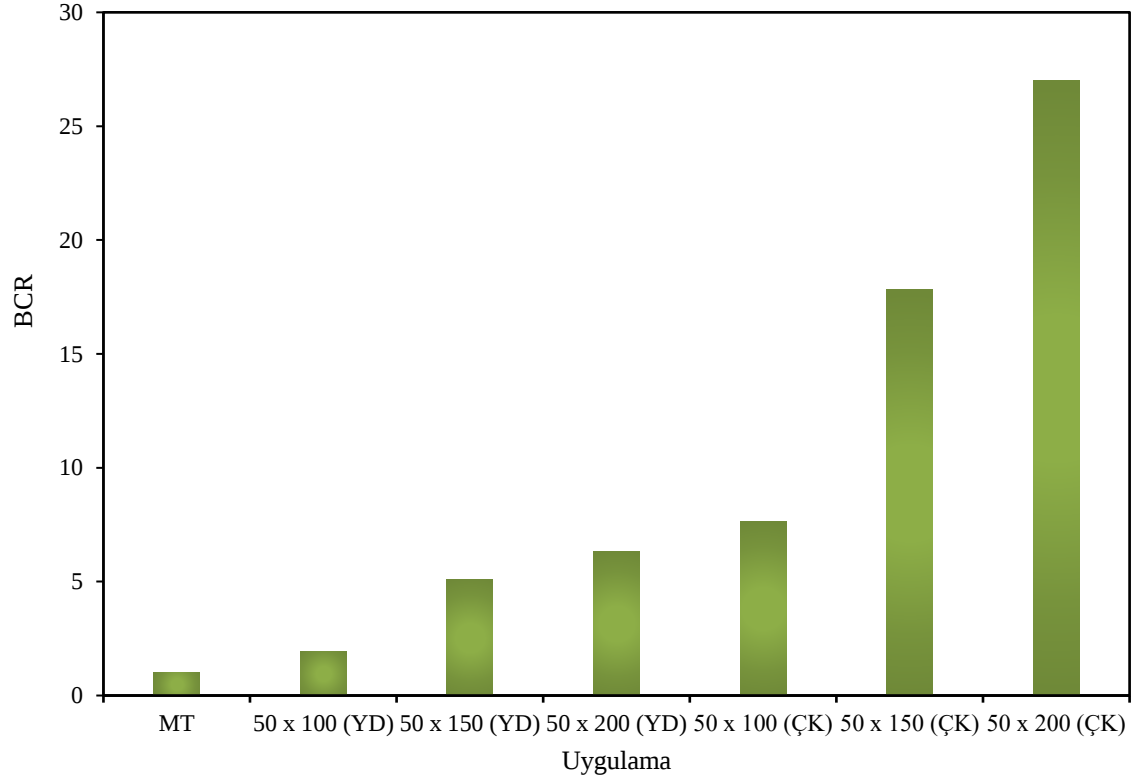
Çakma ve yerinde döküm geopolimer kazıkların taşıma gücü değerlerinin model temelin taşıma gücü değerinden daha yüksek çıkmasının sebebi üzerlerine gelen yükleri daha derine aktarabilmesi ve hem yan yüzeylerinde oluşan sürtünme kuvvetleri hem de uç dirençleriyle yüke karşı koymaları olarak yorumlanmıştır.

Yerinde dökme geopolimer kazıklar ile çakma kazıkların davranışları kıyaslamak için taşıma gücü oranı (BCR) tanımlanmıştır. Seri B ve Seri C deneyleri sonucunda BCR değerleri hesaplanırken aşağıdaki denklem kullanılmıştır (Binquet ve Lee, 1975; Sarıcı, 2014).

$$BCR = q_r / q_0 \quad (1)$$

Bu denklemde q_r yerinde dökme ve çakma geopolimer kazıkların (SERİ B ve SERİ C) nihai taşıma gücünü belirtmektedir. q_0 ise model temelin (SERİ A) nihai taşıma gücünü belirtmektedir. Nihai taşıma gücü hesaplanırken temel ve kazık çapının %10 değerine karşılık gelen oturma değerini oluşturan gerilme değeri kullanılmıştır. Nihai taşıma gücünü belirleme de bu yöntemin kullanılmasının nedeni plaka yükleme deneylerinden elde edilen yük-deformasyon davranışlarının yerel kayma kırılmasına işaret etmesidir (Sarıcı, 2014).

Şekil 4.6' da tüm deneyler için hesaplanmış BCR değerlerinin grafiği sunulmuştur. Şekil 4.6' da görüldüğü üzere 100 mm, 150 mm ve 200 mm boyundaki yerinde dökme geopolimer kazıklar için sırasıyla BCR değerleri 1.9, 5.1 ve 6.3 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte 100 mm, 150 mm ve 200 mm boyundaki çakma geopolimer kazıklar için sırasıyla BCR değerleri 7.6, 17.8 ve 27.0 olarak belirlenmiştir. BCR değerleri değerlendirildiğinde, aynı boydaki kazıklar için çakma geopolimer kazıklar yerinde dökme geopolimer kazıklara göre oldukça yüksek nihai taşıma kapasitesine sahiptir. Hatta 200 mm boyundaki çakma geopolimer kazık, 100 mm boyundaki yerinde dökme geopolimer kazığa göre daha yüksek nihai taşıma kapasitesine sahiptir. Bunun nedeninin geopolimer kazıkların çakılması sırasında etrafındaki gevşek kumu sıkılaştırması olduğu düşünülmüştür. Böylece oluşan sıkı bölge ile geopolimer kazığın etkileşiminden daha yüksek taşıma gücü değerleri oluşmuştur.



Şekil 4. 6 : Tüm deneyler için hesaplanmış BCR değerleri

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında lif takviyeli geopolimer kompozitlerin zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Öncelikle, farklı NaOH konsantrasyonları ve bağlayıcı içerikleri değişkenlerine bağlı olarak optimizasyon çalışmaları tamamlanmıştır. Daha sonra, maksimum basınç dayanımının elde edildiği numuneye 3 farklı oranda çelik lif ilavesi yapılmıştır. Lif takviyeli geopolimer kompozitler üzerinde gerçekleştirilen eğilme ve basınç testleri sonrasında elde edilen optimum lif takviyeli geopolimer kompozitler 3 farklı narinliğe sahip silindir kalıplara dökülmüştür. Bu silindir numuneler ise zayıf zemin stabilizasyonu işleminde kullanılmıştır. Elde edilen deneysel bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Geopolimer hamur üretiminde silis dumanı ikame oranı arttıkça basınç dayanımı erken yaş basınç dayanımı değerlerinde önemli ölçüde artışlar gözlenmiştir. Örneğin, 8 M NaOH ile aktive edilen geopolimer örneklerde silis dumanı ikamesinin % 0'dan % 10'a çıkması basınç dayanımı değerlerini yaklaşık % 60 oranında arttırmıştır.
- NaOH konsantrasyonunun geopolimer kompozitlerin basınç dayanımı üzerinde etkisi incelendiğinde, %10 silis dumanı ikamesi yapılan örneklerde NaOH molaritesinin 8 M'dan 12 M seviyesine yükselmesi basınç dayanımı değerlerini yaklaşık % 40 oranında azalttığı belirlenmiştir.
- Tez çalışmasının ilk aşamasında gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları neticesinde en yüksek basınç dayanımına sahip olan numune grubu 8 M NaOH ile aktive edilen ve % 10 silis dumanı ikame edilen örnekler olarak belirlenmiştir.
- Tez çalışmasının ikinci aşamasında ise, lif takviyesinin % 0.5'ten % 1.5 değerine çıkmasının eğilme dayanımı değerlerini yaklaşık % 90 oranında arttırdığı belirlenmiştir.
- Üç farklı boyutta üretilen yerinde dökme geopolimer kazıkların boyu arttıkça taşıma gücünün arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, geopolimer kazıkların tümünün model temelden daha yüksek taşıma gücüne sahip olduğu gözlenmiştir.
- Benzer şekilde, çakma geopolimer kazıkların tümünün model temelden daha yüksek taşıma gücüne sahip olduğu belirlenmiştir. Yerinde dökme geopolimer kazıklara

benzer şekilde, çakma kazıkların boyutlarının artmasıyla birlikte taşıma gücünün önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir.

- Çakma ve yerinde döküm geopolimer kazıklar ile yapılan stabilizasyon işlemleri sonucunda zemin taşıma gücü değerlerinin artması geopolimer kazıkların üzerlerine gelen yükleri daha derine aktarabilmesi ile açıklanabilir. Ayrıca, kazık yan yüzeylerinde oluşan sürtünme kuvvetleri ve uç dirençleri sayesinde yüke karşı koymaların durumları da zemin taşıma gücünü arttıran diğer faktörler olarak öne çıkmıştır.
- Elde edilen BCR değerleri, aynı boyuttaki çakma geopolimer kazıkların yerinde dökme geopolimer kazıklara nazaran oldukça yüksek nihai taşıma gücü kapasitelerine sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır.

KAYNAKLAR

Al-Mashhadani, M. M., Canpolat, O., Aygörmez, Y., Uysal, M., & Erdem, S. (2018). Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites. *Construction and building materials*, 167, 505-513.

Amandio Teixeira Pinto, Eduardo Viera, 'repairing of damaged stone in monuments and stone buildings', proceedings of world congress geopolymer 2005, France.

Assi, L., Carter, K., Deaver, E. E., Anay, R., & Ziehl, P. (2018). Sustainable concrete: Building a greener future. *Journal of cleaner production*, 198, 1641-1651.

ASTM C109, A. (2002). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). *American Society for Testing and Material*.

ASTM C348-14. (2018). Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars. Annual Book of ASTM Standards, 03(Reapproved), 98–100.

Bhutta, A., Borges, P. H., Zanotti, C., Farooq, M., & Banthia, N. (2017). Flexural behavior of geopolymer composites reinforced with steel and polypropylene macro fibers. *Cement and Concrete Composites*, 80, 31-40..

Binici H. PÇ-GYFC-Pomza Üçlü Karışımlarının Özellikleri. Çukurova Üniversitesi. Doktora Tezi. 2002.

Binici, H., Sevinç, A. H., & Durgun, M. Y. (2010). Barit, bazaltik pomza, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların özellikleri. KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(1), 2010.

Binquet, J. & Lee, K.L. (1975). Bearing Capacity Tests on Reinforced Earth Slabs. *Journal of Geotechnical Engineering Division*. ASCE, 101(12), 1241-1255.

Birand, A.A., 2001, Kazıklı Temeller, Teknik Yayınevi, Ankara.

Branston, J., Das, S., Kenno, S. Y., Taylor, C. 2016. Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 878–886.

Bushlaibi, A. H., & Alshamsi, A. M. (2002). Efficiency of curing on partially exposed high-strength concrete in hot climate. *Cement and concrete research*, 32(6), 949-953..

Cao, Y., Cui, Y., Yu, X., Li, T., Chang, I. S., & Wu, J. (2021). Bibliometric analysis of phosphogypsum research from 1990 to 2020 based on literatures and patents. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 66845-66857.

Chindaprasirt, P., & Chalee, W. (2014). Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. *Construction and building materials*, 63, 303-310.

Çalık, Ü. (2012). Perlitin puzolanik katkı olarak kireç ile birlikte zemin stabilizasyonunda kullanımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s.159, Trabzon.

Davidovits, J., Geopolymer Chemistry and applications .2008 , Saint Quantin, France.

Dawood, E. T. and Ramli, M. (2011). Contribution of hybrid fibers on the properties of high strength concrete having high workability. *Procedia Engineering*, 14, 814-820. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.103>.

De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K., & Sirivivatnanon, V. (2007). Kinetics of geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 512-518..

Dwivedi, A., & Jain, M. K. (2014). Fly ash–waste management and overview: A Review. *Recent Research in Science and Technology*, 6(1)..

Ekinci E. (2022). Bakteri esaslı kendini onarma sisteminin geopolimer hamur ve harçların performansına etkisi, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya

Erdoğan Y.,T., 2003. Beton, Metu Pres, Ankara, s. 478-512

Ersoy, H. Y., 2001. Kompozit malzeme, Literatür Yayınları: 66, İstanbul, Türkiye..

Ganesh, A. C., & Muthukannan, M. (2021). Development of high performance sustainable optimized fiber reinforced geopolymer concrete and prediction of compressive strength. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124543

Ghadir, P., & Ranjbar, N. (2018). Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. *Construction and Building Materials*, 188, 361-371

Hadigheh, S.A.; Ke, F.; Fatemi, H. Durability design criteria for the hybrid carbon fibre reinforced polymer (CFRP)-reinforced geopolymer concrete bridges. *Structures* 2022, 35, 325–339..

Kantarıcı F. (2018). Nano silis, mikro silis ve polimer katkılar içeren volkanik tüf esaslı geopolimer beton üretimi ve özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya

Kantarıcı, F. (2021). Lif boyunun ve içeriğinin geopolimer betonların asit direncine etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), 424-437..

Kurt, G. (2006). Lif içeriği ve su/çimento oranının fibrobetonun mekanik davranışına etkileri..

Matsimbe, J., Dinka, M., Olukanni, D., & Musonda, I. (2022). Geopolymer: A systematic review of methodologies. *Materials*, 15(19), 6852.

Matsimbe, J., Dinka, M., Olukanni, D., & Musonda, I. (2022). Geopolymer: A systematic review of methodologies. *Materials*, 15(19), 6852.

Memon, F. A., Nuruddin, M. F., Khan, S., Shafiq, N. A. S. I. R., & Ayub, T. (2013). Effect of sodium hydroxide concentration on fresh properties and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete. *J. Eng. Sci. Technol*, 8(1), 44-56

Neupane, K., Chalmers, D., & Kidd, P. (2018). High-strength geopolymer concrete-properties, advantages and challenges. *Advances in Materials*, 7(2), 15-25..

Nili, M., Afroughsabet, V. (2010). The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(6), 927–933.

Öner, M., 2001. Yüksek Fırın Cürufalarının Çimento Üretiminde Kullanımında Öğütmeyle ilgili Parametrelerin Etkilerinin Belirlenmesi. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, Ankara, Sayı 23, s. 61–69

Özcan M., 2024, Vidalı kazıkların zayıf zeminlerde taşıma kapasitesinin deneysel ve sayısal çalışmalarla incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya

Pavithra, P., Srinivasula Reddy, M., Dinakar, P., Hanumantha Rao, B., Satpathy, B. K., & Mohanty, A. N. (2016). Effect of the Na₂SiO₃/NaOH ratio and NaOH molarity on the synthesis of fly ash-based geopolymer mortar. In *Geo-Chicago 2016* (pp. 336-344)..

Sabu, A. and Karthi, L. (2018). A review on strength properties of fibre and hybrid fibre reinforced geopolymer concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5, 1686- 1690.

Saeed, A., Najm, H. M., Hassan, A., Sabri, M. M. S., Qaidi, S., Mashaan, N. S., & Ansari, K. (2022). Properties and applications of geopolymer composites: A review study of mechanical and microstructural properties. *Materials*, 15(22), 8250..

Sağır, M. A., Karakoç, M. B., Özcan, A., Ekinçi, E., & Yolcu, A. (2023). Effect of silica fume and waste rubber on the performance of slag-based geopolymer mortars under high temperatures. *Structural Concrete*, 24(5), 6690-6708.

Sarici, T. (2014) Geosentetik ile güçlendirilmiş taş kolonların taşıma kapasitesinin analizi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.

Sarici, T. (2019). Puzolan ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atıklarının granüler dolgu olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya

Sivrikaya O., 2021, İnşaat Mühendisliğinde Temel İnşaatı I, Birsen Yayınevi, İstanbul).

Uzuner, B., A. (2016). Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi, 6. Basım, Trabzon, 409s..

Wang, T., Fan, X., Gao, C., Qu, C., Liu, J., & Yu, G. (2023). The influence of fiber on the mechanical properties of geopolymer concrete: A review. *Polymers*, 15(4), 827.

Xu H, Van Deventer JSJ (2000) The geopolymerisation of alumino silicate minerals. *Int J Miner Process* 59(3):247–266

Yi, Y., Gu, L., & Liu, S. (2015). Microstructural and mechanical properties of marine soft clay stabilized by lime-activated ground granulated blastfurnace slag. *Applied Clay Science*, 103, 71-76

Zakka, W. P., Lim, N. H. A. S., & Khun, M. C. (2021). A scientometric review of geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124353

Zeybek, O. (2009). *Uçucu kül esash geopolimer tuğla üretimi*, Master's thesis, Anadolu University Turkey..

Zhang, P., Wang, J., Li, Q., Wan, J., & Ling, Y. (2021). Mechanical and fracture properties of steel fiber-reinforced geopolymer concrete. *Science and Engineering of Composite Materials*, 28(1), 299-313..

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Bahadır EKİNCİ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Bayburt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM:

- 2015-2023 tarihleri arasında Battalgazi Belediyesi Fen İşleri ve Etüt Proje Müdürlüğü bünyesinde İnşaat Mühendisi olarak görev yapmıştır.
- 2023 yılından itibaren Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı bünyesinde Köy Evleri şantiyelerinde müşavir inşaat mühendisi olarak görevine devam etmektedir.