



Araştırma Makalesi / Research Article

Zayıf bir zeminin ıslahı için oluşturulan geçirimli kazıklarda farklı agregre ve bağlayıcı kullanımının etkisinin araştırılması

Investigation the effect of using different aggregates and binders in pervious piles for the soil stabilization of a weak soil

Talha Sarıcı^{1*}, Mustafa Özcan², Rüçhan Enes Korkmaz³

¹ İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, talha.sarici@inonu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8488-5851>

² İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mustafa.ozcan@inonu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5745-8694>

³ İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, korkmazruchanenes@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7504-774X>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 21 Mayıs 2025
Revizyon 17 Haziran 2025
Kabul 29 Haziran 2025
Online 30 Eylül 2025

Anahtar Kelimeler:

Zemin Islahı, Geçirimli beton kazık, Geçirimli geopolimer kazık, İnşaat ve Yıkıntı Atığı, Uçucu kül, Yüksek fırın cürufu.

ÖZ

Bu çalışma kapsamında doğal ve inşaat yıkıntı atığından elde edilen agregre kullanılarak oluşturulan geçirimli kazıkların davranışını araştırmak üzere deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında geçirimli beton kazık için geleneksel çimento kullanılırken geçirimli geopolimer kazık oluşturmak için alkali aktivatör ile uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak geopolimer hamuru elde edilmiştir. Deneysel çalışmaların ilk aşamasında, oluşturulan geçirimli kazıkların basınç dayanımları belirlenmiş, su emme kapasiteleri ve ultrasonik darbe hızları ölçülmüştür. Daha sonrasında, kazıklar, zayıf bir zemine yerleştirilerek yük-deformasyon davranışları araştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, geçirimli beton ve geopolimer kazıkların güçlendirilmemiş zeminin taşıma gücünü önemli ölçüde artırdığı bulunmuştur. Güçlendirilmemiş zemin ile kıyaslandığında, doğal agregre kullanımında geçirimli geopolimer kazık ile 3 kat; inşaat yıkıntı atığı agregre kullanımında ise geçirimli beton kazık ile 2 kat daha fazla taşıma kapasitesi elde edilmiştir. İnşaat yıkıntı atığı agregreleri su emme kapasitesini artırırken, doğal agregre kullanımı ultrasonik darbe hızını artırmıştır. Taşıma kapasitesi ihtiyacı daha düşük projelerde, inşaat yıkıntı atığı agregreleri ile geçirimli geopolimer kazıkların kullanılması, molozların ve üretim atığı olan öncülerin değerlendirilmesini sağlayabilecektir. Özellikle afet sonrası ortaya çıkan atıkların dönüştürülmesi/değerlendirilmesi bölgenin dönüşümü ve insanların sağlığı için hayati önem taşımaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 May 2025
Received in revised form 17 June 2025
Accepted 29 June 2025
Available online 30 September 2025

Keywords:

Soil stabilization, Pervious concrete piles, Pervious geopolymer piles, Construction and demolition waste, Fly ash, Blast furnace slag

ABSTRACT

Within the scope of this study, experimental studies were carried out to investigate the behavior of pervious piles using natural aggregate and construction demolition waste aggregate. In this study, geopolymer paste was obtained by using fly ash and blast furnace slag with alkali activator to form pervious geopolymer piles while using traditional cement for pervious concrete piles. In the first stage of the experimental studies, the compressive strengths of the pervious piles were determined, water absorption capacities and ultrasonic impact velocities were measured. Then, the piles were placed in a weak soil and their load-deformation behavior was investigated. When the results obtained within the scope of the study were evaluated, it was found that pervious concrete and geopolymer piles significantly increased the bearing capacity of the unreinforced soil. Compared to the unreinforced soil, 3 times more bearing capacity was obtained with pervious geopolymer piles when using natural aggregates and 2 times more bearing capacity was obtained with pervious concrete piles when using construction demolition waste aggregates. Construction demolition waste aggregates increased the water absorption capacity, while the use of natural aggregates increased the ultrasonic pulse velocity. In projects with lower bearing capacity requirements, the usage of pervious geopolymer piles with construction demolition waste aggregates may provide the utilization of rubble and production waste precursors. The transformation/recycling of post-disaster wastes is vital for the regeneration of the region and the public health.

Doi: 10.24012/dumf.1702843

* Sorumlu Yazar

Giriş

Yapılaşma süreçlerinde inşaat çalışmalarına başlamadan önce yapının oturacağı zemin ile ilgili gerekli araştırmaları yapmak yapı sağlığı ve sürdürülebilirliği için oldukça önemlidir [1]. Temel zemininin yapılaşma için yeterli mühendislik özelliklerine sahip olmaması durumunda (farklı oturmalar, yetersiz taşıma gücü, sıvılaşma potansiyelleri vb.) farklı uygulamalar ile temel zeminin özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir [2]. Bu iyileştirme uygulamaları arasında son zamanlarda popülerliği artan geçirimli kazık kullanımı ile kazık elemanların suya maruz kaldığı ortamlarda suyun farklı noktalara tahliyesi sağlanarak, su etkisinin, konsolidasyon miktarının ve sıvılaşma potansiyellerinin engellenmesi mümkün olmaktadır [3]. Geçirimli kazıklar geleneksel granüler kolonlara oranla 4.4 kat daha fazla taşıma kapasitesine ulaşabilmektedir [4]. Geçirimli kazıkların davranışının esnek kazıklar gibi olduğu ve bu sebeple geçirgenlik artarken stabilitenin korunabildiği belirtilmiştir [5]. Öyle ki, yüksek taşıma kapasitesiyle beraber geçirimsizlik özelliğinin korunmasının özellikle konsolidasyon zamanını azalttığını ve bununla beraber kumlu zeminlerde siltli zeminlere nazaran daha yüksek taşıma kapasitesinin elde edilebildiği bulunmuştur [6]. Uygulamalarda yaygın olarak beton içerikli kazıklar kullanılıyor olsa dahi, sanayi üretim atığı olan uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC) gibi bağlayıcılar ile alkali aktivatörlü karışımlar kullanılarak geopolimer yapılar oluşturulabilmektedir [7-10]. Oluşturulan geopolimer yapıların çimento kullanımına oranla daha ekonomik ve çevre dostu olduğu yapılan çalışmalar ile ortaya konulmuştur [11-12]. Ayrıca, doğal agrega yerine inşaat yıkıntı atığı (İYA) kullanılarak elde edilen agregalar ile oluşturulacak geopolimerler sayesinde özellikle afetler sonrasında ortaya çıkan moloz atığının dönüştürülmesi ve zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılabilmesi mümkün olmaktadır [13-15]. Öyle ki, geri dönüştürülmüş agregalardan elde edilen geçirimli kazıkların sıvılaşmaya karşı oldukça başarılı olduğu yapılan çalışmalar ile ortaya konulmuştur [16]. Ayrıca, uzun vadeli olarak İYA depolanması, afetlerin büyüklüğüne göre çok güç olmakta ve depolama süresi boyunca hem hava kalitesini hem de yer altı su kaynaklarının kalitesini doğrudan tehdit edebilmektedir. 6 Şubat 2023 tarihinde gerçekleşen Kahramanmaraş deprem sekansı nedeniyle 580 milyon ton inşaat yıkıntı atığı (İYA) oluşacağı öngörüldüğü göz önünde bulundurulduğunda [17], inşaat yıkıntı atığının farklı alanlarda değerlendirilmesi hayati önem taşımaktadır. İYA içeriklerinin ve türlerinin çeşitli olması farklı alanlarda iyileştirmelerin önünü açmaktadır. Öyle ki, tuğla duvar İYA ile kohezyonlu zeminin karıştırılması ile Kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR) değerinde %260'a varan artış elde edilebilmektedir [18]. Bununla beraber, alkali aktivatör, yüksek fırın cürufu ve İYA kullanımı ile güçlendirilmemiş dolgu zeminin taşıma gücü değeri 4.72 kata kadar artırılabilir [19]. İYA dönüşümleri büyük inşaat yapılarında kullanılabildiği gibi, yaya yolları gibi spesifik ve küçük projelerde de kullanılabilmektedir [20]. Dolayısıyla, küçük ve/veya büyük ölçekli projelerde İYA kullanımı ile geri dönüşümün önemli ölçüde gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında zayıf bir zeminin ıslahında farklı bağlayıcı (uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve çimento) ve agrega (doğal ve inşaat yıkıntı atığından elde edilen agrega) içeriğine sahip geçirimli kazıkların kullanılabilirliğini araştırmak üzere deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Üretilen farklı geçirimli kazıklar üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiş ve basınç dayanımları araştırılmıştır. Ayrıca ultrasonik darbe hızı testi ve su emme deneyleri ile kazıkların su emme kapasiteleri ve ultrasonik darbe hızları ölçülmüştür. Sonraki aşamada kohezyonsuz zayıf zemin içerisine yerleştirilen kazıklar ile model yüklemeye deneyleri gerçekleştirilmiştir. Böylelikle geçirimli kazıkların düşey yükler altında güçlendirilmemiş zeminin taşıma kapasitesine nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Daha önceki çalışmalar değerlendirildiğinde geçirimli kazıklar İYA agregalarının ve geopolimer kullanımının yeteri kadar irdelenmediği görülmüştür. Özellikle afetler sonrasında oluşan molozların tekrar değerlendirilmesinin hayati önem taşıması ve çimento endüstrisinin faaliyetlerinin çevresel zararının yüksek olması nedeniyle çevreci çözümlerin bulunması gerekmektedir. Bu bağlamda çalışma kapsamında farklı bağlayıcı ve agregaların kullanılması ile elde edilen sonuçların, geopolimer ve İYA agregalı kazıkların kullanılabilirliği için fikir verici olacağı ve tercih edilebilirliğini arttırabileceği düşünülmektedir.

Materyal ve metod

Deneysel çalışmalarda kazık üretiminde kullanılmak üzere temin edilen ve molozlardan geri dönüştürülen agregaların tane boyutu 2.36 mm ve 4.75 mm aralığına seçilmiştir. Doğal agregalar Malatya'da faaliyet gösteren bir taş ocağından, inşaat yıkıntı atığı ise Osmaniye ili Düziçi ilçesinde daha önceden faaliyet gösteren İl Özel İdaresi Binasının yıkılması sonrası oluşan molozdan temin edilmiştir [21]. Doğal agrega ve İYA'ya ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Doğal agrega (DA), İYA agrega [21] ve kohezyonsuz zemine [9] ait özellikler

Özellikler	Birimler	İYA	DA	Zemin (SP)	Standard
Uniformluk Katsayısı (C_u)	-	20.00	19.8	2.375	[22]
Eğrilik Katsayısı (C_c)	-	1.12	1.26	0.926	[22]
Yassılık İndeksi	%	11.14	13.99	-	[23]
Los Angeles Aşınma Kaybı	%	32.38	25.25	-	[24]
Özgül Ağırlık (G_s)	-	2.62 ^f 2.62 ^c	2.71 ^f 2.72 ^c	2.74	[25]
Su Emmesi	%	6.91 ^f 3.94 ^c	0.89 ^f 0.68 ^c	-	[26]
Maksimum Kuru Birim Ağırlık (γ_{kmaks})	kN/m ³	19.79	22.00	16.5	[27]
Optimum Su Muhtevası (ω_{opt})	%	11.25	6.10	-	[28]

f: İnce Kısım, c: İri Kısım

Çalışma kapsamında bağlayıcı olarak çimento bazı karışımlarda CEM II tip çimento ve geopolimer karışımlarında F sınıfı UK, YFC ve kütlece yarı yarıya YFC ile UK karıştırılarak dört farklı bağlayıcı kullanılmıştır. Çimento hamuru TS EN 197-5 standartlarında üretilen CEM II tip çimento ile oluşturulmuştur ve kütlece su/çimento oranı 0.55 olarak belirlenmiştir. Özellikleri Tablo 2’de gösterilen UK ve YFC ile oluşturulan geopolimer hamur için alkali aktivatörlü çözelti olarak 8 M NaOH çözeltisi (320 gram katı NaOH ile 1 litrelik su çözeltisi) kullanılmıştır.

Tablo 2. Geopolimer hamur için kullanılan bağlayıcıların özellikleri [21]

Bileşen	Birim	Uçucu Küle ait Değer	Yüksek Fırın Cürufuna ait Değer
SiO ₂	%	63.09	32.47
Al ₂ O ₃	%	3.74	9.94
Fe ₂ O ₃	%	6.11	1.25
CaO	%	6.75	32.45
SrO	%	0.2	-
MgO	%	10.53	9.31
SO ₃	%	0.63	0.82
K ₂ O	%	5.63	0.85
P ₂ O ₅	%	1.43	-
TiO ₂	%	1.62	1.16
S ²⁻	%	-	0.33
Na ₂ O	%	-	0.31
Mn ₂ O ₃	%	-	3.51
CL ⁻	%	-	0.015
Kızdırma kaybı	%	2.6	-

Alkali aktivatörlü çözelti/bağlayıcı oranı 0.65 olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan sodyum hidroksitin özellikleri ise Tablo 3’te görülmektedir. Çalışma kapsamında kullanılacak bütün kazıklar eşit boy (10 cm) ve çapta (4.5 cm), Tablo 4’te verilen karışım oranları ile üretilmiştir. Çalışma kapsamında %20 boşluk oranına sahip 8 farklı geçirimli kazık (Tablo 4) verilen karışım oranları ile (Tablo 5) üretilmiştir. Örnek hamur ve kazık görseli Şekil 1’de görülmektedir.

Tablo 3. Sodyum hidroksite ait özellikler [29]

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	Değer
Molekül formülü	NaOH
Molekül kütlesi (g/mol)	40
Renk	Beyaz
pH	13-14
Bağıl yoğunluk (g/cm ³)	2.13

Tablo 4. Çalışma kapsamında kullanılan farklı türdeki kazıklar

Kazık Adı	Bağlayıcı	Agrega
NPCC	Çimento	Doğal Agraga
NPCF	UK	Doğal Agraga
NPCB	YFC	Doğal Agraga
NPCBF	YFC+UK	Doğal Agraga
WPCC	Çimento	İnşaat Yıkıntı Atığı
WPCF	UK	İnşaat Yıkıntı Atığı
WPCB	YFC	İnşaat Yıkıntı Atığı
WPCBF	YFC+UK	İnşaat Yıkıntı Atığı

Tablo 5. Kazıklar için kullanılan karışım oranları

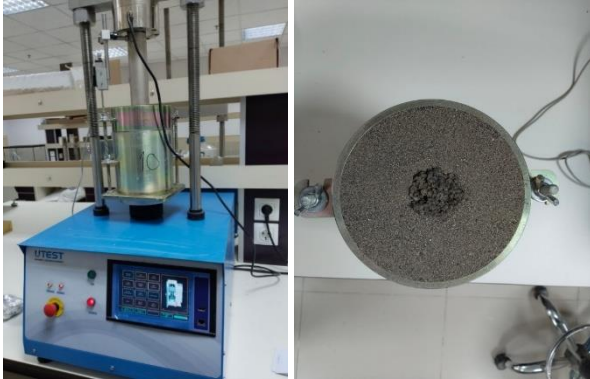
Kazık Adı	a	b	c	d	e	f
NPCC	20%	0.55	39.76	231.70	21.86	-
NPCF	20%	0.55	39.76	231.70	-	21.86
NPCB	20%	0.55	39.76	231.70	-	21.86
NPCBF	20%	0.55	39.76	231.70	-	21.86
WPCC	20%	0.65	39.76	134.36	25.84	-
WPCF	20%	0.65	39.76	134.36	-	25.84
WPCB	20%	0.65	39.76	134.36	-	25.84
WPCBF	20%	0.65	39.76	134.36	-	25.84

Burada; a boşluk oranı, b su-alkali sıvı/bağlayıcı oranı, c bağlayıcı kütlesi (g), d agrega kütlesi (g), e su kütlesi, f alkali çözelti (g)

Kazıklar için oluşturulan hamur derin kapta karıştırılarak oluşturulmuş ve belirlenen oranlarda kalıplara yerleştirilerek priz almaya bırakılmıştır. İYA ile oluşturulan karışımlar yapısı itibarıyla doğal agregaya oranla kendi üzerine daha fazla su emdiği için işlenebilirliğin önemli ölçüde düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca İYA içeriğine ve karışım maruz kaldığı İYA kompozisyonuna bağlı olarak oluşturulan hamurun kendi içinde de farklı yapılar da olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca İYA’yı doygun yüzey kuru duruma getirmek içerdiği çeşitli maddeler nedeniyle de oldukça zordur. Bu da karışım suyunun hamur içinde tutulmasını zorlaştırmaktadır. Bu yüzden deneme-yanılma yolu ile en işlenebilir su-alkali sıvı/bağlayıcı oranı belirlenmiştir. 24 saat geçtikten sonra kazıklar kalıplardan çıkarılmıştır. Öncelikle üretilen kazıklar ile serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiş ve farklı tip kazıkların dayanımları yorumlanmıştır. Daha sonrasında imal edilen kazıklar yapılaşma bulunmayan bir bölgeden temin edilen kohezyonsuz zemin ile oluşturulan zayıf zemin ortamına yerleştirilmiştir. Kohezyonsuz zemin Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi’ne [31] göre SP olarak sınıflandırılmış ve zayıf zemin ortamı oluşturmak için rölatif sıklık (D_r) 10% olacak şekilde yerleşimi yağmurlama yöntemi ile yapılmıştır. Sonrasında kazıklar üzerine 5 cm çapında dairesel rijit temel yerleştirilmiş ve temel üzerine yük uygulanarak model yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Burada; H zemin derinliği, h kazık boyu, d kazık çapı, D zemin ortamının çapını ifade etmektedir. Model yükleme deneylerinde yükleme hızı 1.27 mm/dk olarak belirlenmiş ve yükleme pistonu kazık merkezine gelecek şekilde yükleme yapılmıştır. Her kazık türü için 4 adet numune oluşturulmuş, kuru kür seçilmiş ve oluşturulan kazıklardan yüke maruz kalmamış numuneler ile ultrasonik darbe hızı testi (UPV) ve su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. UPV deney cihazı numunenin vericiden çıkan ses dalgasının numuneden geçerek alıcıya ulaşma süresini, numune boyunu da değerlendirerek hesaplamaktadır. Böylelikle malzemenin bütünlüğü/başlılık durumuna bağlı olarak ses hızlarındaki değişimler kaydedilebilmektedir ve ilgi standarda göre gerçekleştirilmiştir [30]. Su emme deneylerinde ise etüvde kurutulmuş, kuru hali tartılmış numunelerin yanal yüzeyleri kaplanmış ve numunelerin yalnızca alt yüzeyi su yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. 24 saat geçtikten sonra kazıklar tekrar tartılarak su içeriği nedeniyle oluşan kütle artışı ile emilen su miktarı hesaplanabilmektedir.

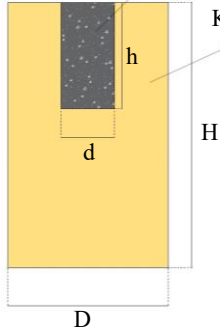


Şekil 1. Karışım hamuru ve geçirimli kazık görselleri



Geçirimli Kazık

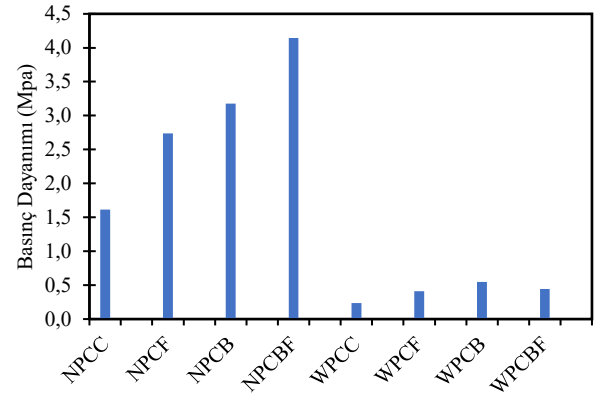
Kohezyonsuz Zemin



Şekil 2. Model yükleme deney seti, sırasıyla, kazık yerleştirilmiş zayıf zemin ortamı, model yükleme deney cihazı, şematik gösterim

Bulgular ve tartışma

İlk aşamada farklı kazıkların basınç dayanımı değerlerini elde etmek üzere 7 günlük kür süresi sonunda geçirimli kazık numuneleri üzerinde basınç dayanım testleri gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonuçlar Şekil 3'te verilmiştir.



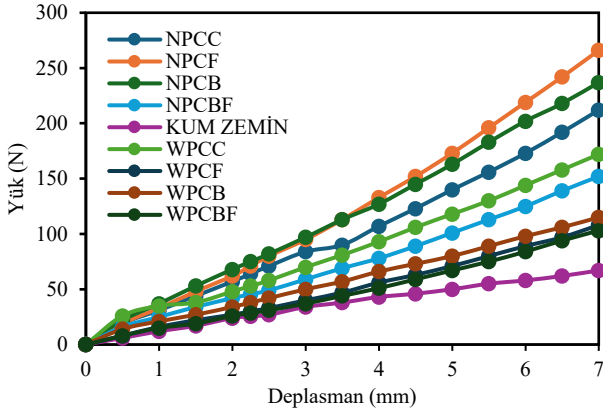
Şekil 3. 7 günlük kür süresinin sonunda geçirimli kazık numunelerin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 3 incelendiğinde, NPCBF'nin (doğal agrega ve %50 YFC ve %50 UK kullanılarak hazırlanan bağlayıcı ile imal edilen kazık) en yüksek 7 günlük basınç dayanımına (4.143 MPa) ulaştığı görülmüştür. Her iki agrega tipinde de UK ve YFC'nin bağlayıcı olarak kullanıldığı geopolimer kazıklarda, çimentoya oranla, daha yüksek basınç dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Bunun nedeninin, uçucu kül daha geç reaksiyona girerken, yüksek fırın cürufunun hızlı reaksiyona girmesi ve dolayısıyla hem erken hem de geç dönemde reaksiyonların devam etmesine neden olması ve iki farklı bağlayıcının CSH jel oluşumunu artırması vasıtasıyla daha yoğun bir matris elde edilebilmesi olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte en düşük basınç dayanımı sonucu ise 0.234 MPa ile WPCC'ye (atık malzeme ve çimento bağlayıcılı kazık) aittir. İYA ile oluşturulan beton kazık numunelerinin basınç dayanımının daha düşük olduğu görülmektedir. İYA karışımlarında agreganın yapısı itibarıyla daha fazla su emmesi nedeniyle, geopolimer yapının oluşmasında rol alacak sıvı miktarını eksilmesine ve daha az sıvının bağlayıcı ile etkileşime girmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca İYA'nın dane dayanımının doğal agregalardan daha düşük olmasının da [21] bu davranışının nedenlerinden biri olduğu düşünülmektedir.

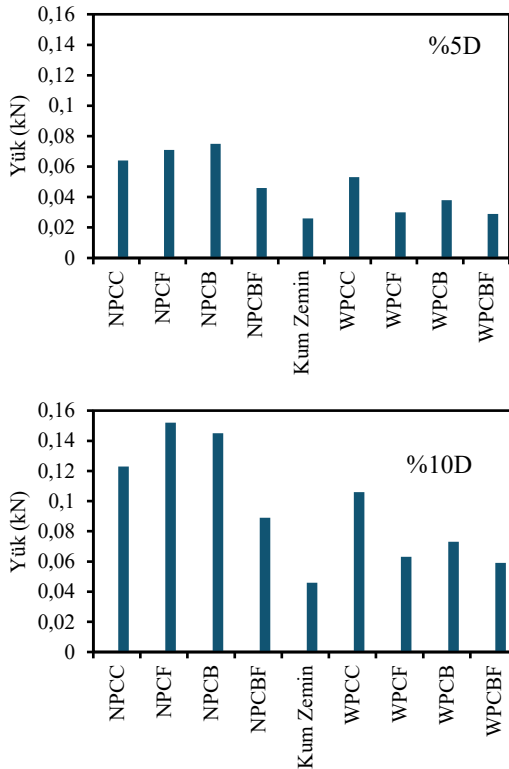
Sonraki aşamada kohezyonsuz zayıf zemine yerleştirilen geçirimli kazıkların yük altındaki davranışını araştırmak üzere model yükleme deney seti ile deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Her deneyde kazıkların üzerinde dairesel model rijit temel yerleştirilmiş ve yük temel üzerine uygulanmıştır. Kazıklar ve model temel, deney tankının merkezine konumlandırılmıştır. Model yükleme deneylerine ait yük deplasman eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. Kazıkların yük-deplasman davranışının değerlendirilmesi için göçme yükü değerleri yük-deplasman eğrisinde kazık çapının (D) %5 ve %10'una denk gelen deplasmana karşılık gelen yük değeri olarak seçilmiştir [2,9,32] ve Şekil 5'te görülmektedir.

Şekil 4-5 değerlendirildiğinde, geçirimli kazıkların güçlendirilmemiş kohezyonsuz zeminin yük altındaki davranışını önemli ölçüde iyileştirdiği görülmektedir. NPCF kullanımında 0.1D deplasmana karşılık gelen yük değerleri değerlendirildiğinde, güçlendirilmemiş zeminin 3.30 katı yük değerleri ölçülmüştür. Aynı bağlayıcıya sahip kazıklardan doğal agrega ile oluşturulan kazıkların İYA ile oluşturulan kazıklara oranla daha yüksek sonuçlar verdiği görülmektedir.

Bunun nedeninin yük altında yanal sınırlamanın kohezyonsuz zeminin gevşek olması nedeniyle düşük olması, İYA agregaların doğal agregalara oranla daha zayıf yapıda olması olduğu düşünülmektedir. Öyle ki, doğal agregalar yapısı daha fazla yük karşılayabilirken, İYA agregalar daha düşük yüklerde bile deforme olabilmektedir.



Şekil 4. Model yükleme deneylerine ait yük-deplasman eğrileri



Şekil 5. %5D ve %10D deplasmana karşılık gelen göçme yükü değerleri

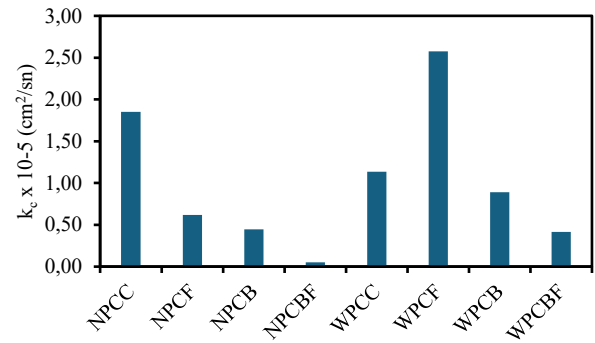
Şekil 5 değerlendirildiğinde, normal agregalar kullanımı ile güçlendirilmemiş zemine oranla NPCC, NPCF, NPCB ve NPCBF için sırasıyla 2.67, 3.30, 3.17 ve 1.93 katı kadar göçme yükü elde edilmiştir. İYA kullanımında ise, güçlendirilmemiş zemine oranla, WPCC, WPCF, WPCB ve WPCBF için sırasıyla, 2.30, 1.37, 1.58 ve 1.28 katı kadar göçme yükü elde edilebilmiştir. Doğal agregalar yapısı itibarıyla İYA'ya kıyasla daha homojen ve rijit yapıdadır. Dolayısıyla doğal agregalar ile hazırlanan numunelerde daha yüksek göçme yükleri elde edilmiştir. Öyle ki %5 D deplasman değeri için

en yüksek değeri NPCB verirken %10 D için NPCF ile en yüksek göçme yükü elde edilmiştir. Her iki deplasman değeri için de NPCB ve NPCF değeri birbirine oldukça yakındır. Ayrıca, geçirimli geopolimer kazıkların geçirimli beton kazıklardan daha yüksek taşıma güçlerine ulaşmasının, geopolimerizasyon sürecinde bağlayıcıların daha yoğun matrisler oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak, doğal agregalar kullanımında İYA kullanımına oranla daha yüksek değerler elde edilse dahi, İYA kullanımı da güçlendirilmemiş zeminin göçme kapasitesini önemli ölçüde arttırmaktadır.

Daha sonra, geçirimli kazıkların geçirimsizlik katsayısını belirlemek üzere su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Su emme katsayısı (k_c) Bağıntı 1 ile hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Şekil 6'da görülmektedir.

$$k_c = \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \times \frac{1}{t} \quad (1)$$

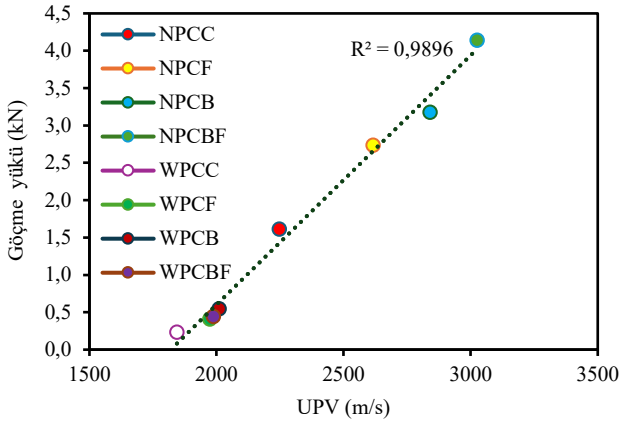
Burada; k_c : Kapiler su emme katsayısı (cm^2/s), Q : t süresi boyunca emilen su miktarı (cm^3), A : Su ile temas eden yüzey alanı (cm^2), t : Geçen süre (s).



Şekil 6. Farklı geçirimli kazıklara ait k_c değerleri

Şekil 6 incelendiğinde, İYA ile imal edilen kazıkların DA ile imal edilen kazıklara nispeten daha fazla su emdikleri görülmüş olup en yüksek kapiler su emme katsayısına sahip kazığın WPCF olduğu görülmektedir. İYA agregalarının homojen yapıda olmaması, İYA danelerinin daha fazla su emme potansiyelinin olması (Tablo 1) ve daha boşluklu olması nedeniyle daha fazla su emdiği düşünülmektedir.

Farklı içeriklerde oluşturulmuş kazıkların sürekliliklerini değerlendirmek üzere UPV deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen darbe hızı deneyleri ve kazıkların göçme yükleri birlikte değerlendirilmiş ve Şekil 7'de verilmiştir. UPV deneylerinde en yüksek hız değeri NPCBF ile elde edilmiş ve basınç dayanımı değerleri de göz önünde bulundurulduğunda yüksek dalga hızına sahip elemanların yüklere karşı da daha dayanıklı olabileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda, elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde boşluk miktarı arttıkça UPV değerlerinin azalmakta olduğu ve boşluk miktarı nedeniyle basınç dayanımlarının da aynı şekilde düşüş yaşadığı görülebilmektedir. Noktalar arasında çizilen eğilim çizgisinin R^2 değeri (0.9896) 1'e çok yakın olup, UPV değerleri ve basınç dayanımlarındaki değişimin tutarlı olduğunu göstermektedir.

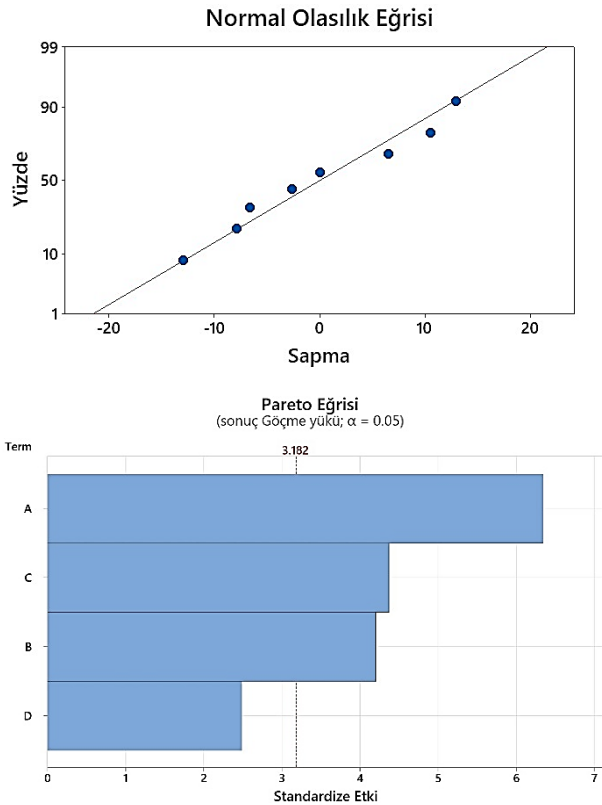


Şekil 7. Farklı geçirimli kazıkların göçme yükü ve ultrasonik darbe hızı değerleri

Farklı parametrelerin göçme yükü üzerindeki etkisini daha detaylı incelemek üzere multi-lineer regresyon gerçekleştirilmiştir. Regresyona ait normal olasılık eğrisi ve Pareto grafiği Şekil 7’de görülmektedir. Gerçekleştirilen regresyona ait R^2 değeri 0.9347 bulunmuş ve regresyon denklemi Denklem 2’de verilmiştir.

$$\text{Göçme yükü} = 145.2 + 30.84 A - 88.2 B - 95.7 C + 59.2D \quad (2)$$

Burada; A: Basınç dayanımı; B: Uçucu kül varlığı; C:Yüksek fırın cürufu varlığı; D: Çimento varlığını ifade etmektedir.



Şekil 7. Regresyona ait normal olasılık eğrisi ve Pareto grafiği

Regresyon denklemi değerlendirildiğinde, göçme yükü üzerinde en fazla etki katsayısının basınç dayanıma ait olduğu görülmektedir. Bu etkiyi uçucu kül ve yüksek fırın cürufu varlığı takip etmektedir.

Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında kohezyonsuz zayıf zemin içerisine yerleştirilen farklı özelliklerdeki geçirimli kazıkların basınç dayanımları, zayıf zemin içerisindeki yük-deformasyon davranışları, su emme katsayıları ve ultrasonik darbe hızlarını belirlemek üzere deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan kazıklarda doğal agrega ve inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen agregalar kullanılarak farklı karışımlar oluşturulmuştur. Bununla beraber, bağlayıcı olarak çimento, uçucu kül, yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu uygulamalarında alkali aktivatör çözeltisi ile geopolimer bir yapı oluşturulmuştur. Farklı özelliklerdeki geçirimli kazıklar üzerinde gerçekleştirilen deneylerin sonuçları değerlendirildiğinde şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. Geçirimli kazık uygulaması ile kohezyonsuz zeminin taşıma kapasitesi önemli ölçüde arttırılabilmektedir. Bu bağlamda geçirimli kazıkların oturma miktarlarını azaltabilmesi, sıvılaşma potansiyellerini engelleyebilmesi ve taşıma kapasitesini arttırabilmesi gibi avantajları sayesinde, derin temel çözümlerinde kullanılabileceği düşünülmektedir.

2. Doğal agrega ile oluşturulan geçirimli kazıkların yük altındaki davranışının İYA agregalarına oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. Doğal agrega homojen bir yapıdayken, İYA agregalar heterojen ve daha zayıf bir dane yapısını sahiptir. Bununla beraber, farklı agregaların farklı su tutma kapasitelerine sahip olması ve karışım su oranları etkilemesi nedeniyle etkileşime giren bağlayıcı miktarlarının önemli ölçüde değiştiği düşünülmektedir. Yine su emme deneylerinden de görüleceği üzere, İYA agrega içerikli karışımların su emme miktarları doğal agrega kullanımına göre daha yüksektir. Ancak, UK ve YFC’nin yarı yarıya kullanımı ile oluşturulan kazıkların ise en düşük emilimi sağladığı görülmüştür. Bunun nedeninin UK+YFC kullanımının daha yoğun bir matris oluşturması olduğu düşünülmektedir.

3. Göçme yükleri karşılaştırıldığında, normal agrega kullanımı ile güçlendirilmemiş zemine kıyasla 3.30 kata ve İYA kullanımında ise 2.30 kata varan göçme yükü elde edilmiştir. Bu bağlamda geçirimli kazık uygulamalarında hem İYA kullanımı hem de doğal agrega kullanımı için önemli derece iyileştirme elde edilebileceği görülmektedir. Elde edilen iyileşme miktarının da bağlayıcı ve agrega türü ile doğrudan ilişkili olduğu da çalışma kapsamında elde edilen sonuçlardan görülmektedir.

4. Geopolimer hamur ile oluşturulan geçirimli kazıkların performansının çimento hamuru ile oluşturulan kazıklara oldukça yakın ve yer yer daha iyi olduğu görülmüştür. Bu bağlamda çimento kullanımının azaltılması ile hem geopolimer içeriğinde kullanılan atıklar ile hem de çimento endüstrisinin çevresel zararının azaltılması ile daha sürdürülebilir sistemler oluşturulabileceği düşünülmektedir. Daha düşük dayanım gereksinimli projelerde İYA tercih edilerek, afetler sonrasında oluşan molozların değerlendirilmesi sağlanabilecektir.

Sınırlamalar

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar özellikleri çalışmada verilen doğal agrega, inşaat yıkıntı atığı, kohezyonsuz zemine has olup tasarımda tek başına kullanılamaz. Çalışmada kazıklar basınç yüküne maruz bırakılmıştır ve deney tankı tarafından zemin çevresi sınırlandırılmıştır. Alkali aktivatörlü karışımın içeriğindeki bileşenlerin özellikleri yine önceki bölümlerde açıklanmış olup elde edilen sonuçlar bu karışım yöntem ve bileşenleri için geçerlidir. Her inşaat mühendisliği projesi için projeye has analizler ilgili yönetmelik ve yönergeler uyarınca gerçekleştirilmelidir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Sarıcı: Yazım- gözden geçirme ve düzenleme, Yazım- orijinal taslak, Doğrulama, Denetim, Yazılım, Kaynaklar, Proje yönetimi, Metodoloji, Araştırma.

Özcan: Yazım- gözden geçirme ve düzenleme, Metodoloji, Biçimsel analiz.

Korkmaz: Doğrulama, Metodoloji, Araştırma

Kaynaklar

- [1] T. Sarici and R. T. Ozcan, "Interpretation of geotechnical risk maps for Malatya province in terms of earthquake sequence on February 6, 2023," *Environ. Earth Sci.*, vol. 84, no. 3, p. 91, 2025.
- [2] A. Demir and B. Ok, "Uplift response of multi-plate helical anchors in cohesive soil," *Geomech. Eng.*, vol. 8, no. 4, 2015.
- [3] R. S. V. Rashma, B. R. Jayalekshmi, and R. Shivashankar, "Liquefaction mitigation potential of improved ground using pervious concrete columns," *Indian Geotech. J.*, vol. 52, no. 1, pp. 205–226, 2022.
- [4] M. T. Suleiman, L. Ni, and A. Raich, "Development of pervious concrete pile ground-improvement alternative and behavior under vertical loading," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 140, no. 7, p. 04014035, 2014.
- [5] T. Munaga, M. M. Khan, and K. K. Gonavaram, "Axial and lateral loading behaviour of pervious concrete pile," *Indian Geotech. J.*, vol. 50, no. 3, pp. 505–513, 2020.
- [6] H. Xia, G. Du, J. Cai, and C. Sun, "Model tests on the bearing capacity of pervious concrete piles in silt and sand," *Geomech. Eng.*, vol. 38, no. 1, pp. 79–91, 2024.
- [7] F. Xu et al., "Influence of aggregate reinforcement treatment on the performance of geopolymer recycled aggregate permeable concrete: From experimental studies to PFC 3D simulations," *Constr. Build. Mater.*, vol. 354, p. 129222, 2022.

- [8] M. Muthu and L. Sadowski, "Performance of permeable concrete mixes based on cement and geopolymer in aggressive aqueous environments," *J. Build. Eng.*, vol. 76, p. 107143, 2023.
- [9] T. Sarici and M. Ozcan, "Using geopolymer coated and uncoated geotextile as a hybrid method to improve uplift capacity of screw piles in cohesionless soil," *Alexandria Eng. J.*, vol. 105, pp. 666–681, 2024.
- [10] A. Yolcu, M. B. Karakoç, E. Ekinci, A. Özcan, and M. A. Sağır, "Effect of binder dosage and the use of waste rubber fiber on the mechanical and durability performance of geopolymer concrete," *J. Build. Eng.*, vol. 61, p. 105162, 2022.
- [11] S. Gupta, A. GuhaRay, A. Kar, and V. P. Komaravolu, "Performance of alkali-activated binder-treated jute geotextile as reinforcement for subgrade stabilization," *Int. J. Geotech. Eng.*, 2021.
- [12] S. Parathi, P. Nagarajan, and S. A. Pallikkara, "Ecofriendly geopolymer concrete: A comprehensive review," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 23, pp. 1701–1713, 2021.
- [13] A. Vásquez, V. Cárdenas, R. A. Robayo, and R. M. De Gutiérrez, "Geopolymer based on concrete demolition waste," *Adv. Powder Technol.*, vol. 27, no. 4, pp. 1173–1179, 2016.
- [14] S. Dadsetan, H. Siad, M. Lachemi, and M. Sahmaran, "Construction and demolition waste in geopolymer concrete technology: a review," *Mag. Concr. Res.*, vol. 71, no. 23, pp. 1232–1252, 2019.
- [15] O. Youssf, D. Safaa Eldin, and A. M. Tahwia, "Eco-Friendly High-Strength Geopolymer Mortar from Construction and Demolition Wastes," *Infrastructures*, vol. 10, no. 4, p. 76, 2025.
- [16] Y. R. V., S. Ganesh Kumar, and G. Santha Kumar, "Sustainable pervious concrete pile for liquefaction and reliquefaction mitigation," *Géotech. Lett.*, vol. 15, no. 1, pp. 32–37, 2025.
- [17] G. Doğdu ve S. N. Alkan, "Deprem Sonrası Oluşan İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Değerlendirilmesi: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri," *Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 38–50, 2023.
- [18] A. Ahmad, U. Khalid, Z. U. Rehman, and M. J. Iqbal, "Reclaimed brick masonry waste recycling in macro-micro amelioration of cemented clayey soil: an eco-friendly construction waste solution," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 27, pp. 1–22, 2025.
- [19] T. Sarici, T. Geckil, B. Ok, and H. S. Aksoy, "An investigation of the usability of alkali-activated blast furnace slag-additive construction demolition waste as filling material," *Materials*, vol. 18, no. 2, p. 398, 2025.
- [20] M. Hussain, H. Zmamou, A. Provost, P. A. H. Romero, A. Mahieu, N. Leblanc, and A. Kane et. al., "Stabilization and recycling of sand in pedestrian walkways," *Buildings*, vol. 14, no. 1, p. 205, 2024.

- [21] T. Sarici, "Puzolan ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atıklarının granüler dolgu olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi," Ph.D. dissertation, Dept. of Civil Eng., İnönü Univ., Malatya, Turkey, 2019.
- [22] *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, ASTM D422-63, ASTM Int'l., 2007.
- [23] *Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*, ASTM D4791-10, ASTM Int'l., 2010.
- [24] *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*, ASTM C131-06, ASTM Int'l., 2010.
- [25] *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, ASTM D854-02, ASTM Int'l., 2002.
- [26] *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*, ASTM C127-24, ASTM Int'l., 2024.
- [27] *Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density*, ASTM D4254, ASTM Int'l., 2017.
- [28] *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*, ASTM D698-12, ASTM Int'l., 2021.
- [29] Ö. Çetkin, "Zemin stabilizasyonunun karayolu üstyapı kalınlığına ve maliyetine etkisi," M.S. thesis, Dept. of Civil Eng., İnönü Univ., Malatya, Turkey, 2022.
- [30] *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*, ASTM C597-16, ASTM International, 2016.
- [31] *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, ASTM-D2487, ASTM Int'l., 2017.
- [32] K. Terzaghi and R. B. Peck, "Soil Mechanics in Engineering Practice", 2nd edition, Wiley Publications, New York, 1967.