

## TAŞ OCAĞI ARTIK MALZEMESİNİN YOL DOLGUSU, ALT VE ÜST TEMEL MALZEMESİ OLARAK UYGUNLUĞUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ

Beyza ÖZULU<sup>1\*</sup>, Gökhan ÇEVİKBİLEN<sup>2</sup>, Berrak TEYMÜR<sup>3</sup>

- <sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sarıyer, 34469, İstanbul, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-4627-9003>
- <sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sarıyer, 34469, İstanbul, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-5444-1387>
- <sup>3</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sarıyer, 34469, İstanbul, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-8290-5337>

Anahtar Kelimeler	Öz
Kompaksiyon enerjisi Taş ocağı artığı Faydalı kullanım	<i>Türkiye’de kentsel dönüşüm projeleri için agrega ihtiyacı, özellikle büyük şehirlerdeki sınırlı sayıdaki ocak sahalarında efektif alan ve kaynak kullanımını gerektirmektedir. Bu çalışmada, İstanbul’da bir taş ocağından kırmataş üretimi sonrası açığa çıkan artık malzemenin yol kesimlerinde kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Kaba dane oranı KDO %75-51 arasında olan malzeme siltli kum (SM) sınıfındadır. Standart enerji SE (600 kN-m/m<sup>3</sup>) ve modifiye edilmiş ME enerjisinde (2700 kN-m/m<sup>3</sup>) belirlenen optimum su içeriği (<math>w_{opt}</math>) değerleri, plastik olmayan artık numunelerindeki sınırlı kil fraksiyonu nedeniyle sırasıyla %11 ve %8 ile sınırlı kaldığı gözlenmiştir. Buna göre KDO ile doğru orantılı olarak artan ıslatılmış CBR değerleri SE’de %9-16, ME’de %45-67 arasında değişmektedir. <math>D_{10}</math> efektif çapı ile doğru orantılı olarak artan geçirgenlik değerleri SE’de <math>2,2 \times 10^{-6}</math> - <math>5,0 \times 10^{-6}</math> m/s ve ME’de <math>1,2 \times 10^{-6}</math> - <math>3,7 \times 10^{-6}</math> m/s’dir. Direk kesme kutusu testlerinde kohezyon (c) değerleri ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiş ve iç sürtünme açısı (<math>\phi</math>) sıkıştırma enerjisiyle orantılı olarak artmıştır. KDO ile doğru orantılı olarak artan <math>\phi</math> değeri SE’de 38-40°, ME’de 43-47° arasında değişmektedir. Sonuç olarak, incelenen ocak artığının ince dane oranının sınırlandırılmasının yol dolgu ve temel altı uygulamalarında kullanılabilirliğini sağlayacağı öngörülmektedir.</i>

## EVALUATION OF THE SUITABILITY OF ROCK QUARRY RESIDUE AS ROAD FILL, SUBGRADE AND SUBBASE MATERIAL

Keywords	Abstract
Compaction energy Quarry residue Beneficial use	<i>The need for aggregates, due to urban transformation projects in Türkiye, requires optimization of space and resource use, especially at the limited number of quarry sites in big cities. In this study, the usability of the residue material, which is released after the production of crushed stone from a quarry in Istanbul, in road sections is evaluated. The material whose coarse grain fraction CGF is between 75 and 51% in silty sand (SM) soil type. Optimum water content (<math>w_{opt}</math>) values determined at standard energy, SE (600 kN-m/m<sup>3</sup>) and modified energy ME (2700 kN-m/m<sup>3</sup>), was observed as 11% and 8% respectively due to the limited clay fraction in the non-plastic residue samples. Accordingly, soaked CBR values which increase in direct proportion to CGF range between 9-16% in SE and 45-67% in ME. The permeability values that increase in direct proportion to <math>D_{10}</math> effective diameter are <math>2.2 \times 10^{-6}</math> - <math>5.0 \times 10^{-6}</math> m/s in SE and <math>1.2 \times 10^{-6}</math> - <math>3.7 \times 10^{-6}</math> m/s in ME. In direct shear box tests, the cohesion (c) values were negligible and the internal friction angle (<math>\phi</math>) increased in proportion to the compression energy. The <math>\phi</math> value, which increases in direct proportion to the CGF, ranges between 38-40° in SE and 43-47° in ME. As a result, it has been predicted that limiting the fine grain ratio of the quarry residue examined will ensure its usability in road fill and sub-base applications.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 14.01.2023

Submission Date : 14.01.2023

Kabul Tarihi : 09.05.2023

Accepted Date : 09.05.2023

\* Sorumlu yazar: [ozulu@itu.edu.tr](mailto:ozulu@itu.edu.tr)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1232294>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Giriş

Dünyada gelişmekte olan sanayileşme ve teknoloji ile birlikte enerji ve hammadde ihtiyacındaki artış, çeşitli çevresel kaynaklardan yararlanma zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Sanayileşme ve teknoloji gelişimine ek olarak, nüfus artışının hız kazanması da alternatif kaynak arayışına sebep olmaktadır (Menteşe ve Böbrek, 2020). Madencilik, dünyadaki bu hammadde/enerji eksikliğine ve mineral kaynağına olan taleplere çözüm olabilecek en önemli ekonomik faaliyetlerden biridir. Ancak, kazı işlemi gibi fiziksel uygulamalar sonucunda mineral/element elde edilmesinin yanı sıra ciddi miktarlarda sıyırma malzemeleri olarak adlandırabileceğimiz artık malzeme açığa çıkmaktadır. Ayrıca, madencilik faaliyetlerinde mineral veya cevher çıkarımı sırasında çevre açısından risk teşkil edebilecek çeşitli kimyasal atıklar oluşmaktadır.

Açık ocak madenciliğinden biri olan taş ocağı işletmeciliğinde amaç; kaya, çakıl, kum ve çeşitli minerallerin üzerini kaplayan örtü tabakasının kazılarak kaldırılması ve hedef madenin çıkarılmasıdır. Ancak, yapılan kazılar sonucunda zemin esaslı maden artık malzemeleri ortaya çıkmakta ve bu malzemelerin maden sahasından uzaklaştırılması gerekmektedir (Salomons, 1995). Bunlara ek olarak, taş ocağı işletmeciliğinde kullanılan su, kazılar sonucunda önemli ölçüde atık su oluşumuna neden olmaktadır. Çünkü madencilik faaliyetlerinde rezerv belirleme için yapılan sondaj işlemlerinde küçük boyuttaki malzemelerin uzaklaştırılması, kullanılan makinelerin kazıcı/delici uçlarının soğutulması ve tozumanın engellenmesi amacıyla su kullanılmaktadır (Ediz, Sunay ve Yuvka, 2001).

Taş ocağı işletmeciliğinde ortaya çıkan önemli miktarlardaki maden artık malzemeleri ve atık su, mineral çıkarımı yapılan alanın yakınında yer alan maden gölünde depolanmaktadır (US Environmental Protection Agency, 1994). En ekonomik ve yaygın bertaraf yöntemlerinden biri olarak artık malzemelerin depolanması tercih edilmektedir. Depolama yöntemine ek olarak, kaba daneli maden artık malzemesi dolgu baraj yapımında kullanılabilirken ince daneli olanlar ise maden gölü tabanında geçirimsiz bir tabaka oluşturmak amaçlı değerlendirilebilmektedir. Kaba ve ince daneli maden artık malzemelerinin bu şekilde kullanımı ekonomik ve uzun süreli bir işleyiş sağlarken belirlenen tasarım parametreleri doğrultusunda dolgu barajın stabilitesinin sağlanması büyük bir öneme sahiptir. Ekonomik ve uzun süreli bir işletim imkânı vermesine rağmen tüm maden sahaları için uygun olmayan bu yöntemin mühendislik açısından olumsuz etkileri de olabilmektedir. Maden gölünde biriktirilen atık suyun dolgu barajdan sızarak kaymaya ve çevresel felaketlere sebep olması ve ince daneli malzemenin rüzgâr gibi çevresel etkilerle yayılarak kirliliğe neden

olması, sürdürülebilirlik ve yapısal stabilitenin sağlanması açısından olumsuz etkiler oluşturmaktadır (US Environmental Protection Agency, 1994). Buna bağlı olarak, maden gölünde biriktirilen artık malzemelerin miktarının azaltılması ve dolgu barajın stabilite problemlerinin önlenmesi amacıyla kıyı koruma yapılarında ve altyapı projelerinde bu malzemeler değerlendirilebilmektedir.

Ülkemizde kentsel dönüşüm projeleri ile inşaat faaliyetleri için ortaya çıkan doğal agrega ihtiyacı, büyük şehirlerde sınırlı sayıda kalan taş ocaklarında yer ve kaynak kullanımını optimize etmeyi gerektirmektedir. İstanbul özelinde gerçekleştirilen önceki çalışmalarda maden artığının geotekstil tüp gibi yöntemlerle susuzlaştırılarak faydalı kullanıma yönlendirilmesinin atık havuz alanı ihtiyacını azaltacağı ifade edilmektedir (Karadoğan, 2021). Karadoğan vd. (2022) tarafından geotekstil tüp içerisinde ince dane tutabilme oranının poliakrilamid katkısı kullanımı ile artırıldığı gösterilen çalışmada artık malzemenin dane çapı dağılımının %53 kaba dane ile sınırlı kaldığı gözlenmiştir. Bu çalışmada, aynı taş ocağında atık havuzuna yönlendirilen malzemenin, nakil boru hattından temin edilen daha çok sayıda numune üzerinde yapılan elek ve hidrometre analizleri ile kaba dane oranının %75 seviyelerine kadar ulaşabildiği gözlenmiştir. Bu bakımdan plastik davranış göstermeyen siltli kum sınıfına giren artık malzemenin, Karayolları Teknik Şartnamesine (KTŞ, 2013) göre yol dolgusu, alt ve üst temel malzemesi olarak uygunlukları araştırılmıştır. Bu kapsamda, ince dane oranı en az ve en çok olan iki numuneye odaklanılmış, standart ve modifiye enerjide sıkışma kapasiteleri kompaksiyon deneyleriyle belirlenen numunelerin, maksimum birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevasında sıkıştırılmaları sonrası mekanik ve hidrolik özellikler, ilgili şartname koşulları uyarınca değerlendirilmiştir. Bu amaçla CBR, direkt kesme kutusu ve düşen seviyeli permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiş, sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

## 2. Malzeme ve Yöntem

### 2.1. Malzeme

Bu çalışmada, İstanbul'da yer alan bir taş ocağı açık maden işletmeciliği sonucunda ortaya çıkan ve maden gölüne depolanan artık malzeme kullanılmıştır. Bu amaçla, göl deşarj hattından alınan numuneler 15 dm<sup>3</sup> hacimli plastik saklama kaplarında muhafaza edilmiştir. Kimyasal olarak herhangi bir işlem görmemiş olan taş ocağı artığının başlıca ağırlıkça kimyasal bileşenleri; C (%5.42), O (%36.35), F (%1.07), Na (%0.83), Mg (%4.75), Al(%13.21), Si (%24.84), K (%1.73), Ca (%0.68) ve Fe (%11.12)'dir (Karadoğan, Çevikbilen, Korkut ve Teymur, 2022). Mineralojik açıdan %84-88 kuvars, %5-7 feldspat ve kalsit, %1'den düşük mika ve opak mineral içeren numune

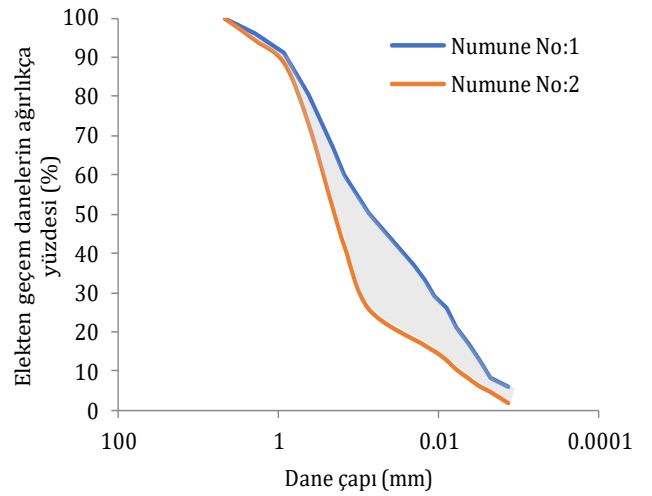
kumtaşıdır. TS 2517 standartına göre kırma kum fraksiyonunda çözünen  $\text{SiO}_2$  27 milimol/litre ve alkali agrega azalması 79 mmol/litre belirlenmiş artık malzemenin zararsız agrega bölgelerinde kaldığı değerlendirilmiştir. Numunelerde, herhangi bir organik içerik gözlenmemiş, çalışmada  $105^\circ\text{C}$  etüvde kurutulan numuneler kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Taş ocağı artık malzemesi

Artık malzemedeki değişkenliği ortaya koymak amacıyla sahadan alınan numunelerden seçilen 6 adet numune ayrı ayrı kurutularak endeks özellikleri belirlenmiştir. Bu kapsamda, ASTM D6913 ve ASTM D7928 standartlarına uygun olarak, sırasıyla elek ve hidrometre analizleri yapılmıştır. Dane çapı dağılım eğrileri çizilen numunelerin Şekil 2'de verilen taralı bölge ile temsil edildiği, kaba dane oranının %75 ile 51 arasında olduğu ve kil yüzdesinin %4 -8 arasında sınırlı

kaldığı belirlenmiştir. ASTM D4318 standardı baz alınarak gerçekleştirilen kıvam limitleri deneylerine göre incelenen numuneler plastik davranış göstermemiştir. ASTM D2487 standardında yer alan Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) uyarınca taş ocağı artığı SM (siltli kum) olarak sınıflandırılmıştır. AASHTO M145 ve ASTM D3282 sınıflandırma sistemine göre ise artığın içerisindeki ince dane oranı bakımından çoktan aza doğru A-4 veya A-2-4 sınıfına girmiştir. ASTM D854 standardına göre piknometre testi yapılmış danelerin ortalama özgül ağırlık değeri 2.77 hesaplanmıştır. Numunelere ait endeks özelliklerindeki değişim Tablo 1'de kaba dane oranı en düşük ve en yüksek olanları ile özetlenmiştir.



Şekil 2. Dane boyutu dağılım eğrilerinin değişim aralığı

Tablo 1. Seçilen Taş Ocağı Maden Artığı Numunelerinin Zemin Endeks Özellikleri

Testler	Parametreler	Numune No: 1 (NN1)	Numune No :2 (NN2)	Test Metodu
Dane Çapı Dağılımı	Çakıl (%)	1	0	ASTM D6913
	Kum (%)	50	75	ASTM D6913
	Silt (%)	41	21	ASTM D7928
	Kil (%)	8	4	ASTM D7928
	$D_{10}$	0.003	0.01	
	$D_{30}$	0.011	0.09	
	$D_{60}$	0.15	0.25	ASTM D6913
	$C_u$	50	25	& ASTM D7928
	$C_c$	0.27	3.24	
Kıvam Limitleri	Likit Limit (LL)			
	Plastik Limit (PL)	Plastik değil	Plastik değil	ASTM D4318
Özgül Ağırlık	$G_s$	2.78	2.76	ASTM D854
Zemin Sınıfı (USCS)	-	SM	SM	ASTM D2487
Zemin Sınıfı (AASHTO)	-	A-4	A-2-4	AASHTO M145

## 2.2. Yöntem

Belirlenen maden sahasından elde edilen taş ocağı artık malzemesinin yol dolgusu, alt ve üst temel malzemesi olarak uygunluğunun değerlendirilebilmesi amacıyla iki farklı enerji altında sıkıştırılabilirliği incelenmiştir. Her iki enerji altında da sıkıştırılmış artık malzemelerin mekanik ve hidrolik davranışlarını belirlemek için laboratuvar deneyleri yapılmıştır.

ASTM D698 ve ASTM D1557 standartlarına uygun olarak, 600 kN-m/m<sup>3</sup> standart ve 2700 kN-m/m<sup>3</sup> modifiye olmak üzere iki farklı sıkıştırma enerjisinin kullanıldığı kompaksiyon deneylerinde en az 5 farklı su muhtevasında çalışılmıştır. İlk su muhtevası için belirlenen su miktarı ile ıslatılan numuneler homojen bir nem dağılımı için bir gece boyunca üzeri kapalı bir şekilde bekletilmesinin ardından kullanılmıştır.

Sıkıştırılmış taş ocağı artık malzemesinin potansiyel mukavemetini belirlemek, alt temel veya temel tabakası olarak uygunluğunu değerlendirmek amacıyla yaş CBR deneyi ASTM D1883 standartına göre yapılmıştır. Optimum su muhtevasında 600 kN-m/m<sup>3</sup> standart ve 2700 kN-m/m<sup>3</sup> modifiye sıkıştırma enerjisi altında artık numuneleri CBR kalıbına sıkıştırılmıştır. Numuneler en az bir hafta süre ile 4.5 kg'lık sürşarj yükü altında, su içerisinde bekletilerek şişme davranışları düşey mikrometrelerle takip edilmiştir. Bu aşamadan sonra CBR testi yapılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. CBR deneyi

Düşen seviyeli permeabilite deneyi (ASTM D2434) için önceden belirlenen optimum su muhtevasında hazırlanan artık numuneleri kullanılmıştır. Rijit duvarlı permeabilite deney düzeneğinde 11.6 cm yükseklik ve 10 cm iç çaplı kalıp içerisinde numuneler standart veya modifiye kompaksiyon enerjisi altında sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Kalıbın üst ve alt kapakları ile numune yüzeyi arasına numune sürüklemeyi engellemek için oldukça geçirgen filtre malzemesi konulmuştur. Kapak ile boru hatlarında bulunan hava kabarcıkları, vakum kullanılarak uzaklaştırılmış ve numune, içerisinden aşağıdan yukarıya doğru su geçirilerek doyurulmuştur. Doyurma sonrası numunede yukarıdan aşağı doğru

kararlı bir su akışı sağlandıktan sonra deneye başlanmış, başlangıç ve son durumundaki su yükseklikleri arasındaki fark zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Deney, numune içerisinden 50 ml'lik su geçişi sonrasında sonlandırılmıştır. Her numune için deney en az iki kez tekrarlanmıştır.

Kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi amacıyla ASTM D3080 standardı uyarınca, direkt kesme deneyleri yapılmıştır (Şekil 4). Optimum su muhtevasında standart veya modifiye enerji altında 10.0 cm yükseklik ve 11.6 cm iç çaplı kalıpta sıkıştırılan numunelerden çelik ring batırılarak 6 cm x 6 cm kesit alanlı ve 2 cm yükseklikli deney numuneleri çıkarılmıştır. Deney hücresine yerleştirilen numunelerde deney boyunca drenaj üst ve alt başlıklardan sağlanmış, ilk yüklemenin hemen ardından deney hücresine su doldurulmuştur. Numuneler deneyin yapılacağı 100, 200 veya 300 kPa normal gerilme altında en az 24 saat süreyle konsolide edilmiştir. Düşey deformasyon ölçümlerine göre birincil konsolidasyonunu tamamlayan numuneler üzerinde 0.12 mm/dk hızında kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan yatay ve düşey yer değiştirme ile kesme kuvvetleri değerleri, yatay yer değiştirmeye bağlı olarak kaydedilmiştir.



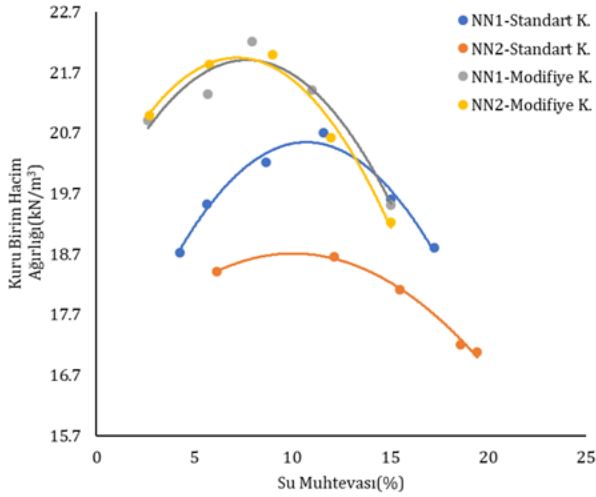
Şekil 4. Direk kesme kutusu deneyi

## 3. Bulgular

Taş ocağı maden gölünde biriktirilen artık malzemelerin kimyasal test analizlerinde çevre için zararlı olabilecek herhangi bir kirletici maddeye rastlanmamıştır. Buna göre taş ocağı artık malzemesinin herhangi bir ek işlem görmeden toprak işlerinde zemin esaslı dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Artık malzemenin plastik davranış göstermediği ve siltli kum (SM) zemin sınıfında olduğu belirlenmiştir. Amerikan Karayolları Sınıflandırma Sistemi'ne göre NN1 için A-4 olan zemin sınıfı, NN2 için A-2-4 sınıfındadır. Buna göre, artık malzeme içerisindeki ince dane oranının %49'dan 25'e azalması AASHTO'nun genel derecelendirilmesine göre alt temel olarak uygunluk seviyesini orta düzeyden iyiye yükseltmektedir.

Artık malzemenin sıkışma kapasitesinin araştırıldığı deneylerde standart ve modifiye sıkıştırma enerjisi altında oluşan su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık

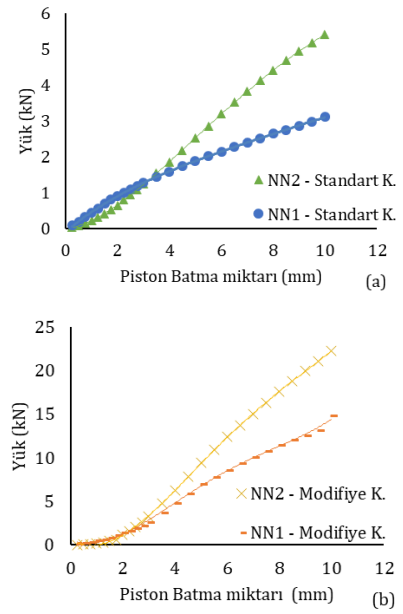
arasındaki ilişki NN1 ve NN2 numuneleri için Şekil 5'te verilmiştir. Buna göre belirlenen  $w_{opt}$  ve  $\gamma_{k maks}$  değerleri Tablo 2'de özetlenmiştir. Önceki çalışmalara göre ince dane oranı yüksek, killi numunelerde optimum su muhtevasının kaba daneli zeminlere göre daha yüksek olması beklenmektedir. Bu çalışmada standart veya modifiye enerjide sıkıştırılan numunelerde  $w_{opt}$  değerleri ince dane oranına göre değişkenlik göstermemiştir. Bunun nedeni ince dane içerisindeki kil yüzdesinin %4-8 aralığında sınırlı kalmasıdır. Deneylerde sıkıştırma enerjisinin artmasıyla  $w_{opt}$  değeri beklenildiği gibi %11'den %8'e düşmüştür. Dane çapı dağılımına göre numunelerin daha iyi derecelendirilmesi,  $\gamma_{k maks}$  değerini standart enerjide 18.6'dan 20.6 kN/m<sup>3</sup>'e artırırken, modifiye enerjide sıkıştırılan numunelerde  $\gamma_{k maks}$  değerinde 22.0'den - 22.2 kN/m<sup>3</sup>'e artış bulunmuş ve derecelendirmenin olumlu etkisinin sınırlı kaldığı gözlenmiştir (Tablo 2).



Şekil 5. NN1 ve NN2 numunelerine ait standart ve modifiye enerji altındaki sıkıştırma eğrileri

Optimum su muhtevasında standart veya modifiye enerji altında sıkıştırılarak hazırlanan NN1 ve NN2 numunelerinin yaş CBR deneyleri yapılmıştır. Yaş CBR

deneyi öncesi şişme davranışı gözlenmemiştir. Deneyde elde edilen yük-batma miktarı eğrileri Şekil 6'da verilmiştir. Deneyler sonucunda standart ve modifiye enerji ile sıkıştırılan NN1 numunesinin CBR değerleri sırasıyla %9 ve 45 olarak hesaplanmış, NN2 numunesi için ise bu değerler %16 ve 67 olarak belirlenmiştir. CBR deneylerine ait veriler Tablo 2'de özetlenmiştir. Buna göre, artık malzemedeki kaba dane oranıyla doğru orantılı olarak yaş CBR değerlerinin arttığı, sıkıştırma enerjisinin standarttan modifiye artırılması ile NN1 ve NN2 numunelerinde CBR değerlerinin sırasıyla yaklaşık 5 ve 4 kat iyileştiği gözlenmiştir.



Şekil 6. CBR deney verilerinin a) Standart ve b) Modifiye sıkıştırma enerjisiyle hazırlanan numunede gösterimi

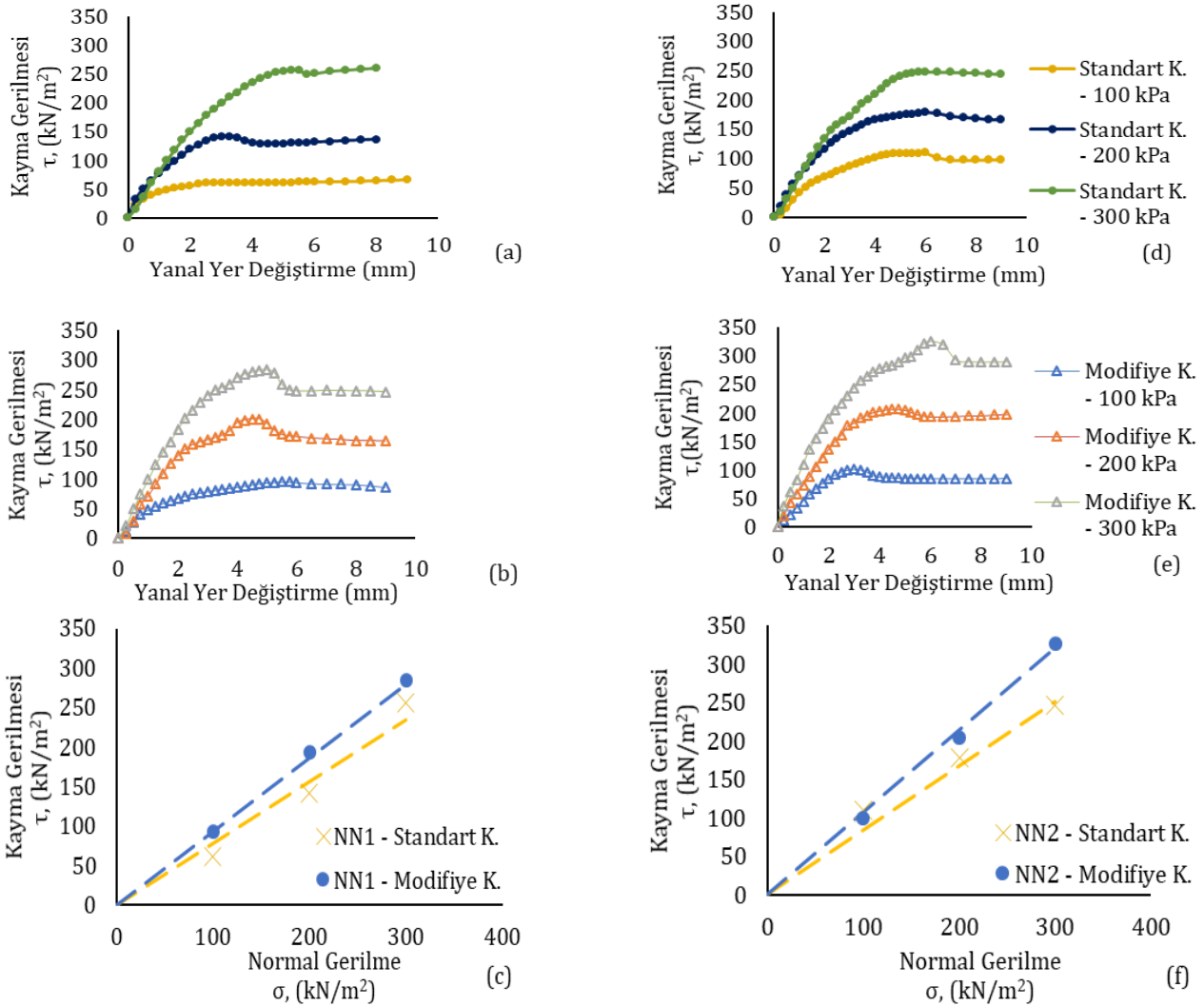
Tablo 2. Seçilen Taş Ocağı Maden Artığı Numunelerinin Mekanik ve Hidrolik Özellikleri

Testler	Parametreler	NN1		NN2		Test Metodu
		Standart	Modifiye	Standart	Modifiye	
Sıkıştırma potansiyeli	Optimum su muhtevası, $w_{opt}$ (%)	11	8	10	7.6	ASTM D698 / ASTM D1557
	Maksimum kuru birim hacim ağırlık $\gamma_{k maks}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20.6	22.2	18.6	22.0	
CBR	Şişme yüzdesi (%)	-	-	-	-	ASTM D1883
	CBR (%)	9	45	16	67	
Hidrolik iletkenlik	Permeabilite katsayısı, k(m/s)	$2.2 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-6}$	$3.7 \times 10^{-6}$	ASTM D2434
Kayma mukavemeti	Kohezyon, c (kN/m <sup>2</sup> )	-	-	-	-	ASTM D3080
	Kayma mukavemeti açısı, $\phi$ (°)	38	43	40	47	

İnce dane oranı ve enerji değişimi ile birlikte NN1 ve NN2 taş ocağı artık malzemelerinin permeabilite katsayılarının ( $k$ ) belirlenebilmesi için düşen seviyeli permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, standart ve modifiye enerji altında hazırlanan NN1 numunesinin  $k$  değerleri sırasıyla  $2.2 \times 10^{-6}$  ve  $1.2 \times 10^{-6}$  m/s olarak bulunmuştur. Aynı koşullar altında sıkıştırılan NN2 numunesi için ise  $k$  sırasıyla  $5 \times 10^{-6}$  ve  $3.7 \times 10^{-6}$  m/s değerlerini almıştır (Tablo 2). Önceki çalışmalarda çoğunlukla permeabilite ile ilişkilendirilen D10 efektif çap değeri baz alındığında, bu çalışmada da elde edilen  $k$  değerleri D10 ile doğru orantılı olarak büyümüştür. Standart enerjide sıkıştırılan numunelerde belirlenen  $k$  değerlerinin, sıkıştırma işleminde modifiye enerjinin kullanılması ile NN1 ve NN2 için sırasıyla %46 ve 25 oranında azalmıştır. Buna göre,  $k$  değerinin

düşürülmesi amacıyla sıkıştırma enerjisinin artırılması ince dane içeriği fazla olan numunede daha etkili olmuştur.

Zeminlerin geoteknik mühendisliği açısından değerlendirilebilmesi için önemli bir yere sahip olan kayma mukavemet parametreleri, direkt kesme deneyi ile belirlenebilmektedir. Bu deneyler sonucunda zemin numunelerinin içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) ve kohezyon ( $c$ ) değerleri elde edilmektedir (Reddy, 2002). Standart ve modifiye enerji ile sıkıştırılan NN1 ve NN2 numunelerinin direkt kesme deneyleri sonucunda, elde edilen kayma gerilmesi ( $\tau$ ) - yanal yer değiştirme ( $\Delta l$ ) ilişkisini gösteren grafikler Şekil 7'de verilmiştir. Mohr Coulomb kırılma kriterine göre kohezyon değerlerinin ihmal edilebilir olduğu tespit edilmiştir. NN1 zemin numunesinin standart kompaksiyon enerjisi için içsel sürtünme açısı  $38^\circ$  iken, modifiye kompaksiyon enerjisi



Şekil 7. NN1 ve NN2 numunelerinin kesme kutusu deney verileri a) NN1 Standart sıkıştırma enerjisinde b) NN1 Modifiye sıkıştırma enerjisinde c) Standart ve Modifiye sıkılıktaki NN1 numunelerinin  $\sigma$ - $\tau$  grafikleri d) NN2 Standart sıkıştırma enerjisinde e) NN2 Modifiye sıkıştırma enerjisinde f) Standart ve Modifiye sıkılıktaki NN2 numunelerinin  $\sigma$ - $\tau$  grafikleri

için bu değer  $43^\circ$  olarak belirlenmiştir. Aynı şartlarda hazırlanan NN2 numunesinin içsel sürtünme açısı, enerjinin artmasıyla birlikte  $40^\circ$  den  $47^\circ$  ye yükselmiştir (Tablo 2). Direkt kesme kutusu deneylerinde ince dane oranının büyük çoğunluğunun silt dane boyutunda olması sebebiyle c değerinde bir değişim gözlenmezken, kaba dane oranıyla doğru orantılı olarak  $\phi$  değeri standart enerjide  $2^\circ$ , modifiye enerjide  $4^\circ$  lik bir artış göstermiştir.

#### 4. Tartışma

Açık maden ocağı işletmelerinden biri olan taş ocakları, kimyasal işlem görmemiş zemin esaslı artık malzemeler üretmektedir. Günümüzde bu tür artık malzemeler, inşaat ve geoteknik mühendisliği projelerinde kullanım alanı bulmaktadır. Ancak, bu tür artık malzemelerin faydalı kullanım alanlarının belirlenmesi için bir dizi ön araştırmaya ihtiyaç vardır. Bu amaçla sahadan alınan numunelerin endeks ve mühendislik özelliklerinin zemin mekaniği laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi toprak işi uygulamaları için gereklidir. Bu çalışma kapsamında, İstanbul'da yer alan bir taş ocağından temin edilen maden artık malzemelerinin öngörüldüğü üzere kimyasal madde içermediği tespit edilmiştir. Maden sahasından çıkarılan temsili artık malzeme örnekleri üzerinde dane boyutu dağılım analizleri sonucunda SM zemin sınıfında olduğu ancak ince dane oranının %25-49 arasında değiştiği gözlenmiştir.

Sahadaki ince dane oranı değişkenliğinin mühendislik parametrelerine yansımaları değerlendirilebilir. Amacıyla iki sınır değerli numune ile de çalışılması uygun bulunmuştur. Gerek zeminin taşıma gücünün artırılması gerekse hidrolik iletkenliğinin düşürülmesi amacıyla dolgu imalatlarında zemine katkı ekleyerek iyileştirme yöntemi yerine uygulanan sıkıştırma enerjisinin artırılması daha ekonomik ve çevre dostu bir çözüm olabilmektedir. Bu yüzden, seçilen her iki artık malzemesi üzerinde de standart ve modifiye sıkıştırma enerjileri altında artık malzemenin mekanik ve hidrolik davranışı modellenmiş sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

KTŞ'ye göre dolgu malzemesi olarak kullanılması planlanan zemin numunesinin  $LL < 60\%$  ve  $PI \leq 35\%$  şartlarını sağlaması beklenmektedir. Yapılan kıvam limitleri deneyleri sonucunda her iki tür zemin numunesinin de plastik davranış göstermediği ve şartları sağladığı görülmektedir. Karadoğan, Çevikbilen ve Teymur (2020)' nin çalışmasında bahsedildiği üzere, SM zemin sınıfına ait maden artık malzemelerinin dolgu malzemesi olarak kullanımı uygundur. Bununla birlikte, KTŞ' de yer alan dolgu malzemesi olarak kullanım şartlarına göre standart kompaksiyon deneyi sonucunda zemin numunesinin  $\gamma_{kmax} \geq 14.5 \text{ kN/m}^3$  şartını sağlaması gerekmektedir. Gerçekleştirilen standart ve modifiye kompaksiyon deneylerinde

enerjinin artırılması ile birlikte maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artış görülürken su muhtevası değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. En iyi sıkıştırma potansiyeline sahip zemin numuneleri modifiye sıklıkta hazırlanan NN1 ve NN2 numuneleridir ve tüm numuneler KTŞ' de belirtilen maksimum kuru birim hacim ağırlık şartını sağlamaktadır.

Yol ve altyapı inşaatlarında kullanım kriterlerine bağlı olarak, belirli bir kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılan zeminlerin şişme potansiyellerinin ve yaş CBR değerlerinin KTŞ' de belirtilen şartları sağlaması gerekmektedir. Standart ve modifiye enerjide sıkıştırılan NN1 ve NN2 numunelerinin, dolgu malzemesi için gerekli olan %3' ten daha az şişme potansiyeline sahip olma şartını sağladığı tespit edilmiştir. Ancak, standart enerjide sıkıştırılan NN1 numunesinin KTŞ' de yer alan ve CBR değerinin %10' nun altında olması durumunda zayıf zemin olarak nitelendirilmesinden dolayı dolgu malzemesi olarak kullanılamayacağı anlaşılmıştır. Buna bağlı olarak literatürde yer alan geotüp ile susuzlaştırma işlemine maruz bırakılan ilgili malzemenin % 53 kaba dane oranlı fraksiyonu üzerinde yapılan deneyler sonucunda CBR değerinin %8 olduğu ve bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlarla paralellik gösterdiği belirlenmiştir (Karadoğan, 2021). Standart enerjide sıkıştırılan NN2 numunesi ise dolgular için gerekli olan  $CBR \geq 15$  şartını sağlamaktadır. Modifiye sıklıktaki NN1 zemin numunesi üstyapı taban malzemesi için gerekli olan  $CBR \geq 20$  şartı sağlarken aynı sıklıktaki NN2 numunesi alt temel kullanım kriteri olan  $CBR \geq 50$  koşulunu sağlayıp en yüksek CBR değerine sahiptir.

Dolgu yapılarında stabilite ve oturma problemlerine yol açan en önemli faktörlerden biri dolgu gövdesinden veya temel zemini içinden gerçekleşen sızma problemidir. Meydana gelen bu sızma problemi, dolguyu oluşturan zemin danelerini sürükleyerek borulanmaya ve hatta yapının yıkımına yol açabilmektedir (Mesci, 2006). Bu aşamada, oturma ve stabilite problemlerinin engellenebilmesi için permeabilite deneylerinden yararlanılmaktadır. Galvão, Almeida, Póvoas ve Basto (2016),  $10^{-5}$  ve  $10^{-7}$  m/s değerleri arasında yer alan permeabilite katsayısına sahip zemin numunelerinin düşük geçirgenlik özelliği gösterdiğini belirtmektedir. Modifiye sıklıkta hazırlanan NN1 ve NN2 numunelerinin standart sıklıktaki numunelere göre daha düşük permeabilite katsayısına sahip olduğu ve modifiye sıklıktaki NN1 numunesinin en düşük geçirgenliği gösterdiği belirlenmiştir. Daha önce bahsedilen permeabilite katsayısı kriterine göre standart ve modifiye sıklıkta hazırlanan tüm zemin numunelerinin, dolgu malzemesi olabileceği, ancak maden gölü taban zemininde vb. geçirimsizlik tabakası olarak kullanılması için gerekli olan  $k=10^{-9}$  m/s değerine sahip olmadığı anlaşılmıştır.

Maden artık malzemesinin kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi için, konsolidasyonlu ve drenajlı koşullarda kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her iki sıklıkta hazırlanan NN1 ve NN2 numunelerinin tamamı kohezyonsuz zemin özelliği gösterirken en yüksek içsel sürtünme açısı değerine sahip artık malzeme modifiye sıklıktaki NN2 numunesidir. Kaba dane oranı fazla olan NN2 numunelerinde, enerjinin etkisinden bağımsız olarak daha yüksek içsel sürtünme açısı elde edilmiştir.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, İstanbul'daki bir taş ocağında yer alan maden gölünde biriktirilen maden artık malzemesi üzerinde bir dizi laboratuvar deneyi gerçekleştirilerek kompaksiyon enerjisi değişiminin bu zemin numunelerinin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi ve buna bağlı olarak geoteknik mühendisliği açısından uygulama alanları değerlendirilmiştir. Yürütülen deneyler sonucunda elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- Temin edilen artık numuneleri üzerinde yapılan dane boyutu dağılım analizleri sonucunda maden artık malzemelerinin ince dane oranı değerleri %25 (NN2) ile %49 (NN1) arasında değişkenlik göstermekte ve numuneler siltli kum (SM) zemin sınıfında yer almaktadır.
- Yapılan kıvam limitleri deneyleri doğrultusunda, NN1 ve NN2 zemin numunelerinin plastik davranış göstermediği ve KTS'de yer alan dolgu malzemesi için gerekli olan kriterlere uygun oldukları saptanmıştır.
- Kompaksiyon enerji değişiminin değerlendirilmesi baz alınarak yürütülen deneyler sonucunda standart ve modifiye enerjiyle sıkıştırılan her iki zemin numunesinin de maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artış görülmüş ve KTS'ye göre dolgu malzemesi olarak kullanım kriterini sağladığı belirlenmiştir.
- Standart enerjide sıkıştırılan NN1 numunesinin CBR değerleri dikkate alındığında KTS'ye göre zayıf zemin sınıfına girdiği ve dolgu malzemesi olarak kullanılamayacağı belirlenirken aynı enerjide sıkıştırılan NN2 numunesinin dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir. Modifiye enerjide sıkıştırılan NN1 numunesinin ise üstyapı taban malzemesi olarak kullanılabileceği ve NN2 numunesinin alt temel uygulamalarında değerlendirilebileceği belirlenmiştir.
- Her iki zemin numunesi için de permeabilite katsayısı kriteri baz alınarak modifiye sıklıkta hazırlanan zemin numunelerinin standart sıklıkta hazırlananlara göre daha düşük geçirgenliğe sahip olduğu tespit edilirken en düşük geçirgenliğe sahip

zemin numunesinin modifiye sıklıkta hazırlanan NN1 numunesi olduğu gözlemlenmiştir.

- Direkt kesme kutusu deneylerinden elde edilen sonuçlara göre standart ve modifiye sıklıkta hazırlanan NN2 numunelerinin NN1 numunelerine göre daha yüksek içsel sürtünme açısı değerine sahip olduğu ve en yüksek değer modifiye sıklıktaki NN2 numunesinden elde edilmiştir.

Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde; kompaksiyon enerjisindeki artışın zemin iyileştirmesinde önemli bir rol oynadığı ispatlanırken standart enerjiyle sıkıştırılan NN1 numunesinin zayıf zemin sınıfında olduğu ve dolgu malzemesi olarak kullanılamayacağı KTS kriterlerine göre belirlenmiştir. Ancak, standart sıklıktaki NN2 numunesi dolgu malzemesi olarak kullanıma uygun olmakla birlikte, modifiye sıklıkta hazırlanan NN1 ve NN2 numunelerinin sırasıyla üstyapı taban malzemesi ve alt temel olarak kullanılabileceği saptanmıştır. Kompaksiyon enerjisinin artırılmasıyla birlikte taş ocağı maden artık malzemelerinin mekanik davranışları üzerinde iyileştirme sağlanabilirken inşaat ve geoteknik mühendisliği açısından yararlı kullanım alanlarının genişletilebileceği yorumu yapılabilmektedir. İleriki çalışmalarda saha uygulamaları için artık malzemenin içerisindeki ince dane oranını kontrol altında tutmak amacıyla yıkama eleme vb. yöntemlerle istenilen yaş CBR değerinin sağlanması önerilmektedir.

## Teşekkür

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Geoteknik Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Tüm laboratuvar çalışanlarına ve numunelerin tedariki konusunda desteklerinden dolayı Dr. Öğretim Üyesi Ümit Karadoğan'a teşekkür ederiz.

## Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; B. ÖZULU, bilimsel araştırmanın deneylerinin yapılması, deney sonuçlarının yorumlanması, makalenin oluşturulması; G. ÇEVİKBİLEN, bilimsel yayın araştırması, makalenin oluşturulması; B. TEYMÜR, makalenin oluşturulması konularında katkı sağlamıştır.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## Kaynaklar

- ASTM D1557. (2014). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D1557-12R21>.



- ASTM D1883. (2018). Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D1883-16.1>.
- ASTM D2434. (2022). Standard Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head). doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D2434-22>.
- ASTM D2487. (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D2487-17>.
- ASTM D3080. (2012). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D3080-04>.
- ASTM D3282. (2015). Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D3282-15>.
- ASTM D4318. (2017). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D4318-17E01>.
- ASTM D6913. (2017). Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D6913-04R09E01>.
- ASTM D698. (2021). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (600 kN-m/m<sup>3</sup>). doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D0698-12R21>.
- ASTM D7928. (2017). Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D7928-17>.
- ASTM D854. (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. Erişim adresi: <https://www.astm.org/standards/d854>.
- Ediz, İ. G., Sunay, B. ve Yuvka, Ş. (2001). MADENCİLİKTE TOZ KAYNAKLARI VE KONTROLÜ. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, (002), 121-132. Erişim adresi: [https://dergipark.org.tr/pub/dpufbed/issue/36361/411958#article\\_cite](https://dergipark.org.tr/pub/dpufbed/issue/36361/411958#article_cite).
- Galvão, R. G., Almeida, N., Póvoas, Y. ve Basto, P. (2016). Pervious concrete pavement system at polytechnic school of university of pernambuco, Brazil: Product design conception. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 21, 4657-4668. Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/publication/306159864\\_Pervious\\_concrete\\_pavement\\_system\\_at\\_polytechnic\\_school\\_of\\_university\\_of\\_pernambuco\\_Brazil\\_Product\\_design\\_conception](https://www.researchgate.net/publication/306159864_Pervious_concrete_pavement_system_at_polytechnic_school_of_university_of_pernambuco_Brazil_Product_design_conception).
- Karadoğan, Ü. (2021). Haliç Dip Tarama Çamuru ve Maden Atığının Geotekstil Tüp ile Susuzlaştırılması ve Geoteknik Mühendisliği Açısından Değerlendirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, Erişim adresi: <https://polen.itu.edu.tr/items/1c45192e-8e62-4a0d-8074-545801a37c9d>.
- Karadoğan, Ü., Çevikbilen, G., Korkut, S. ve Teymur, B. (2022). Dewatering of Mine Waste Using Geotextile Tubes. Mining, Metallurgy and Exploration, 39(6), 2477-2490. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s42461-022-00679-w>.
- Karadoğan, Ü., Çevikbilen, G. ve Teymur, B. (2020). Deniz Dibi Tarama Malzemelerinin Yol Dolgusu Olarak Kullanımı. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25(2), 1059-1070. doi: <http://dx.doi.org/10.17482/uumfd.679700>.
- Menteşe, S. ve Böbrek, O. (2020). Madencilik Faaliyetlerinin Topraktaki Ağır Metaller (As, Cd, Co, Fe Ve Ni) Üzerine Etkisi: Orhaneli Ve Büyükorhan (Bursa) Örneği. Ege Coğrafya Dergisi, 29(1), 45-56. Erişim adresi: [https://dergipark.org.tr/tr/pub/ecd/issue/55073/684614#article\\_cite](https://dergipark.org.tr/tr/pub/ecd/issue/55073/684614#article_cite).
- Mesci, S. B. (2006). Dolgu Baraj Gövdelerindeki Sızmaların ve Freatik Hattın İncelenmesi: Seferihisar Barajı Uygulaması. Erişim adresi: <https://polen.itu.edu.tr:8443/server/api/core/bitstreams/bafa8f2c-f631-465e-b721-f3b2b823bec4/content>.
- Salomons, W. (1995). Environmental impact of metals derived from mining activities: Processes, predictions, prevention. Journal of Geochemical Exploration, 52(1-2), 5-23. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)00039-E](http://dx.doi.org/10.1016/0375-6742(94)00039-E).
- US Environmental Protection Agency. (1994). Technical Report: Design and evaluation of tailings dams. Office of Solid waste. Erişim adresi: <https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/industrial/special/web/pdf/tailings.pdf>.
- Yusoff, S. A. N. M., Bakar, I., Wijeyesekera, D. C., Zainorabidin, A., Azmi, M. ve Ramli, H. (2017). The Effects of Different Compaction Energy on Geotechnical Properties of Kaolin and Laterite. AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics Inc. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4998380>.