



MAKÜ FEBED
ISSN Online: 1309-2243
<http://dergipark.gov.tr/makufebed>
DOI: 10.29048/makufebed.429021

Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 9(2): 168-178 (2018)
The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University 9(2): 168-178 (2018)

Araştırma Makalesi / Research Paper

Yüzeysel Zemin İyileştirmesinde Yeni Bir Malzeme Olarak Atık Gazbeton Kullanımı

Mehmet ALPYÜRÜR^{1*}, Aykut ŞENOL²

¹ Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Burdur
² İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul

Geliş Tarihi (Received): 31.05.2018, Kabul Tarihi (Accepted): 10.07.2018

✉ *Sorumlu Yazar (Corresponding author*): malpyurur@mehmetakif.edu.tr*

☎ +90 248 2132745 📠 +90 248 2132704

ÖZ

Günümüzde yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinden biri olan gazbetonun yakın gelecekte inşaat yıkıntı atıklarından biri olacağı açıktır. Bu çalışmada, atık gazbetonun zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Gazbeton malzemesi, öğütülerek kullanılmış ve farklı zemin tiplerine etkisini araştırmak amacı ile yüksek plastisiteli kil olarak bir bentonit (CH), bir düşük plastisiteli kil zemin (CL) ve bir kum zemin (SP) numuneleri ile karıştırılarak deneyler yapılmıştır. Öğütülmüş gazbeton atığı (ÖGA) katkısı ile kil zeminlerin serbest basınç mukavemeti ve CBR değerlerinin, kum zeminin ise kayma mukavemeti açısından arttığı belirlenmiştir. Ayrıca CH numunesinin şişme basıncı ve şişme yüzdesinde önemli derecede azalmalar tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin iyileştirme, yıkıntı atığı, gazbeton, kil, kum

Reuse of Aerated Autoclaved Concrete Waste as a New Material in Shallow Soil Stabilization

ABSTRACT

Nowadays, the autoclaved aerated concrete (AAC) is one of the most widely used construction materials. Hence, there will be a huge amount of AAC waste in the near future. In this research, an experimental research study within the scope of investigating the potential use of autoclaved aerated concrete (AAC) waste in the shallow soil stabilization was presented. Three types of subgrades that are a high plasticity bentonite clay (CH), a low plasticity clay (CL) and a sand (SP) were used with the pulverized autoclaved aerated concrete waste (PAACW). It was found that PAACW additive increased the unconfined compression strength and CBR of the clay soils and the internal friction angle of the sand. Also, addition of PAACW significantly decreased the swelling potential and swelling pressure of CH.

Keywords: Soil improvement, demolition waste, autoclaved aerated concrete, clay, sand

GİRİŞ

Medenileşme ile birlikte, daha iyi yaşam ve ulaşım koşulları için arazi kullanımı konusunda talep artışı olmuştur. Günümüzde konutlar, ticari binalar, yüksek katlı ofis

binaları, karayolları, demiryolları, tüneller, su setleri ve toprak barajlar inşa edilmekte olup ve gelecekte de inşa edilmeye devam edecektir. Bunun bir etkisi olarak yeterli taşıma gücüne sahip elverişli zeminlerin giderek azalması, elverişli olmayan zeminlerin, yapı için uygun

hale getirilme ihtiyacını arttırmaktadır. Geoteknik mühendisleri taşıma gücü problemi, toplam ve farklı oturmalar, sıvılaşma, erozyon ve su sızıntıları gibi birçok geoteknik sorun ve zorluklar ile karşılaşmaktadırlar. Yapıların temel zeminlerinin, problemlili zeminlerden oluştuğu sahalarda zemin iyileştirmesi yoluyla zemine istenilen özellikleri kazandırmaya çalışmak günümüzde birçok ülkede oldukça yaygındır. Ekipman, malzeme ve tasarım yöntemlerindeki yeni gelişmeler, zemin iyileştirme yöntemlerini daha etkili, verimli ve ekonomik hale getirmiştir (Han, 2015).

Zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan yöntemlerden biri de katkı malzemeleriyle stabilizasyondur. Son yıllarda farklı atık malzemelerin zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ülkemizde ve dünyada atık olarak ortaya çıkan maddelerin büyük bir kısmı geri dönüştürülebilir malzemelerdir. Bu atıkların neden olduğu çevre kirliliğinin insan yaşamına ve ekolojiye olumsuz etkileri bütün ülkelerin ortak problemidir. Kullanılabilir atıkların farklı mühendislik uygulamalarında kullanılması hem ekonomik çözümler sunmakta hem de çevre kirliliği gibi olumsuz etkilerin azaltılmasında etkili olmaktadır. Atıkların, büyük miktarlarda hammaddeye ihtiyaç duyulan inşaat sektöründe kullanılarak bertaraf edilmesi önemli bir seçenek olarak görülmektedir (Bennert ve ark., 2000; European Environment Agency, 2009; Herrador ve ark., 2011; Arulrajah ve ark., 2013; Rahman ve ark., 2014; Cristelo ve ark., 2016; Cardoso ve ark., 2016; Ulubeyli ve ark., 2017). Dünyada, her yıl giderek artan şekilde, milyarlarca ton inşaat yıkıntı atığı açığa çıkmaktadır. Bu atıkların geri kazanımı, tüm ülkeler için çok önemli sosyal ve çevresel bir konudur. Son yıllarda inşaat yıkıntı atıklarının geri dönüşümü, üzerinde çok durulan bir inceleme konusu olmuştur (Dongxing ve ark., 2010). Çevresel nedenler ve doğal kaynakların kıtlığı dolayısıyla inşaat yıkıntı atıklarının mümkün olduğu kadar geri dönüştürülmesi ve değerlendirilmesi ülkelerin ekonomisine ciddi katkılar sağlamaktadır (Xuan ve ark., 2012). Her inşaat sahasında, kapsamlı bir inşaat atık yönetimine ihtiyaç vardır (Tam ve ark., 2006).

Bir tür hafif beton olarak da bilinen gazbeton; çevre dostu, yanmaz, hafif olması ve yüksek ısı ve ses yalıtım özellikleri nedeniyle, dünyada duvar örgü malzemesi olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel anlamda ilk kez İsveç'te başlayan gazbeton üretimi, Almanya'da geliştirilerek devam etmiştir. Yapı-Endüstri Merkezi'nin hazırladığı Türk Yapı Sektörü Raporu 2016'ya göre Türkiye'de gazbeton üretiminin başlamasından itibaren geçen 50 yılda toplam 50 milyon m³ gazbeton üretilerek 4 milyon yapının inşasında kullanılmıştır. Önümüzdeki yıllarda kalitesiz, standart dışı ve çevreyi korumayan ürünlerin pazardan giderek çekilmesi ile birlikte, gazbeton malzemesine olan talebin daha da artması beklen-

mektedir. 2015 yılı itibari ile ülkemiz genelindeki gazbeton üretim tesislerinin kurulu kapasitesi 5.1 milyon m³'e, gazbeton tüketimi ise 4.7 milyon m³'e ulaşmıştır.

Bu araştırmanın amacı bir inşaat yıkıntı atığı olarak gazbetonun, zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliğinin geoteknik laboratuvar deneyleri ile araştırılmasıdır. Laboratuvar deney programı kapsamında elek analizi ve hidrometre deneyleri, Harvard minyatür kompaksiyon, serbest basınç, kesme kutusu, Kaliforniya taşıma oranı ve şişme basıncı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Gazbeton öğütülerek kullanılmış ve farklı zemin tiplerine etkisini araştırmak amacı ile yüksek plastisiteli bentonit (CH), düşük plastisiteli kil (CL) ve kum (SP) zemin numuneleri ile karıştırılarak deneyler yapılmıştır. Deneyler katkısız CH, CL ve SP numunelerine ek olarak kuru ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında öğütülmüş gazbeton atıkları (ÖGA) içeren CH-ÖGA, CL-ÖGA ve SP-ÖGA numuneleri üzerinde seri şekilde gerçekleştirilmiştir. Hem ince daneli hem de kaba daneli zemini temsilen seçilen numuneler üzerinde deneyler yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Şekil 1'de gazbetonun ufalanmış ve öğütülmüş hali gösterilmiştir.



Şekil 1. Öğütülmüş gazbeton atıkları

Deneylerde kullanılan kum, İstanbul'un Eyüp ilçesinde bulunan Akpınar bölgesinden elde edilen sarı renkli kumdur. ASTM standardına göre kum ile yapılan elek analizi sonucunda, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması Yöntemi'ne (USCS) göre zemin sınıfı, kötü derecelenmiş kum (SP) çıkmıştır. ASTM standartlarına göre piknometre ve rölatif sıklık deneyleri gerçekleştirilerek dane birim hacim ağırlıkları ve rölatif sıklık parametreleri bulunmuştur. ÖGA ve SP numunelerinin rölatif sıklık-

lık ve dane çapı dağılımı parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Deneylerde kullanılan yüksek plastisiteli kil (CH), endüstriyel olarak üretilen sodyum bentonittir. Bir üretici

firmadan elde edilen bentonitin fiziksel ve kimyasal özellikleri sırası ile Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan düşük plastisiteli kil (CL), İstanbul'un Eyüp ilçesinde bulunan Akpınar bölgesinden elde edilen gri renkli bir kildir. Kullanılan tüm malzemelerin dane çapı dağılımı eğrileri Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 1. ÖGA ve SP numunelerinin rölatif sıklık ve dane çapı dağılımı parametreleri

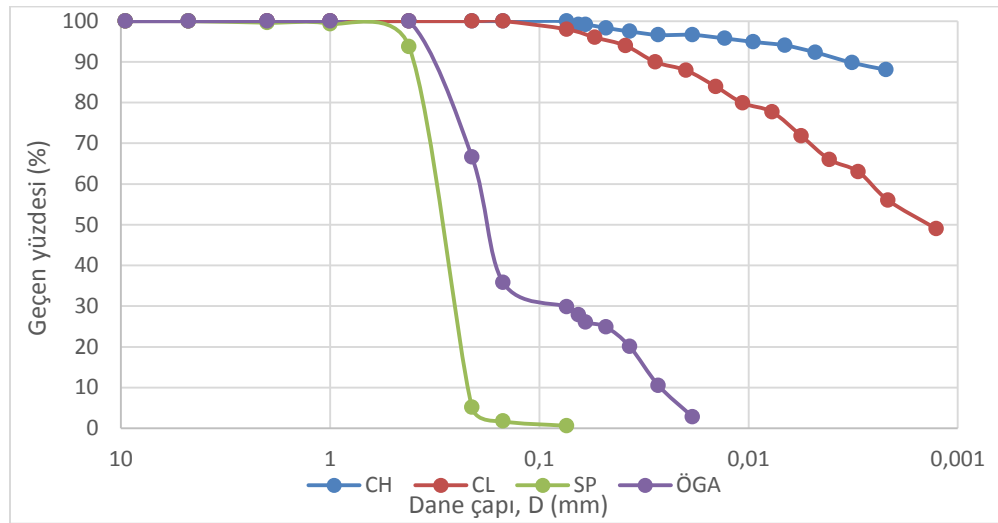
Açıklama	ÖGA	SP
Dane birim hacim ağırlığı, γ_s (kN/m ³)	26.6	26.0
Maksimum kuru birim hacim ağırlığı, γ_{dmaks} (kN/m ³)	8.2	16.5
Minimum kuru birim hacim ağırlığı, γ_{dmin} (kN/m ³)	5.6	15.1
Maksimum boşluk oranı, e_{max}	3.75	0.73
Minimum boşluk oranı, e_{min}	2.23	0.58
D ₁₀ (mm)	0.03	0.22
D ₃₀ (mm)	0.07	0.25
D ₆₀ (mm)	0.20	0.30
Üniformluk katsayısı, C_u	6.66	1.36
Derecelenme katsayısı, C_c	0.82	0.95

Tablo 2. Bentonitin fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Renk	Sarı
Metilen mavisi	340 m ² /gr
Montmorillonit	> %85
Tabii su muhtevası	%11
pH	10.4

Tablo 3. Bentonitte bulunan kimyasal bileşikler

Kimyasal bileşikler	Ağırlıkça (%)
SiO ₂	59 - 61
Al ₂ O ₃	18 - 20
MgO	2.5 - 3.5
K ₂ O	0.5 - 1.5
Fe ₂ O ₃	4 - 6
CaO	0.5 - 1.5
Na ₂ O	2 - 3
TiO ₂	0.5 - 1.5



Şekil 2. Kullanılan malzemelerin dane çapı dağılımı eğrileri

Deneysel Yöntem

Öğütülmüş gazbeton atıklarının, killerin kıvam limitlerine ve mukavemet özelliklerine etkisi incelenmiştir. Yüksek plastisiteli bentonit kili ile hazırlanan numunelere şişme deneyleri de uygulanarak, öğütülmüş gazbeton atıklarının bentonitin şişme parametrelerine etkisi ayrıca araştırılmıştır. Farklı bir zemin olarak ele alınan kötü derecelenmiş kum (SP) zeminin mukavemet değerine ÖGA katkısının etkisi incelenmiştir. Bu amaçla %40 rölatif sıklıkla hazırlanan SP-ÖGA karışımları üzerinde kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. ÖGA ile yapılan elek analizi ve hidrometre deneyleri sonucunda, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması Yöntemi'ne (USCS) göre zemin sınıfı, iyi derecelenmiş kum (SW) olarak belirlenmiştir. ÖGA, kum gibi davranmakta olup kendini tutabilen numune alınamamıştır. ÖGA ile yapılan kıvam limitleri deneyleri sonucunda, malzemenin plastik olmayan (NP) bir malzeme olduğu belirlenmiştir. Puzzolanik malzemeler su ile karıştırıldığında belirli bir süre sonunda sertleşir ve dayanım kazanır. ÖGA malzemesinde puzzolanik özelliğin esası olan bu dayanım kazanma özelliği gerçekleşmemiş ve ÖGA'nın puzzolanik reaksiyon göstermediği tespit edilmiştir.

Kil ve ÖGA karışımlarının mühendislik özelliklerini belirlemek için elek analizi (ASTM D6913-04,2009) ve hidrometre (ASTM D7928-16,2016), kıvam limitleri (ASTM D4318-10,2010), Harvard minyatür kompaksiyon (Wilson, 1970), serbest basınç deneyi (ASTM D2166M-16, 2016) ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyleri (ASTM D1883-16,2016) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yüksek plastisiteli kil ve ÖGA karışımları şişme deneylerine (ASTM D4546-14,2014) tabi tutulmuştur.

Harvard Minyatür Kompaksiyon Deneyi

Deneysel çalışmada, Harvard minyatür kompaksiyon deney aleti kullanılmıştır. Özellikle hem uygun boyutta serbest basınç numunesi elde etmek hem de yeterli sayıda numuneyi sağlamak için Standart Proctor kompaksiyon enerjisine denk olacak şekilde Harvard minyatür kompaksiyon aletinde numuneler hazırlanmıştır (Etminan, 2012; Alpyürür, 2016).

Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneylerinde, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış örnekler kullanılmıştır. Kum gibi davranan ÖGA ile kendini tutabilen numune alınamamış ve serbest basınç deneyi gerçekleştirilememiştir. Örneklerin örselenmesini en aza indirmek için bir hidrolik numune çıkarıcı kullanılmıştır. Serbest basınç deneyleri için 50 mm çap (D) ve 100 mm boyunda (H) örnekler hazırlanmıştır. Örnek-

lerin bu boyutlarda olması sayesinde 2.0 ile 2.5 aralığında boy/çap oranında olma koşulu sağlanmıştır. Ardından, eksenel deformasyon oranı dakikada %1.2 olan bir kompaksiyon aleti kullanılmıştır. Örnekler göçünceye ya da %15 deformasyon oranı elde edilene kadar yüklenmiştir.

CBR Deneyi

Numuneler CBR kalıbında, optimum su muhtevasında ve Standart Proctor sıklığında hazırlandıktan sonra basınç aletine yerleştirilmiştir. Silindrisel pistonun penetrasyon hızı dakikada 1.27 mm olacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Eksenel yük okumaları her 0.25 mm'de bir alınmıştır. Serbest basınç ve CBR deneyleri sonunda numunelerin su muhtevası kontrol edilmiştir. Deneylerin ardından yük-penetrasyon eğrilerinde gerekli düzeltmeler yapılarak CBR değerleri belirlenmiştir.

Kesme Kutusu Deneyi

SP-ÖGA karışımlarının piknometre ve rölatif sıklık deneylerinden sonra %40 rölatif sıklık için belirlenen miktarda kuru karışım 60x60x25 mm boyutlarındaki kesme kutusu kalıbına yerleştirilmiştir. Deneyler 0.002 mm/sn yükleme hızında ve 100,200 ve 300 kN/m² normal gerilmeler altında gerçekleştirilmiştir (ASTM D3080M-11,2011).

Şişme Deneyi

Katkısız CH ve CH-ÖGA karışımlarının şişme yüzdesi değerleri hesaplanırken ASTM D4546'da belirtilen A yöntemi, şişme basıncı değerleri tespit edilirken aynı standarttaki C yöntemi kullanılmıştır. Standart Proctor sıklığında ve optimum su muhtevasında hazırlanmış CH-ÖGA karışımlarının şişme davranışının belirlenmesi için standart odometre aparatı kullanılmıştır. Yüksekliği 5 cm ve çapı 2 cm olan odometre ringinin, hazırlanan numuneye batırılmasıyla elde edilen örneğe ilk yük olarak 5 kPa uygulanmıştır. Ardından, şişme basıncının elde edilmesi için örnek suya daldırıldıktan sonra düşey basınçtaki kademeli artımlarla örnek sabit yükseklikte tutulmuştur. Deney başında ve sonunda birim hacim ağırlıkları ve su muhtevaları kontrol edilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Gazbeton büyük oranda silis kumundan imal edilmektedir. Kullanılan ÖGA yine kum gradasyonuna sahiptir ve kum davranışı gösteren bir malzemedir. Dolayısıyla ÖGA ile tam anlamı ile kendini tutabilen numune alınamadığından serbest basınç deneyi gerçekleştirilememiştir. Numunenin fiziksel özellikleri, kaba daneli zemin davranışına benzer durumdadır. Öğütülmüş

gazbeton ve kil ile oluşturulan serbest basınç numunelerinde zamanla dayanım değişmemektedir.

ÖGA'nın, killerin kıvam limitlerine etkisi incelenmiştir. Katkısız ÖGA'nın, kıvam limitleri deneyi sonucunda plastik olmayan (NP) bir malzeme olduğu görülmüştür. CH-ÖGA numunelerinde, katkı miktarı arttıkça likit limite düşüş, plastik limite ise yükseliş meydana gelmiştir. Dolayısıyla zeminin plastisite indisi azalmıştır. Katkı oranı %25 olduğunda plastisite indisinin, katkısız CH numunesine göre %60 oranında azaldığı tespit edilmiştir. CL-ÖGA numunelerinde, ÖGA miktarı arttıkça likit limit ve plastik limit değerinin arttığı ve plastisite indisinin azaldığı belirlenmiştir. Katkı oranı %25 olduğunda plastisite indisinin, katkısız CL numunesine göre %33 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

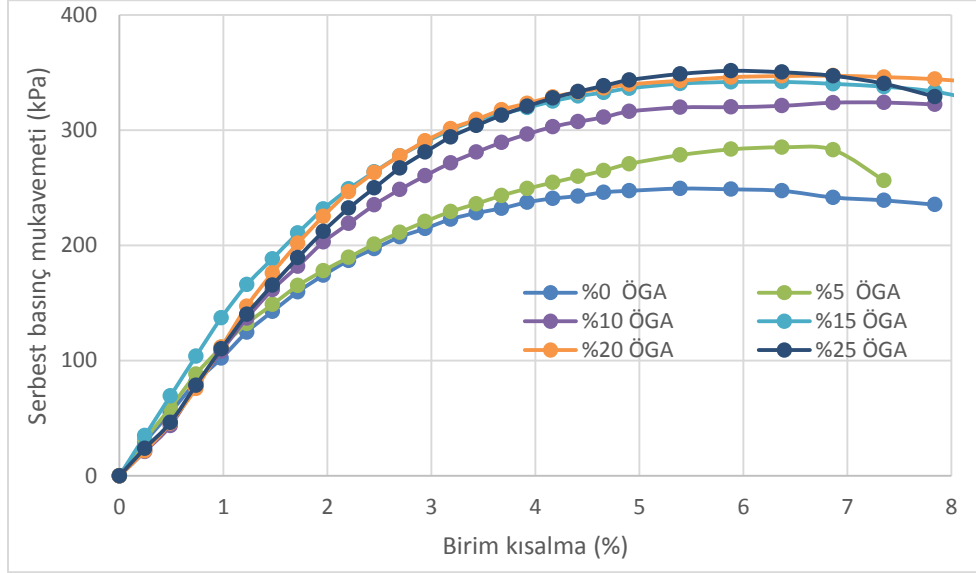
ÖGA'nın, killerin kompaksiyon parametrelerine etkisini incelemek amacı ile Harvard minyatür kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Elde edilen numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kompaksiyon deneylerinin ardından optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında hazırlanan numunelerde ayrıca CBR deneyleri de yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4'te gösterilmiştir. Tablo 4'te de görüldüğü gibi ÖGA katkısı arttıkça CL numunelerin optimum su muhtevalarının arttığı ve kuru birim hacim ağırlıklarının azaldığı belirlenmiştir. CH numunelerinde ise ÖGA katkısı %20 oranına kadar

arttıkça, numunelerin optimum su muhtevalarının arttığı, bu orandan sonra bir miktar azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca ÖGA katkısı %15 oranına kadar arttıkça numunelerin kuru birim hacim ağırlıklarının azaldığı, bu orandan sonra ise bir miktar arttığı belirlenmiştir. Sayısal değerler mühendislik açısından ele alındığında ÖGA katkısının CH numunesinin kuru birim hacim ağırlığı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu düşünülebilir.

Optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler ile serbest basınç ve CBR deneyleri gerçekleştirilerek, ÖGA'nın killerin mukavemet özelliklerine etkisi incelenmiştir. CH-ÖGA numunelerinde, ÖGA katkısı arttıkça karışımın serbest basınç mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. Bentonitin serbest basınç mukavemeti 249 kPa olarak belirlenmiştir. Ögütülmüş gazbeton katkısı arttıkça serbest basınç mukavemetinin arttığı ve %25 ögütülmüş gazbeton katıldığında bu değer 351 kPa değerine ulaşarak %41 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bu durum yumuşak olan CH numunesine katı ÖGA malzemesinin eklenmesi ile dayanımın artması şeklinde yorumlanabilir. Numunelerin serbest basınç deneylerinden elde edilen grafikler Şekil 3'te verilmiştir. Ayrıca kil ve ÖGA numunelerinin su muhtevasına bağlı olarak serbest basınç mukavemetlerindeki değişimler incelenmiştir. CH-ÖGA numunelerinin grafikleri Şekil 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Numunelerinin kıvam, kompaksiyon, serbest basınç ve CBR deney sonuçları

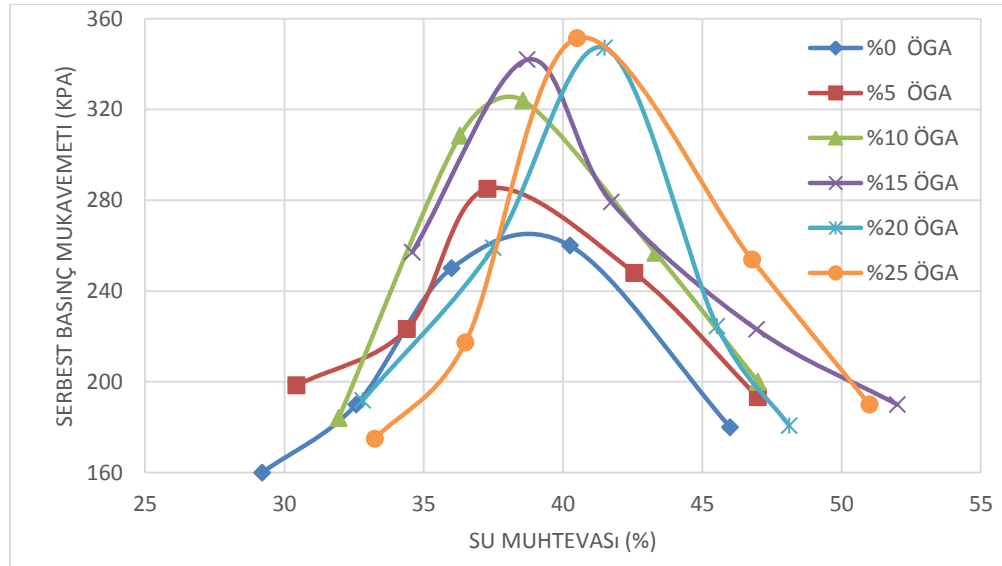
Numune	w _L (%)	w _P (%)	I _p (%)	w _{opt} (%)	Y _{kmaks} (kN/m ³)	q _u (kPa)	CBR (%)
% 100 ÖGA	-	-	-	55	8.3	-	-
% 100 CH	274	44	230	36	12.6	249	9
% 95 CH + % 5 ÖGA	244	46	198	37	12.2	285	10
% 90 CH + % 10 ÖGA	220	47	173	37	12.2	324	12
% 85 CH + % 15 ÖGA	212	47	165	40	11.7	342	13
% 80 CH + % 20 ÖGA	186	48	138	41	11.9	347	11
% 75 CH + % 25 ÖGA	140	48	92	40	12.1	351	11
% 100 CL	37	22	15	21	16.0	325	14
% 95 CL + % 5 ÖGA	38	24	14	22	15.5	384	16
% 90 CL + % 10 ÖGA	39	26	13	23	14.9	399	23
% 85 CL + % 15 ÖGA	41	28	13	25	14.5	406	21
% 80 CL + % 20 ÖGA	44	32	12	28	14.3	332	17
% 75 CL + % 25 ÖGA	46	36	10	29	13.7	314	15



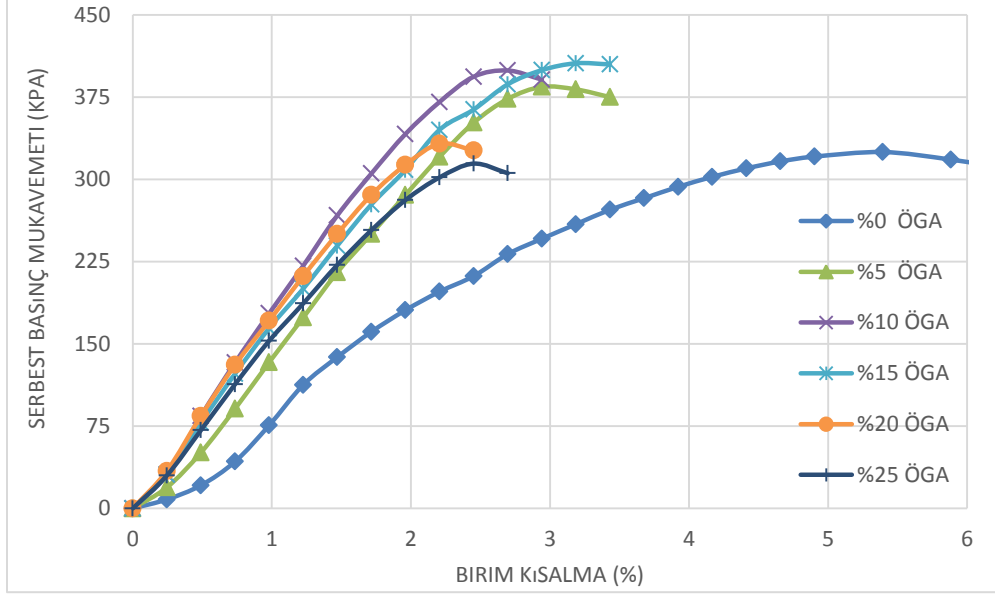
Şekil 3. CH-ÖGA numunelerinin serbest basınç grafikleri

CL-ÖGA numunelerinde ise ÖGA katkısı %15 oranına kadar arttıkça numunelerin serbest basınç mukavemetinin arttığı, %15 oranı aşıldıktan sonra mukavemette düşüş olduğu belirlenmiştir. Katkı oranı %15 olduğunda, serbest basınç mukavemeti değerinin katkısız CL numunesine göre %25 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi, yapılan deneyler sırasında katı ÖGA katkısının neden olduğu gevrek davranış olarak açıklanabilir. ÖGA katkısı ile birlikte düşük plastisiteli kilin

gevrek davranış gösterdiği görülmüştür. Yüksek plastisiteli kil ile yapılan serbest basınç deneylerinde düşük ÖGA katkısı oranlarında, gevrek davranış meydana gelmezken, düşük plastisiteli kil ile yapılan serbest basınç deneylerinde katkı miktarı arttıkça etkili bir gevrek davranış, kırılma meydana gelmiştir. CL-ÖGA numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen grafikler Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. CH-ÖGA numunelerinin su muhtevası-serbest basınç dayanımı grafikleri

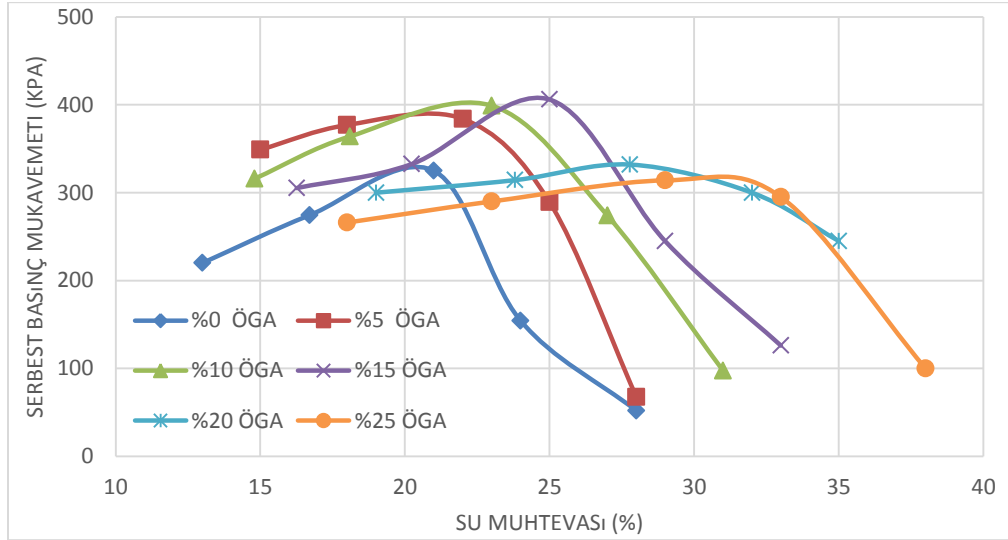


Şekil 5. CL-ÖGA numunelerinin serbest basınç eğrileri

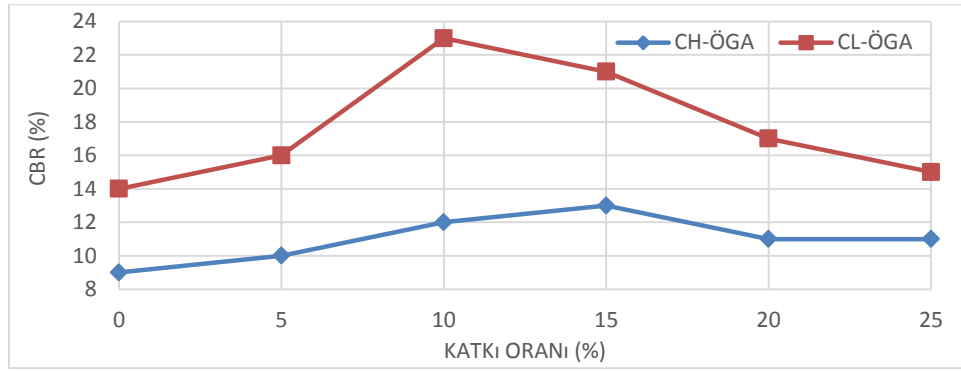
CL-ÖGA numunelerinin su muhtevasına bağlı olarak serbest basınç mukavemetindeki değişimleri gösteren grafikler Şekil 6'da verilmiştir.

CBR deneyi, kil ve ÖGA karışımları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler ile yapılan CBR deneylerinden sonra katkısız CH numunesinin CBR değeri %9 olarak bulunmuştur. Ayrıca %15 ÖGA katkısı ile bu değer %13 değerine ulaşarak, %44 oranında arttığı, bu katkı oranını geçince ise CBR değerinde düşüş gerçekleştiği tespit edilmiştir. Böylece ÖGA'nın mukavemet üzerinde olumlu etkisi

olduğu belirlenmiştir. Katkısız CL numunesinin ise CBR değeri %14 olarak belirlenmiştir. Ayrıca %10 katkı eklince bu değer %23'e ulaştığı ve %64 oranında arttığı, yine aynı şekilde bu katkı oranını geçince CBR değerinde düşüş gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durum, aynı şekilde katı ÖGA katkısının meydana getirdiği gevrek davranışla açıklanabilir. Yumuşak kil numunelere belli bir orana kadar katılan katı ÖGA malzemesi, dayanıma olumlu katkı sağlarken, artan katkı miktarı gevrek davranışa neden olmakta ve dayanımı düşürmektedir. Karışımların CBR değerlerinin katkı oranı ile değişimleri Şekil 7'de gösterilmiştir.



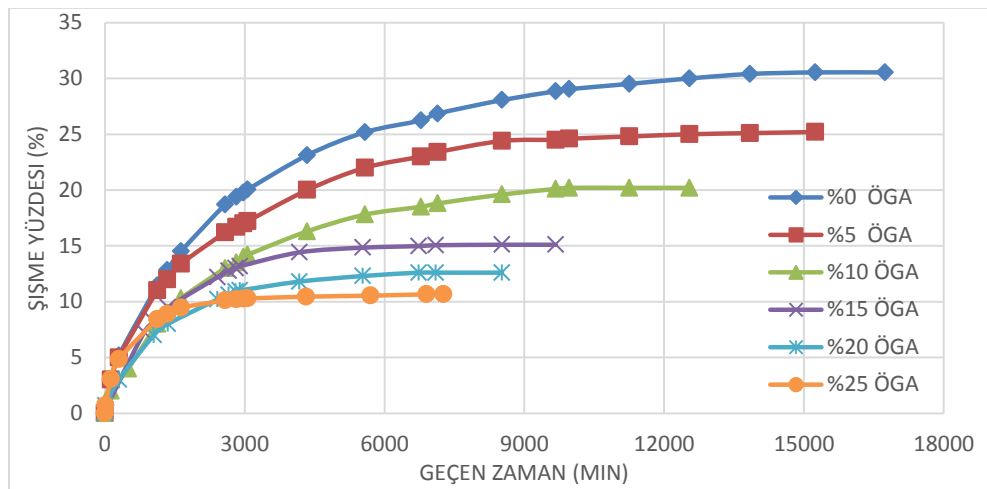
Şekil 6. CL-ÖGA numunelerinin su muhtevasına bağlı serbest basınç dayanımı



Şekil 7. Katkı oranına bağlı olarak CBR değerleri

CH-ÖGA numunelerine şişme deneyleri uygulanarak, katkı miktarı ile birlikte şişme yüzdesi ve şişme basıncındaki değişimler incelenmiştir. Optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler ile gerçekleştirilen deneylerin ardından, katkı miktarı arttıkça numunelerin şişme potansiyelinde ve şişme basıncında önemli ölçüde azalma gerçekleştiği tespit edilmiştir. ASTM-D4546 A

yöntemine göre yapılan serbest şişme deneylerinin ardından katkısız CH numunesinin şişme yüzdesinin %31 olduğu, katkı oranı %25 olduğunda ise bu değer %11 değerine düşerek %65 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Karışımların zamana bağlı olarak şişme yüzdesi Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. CH-ÖGA numunelerinin zamana bağlı olarak şişme yüzdesi

Şekil 9'da da görüldüğü üzere ÖGA miktarı arttıkça numuneler daha az şişme potansiyeli göstermekte ve maksimum şişme miktarına daha kısa sürede ulaşmaktadır. ASTM-D4546 C yöntemine göre gerçekleştirilen şişme basıncı deneylerinin ardından katkısız CH numunesinin şişme basıncının 380 kPa olduğu, %25 ÖGA katıldığında bu değer 175 kPa değerine düşerek %54 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Numunelerin şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Şişme basıncı ve potansiyelindeki bu düşüşün nedeni olarak ÖGA'nın NP bir malzeme olması gösterilebilir.

Tablo 5. CH-ÖGA numunelerin şişme parametreleri

Açıklama	Şişme yüzdesi (%)	Şişme basıncı (kPa)
% 100 CH	31	380
% 95 CH + % 5 ÖGA	25	325
% 90 CH + % 10 ÖGA	20	275
% 85 CH + % 15 ÖGA	15	250
% 80 CH + % 20 ÖGA	13	210
% 75 CH + % 25 ÖGA	11	175

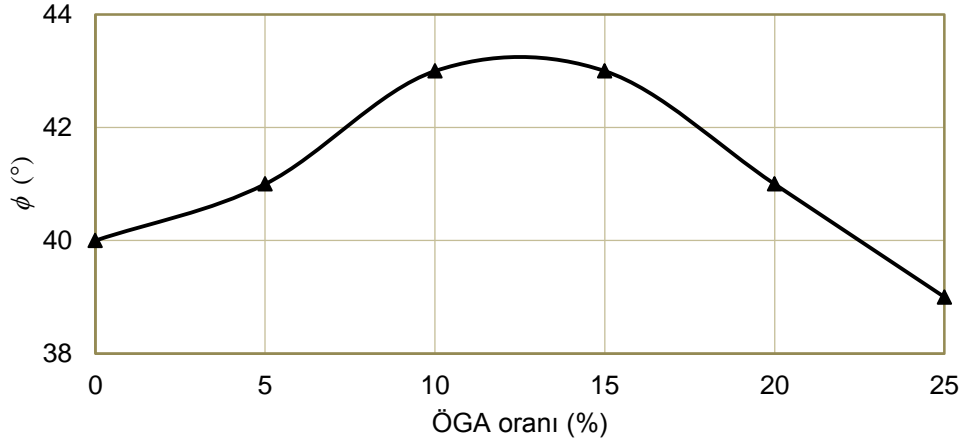
ÖGA katkısının kumların kesme dayanımına etkisini araştırmak amacı ile kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her karışım için rölatif sıklık ve dane birim hacim ağırlığı deneyleri yapıldıktan sonra %40 rölatif sıklıkta numuneler hazırlanmıştır. Deneyde orta sıkı durumu yansıtmaları bakımından %40 rölatif sıklıkta hazırlanan numuneler öngörülerek kullanılmıştır. %40 rölatif sıklıktaki numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinden elde edilen verilere göre, ÖGA katkısı yaklaşık %13 oranına kadar arttıkça, karışımların kayma mukavemeti açısının arttığı, bu orandan sonra ise azalmaya başladığı belirlenmiştir. Bu durumda, ÖGA malzemesinin dane çapı dağılımının ve gevrek davranışın etkili olduğu düşünülmektedir. Numunelerin kayma mukavemeti açıları Tablo 6'da verilmiştir. %15 katkı oranından sonra kayma mukavemeti açısının katkısız zemine göre bir değişim göstermediği söylenebilir.

Katkı oranına bağlı olarak numunelerin kayma mukavemeti açılarındaki değişimi gösteren grafik Şekil 9'da verilmiştir.

Tablo 6. SP-ÖGA numunelerinin kayma mukavemeti açıları

Açıklama	ϕ (Dr = %40)
Katkısız SP	40
% 95 SP + % 5 ÖGA	41
% 90 SP + % 10 ÖGA	43
% 85 SP + % 15 ÖGA	43
% 80 SP + % 20 ÖGA	41
% 75 SP + % 25 ÖGA	39

Kesme kutusu deneyi sonuçları Tablo 7'de ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 9. ÖGA oranı – kayma mukavemeti açısı grafiği

Tablo 7. Kesme kutusu deneyi sonuçları

Numune	σ_n (kN/m ²)	τ_{maks} (kN/m ²)	Δl_f (mm)	ϕ (°)	R ²
% 100 SP	100	63.9	3.50	40	0.93
	200	126.2	2.75		
	300	279.6	3.75		
%95 SP – %5 ÖGA	100	75.8	2.00	41	0.96
	200	143.0	4.00		
	300	287.0	4.50		
%90 SP – %10 ÖGA	100	86.8	3.50	43	0.99
	200	180.3	6.00		
	300	283.4	4.50		
%85 SP – %15 ÖGA	100	91.7	2.50	43	0.96
	200	151.2	3.75		
	300	303.6	4.50		
%80 SP – %20 ÖGA	100	92.5	3.50	41	0.98
	200	169.9	5.25		
	300	265.8	4.00		
%75 SP – %25 ÖGA	100	93.0	5.25	39	0.97
	200	133.6	5.00		
	300	256.7	5.25		

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek plastisiteli bentonit kili ve öğütülmüş gazbeton karışımları üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Karışımlardaki öğütülmüş gazbeton miktarı arttıkça, likit limit değerinin azaldığı, plastik limit değerinin bir miktar arttığı ve plastisite indisinin önemli oranda azaldığı,
- Kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre, ÖGA katkısının CH numunesinin kuru birim hacim ağırlığı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu,
- Serbest basınç deneyi sonucunda, katkı arttıkça serbest basınç mukavemetinin arttığı,
- CBR deneyi sonucunda, bentonitin CBR değerinin belli bir ÖGA katkısı oranına kadar arttığı,
- Mukavemet artışı ile beraber şişme problemine de ÖGA'nın olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir.

Düşük plastisiteli kil ve öğütülmüş gazbeton karışımları üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar da aşağıda özetlenmiştir:

- Karışımlardaki öğütülmüş gazbeton miktarı arttıkça likit limit ve plastik limit değerlerinin bir miktar arttığı, plastisite indisinin ise azaldığı,
- Katkı miktarı arttıkça karışımların maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının azaldığı ve optimum su muhtevalarının arttığı,
- Serbest basınç deneyi sonucunda, karışımların serbest basınç mukavemetinin belli bir ÖGA katkısı oranına kadar arttığı,
- CBR deneyi sonucunda, karışımların CBR değerinin

belli bir ÖGA katkısı oranına kadar arttığı belirlenmiştir.

Kum ve öğütülmüş gazbeton karışımları üzerinde gerçekleştirilen kesme kutusu deneyleri sonucunda ÖGA katkısı yaklaşık %13 oranına kadar arttıkça karışımların kayma mukavemeti açısının arttığı, bu orandan sonra ise azalmaya başladığı belirlenmiştir.

Yapılan bu laboratuvar çalışması sonucunda pratik uygulama için optimum katkı oranları, kil ve kum zeminler için kuru ağırlıkça %10-15 olarak belirlenmiştir.

Çalışma sonucunda, yakın gelecekte büyük miktarlarda ortaya çıkacak olan inşaat yıkıntı atığı gazbetonun, problemlili zeminlerin yüzeysel iyileştirmesinde, belli ölçülerde zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

SEMBOLLER

- CBR : Kaliforniya taşıma oranı
 D_r : Rölatif sıkılık
ÖGA : Öğütülmüş gazbeton atığı
 I_p : Plastisite indisi
 R^2 : Determinasyon katsayısı
 q_u : Serbest basınç dayanımı
 w_L : Likit limit
 w_{opt} : Optimum su muhtevası
 w_p : Plastik limit
 Δl_f : Göçme anında yatay yer değiştirme
 ϕ : Kayma mukavemeti açısı
 σ_n : Normal gerilme
 τ_{maks} : Maksimum kayma gerilmesi

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 38653 No'lu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, söz konusu maddi destek için teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- Alpyürür, M. (2016). Zemin iyileştirmesinde öğütülmüş gazbeton kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M.M., Bo, M.W. (2013). Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 (8), 1077-1088.
- ASTM D1883-16 (2016). Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2166/D2166M-16 (2016). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D3080/D3080M-11 (2011). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4318-10 (2010). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4546-14 (2014). Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6913-04 (2009). Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D7928-16 (2016). Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D854-14 (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bennert, T., Papp W.J., Jr., Maher, A., Gucunski, N. (2000). Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications, *Transportation Research Record*, 1714, 33-39.
- Dongxing, X., Houben, L.J.M., Molenaar, A.A.A., Zhonghe, S. (2010). Cement treated recycled demolition waste as a road base material, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 25 (4), 696-699.
- Etminkan, E. (2012). Soft soil stabilization using fly ash, polypropylene, copolymer and VHP., Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- European Environment Agency (2009). Diverting Waste from Landfill – Effectiveness of Waste management Policies in the European Union. http://www.eea.europa.eu/publications/diverting-waste-from-landfill-effectiveness-of-waste-management-policies-in-the-european-union/at_download/file, erişim tarihi 10.2.2018
- Han, J. (2015). Principles and Practice of Ground Improvement, Wiley, New Jersey, ABD.
- Herrador, R., Pérez, P., Garach, L., Ordóñez, J. (2011). Use of recycled construction and demolition waste aggregate for road course surfacing, *Journal of Transportation Engineering*, 138 (2), 182-190.
- Rahman, A., Imteaz, M., Arulrajah, A., Disfani, M.M. (2014). Suitability of recycled construction and demolition aggregates as alternative pipe backfilling materials, *Journal of Cleaner Production*, 66, 75-84.
- Cristelo, N., Vieira, C.S., Lopes, M.D.L. (2016). Geotechnical and geoenvironmental assessment of recycled construction and demolition waste for road embankments, *Procedia Engineering*, 143, 51-58.
- Cardoso, R., Silva, R.V., Brito, J., Dhir, R. (2016). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review, *Waste Management*, 49, 131-145.
- Ulubeyli, S., Kazaz, A., Arslan, V. (2017). Construction and demolition waste recycling plants revisited: Management issues, *Procedia Engineering*, 172, 1190-1197.
- Tam, V.W.Y., Tam, C.M. (2006). A Review on the viable technology for construction waste recycling, *Resources, Conservation and Recycling*, 47 (3), 209-221.
- Türk Yapı Sektörü Raporu 2016, <http://www.yapi.com.tr/TurkYapiSektoruRaporu2016/index.html#174/>, erişim tarihi 06.06.2018.
- Xuan, D.X., Houben, L.J.M., Molenaar, A.A.A., Shui, Z.H. (2012). Mixture optimization of cement treated demolition waste with recycled masonry and concrete, *Materials and Structures*, 45 (1), 143-151.
- Wilson, S. (1970). Suggested Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using Harvard Compaction Apparatus," Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes: Fifth Edition, STP38484S, C. ASTM, Ed., ASTM International, West Conshohocken, PA, 101-103.