

Yüksek fırın cürufunun geoteknik özellikleri ve taşıma kapasitesi performansının incelenmesi

Investigation of geotechnical properties and bearing capacity performance of blast furnace slag

İnci DEVELİOĞLU¹, Hasan Fırat PULAT^{2*}

^{1,2}İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
inci.develioğlu@ikc.edu.tr, hfirat.pulat@ikc.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 19.01.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 20.06.2017

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.82574

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, yüksek fırın cürufunun (YFC) geoteknik özellikleri incelenmiş ve taşıma kapasitesi performansı analiz edilmiştir. Dane boyutunun taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla YFC ince ($D_{max} = 4.75$ mm) ve iri ($D_{max} = 9.50$ mm) dane dağılımlı olarak iki bölüme ayrılmıştır. YFC'nin dane boyu dağılımı, özgül yoğunluk, pH, optimum su içeriği, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve kıvam limitleri gibi temel mühendislik özellikleri ASTM standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Daha sonra, iri ($D_{9.50}$) ve ince ($D_{4.75}$) dane dağılımlı numuneler için Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. Sıkıştırma enerjisinin CBR değeri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla numuneler Standart Proctor (SP) ve Modifiye Proctor (MP) enerjisi ile hazırlanmıştır. Boşluk sıvısının taşıma performansı üzerindeki etkisini belirlemek için test numuneleri musluk ve deniz suyu ile hazırlanmış ve 96 saat süresince kür edildikten sonra yaş CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, sıkıştırma enerjisinin CBR performansı üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Aynı şartlarda, MP enerjisi ile sıkıştırılan numunelerin SP enerjisi ile sıkıştırılan numunelerden en az 2.2 kat daha yüksek CBR değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. İnce dane dağılımlı numunelerin, iri dağılımlı numunelere kıyasla daha yüksek taşıma kapasitesi değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Aynı koşullarda farklı boşluk sıvılarıyla test edilen numunelerin CBR değer ortalamaları hesaplandığında deniz suyu ile hazırlanan numunelerin %17 daha yüksek değere sahip olduğu belirlenmiştir. YFC'nin sahip olduğu geoteknik özellikler göz önünde bulundurulduğunda, çeşitli mühendislik uygulamalarında dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Taşıma kapasitesi, Yüksek fırın cürufu, Sıkıştırma enerjisi, Dane boyu, Geoteknik mühendislik özellikleri

Abstract

In this study, the geotechnical characterization of blast furnace slag (BFS) was investigated and the bearing capacity performance was analyzed. In order to investigate the particle size effect on bearing capacity, BFS was separated two parts called fine ($D_{max}=4.75$ mm) and coarse ($D_{max}=9.50$ mm) grain size distributions. Basic engineering properties of the BFS, such as particle size distribution, specific gravity, pH, optimum water content, maximum dry unit weight, and consistency limits were determined according to ASTM standards. Thereafter, California Bearing Ratio (CBR) tests were conducted for coarse ($D_{9.50}$) and fine ($D_{4.75}$) grained BFS samples. The samples were prepared with Standard Proctor (SP) and Modified Proctor (MP) energies to examine the compaction energy effect on CBR value. In order to determine the pore fluid effect on bearing performance, samples were prepared with tap and sea water, after 96 hours curing period wet CBR tests were conducted. Test results have shown that compaction energy affects the CBR performance significantly. It has been determined that samples compacted with MP energy has at least 2.2 times higher CBR value than samples compacted with SP energy. It has been seen that fine grained samples have higher bearing capacities than coarse grained samples. When the average CBR value of samples prepared with different pore fluids in same conditions were compared, it was seen that samples prepared with sea water have 17% higher CBR values than the others. While the geotechnical engineering properties of BFS are taken into account, it is considered that BFS can be used in various engineering applications as a fill material.

Keywords: Bearing capacity, Blast furnace slag, Compaction energy, Particle size, Geotechnical engineering properties

1 Giriş

İlerleyen teknoloji, artan nüfus ve genişleyen şehirleşmenin bir neticesi olarak ortaya çıkan atıkların bertarafında karşılaşılan problemler göz ardı edilemeyecek boyutlara ulaşmıştır. Bu nedenle, ev, endüstriyel ve sanayi atıklarının bertarafı oldukça önem kazanmıştır. Bu amaçla hazır beton imalatı, zemin iyileştirme ve dolgu malzemesi gibi farklı inşaat mühendisliği uygulamalarında da çeşitli atık malzemelerin kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır [1]-[3]. Bu sayede atıkların yeniden kullanım ve geri dönüşüm ile bertarafı sağlandığı gibi, ekonomi ve enerjiden de kazanç elde edilmektedir. Demir-çelik üretimi sırasında ortaya çıkan bir yan ürün olan YFC, inşaat sektöründe yol kaplaması, zemin iyileştirme, hazır beton üretimi, temel dolgu malzemesi gibi çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır [4]-[11]. Türkiye Çelik Üreticileri Derneği'nin (TÇÜD) 2015 yılı raporunda Zonguldak,

Hatay ve Karabük illerinde faaliyet gösteren entegre tesislerden 2.7 milyon ton granüle yüksek fırın cürufunun çıktığı ve bunun tamamına yakınının klinker üretiminde kullanılmak üzere çimento fabrikalarına gönderildiği belirtilmiştir [12].

Sivrikaya ve diğ. [9] granüle yüksek fırın cürufunun (GBFS) kil zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini incelemiştir. GBFS %5, %10, %20, %30 ve %50 oranlarında Kolsuz kili ve bentonit kiline karıştırılmış ve mühendislik özellikleri incelenmiştir. Karışımların dane birim hacim ağırlığı, kıvam limitleri ve sıkıştırma parametreleri belirlenmiştir. Her iki salt kil zemini için GBFS oranı arttıkça dane birim hacim ağırlığının arttığı gözlenmiştir. Kolsuz kilinde, plastik limit %19-%21 aralığında artarken likit limit %21 ile %28 aralığında azalmıştır. Bentonit kilinde, plastik limit %32 ile %55 aralığında artarken likit limit %147 ile

%212 aralığında azalmıştır. Bu sonuçlara bağlı olarak plastisite indeksinin de %92 ile %180 aralığında azaldığı gözlenmiştir. Kompaksiyon deneylerinin sonucunda, iyileştirilmiş Kolsuz kili numunelerinin optimum su içeriği %16.8 ile %17.5 arasında, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları 15.65 kN/m³ ile 16.41 kN/m³ arasında bulunmuştur. Bu değerler iyileştirilmemiş numuneler için ise sırasıyla %14.20 ve 16.97 kN/m³ bulunmuştur. Bentonit kili numunelerinin optimum su içeriğinin ise %14.2 ile %14.9 arasında, maksimum kuru birim hacim ağırlığının ise 17.6 kN/m³ ile 18.2 kN/m³ arasında değiştiği gözlenmiştir. Yine bu değerler iyileştirilmemiş numuneler için sırasıyla %17.61 ve 15.65 kN/m³ bulunmuştur.

Bilgen ve diğ. [10] YFC'nin killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılmasını ve kireç ile etkileşimini araştırmıştır. Karışım oranları YFC için %0 ile %7.5 arasında, kireç için ise %0 ile %5 arasında değişmektedir. Çalışma kapsamında, kıvam limitleri belirlenmiş, kompaksiyon, serbest basınç ve CBR deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, YFC'nin tek başına plastisite üzerinde bir etkisi olmadığı, ancak %5 kireç ve %3.33 YFC araştırıldığında plastisitenin 28 den 9 a düştüğü grlmştir. YFC hem tek başına, hem de kireç ile birlikte kullanıldığında optimum su içeriğinde önemli bir değişikliğe sebep olmamıştır. YFC tek başına kullanıldığında serbest basınç dayanımını yaklaşık 2 kat arttırırken, %5 kireç ve %3.33 YFC birlikte kullanıldığında serbest basınç dayanımı 11 kat artmış ve 4000 kPa değerine ulaşmıştır.

Cokca ve diğ. [11] gtlmş granüle yüksek fırın cürufunu (GBFS) ve gtlmş granüle yüksek fırın cürufu ile imento (GBFSC) karışımını şişen zeminlerin iyileştirilmesinde kullanmışlardır. GBFS ve GBFSC karışımı %5 ile %25 arasındaki oranlarda zemin numunelerine eklenmiştir. Bu katkıların dane boyu dağılımı, kıvam limitleri, şişme hızı ve şişme oranı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneyler sonucunda, katkı oranı arttıka kil ve silt yüzdesinde azalma olduğu grlmştir. Katkı miktarı arttıka plastisite indeksi ve şişme yüzdesi azalırken, özgül yoğunluk artmıştır. Çalışmanın sonucunda, hem çevresel etkiler hem de şişme yüzdesi göz önüne alındığında %15 GBFSC karışımının en efektif seçenek olduğu rapor edilmiştir.

Yıldırım ve diğ. [13] yıllanmış ve taze YFC'nin geoteknik özelliklerini araştırmışlardır. Numunelerin dane boyu dağılımı, özgül ağırlığı ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Ayrıca kayma dayanımı parametrelerini elde etmek için büyük ölçekli kesme kutusu deneyi gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda, yıllanmış ve taze YFC'nin sınıflandırması sırasıyla, SP ve SP-SM olarak bulunmuştur. Özgül yoğunluk değerleri ortalama 3.33 ve 3.32 elde edilmiştir. Maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ortalama 20.85 kN/m³ ve 20.62 kN/m³, optimum su içeriği değerleri %7 ve %5 olarak bulunmuştur. Büyük lekli kesme kutusu deneyi sonucunda, yıllanmış ve taze YFC'nin içsel sürtünme aırları sırasıyla ortalama, 45.3° ve 46.8° bulunmuştur.

O'Kelly [14] iki farklı YFC'nin geoteknik özelliklerini incelemiştir. Bu kapsamda, özgül yoğunluk, maksimum kuru birim hacim ağırlık, içsel sürtünme ağırlığı, hidrolik iletkenlik, pH ve CBR değerleri bulunmuştur. Yapılan elek analizi ve kıvam limitleri deneyleri sonucunda, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre örnekler iyi derecelendirilmiş çakıllı kum olarak sınıflandırılmıştır. Özgül

yoğunluk değerleri 2.41 ve 2.67, pH değerleri 12 ve kuru birim hacim ağırlıkları 1.34 ve 1.47 t/m³ bulunmuştur. İçsel sürtünme aırları 39° ve 40°, hidrolik iletkenlikleri ise 1.8 10⁻³ ve 3.4 10⁻³ m/s olarak belirlenmiştir. CBR değerleri %16 ve %31.1 llmştir.

Yukarıda özetlenmeye çalışılan araştırmalardan görüldüğü üzere YFC sahip olduğu mekanik özellikler ile çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Ancak, bu malzemeden maksimum verimin alınabilmesi amacıyla dane boyutu, kompaksiyon enerjisi ve boşluk sıvısı gibi davranışları üzerinde etkili olan mühendislik parametrelerinin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, iri (D_{9.50}) ve ince (D_{4.75}) dane dağılımlı YFC numunelerinin geoteknik karakterizasyonları; likit limit, plastik limit, özgül yoğunluk, pH, standart proctor modifiye proctor ve yıkamalı elek analizi deneyleri ile belirlenmiştir. İnce (D_{4.75}) ve iri (D_{9.50}) dane dağılımlı numuneler; standart ve modifiye kompaksiyon enerjileriyle musluk ve deniz suyu ile hazırlandıktan sonra 96 saat kr koşullarında bekletilmiş ve daha sonra yaş CBR deneyleri yapılarak taşıma gücü performansları incelenmiştir.

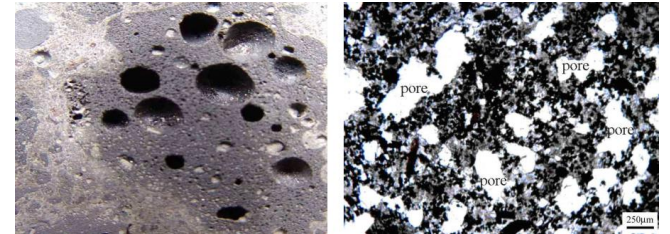
2 Materyal ve Yöntem

YFC, demir-elik üretimi esnasında ortaya çıkan bir atık yan üründür. Kok, kireç ve demir filizi ganginin birlikte yanması sonucu YFC elde edilir. YFC demir ve kok klndeki silika ve alümina ile kirecin kimyasal olarak bir araya gelmesiyle oluşur. Daneli bir yapıya sahip olduğu için imento endüstrisinde ham madde olarak kullanılmaktadır [11],[14]. YFC'nin tipik kimyasal yapısı Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: YFC'nin tipik kimyasal yapısı.

Bileşen	Ağırlık (%)
Kireç (CaO)	32 - 45
Magnezyum oksit (MgO)	5 - 15
Silika (SiO ₂)	32 - 42
Alümina (Al ₂ O ₃)	7 - 16
Sülfür (S)	1 - 2
Demir oksit (FeO, Fe ₂ O ₃)	0.1 - 1.5
Manganez oksit (MnO)	0.2 - 1.0

YFC'nin boşluklu yapısı nedeniyle agregaya kıyasla genel yoğunluğu daha düşük, ($\rho_{YFC}=1350 \text{ kg/m}^3 < \rho_{Agr.}=1450 \text{ kg/m}^3$) görünür yoğunluğu ise ($\rho_{YFC}=2840 \text{ kg/m}^3 > \rho_{Agr.}=710 \text{ kg/m}^3$) daha yüksektir [8]. YFC'nin genel kompozisyonu ve yapısı şekil 1'de gösterilmiştir.

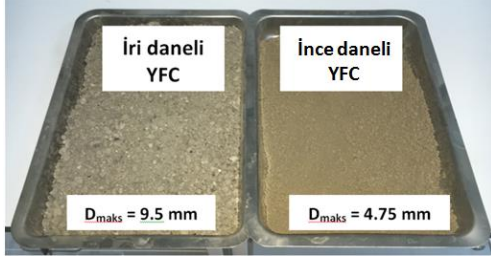


şekil 1: YFC'nin genel kompozisyonu ve yapısı [8].

Bu çalışmada kullanılan YFC numuneleri İzmir'in Aliağa ilçesinde bulunan zerdem Demir Ař'den temin edilmiştir.

Laboratuara getirilen numuneler ASTM standartlarında belirtilen deneylerde kullanılabilecek maksimum dane boyutu sınırlamalarına uygun olması açısından öncelikle 9.5 mm elekten elenerek üzerinde kalan kısım bertaraf edilmiştir. Maksimum dane boyu 9.5 mm (iri dane dağılımlı) ve 4.75 mm

(ince dane dağımlı) olacak şekilde ikiye ayrılan numunelerin mühendislik özellikleri belirlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2: İri ve ince daneli YFC örnekleri.

Numunelerin dane boyu dağımları ASTM-D422-07 standardına göre belirlenmiştir [15]. Etüvde kurutulmuş numuneler No.200 (0.075 mm) elekten yıkamalı olarak elenmiştir. Atterberg limitleri olarak da bilinen plastik limit ve likit limit değerleri ASTM-D4318-10 standardına göre belirlenmiştir [16]. İnce ve iri dane dağımlı (D_{4.75} ve D_{9.50}) numunelerin likit limit değerlerini belirlemek için düşen koni testi yapılmıştır. Dane dağımlı grafiği ve Atterberg limitleri kullanılarak ASTM-D2487-11 standardına göre ince ve iri dane dağımlı numunelerin sınıflandırması yapılmıştır [17]. YFC'nin özgül ağırlığı ASTM-D854-14 standardına göre 500 ml cam piknometre ve vakum pompası kullanılarak belirlenmiştir [18]. İlk olarak, ağırlığı belli olan cam piknometreye saf su konulup vakum pompasıyla havası alınmış, piknometre ve saf su ağırlığı tartılmıştır. Daha sonra, piknometre, havası alınmış saf su ve YFC numunesi birlikte tartılmış ve bu değerler yardımı ile özgül yoğunluk belirlenmiştir.

YFC'nin asidite ve alkalinite tayinini yapabilmek için D_{4.75} ve D_{9.50} örneklerinin pH değerleri belirlenmiştir [19]. 50 gr numune ile 125 ml saf su karıştırılarak süspansiyon oluşturulmuş ve bu karışım parafilm ile kapatılarak dengeye gelmesi için 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra pH ölçümleri dijital pH metre ile yapılmıştır. Değerlerin tekrar edilebilirliğinden emin olmak amacıyla tüm deneyler en az 2 kez tekrarlanmıştır.

Optimum su içeriğini ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerini belirlemek için Standart Proctor (SP) ve Modifiye Proctor (MP) deneyleri gerçekleştirilmiştir [20], [21]. SP deneyinde numune kalıba (D:102 mm ve H:116 mm) 3 katmanda yerleştirilmiş ve her katmana 2.45 kg ağırlığındaki tokmak ile 25'er darbe vurulmuştur. MP deneyinde ise numune kalıba (D:102 mm ve H:116 mm) 5 katmanda yerleştirilmiş ve her katmana 4.45 kg ağırlığındaki tokmak ile 25'er darbe vurulmuştur. ASTM standardında da belirtildiği üzere tokmak ağırlığı, düşme yüksekliği ve darbe sayısı farklılıklarından ötürü MP deneyi SP deneyinden 4.5 kat daha fazla sıkıştırma enerjisine sahiptir [22].

YFC'nin farklı koşullar altında taşıma kapasitesi performansını incelemek için ASTM D1883 standardına uygun şekilde CBR deneyleri yapılmıştır [23]. Tüm numuneler SP ve MP deneylerinden elde edilen optimum su içeriklerinde hazırlanmıştır. Numuneler hazırlandıktan sonra 4.54 kg/lık düşey yük altında, 96 saat kür koşullarında bekletilmiş ve düşey deplasmanları kayıt altına alınmıştır (Şekil 3).

Boşluk suyunun taşıma performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla numunelerin hazırlanmasında ve kür süresince musluk ve deniz suları kullanılmıştır.

CBR deneyleri Dotek firması tarafından üretilmiş 45 kN yükleme kapasiteli tam otomatik deney sistemiyle

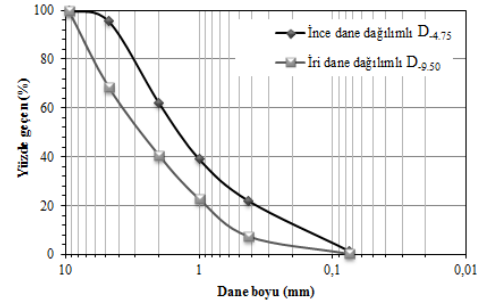
gerçekleştirilmiştir. CBR deneyinde standartlarda önceden belirtilen penetrasyon değerlerine karşılık gelen yük değerleri okunmuştur ve pistonun yüzey alanına bölünerek gerilme değerleri elde edilmiştir. Deney standartlarda belirtilen 1.27 mm/dk'lık sabit hızda gerçekleştirilmiştir. CBR değerleri gerilme-penetrasyon grafiğinde 5.08 mm penetrasyona karşılık gelen düzeltilmiş gerilme değerinin 10 MPa standart gerilme değerine bölünüp 100 ile çarpılmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 3: Küre tabi tutulan CBR numunesi.

3 Bulgular ve tartışma

İnce (D_{4.75}) ve iri (D_{9.50}) dane dağımlı numunelerin yıkamalı elek analizlerinden elde edilen dane boyu dağımları Şekil 4'te gösterilmiştir. Her iki numune içinde 0.075 mm elekten geçen malzeme miktarı oldukça azdır.



Şekil 4: D-4.75 ve D-9.50 numunelerinin dane boyu dağımlı.

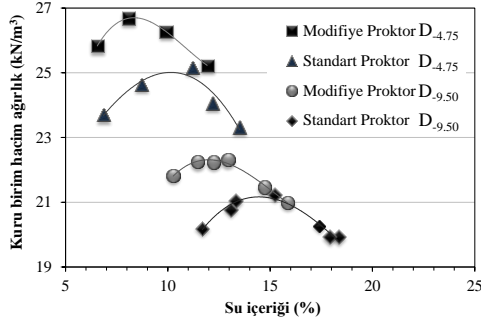
YFC'nin deneylerden elde edilen geoteknik özellikleri Tablo 2'de özetlenmiştir. Numunelerin sınıflandırması USCS'ye göre yapılmıştır. Sınıflandırma yapılırken dane boyu dağımlı ve kıvam limitleri deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.

Tablo 2: YFC'nin geoteknik mühendisliği özellikleri.

Parametre	D-4.75 YFC	D-9.50 YFC
Likit limit, w _L (%)	34.1	34.1
Plastik limit, w _P (%)	NP	NP
Doğal su içeriği, w _N (%)	7.9	7.9
USCS	SW	SW
pH	9.8	10.2
Özgül yoğunluk, G _s	3.07	3.35

Yapılan pH deneyleri sonucunda YFC'nin bazik özellikte olduğu belirlenmiştir, elde edilen değerler literatür çalışmalarıyla benzer sonuç göstermiştir [14]. Plastik limit deneylerinin sonucunda numunelerin plastik davranış göstermediği gözlenmiştir. İri (D_{9.50}) ve ince (D_{4.75}) dane

dağılımlı numunelerin SP ve MP deneylerinden elde edilen kompaksiyon eğrileri Şekil 5'te gösterilmiştir.



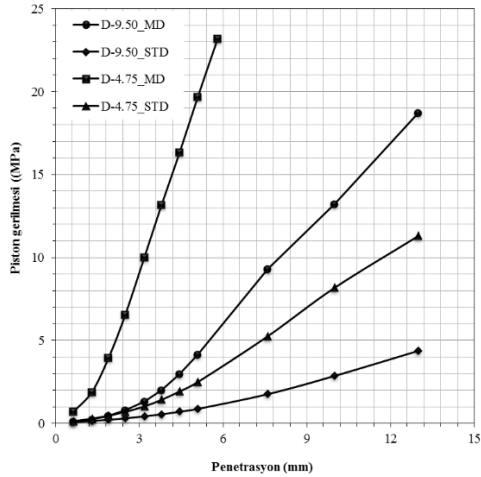
Şekil 5: D-4.75 ve D-9.50 numunelerinin kompaksiyon eğrileri.

D-4.75 ve D-9.50 numunelerinin optimum su içeriklerinin %8.3 ile %14.8 arasında değiştiği görülmüştür. Maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ise 21.2 ile 26.3 kN/m³ arasında değer almıştır (Tablo 3).

Tablo 3: D-4.75 ve D-4.75 numunelerinin optimum su içeriği (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı ($\gamma_{k.maks}$).

Malzeme	Test Tipi	$\gamma_{k.maks}$ (kN/m ³)	w_{opt} (%)
D-4.75	SP	25.0	10.2
	MP	26.3	8.3
D-9.50	SP	21.2	14.8
	MP	22.3	12.0

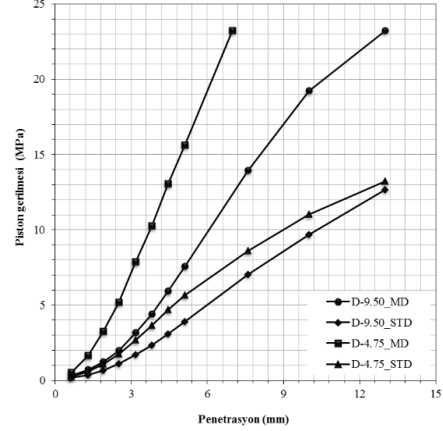
Optimum su içeriğinde çeşme suyu ile hazırlanan ve 96 sa. kür altında bekletilen numunelerin CBR eğrileri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6: Çeşme suyu ile hazırlanmış numunelerin CBR eğrileri

Modifiye kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılan ince daneli YFC numunesi piston kapasitesinin maksimum değerine (45 kN) ulaştığından deney sonlandırılmıştır. Deneyler neticesinde standart kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılan numunelerin daha düşük piston gerilmelerine sahip olduğu görülmüştür. Modifiye kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılan iri daneli numune aynı penetrasyon değerinde (13 mm) standart kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılan numuneden 4.3 kat daha yüksek piston gerilmesine sahip olmuştur. Aynı kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılmış ince daneli numunenin iri daneli numuneden 2.6 kat daha yüksek piston gerilmesi değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

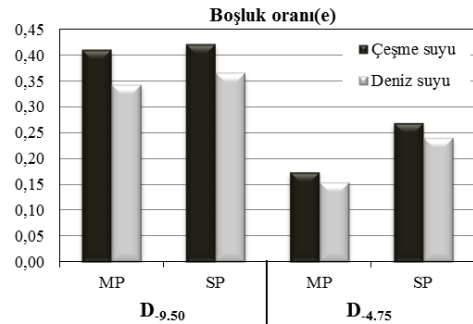
Optimum su içeriğinde deniz suyu ile hazırlanan ve 96 sa. kür koşullarında bekletilen numunelerin CBR eğrileri Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7: Deniz suyu ile hazırlanmış numunelerin CBR eğrileri.

İki farklı dane dağılımında ve iki farklı kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılmış numunelerin deniz suyu etkisi altında yaş CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, sahil şeridi boyunca yada denize yakın bölgelerde yapılacak YFC dolgularının deniz suyu ile nasıl bir etkileşim içerisinde olduğu incelenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde modifiye sıkıştırma enerjisiyle hazırlanmış ince dane dağılımlı numunenin hızlı bir şekilde maksimum piston kapasitesine (45 kN) ulaştığı belirlenmiştir. Bunu takiben modifiye kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılmış iri daneli numune de 13 mm'lik penetrasyon değerine gelindiğinde maksimum piston kapasitesine ulaşmıştır. Standart kompaksiyon enerjisiyle hazırlanan ince ve iri dane dağılımlı numuneler 13 mm'lik penetrasyon derinliğinde birbirine oldukça yakın değerler almıştır. Modifiye kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılan ince ve iri daneli numuneler standart kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılan numunelerden 1.8 kat daha yüksek piston gerilmesi değerlerine sahip olmuşlardır.

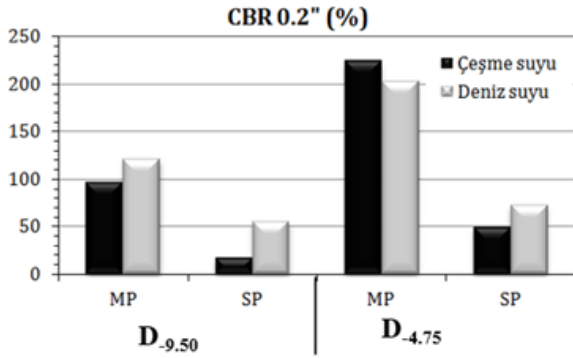
İki farklı dane dağılımı ve iki farklı kompaksiyon enerjisiyle musluk ve deniz suyu etkisi altında hazırlanan CBR numunelerinin boşluk oranları Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 8'den görüldüğü üzere ince daneli numuneler, iri daneli numunelerden daha küçük boşluk oranı değerlerine sahiptir. Modifiye ve standart kompaksiyon enerjileriyle sıkıştırılmış ince daneli numunelerde önemli boşluk oranı değeri farklılıkları gözlenirken, iri dane dağılımlı numuneler için aynı durum söz konusu değildir. Tüm numuneler göz önünde bulundurulduğunda deniz suyu ile hazırlanan numunelerin çeşme suyu ile hazırlanan numunelerden daha düşük boşluk oranı değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 8: Numunelerin boşluk oranları.

4 Sonuçlar

Farklı fiziksel özellikler etkisinde eşme ve deniz suyu ile hazırlanmış iri ve ince daneli numunelerin CBR değerleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekil 9'dan görüldüğü üzere, MP sıkışma enerjisinde hazırlanan numunelerin SP sıkışma enerjisinde hazırlanan numunelere kıyasla daha büyük CBR değerine sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni MP sıkışma enerjisinin SP sıkışma enerjisinden 4.5 kat daha büyük olmasıdır. Daha küçük boşluk oranlarına sahip olan ince daneli numuneler iri daneli numunelerden daha yüksek CBR değerlerine sahip olmuşlardır. Boşluk oranı düşük olan daha sıkı yapılı numuneler daneler arası daha büyük sürtünme direncine sahiptirler ve bu durum taşıma direncini olumlu şekilde etkilemiştir. Ayrıca, deniz suyunun içerisindeki klor ve sodyum iyonlarının YFC'nin yapısındaki oksitlenmeyi arttırdığı ve bu durumun dayanım üzerinde pozitif bir etki yarattığı düşünülmektedir. Deniz suyunun CBR değeri üzerindeki pozitif etkisinin ince daneli numunelerde iri daneli numunelere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. İri daneli numunelere göre daha fazla yüzey alanına sahip olan ince daneli numuneler deniz suyu ile daha iyi kimyasal etkileşime girdiği düşünülmektedir.



Şekil 9: Numunelerin CBR değerleri.

En yüksek CBR değerleri modifiye kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılmış ince daneli numunelere aittir. Bu değerleri yine modifiye kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılmış iri daneli numuneler takip etmiştir. Tamamlanan deneyler sonucunda numunelerin %75'inin CBR değerinin 50'den daha yüksek değer aldığı görülmüştür. Standart kompaksiyon enerjisiyle ve eşme suyu etkisi altında hazırlanan iri daneli numunenin en düşük CBR değerine sahip olduğu belirlenmiştir (CBR=17.3). Kaldı ki bu değer dahi taban ve alt temel dolgularında kullanılabilecek sınırlar ierisindeedir. Tablo 4'te verilen değerlendirme kriterleri ve karayolları teknik şartnamesinde belirtilen dolgu malzemesi özellikleri göz önünde bulunduğunda modifiye kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılan malzemelerin temel ve alt temel inşaatında dolgu malzemesi olarak kullanılması uygundur [24].

Bu çalışmada iki farklı dane dağılımındaki YFC numunelerinin temel geoteknik özellikleri ve taşıma kapasitesini etkileyen faktörler araştırılmıştır. D-4.75 ve D-9.50 numunelerinin granülometri, likit ve plastik limit deneyleri neticesinde SW zemin sınıfına ait oldukları belirlenmiştir. D-4.75 ve D-9.50 numunelerinin bazik özellikte oldukları belirlenmiştir. Gerçekleştirilen modifiye ve standart kompaksiyon deneyleri sonucunda D-9.50 ve D-4.75 numunelerinin optimum su içeriklerinin %8.3 ile %14.8 arasında maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının ise 21.2 ile 26.3 kN/m³ arasında değer aldığı görülmüştür. Standart ve modifiye kompaksiyon enerjileriyle hazırlanan D-4.75 ve D-9.50 numunelerinin taşıma gücü performansları yaş CBR deneyleriyle incelenmiştir. İncelenen mühendislik parametreleri arasında kompaksiyon enerjisinin CBR taşıma performansı üzerinde en etkin role sahip olduğu belirlenmiştir. Modifiye kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılmış D-9.50 numunelerinde 4.3, D-4.75 numunelerinde 2.6 kat daha yüksek piston gerilmeleri elde edilmiştir. Benzer durum CBR değerleri içinde geçerlidir; modifiye kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılmış numunenin CBR değeri, standart kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılmış numuneden 4.5 kat daha yyektir. Boşluk oranı (e) ile CBR değerleri arasında ters orantı söz konusudur; boşluk oranı ortalamaları 0.165 olan eşme ve deniz suları ile hazırlanmış, modifiye kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırılmış D-4.75 numuneleri en yüksek CBR ortalamasına sahiptir (CBR=213). Boşluk oranı azaldıkça numune sıklığı artmakta ve daneler arası kilit noktaları daha kuvvetli hale gelmektedir. YFC numunelerinin %75'i 50'den daha yüksek CBR değerine sahip olmuştur. Farklı özelliklerde iyon derişimine sahip olan deniz suyunun YFC'nin yapısındaki oksitlenmeyi arttırarak taşıma kapasitesini olumlu şekilde etkilediği düşünülmektedir. Gerçekleştirilen geoteknik deneyleri sonucunda YFC'nin, karayolları teknik şartnamesinde belirtilen dolgu malzemesi özelliklerini sağladığı görülmüştür. Bu alışmada YFC sadece geoteknik özellikler bakımından incelenmiş olup, malzemenin çevreye olası etkileri bu çalışma kapsamı dışındadır.

5 Kaynaklar

- [1] Kozak M. "Tekstil atıklarının yapı malzemesi olarak kullanım alanlarının araştırılması". *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 62-70, 2010.
- [2] Gurer C, Akbulut H, Kurklu G. "İnşaat endüstrisinde geri dönüşüm ve bir hammadde kaynağı olarak farklı yapı malzemelerinin yeniden değerlendirilmesi". *5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 13-14 Mayıs 2004.

Tablo 4: CBR değerlerine göre karayolları dolgularında kullanılabirlik.

Zemin zellikleri ve Kullanım Alanları			Sınıflandırma Sistemi	
CBR No	Genel Değerlendirme	Kullanım	USCS	AASHTO
0-3	ok Zayıf	Taban	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3-7	Zayıftan Ortaya	Taban	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7-20	Orta	Alt temel	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2-A4-A6-A7
20-50	İyi	Temel veya Alt temel	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A1b-A2-5,A-3,A2-6
>50	ok İyi	Temel	GW, GM	A1a-A2-4, A3

- [3] Aruntaş HY. "Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli". *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 193-203, 2006.
Kodikara J, Yeo R. *Performance Evaluation of Road Pavements Stabilized in Situ*. Editor: Zhang L. Elsevier Geo- Engineering Book Series, 409-443, Elsevier Science, 2005.
- [4] Yao AL, Sun ZJ. "The research on slag road cement (SRC) using less clinker and more granulated blast furnace slag". *5th China-Japan Workshop on Pavement Technologies*, Xi'an, China, 11-13 September 2009.
- [5] Poh HY, Ghataora GS, Ghazireh N. "Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(2), 229-240, 2006.
- [6] Yazıcı V. Stabilization of Expansive Clays Using Granulated Blast Furnace Slag (GBFS), GBFS-lime combinations and GBFS cement. PhD Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2004.
- [7] Jiao S, Hu L, Zhou J, Fu J. "Test on cement stabilized blast furnace slag material". *Advanced Materails Research*, 671-674, 1297-1300, 2013.
- [8] Sivrikaya O, Yavascan S, Cecen E. "Effects of ground granulated blast-furnace slag on the index and compaction parameters of clayey soils". *Acta Geotechnica*, 1, 19-27, 2014.
- [9] Bilgen G, Kavak A, Çapar ÖF. "Düşük plasisiteli bir kilde katkı olarak çelikhane cürufunun kullanılması ve kireç ile tkileşimi". *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2(2), 30-38, 2012.
- [10] Cokca E, Yazıcı V, Ozaydin V. "Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-cement". *Geotechnical and Geological Engineering*, 27, 489-499, 2009.
- [11] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, "Türkiye Çelik Üreticileri Derneği". Demir Çelik Cüruf Raporu. Ankara, Türkiye, 2015.
- [12] Yildirim IZ, Prezzi M. "Geotechnical properties of fresh anda ged basic oxygen furnace steel slag". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(12), 1-11, 2015.
- [13] O'Kelly BC. "Geo-engineering properties of granulated blast furnace slag". *International Conference on Geotechnical Engineering*, Hammamet, Tunisia, 24-26 March 2008.
- [14] ASTM International. "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016)". West Conshohocken/Pennsylvania, USA, ASTM D422-63(2007)e2, 2007.
- [15] ASTM International. "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils". West Conshohocken/Pennsylvania, USA, ASTM D4318-10e1, 2010.
- [16] ASTM International. "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)". West Conshohocken/Pennsylvania, USA, ASTM D2487-11, 2011.
- [17] ASTM International. "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer". West Conshohocken/Pennsylvania, USA, ASTM D854-14, 2014.
- [18] Kocasoy, G. *Atıksu Arıtma Çamuru ve Katı Atık ve Compost Örneklerinin Analiz Yöntemleri*. İstanbul, Türkiye, Boğaziçi Üniversitesi Matbaası, 1994.
- [19] ASTM International. "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))". West Conshohocken/Pennsylvania, USA, ASTM D698-12e2, 2012.
- [20] ASTM International. "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))". West Conshohocken/Pennsylvania, USA, ASTM D1557-12e1, 2012.
- [21] Holtz RD, Kovacs WD. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. California, USA, Prentice-Hall, 1981.
- [22] ASTM International. "Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils". West Conshohocken/Pennsylvania, USA, ASTM D1883-16, 2016.
- [23] Karayolları Genel Müdürlüğü. "Karayolu Teknik Şartnamesi, Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler". Ankara, Türkiye, 2013.