

Geri Dönüştürülebilir Atık Malzemelerin Geoteknik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi

Bilal Korkmaz¹, Şüheda Taştan¹, Ash Y. Dayıoğlu^{*1}, Mustafa Hatipoğlu¹

*¹ İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği, İstanbul

(Alınış / Received: 03.04.2023, Kabul / Accepted: 28.04.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Anahtar Kelimeler

Elektrik ark cürufu,
Pota cürufu,
Geri dönüştürülmüş asfalt
agregası,
Geri dönüştürülmüş beton
agregası,
Yol inşaatı.

Öz: Yol inşaatlarında dolgu malzemesi olarak kullanılan doğal zemin kaynaklarının giderek azalması, alternatif malzeme ihtiyacı doğurmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda büyük miktarlarda yapı malzemesi gerektiren yol inşaatı gibi yapım işlerinde, atık malzemelerin kullanılabilirliği güncel bir araştırma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada; geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA), geri dönüştürülmüş asfalt agregası (RAP), elektrik ark fırın cürufu (EAF) ve pota cürufu (PF) gibi atık malzemelerin geoteknik uygulamalarda dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmaktadır. Bu amaçla temin edilen atık malzemelerin; dane çapı dağılımı, özgül ağırlığı, kompaksiyon özellikleri, permeabilite katsayıları, kayma mukavemeti parametreleri, ıslak ve kuru CBR değerlerini belirlemek üzere deneyler yapılmıştır. Bunlara ek olarak, çelik cüruflarının şişme potansiyelleri hızlandırılmış şişme deneyleri ile belirlenmiştir.

Investigation of the Geotechnical Properties of Recycled Waste Materials

Keywords

Electric arc slag,
Ladle slag,
Recycled asphalt pavement,
Recycled concrete,
Road construction.

Abstract: The gradual decrease in natural aggregate resources used as embankment material in road construction arises demand for alternative materials. To fulfill this demand, it is suggested that waste materials are used in road construction applications, which requires large amounts of building materials. This study aims to determine whether waste materials from different sources such as recycled concrete aggregate (RCA), recycled asphalt pavement (RAP), electric arc furnace slag (EAF), and ladle slag (LS) can be used as geotechnical filling materials for road construction. For this purpose, experiments were carried out to determine the particle diameter distribution, specific gravity, compaction parameters, coefficients of permeability, shear strength parameters, and soaked/unsaturated CBR values of the waste materials. In addition, the expansion potential of steel slags was determined by accelerated swelling experiments.

*İlgili Yazar, email: yalcinas@itu.edu.tr

1. Giriş

Birçok ülkede, yol inşaatında dolgu malzemesi olarak kullanılan doğal zeminlerin temin edilmesi giderek zorlaşmaktadır. Bu duruma, taş ocaklarının açılması ve işletilmesi hususunda yeni düzenlemeler ile getirilen sıkı kuralların da etkisi mevcuttur [1]. Ayrıca, yerleşim birimlerine yakın olan taş ocaklarında ve dere yataklarında doğal zemin rezervlerinin tükenmeye başlaması temini zorlaştıran diğer bir etkidir. Bu nedenle yerleşim birimlerine daha uzak bölgelerde bulunan taş ocaklarına yönelme söz konusudur. Ancak bu durum nakliye giderlerini ve yol yapım maliyetlerini arttırmaktadır. Maliyet artışının önüne geçilebilir ve doğal kaynakların

korunması için, atık malzemelerin yeniden kullanımı zorunluluk haline gelmektedir. Bu nedenle yol inşaatlarında kullanılması planlanan atık malzemelerin mekanik ve çevresel etkilerini incelemeye yönelik birçok bilimsel çalışma mevcuttur [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11]. Atık malzemelerin yol dolgu malzemesi olarak kullanılması, yol yapım maliyetlerinde iyileşmeye ve atık malzemelerin yeniden kullanımına katkı sağlayarak sürdürülebilirliği de desteklemektedir. Ayrıca, atık malzemelerin yeniden kullanılması hem depolama sorununu ortadan kaldırmakta hem de doğal kaynaklara olan talebi azaltmaktadır [12].

EAF ve PF cürufları; kimyasal olarak hafif oksitler, silikatlar ve boratlardan oluşmaktadır. Bu malzemeler, çelik üretim süreçlerinde oluşan ve eriyik çeliğe göre daha düşük yoğunluğa sahip olduğu için yüzeyde biriken katı yan ürünlerdir [13] [14] [15]. Üretim aşamalarından edinilen verilere göre genellikle 1 ton ham çelik üretimi için %15 - %20 oranında cüruf atığı oluşmaktadır [16] [17]. Belirtilen üretim kapasitesi ve oluşan cüruf atığının miktarı, depolama sorununa ve buna bağlı olarak çevresel ve biyolojik zararlara neden olmaktadır. Cüruf atıklarının yeniden kullanılması veya geri dönüştürülmesinde geoteknik mühendisliği uygulamalarının büyük katkısının bulunacağı düşünülmektedir. Sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla yapılan çalışmalar ışığında, çelik cüruflarının yol dolgusunda kullanılan doğal zeminlere alternatif sunabileceği belirtilmiştir [18] [19] [20] [21] [15] [22]. Cürufların agregası olarak değerlendirildiği saha uygulamalarında, dayanımın artması ile servis ömrünün uzadığı ve oturmaların azaldığı rapor edilmiştir [23]. Ancak yüksek dayanım özelliklerine rağmen çelik cürufu agregalarında bulunan silikat yapıdaki reaksiyona girmemiş serbest kireç ve magnezyum oksitler, su ile temas ettiğinde şişmeye neden olmaktadır. Bu durum kaplama tabakasının kabarmasına ve yüzeyde çatlamalara neden olabilmektedir [24]. Bu nedenle yol dolgusunda kullanılması planlanan cürufun mekanik özelliklerinin yanı sıra şişme potansiyelinin de değerlendirilmesi gerekmektedir.

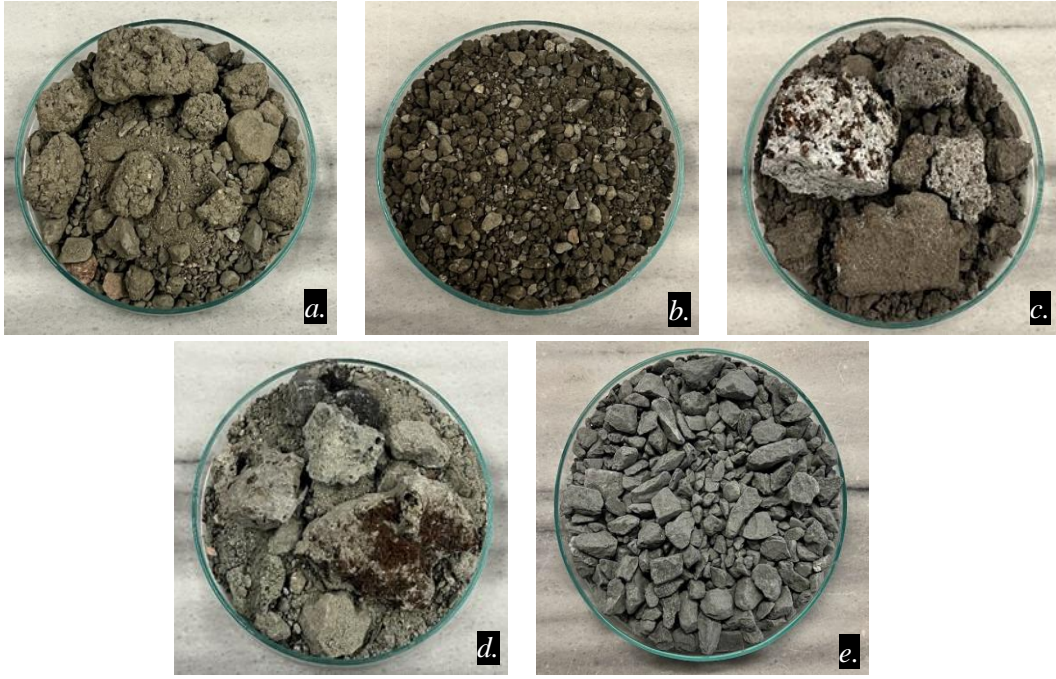
Geri dönüştürülmüş asfalt agregası (RAP), bozulmuş veya kullanım ömrünü tamamlamış asfalt kaplamaların yol yüzeyinden kazınması ve öğütülmesi ile ortaya çıkan, içerisinde yaklaşık %96 oranında agregası ihtiva eden atık malzemedir [25]. Ayrıca içeriğinde asfalt, zift, doğal polimer gibi malzemelerin yanı sıra yüksek oranda kuvars ve belirli oranlarda kalsit, kaolin, şamozit, tramolit, mika vb. mineraller bulundurması sebebiyle yeniden kullanılabilme potansiyeline sahip ikincil bir agregası türüdür [26]. 2005 yılı verilerine göre Japonya'da, geri dönüştürülen RAP malzemesinin yaklaşık %60'ı asfalt olarak, %40'ı ise yol yapımında agregası olarak kullanılmıştır [27].

Geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA) ise, kullanım ömrünü tamamlamış betonarme yapılardan ve doğal afet sonucu oluşan betonarme yıkıntıların geri dönüşümü ile elde edilen atık malzemedir [28]. Betonun mutlak bileşiminde hacimsel olarak yaklaşık %60-80 oranında agregası bulunmaktadır. İçeriğinde bulundurduğu mineraller RAP ile benzer özellikte olup ilave olarak muskovit minerali bulundurmaktadır. Bu mineral, RCA içerisinde bulunan tuğla ve kayanın varlığı ile ilişkilendirilmektedir [26]. RCA malzemesi ihtiva ettiği mineraller ve agregası miktarı bakımından yeniden kullanılabilme potansiyeline sahip ideal bir geri dönüşüm malzemesidir. Yapılan çalışmalarda, RCA'nın mekanik ve çevresel özellikleri incelenmiş ve yol inşaatı için uygun nitelikte olduğu kanısına varılmıştır [3] [4] [6] [8] [9]. Bunlara ek olarak RCA, yol inşaatının farklı aşamalarında en çok kullanılan atık malzemesi olarak bilinmektedir [29].

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen atık malzemeler üzerinde, elek analizi, piknometre, kompaksiyon, permeabilite, direkt kesme, ıslak ve kuru CBR deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kimyasal özelliklerinden dolayı şişme potansiyeline sahip çelik cüruflarına hızlandırılmış şişme deneyleri yapılmış ve geoteknik açıdan atık malzemelerin yol dolgusunda kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

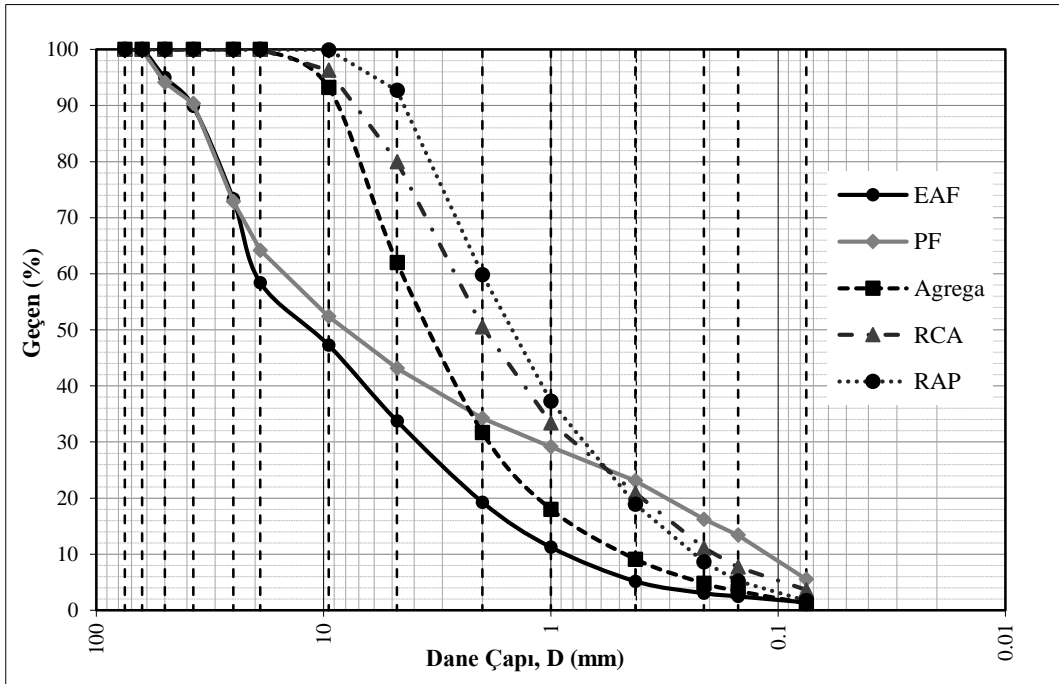
2. Materyal ve Metot

Geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA) "İSTAÇ A.Ş.", geri dönüştürülmüş asfalt agregası (RAP) "İSFALT A.Ş." çelik cürufları (EAF-PF) "ÇEMTAŞ Çelik Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den tedarik edilmiştir. Ayrıca, atık malzemelerin yol dolgu performansını kıyaslamak üzere kontrol numunesi olarak agregası 'İ.T.Ü Yapı Malzemeleri' laboratuvarından temin edilmiştir. Şekil 1'de, kullanılan malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 1. Kullanılan malzemeler: a. RCA b. RAP c. EAF d. PF e. Agregat

Tesislerden alınan numunelere ilk olarak sınıflandırma deneyleri yapılmıştır. Atık malzemelerin ve agreganın granülometri eğrileri Şekil 2’de verilmiş, fiziksel özellikleri ise Tablo 1’de özetlenmiştir.



Şekil 2. Dane çapı dağılımı eğrileri

Tablo 1. Malzemelerin fiziksel özellikleri

Malzeme	Gs	Çakıl İçeriği (%)	Kum İçeriği (%)	İnce Dane İçeriği (%)	IP (%)	Zemin Sınıfı (AASHTO)	Zemin Sınıfı (USCS)
RCA	2.68	20.0	76.4	3.6	NP	A-2-7	SW
RAP	2.50	7.3	89.1	1.7	NP	A-2-7	SW
EAF	3.62	66.3	32.4	1.3	NP	A-2-7	GP
PF	2.73	56.9	37.6	5.5	NP	A-2-7	GP
Agregat	2.71	38.0	61.0	1.0	NP	A-2-7	SW

Yapılan sınıflandırma deneyleri [30] sonucunda, malzemelerin ince dane içeriğinin %1.0 – %5.5 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Tüm malzemelerin ince dane içeriği %12'den az olduğu için, dona karşı hassasiyeti olmayan malzeme koşulunu karşılamaktadır [31]. AASHTO Sınıflandırma Sistemi'ne göre malzemeler A-2-7 olarak belirlenirken, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre RCA ve RAP iyi derecelenmiş kum (SW), cürufur kötü derecelenmiş çakıl (GP) ve agrega ise iyi derecelenmiş kum (SW) olarak belirlenmiştir. Piknometre deneylerine göre [32] EAF cürufu, demir içeriği nedeni ile diğer malzemelere kıyasla daha yüksek özgül ağırlığa sahiptir [33].

2.1. Kompaksiyon deneyleri

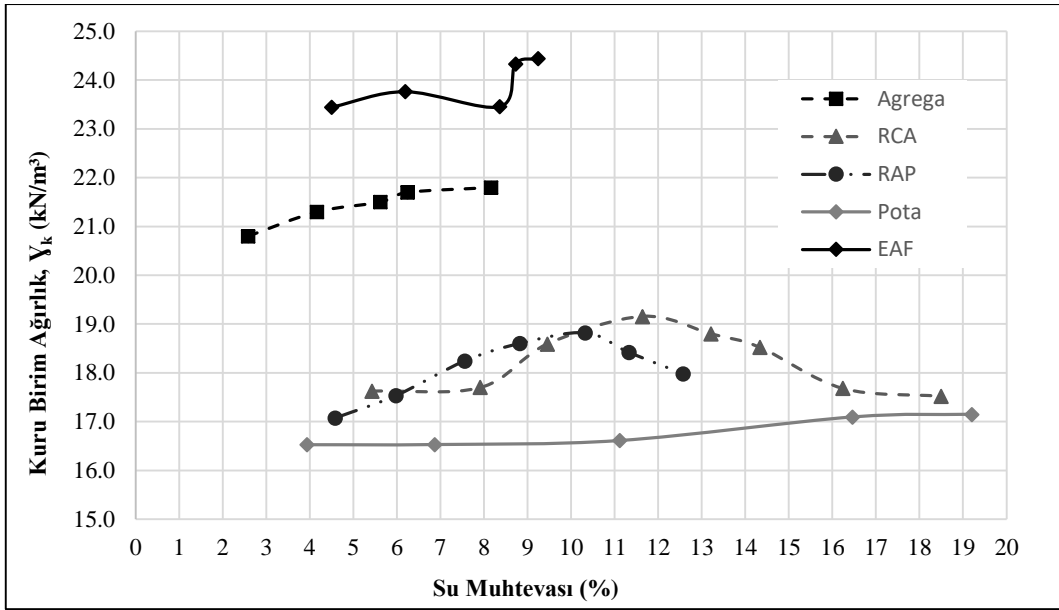
Malzemelerin dane çapı dağılım eğrileri ve ASTM D698-12 [34] standardına uygun olarak RAP için Metot A, RCA ve agrega için Metot B, EAF ve PF için ise Metot C' ye göre standart proktor enerjisi uygulanarak kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kalıp tabanında serbest su gözlemlendiğinde deneyler sonlandırılmıştır. Kompaksiyon parametreleri ise Maryland Standard Method of Test (MSMT) 321'e göre serbest suyun gözlemlendiği noktanın su içeriği ile bir önceki nokta arasındaki farkın yarısı alınarak belirlenmiştir. Şekil 3'te pota cürufundaki serbest su çıkışı gösterilmiştir.



Şekil 3. Kalıp tabanında serbest su gözlemlenmesi

Doğal zeminlerde beklenen kompaksiyon eğrilerinden farklı olarak birkaç tepe noktası içeren düzensiz sıkışma eğrileri de mevcuttur. Düzensiz eğrilikler üzerine yapılmış çalışmalara göre dane dağılımı, kıvam limitleri, dane şekli, mineraloji ve yüzey gerilimi gibi faktörlerin bu eğrileri oluşturduğu ve özellikle cüruf vb. atıklar için de söz konusu olduğu belirtilmiştir [35] [36]. Şekil 4'te tüm malzemelere ait kompaksiyon eğrileri, Tablo 2'de ise kompaksiyon parametreleri verilmektedir.

Tablo 2'den görüldüğü gibi EAF, $\omega_{opt} = \%9.0$ ve $\gamma_{kmax} = 24.4 \text{ kN/m}^3$ kompaksiyon parametreleri ile diğer malzemelere oranla en yüksek kuru birim hacim ağırlık değerine sahiptir ve bulunan değerler önceki çalışmalarla uyumludur [37]. Ayrıca tüm malzemelerin, dolgu malzemesi için belirlenen $\gamma_{kmax} = 14.5 \text{ kN/m}^3$ değerine eşit veya büyük olmalı koşulunu sağladığı görülmektedir [31].



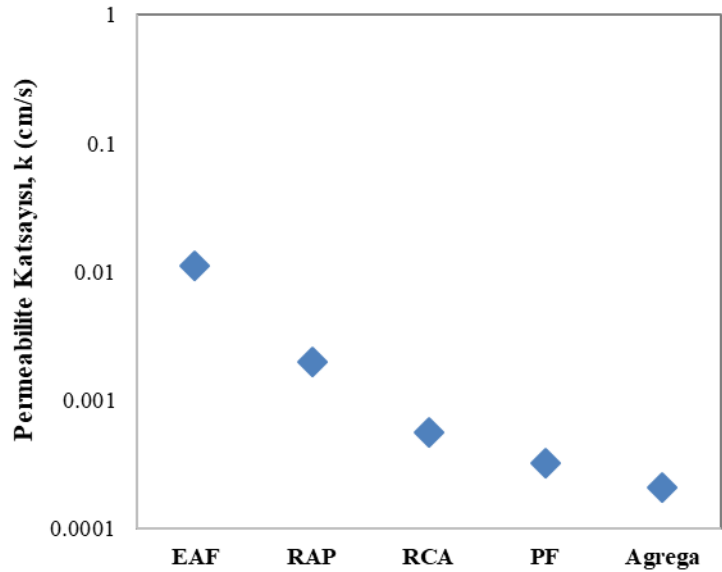
Şekil 4. Kompaksiyon eğrileri

Tablo 2. Malzemelerin kompaksiyon parametreleri

Malzeme	γ_{kmax} (kN/m^3)	ω_{opt} (%)
RCA	19.16	16
RAP	18.82	10
EAF	24.38	9
PF	17.12	18
Agrega	21.75	7

2.2. Geçirimlilik deneyleri

Malzemelerin hidrolik iletkenliklerini belirlemek için sabit seviyeli permeabilite deneyleri [38] gerçekleştirilmiştir olup deney düzeneği Şekil 5'te gösterilmiştir. RCA, RAP, EAF, PF ve agreganın permeabilite katsayıları sırasıyla 5.69×10^{-4} cm/s, 1.99×10^{-3} cm/s, 1.11×10^{-2} cm/s, 3.23×10^{-4} cm/s ve 2.08×10^{-4} cm/s olarak elde edilmiştir. PF ve RCA'da ince dane oranı nispeten yüksek olduğu için daha düşük geçirimsizlik göstermiştir. Ayrıca RCA'da bulunan çimento gibi bağlayıcı maddelerin varlığı düşük geçirimsizliğe neden olmuştur [39].



Şekil 5. Permeabilite deney düzeneği ve permeabilite katsayıları grafiği

2.3. Kesme kutusu deneyleri

Atık malzemelerin kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için 10x10 cm boyutlarındaki numune hücrelerinde direkt kesme deneyleri yapılmıştır. Numuneler #10 numaralı (2 mm) elekten geçirilerek, 100, 200 ve 300 kPa'lık normal gerilme seviyelerinde kuru şekilde kesmeye tabi tutulmuştur. Kesme kutusu cihazı Şekil 6'da kesme deneyinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri ise Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 6. Kesme kutusu deney aleti

Tablo 3. Malzemelerin kayma mukavemeti parametreleri

Malzeme	Kayma mukavemet açısı, ϕ_f (°)	Kohezyon değeri, c (kPa)
RCA	37	0
RAP	34	20
EAF	37	0
PF	28	40
Agrega	47	0

2.4. Kalifornia Taşıma Oranı (CBR) deneyleri

CBR deneyi 19 mm elekten geçen malzemelere uygun olarak tasarlandığı için [40] tüm malzemeler 19 mm elekten geçirilerek CBR deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler, optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri dikkate alınarak ıslak ve kuru koşullarda gerçekleştirilmiştir [41].

2.4.1. Kuru (CBR) deneyleri

Kuru CBR deneyinde 15 mm penetrasyona kadar okumalar alınmış ve yük-penetrasyon ilişkisini gösteren eğriler elde edilmiştir. Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra kuru CBR değerleri belirlenmiş ve Tablo 4'de verilmiştir. Kuru CBR değerlerine bakıldığında, RCA ve RAP alt temel tabakası için, EAF ve PF'nin ise temel veya alt temel tabakası için kullanıma uygun olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Malzemelerin kuru CBR değerleri

Malzeme	Kuru CBR Değeri (%)
RCA	16.5
RAP	11.8
EAF	25.8
PF	26.6
Agrega	26.8

2.4.2. Islak (CBR) deneyleri

Kuru CBR deneylerinden farklı olarak malzemeler yaklaşık 72 saat su içerisinde bekletilip numunelerden şişme okumaları alınmış ve CBR deneyleri yapılmıştır. Tüm malzemelerin, Karayolları Teknik Şartnamesi'nde dolgu malzemeler için belirtilen maksimum yaş CBR şişme yüzdesi olan %3 değerini sağladığı görülmektedir [31]. Numuneyi suya doyurma işlemi Şekil 7'de gösterilmiş ve ıslak CBR değerleri Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 7. Numuneyi suya doyurma işlemi

Tablo 5. Malzemelerin ıslak CBR değerleri

Malzeme	Islak CBR Değeri (%)
RCA	30.4
RAP	7.7
EAF	53.6
PF	46.3
Agrega	28.9

Elde edilen değerlere göre EAF ve PF diğer malzemelere oranla daha fazla performans göstermiştir. Bu durum çelik cürufunun köşeli ve pürüzlü yüzey yapısından dolayı yüksek dayanım özelliklerine sahip olması ve içeriğindeki demir içeriği ile açıklanabilir [33]. Öte yandan EAF, PF ve RCA malzemesinin ıslak CBR değerlerinin kuru CBR değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum malzemelerin su ile temas etmesi sonucu gerçekleşen hidratlaşma reaksiyonları ile açıklanabilir [39].

2.4. Hızlandırılmış şişme deneyleri

Çelik cürufları silika, alümina, kireç, magnezyum ve demir gibi oksitler içerir. Uygun sıcaklık ve kür koşulları altında, serbest kireç ve serbest magnezyum oksitler su ile temas edip hidroksitler oluşturarak uzun vadeli genişlemeye veya şişmeye neden olmaktadır [42] [43] [44] [45]. Özellikle serbest kirecin büyük ölçüde hidratasyona uğrayacağı ve bunun servis ömrü boyunca şişmeye ve stabilite sorunlarına yol açacağı bilinmektedir. Ayrıca serbest magnezyum, kireçten daha yavaş bir hidratasyon hızına sahiptir, bu nedenle yukarıda belirtilen uzun vadeli şişmeye neden olur [46]. Yol dolgusunda kullanılması planlanan mevcut EAF ve PF cüruflarının şişme potansiyelini incelemek için, numunelere ASTM D4792-13'e [47] uygun hızlandırılmış şişme testi yapılmıştır.

Hızlandırılmış şişme testlerinde, EAF ve PF malzemeleri maksimum kuru birim ağırlık ve optimum su muhtevasında ASTM D1883-07 [48] genel prosedürlerine uygun olarak sıkıştırılmış ve numune üzerine sürşarj yükü konulmuştur. Şişme yüzdesini belirlemek için okuma saatleri yerleştirilip ardından 70 ± 3 °C sıcaklıktaki su ilave edilen kovalar etüve yerleştirilmiştir. Deplasman saatleri ile okumalar alınmıştır. Şekil 8'de deneyin kurulumu, şişme eğrileri ise Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmektedir.

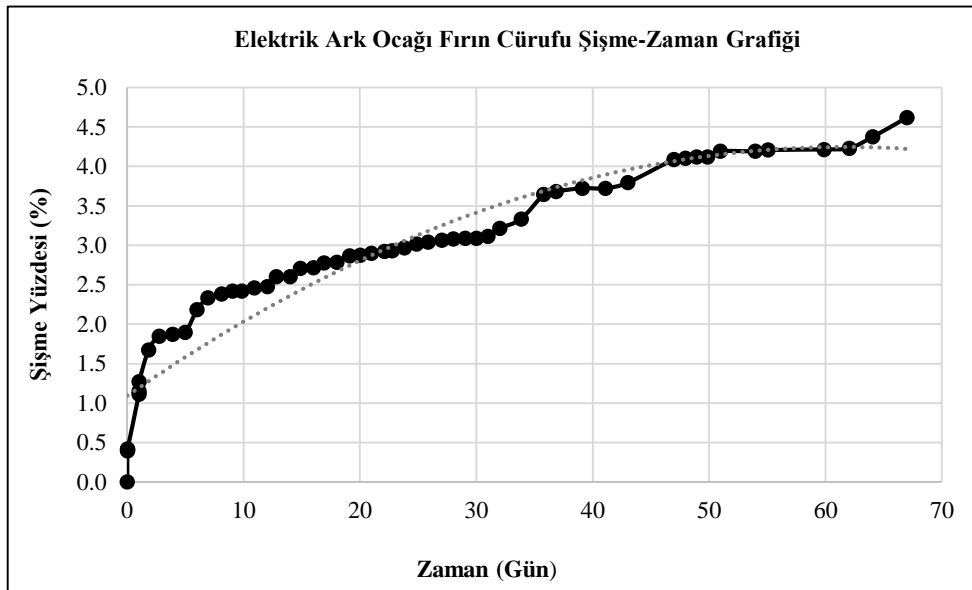
EAF'ın maksimum şişme yüzdesi %4.6, pota cürufunun ise %4.4 olarak belirlenmiştir. Şekil 9'daki şişme eğrileri incelendiğinde EAF ve pota cürufu, 2.dereceden parabolik bir eğri oluşturacak şekilde şişmektedir. Deney sonucu her iki cüruf malzemesi için elde edilen şişme değeri, şişme potansiyeli olan malzemelerin karayolu uygulamalarında kullanılabilirliğini ölçen ASTM D-2940 standardında izin verilen %0.5 sınır değerini aşmaktadır. Bu nedenle cüruf atıklarına, çeşitli iyileştirme ve yaşlandırma yöntemleri uygulandıktan sonra yol dolgusunda kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi gerekmektedir.

Yzenas (2008) [49], çelik cürufunun inşaat agregası olarak uygunluğunu değerlendirmek için bir ölçek geliştirmiştir. Bu ölçeğe göre, %11'lik şişme yüzdesine kadar çelik cüruf numunesi uygun; %11 - %16 arasında ise, aykırı (marjinal) olarak adlandırılmakta ve malzemenin daha fazla araştırılmasını önermektedir. Şişme yüzdesi %16'dan fazla olan çelik cürufu uygun olmayan malzeme olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte Juckes (2003) [50], yaptığı çalışmada çeşitli çelik cürufu malzemelerinin şişme davranışını hem laboratuvar hem de saha koşullarında değerlendirmiş ve malzemenin laboratuvar ve saha koşullarındaki şişme davranışının farklı olabileceğini göstermiştir. Buna göre, hızlandırılmış laboratuvar şişme testinde şişme hızı, sahada gerçekleşen şişme hızından oldukça yüksektir. Böylece laboratuvar test sonuçları saha performansı ile tam olarak ilişkilendirilmemektedir ve elde edilen değerler saha koşullarında meydana gelebilecek şişme miktarını kesin olarak göstermemekle birlikte bir öngörü niteliğindedir [47].

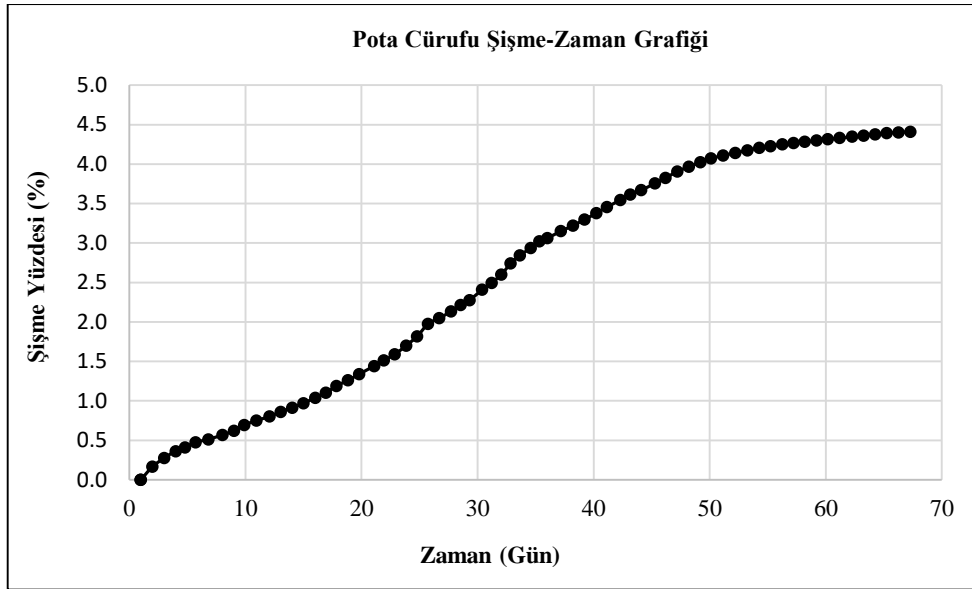


Şekil 8. Hızlandırılmış şişme testi kurulumu

Cüruflardaki şişme miktarının azaltmaya yönelik birçok bilimsel çalışma mevcuttur. Verhasselt vd. (1989) [51], kum tabakasının içindeki boşlukların şişmeyi bertaraf edebilmesi nedeniyle cüruf tabakasının altına ve üstüne kum tabakaları yerleştirmenin şişme miktarı azaltılabileceğini göstermiştir. Ghionna vd. (1996) [52], düzenli depolama sahalarında yapısal dolgu malzemesi olarak çelik cürufu kullanma potansiyelini incelemişler ve çelik cürufunun çakıl ve kum gibi malzemelerle seyreltilmesinin şişme potansiyelini azaltılabileceğini göstermişlerdir. Yıldırım ve Prezzi (2011) [15], EAF cürufuna ağırlıkça %10 oranında C sınıfı uçucu kül ilave edilmesinin, şişme değerlerini ihmal edilebilir seviyelere indirdiğini göstermiştir. Dayıoğlu (2018) [17], çelik cüruf malzemelerini bitümlü asfalt ile kaplayarak veya su arıtma rezidüelleri ile karıştırarak, yol inşaatında dolgu malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir.



Şekil 9. EAF - Hızlandırılmış şişme eğrisi



Şekil 10. PF - Hızlandırılmış şişme eğrisi

3. Tartışma ve Sonuç

Çelik üretimi sonucu ortaya çıkan endüstriyel atık miktarları depolama sorunlarına ve buna bağlı olarak çevresel zararlara yol açmaktadır. Benzer durum, geri kazanılmış inşaat-yıkım agregalarında da mevcuttur. Atıkların bertaraf edilebilmesi açısından geoteknik uygulamalar elverişlidir. Özellikle yol inşaatlarında doğal zemin yerine kullanılabilirleri, büyük hacimlerdeki atığın bertaraf edilmesini sağlayacaktır. Bu bakımdan; EAF, PF, RAP ve RCA gibi atık malzemelerin yol dolgusu olarak kullanımının araştırıldığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Mukavemet parametreleri, geçirimsizlik katsayıları ve kimyasal yapıdan kaynaklı rijitlik değerleri dikkate alındığında, atık malzemelerin yol dolgusu olarak kullanıma uygun şartlara sahip olduğu anlaşılmaktadır. ($\phi'_{EAF} = 37^\circ$, $\phi'_{PF} = 28^\circ$, $\phi'_{RAP} = 34^\circ$, $\phi'_{RCA} = 37^\circ$). Ancak cüruf kullanımı durumunda, servis ömrü boyunca oluşabilecek duraylılık sorunlarını azaltmak için uzun vadeli şişme potansiyellerinin irdelenmesi gerekmektedir.

Sabit seviyeli permeabilite deneylerine göre RCA ve PF malzemeleri düşük geçirimsizliğe; RAP ve EAF ise orta düzey geçirimsizliğe sahiptir. Malzemeler genel olarak iyi drenaj özelliği gösteren permeabilite katsayılarına sahiptir ($k_{RCA} = 5.69 \times 10^{-4}$ cm/s, $k_{RAP} = 1.99 \times 10^{-3}$ cm/s, $k_{EAF} = 1.11 \times 10^{-2}$ cm/s, $k_{PF} = 3.23 \times 10^{-4}$ cm/s). RCA bünyesinde bulunan bağlayıcı maddeler, zamanla çimentolaşma ile yol kesitinin drenaj potansiyelini olumsuz etkileyebilecektir.

Karayolları Teknik Şartnamesi'nde izin verilen kuru CBR değerlerine bakıldığında, RCA ve RAP alt temel tabakası için, EAF ve PF ise temel veya alt temel tabakası için kullanıma uygundur [31]. Öte yandan EAF, PF ve RCA malzemesinin ıslak CBR değerlerinin kuru CBR değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, malzemelerin su ile temas etmesi sonucu gerçekleşen hidratlaşma reaksiyonları ile açıklanabilir.

Literatürde cürufaların uygun koşullarda hidratlaşma eğilimi gösterdiği belirtilmiştir. Bu çalışmada, yapılan ıslak CBR ve permeabilite deneylerinde de hidratlaşmanın etkileri gözlenmiştir. Buna göre, hidratlaşma reaksiyonları geçirimsizlik katsayısında azalmaya neden olurken, EAF, PF ve RCA malzemelerinin CBR değerlerini arttırmıştır.

Hızlandırılmış şişme deneylerin, EAF'nin maksimum şişme yüzdesi %4.6, pota cürufunun ise %4.4 olarak belirlenmiştir. Deney sonucu her iki cüruf malzemesi için elde edilen şişme değeri, izin verilen %0.5 sınır değerini aşmaktadır. Bu nedenle cüruf atıklarına, çeşitli iyileştirme ve yaşlandırma yöntemleri uygulandıktan sonra yol dolgusunda kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Bilimi (BAP) tarafından 43769 ve 42841 nolu projelerle desteklenmiştir. Ayrıca yazarlar çalışma esnasında verdiği bilimsel destekten ötürü Prof. Dr. Aykut ŞENOL'a teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] TÇÜD, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2015) Demir Çelik Cüruf Raporu. Türkiye Çelik Üreticileri Derneği. 2015.
- [2] Abbaspour, A., B.F. Tanyu, and B. Cetin, Impact of aging on leaching characteristics of recycled concrete aggregate. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016. 23: p. 20835-20852.
- [3] Arulrajah, A., et al., Geotechnical properties of recycled concrete aggregate in pavement sub-base applications. *Geotechnical Testing Journal*, 2012. 35(5): p. 743-751.
- [4] Bestgen, J.O., et al., Mechanical and environmental suitability of recycled concrete aggregate as a highway base material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016. 28(9): p. 04016067.
- [5] Cetin, B., A.H. Aydilek, and Y. Guney, Stabilization of recycled base materials with high carbon fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010. 54(11): p. 878-892.
- [6] Cooley, L.A., H. Hornsby, and B.C. Dennis, Evaluation of crushed concrete base strength. 2012, Mississippi. Dept. of Transportation.
- [7] Dayioglu, A.Y. and A.H. Aydilek, Effect of pH and subgrade type on trace-metal leaching from steel-slag embankments into groundwater. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019. 31(8): p. 04019149.
- [8] Engelsen, C.J., H.A. van der Sloot, and G. Petkovic, Long-term leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction. *Science of the Total Environment*, 2017. 587: p. 94-101.
- [9] Haider, I., et al. Evaluation of the mechanical performance of recycled concrete aggregates used in highway base layers. in *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability*. 2014.
- [10] Jahren, C.T. and D. Chen. Long-term performance of cold in-place recycled asphalt roads. in *Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium Ames, Iowa*. 2005.
- [11] Li, L., et al., Sustainable construction case history: Fly ash stabilization of recycled asphalt pavement material. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2008. 26: p. 177-187.
- [12] Augiseau, V., Construction materials flows and stocks in Paris region: An overview. *Ecocycles*, 2020. 6(1): p. 18-22.
- [13] Uysal, F.F. and S. Bahar, Cüruf Çeşitleri ve Kullanım Alanları. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2018. 19(1): p. 37-52.
- [14] Yi, H., et al., An overview of utilization of steel slag. *Procedia Environmental Sciences*, 2012. 16: p. 791-801.
- [15] Yildirim, I.Z. and M. Prezzi, Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*, 2011. 2011.
- [16] Association, W.S., World steel in figures. World Steel Association: Brussels, Belgium, 2022.
- [17] Dayioglu, A.Y., et al., Trace metal leaching from steel slag used in structural fills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018. 144(12): p. 04018089.
- [18] Dayioglu, A.Y., A.H. Aydilek, and B. Cetin, Preventing swelling and decreasing alkalinity of steel slags used in highway infrastructures. *Transportation Research Record*, 2014. 2401(1): p. 52-57.
- [19] Mina, E., R. Kusuma, and N. Ulfah. Utilization of steel slag and fly ash in soil stabilization and their effect to california bearing ratio (CBR) value.(Case study: Kp. Kadusentar road Medong village Mekarjaya Subdistrict Pandeglang District). in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. IOP Publishing.
- [20] Shi, C., Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of materials in civil engineering*, 2004. 16(3): p. 230-236.
- [21] Wang, S., et al., Experimental Research on Steel slag Stabilized Soil and its Application in Subgrade Engineering. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020. 38(5): p. 4603-4615.
- [22] Yildirim, I.Z. and M. Prezzi, Subgrade stabilisation mixtures with EAF steel slag: an experimental study followed by field implementation. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022. 23(6): p. 1754-1767.

- [23] Senol, A. and B. Erol. 2D Numerical Settlement Analysis of A Slag Aggregated Test Road on Weak Soils. in Material Design, Construction, Maintenance, and Testing of Pavements: Selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference. 2009.
- [24] Dayioglu, A.Y. and A.H. Aydilek, Evaluation of mitigation techniques for the expansive behavior of steel slag, in Geotechnical Frontiers 2017. 2017. p. 360-368.
- [25] Şeref, O., B. YILMAZ, and M.S. Mazlum, Geri kazanılan asfalt kaplamaların sıcak asfalt karışımlarda yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2018. 30(1): p. 87-93.
- [26] Hung, V.Q., et al., Investigating Potential Environmental Issues of using Recycled Materials in Road Construction.
- [27] Cabrera, M.B., T. Satomi, and H. Takahashi, Study on recycling of waste asphalt blocks containing roadbed materials using new screenless separation equipment with a vibration device. International Journal of Pavement Research and Technology, 2017. 10(3): p. 228-244.
- [28] Akbaş M., D.A.Y., Hatipoğlu M., İyisan R., Geri Dönüştürülmüş Beton Agregaların Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı, in Conference Paper September. 2018.
- [29] Zhang, Y., D. Goulias, and A. Aydilek, Sustainability evaluation of pavements using recycled materials, in Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. 2017, CRC Press. p. 1283-1291.
- [30] ASTM-D422-63, D422-63. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA: 2007. 2007.
- [31] KTS, T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü. (2013) Karayolları Teknik Şartnamesi 2013.
- [32] ASTM D854-14, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. 2014: ASTM International, West Conshohocken, PA: 2014. In.
- [33] Deniz, D., E. Tutumluer, and J.S. Popovics, Expansive characteristics of reclaimed asphalt pavement (RAP) used as base materials. 2009, Illinois. Dept. of Transportation. Bureau of Materials and Physical Research.
- [34] ASTM-D698, Standard practice for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). Book of Standards 04.08, 2003.
- [35] Rohde, L., W. Peres Núñez, and J. Augusto Pereira Ceratti, Electric arc furnace steel slag: base material for low-volume roads. Transportation research record, 2003. 1819(1): p. 201-207.
- [36] Yildirim, I.Z. and M. Prezzi, Use of steel slag in subgrade applications. 2009.
- [37] Noureldin, A.S. and R.S. McDaniel, Evaluation of surface mixtures of steel slag and asphalt. Transportation Research Record, 1990(1269).
- [38] ASTM D2434-68, Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head): ASTM D2434-2006, ASTM International West Conshohocken, PA.
- [39] McCulloch, T., et al., Long-term performance of recycled concrete aggregate for subsurface drainage. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017. 31(4): p. 04017015.
- [40] ASTM D4318-17, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. 2017: West Conshohocken, PA; ASTM International.
- [41] ASTM D1883-21, Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils, in ASTM International. 2021.
- [42] Cikmit, A.A., et al., Expansion characteristic of steel slag mixed with soft clay. Construction and Building Materials, 2019. 227: p. 116799.
- [43] Dayioglu, A.Y., Geotechnical and environmental impacts of steel slag in highway embankments. 2016, University of Maryland, College Park.
- [44] Feng, P., et al., Steel slag aggregate concrete filled-in FRP tubes: Volume expansion effect and axial compressive behaviour. Construction and Building Materials, 2022. 318: p. 125961.
- [45] Ramonich, E.V. and M. Barra, Reactivity and expansion of electric arc furnace slag in their application in construction. Materiales de Construcción, 2001. 51(263-264): p. 137-148.
- [46] Montenegro-Cooper, J., et al., Study of the expansive behavior of ladle furnace slag and its mixture with low quality natural soils. Construction and Building Materials, 2019. 203: p. 201-209.
- [47] ASTM D4792-13, Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions. 2019.

- [48] ASTM D1883-07, Standard test method for CBR (California bearing ratio) of laboratory compacted soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [49] Yzenas, J. Utilization of Steel Furnace Slag in Asphalt. in Presentation in ADC60 Waste Management and Resource Efficiency in Transportation Summer Conference, July. 2008.
- [50] Juckes, L.M., The volume stability of modern steelmaking slags. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2003. 112(3): p. 177-197.
- [51] Verhasselt, A. and F. Choquet, Steel slags as unbound aggregate in road construction: problems and recommendations, in Unbound Aggregates in Roads. 1989, Elsevier. p. 204-211.
- [52] Ghionna, V., et al. Geotechnical investigation on steel slags mixtures for landfills embankments construction. in Environmental geotechnics. 1996.