

Kompaksiyon Yönteminin Farklı Tip Geri Dönüştürülmüş Agregalar Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

Bahadır OK^{1*}, Hüseyin ÇOLAKOĞLU²

^{1,2}Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 01250, Adana

¹<https://orcid.org/0000-0001-8333-5671>

²<https://orcid.org/0000-0001-6804-0963>

*Sorumlu yazar: bahadirok@atu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 18.02.2022

Kabul tarihi:06.07.2022

Online Yayınlanma:12.12.2022

Anahtar Kelimeler:

İnşaat ve yıkıntı atıkları

Kompaksiyon yöntemi

Atık agregalar

Sürdürülebilirlik

Geri dönüşüm

Dolgular

ÖZ

Son yıllarda inşaat ve yıkıntı atıklarının dönüştürülerek tekrar kullanılması, çevresel kaygılar ve ekonomik sebeplerden dolayı artarak önem kazanmıştır. Bu çalışmada farklı inşaat ve yıkıntı atıklarından dolgu inşa edebilmek için sıkıştırılmasında kompaksiyon yönteminin etkisi araştırılmıştır. Bu doğrultuda önce beş farklı yıkıntı atığı dönüştürülerek granüler dolgu malzemesi haline getirilmiş ve su emme gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra bu atık agregalar üzerinde ayrı ayrı düşen tokmak ve titreşimli tokmak kullanarak kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kompaksiyon deneyleri öncesi ve sonrası elek analizleri ile danelerin kompaksiyon yöntemine göre parçalanma durumları araştırılmıştır. Bu deneyler atık agregaları kıyaslama amacı ile bir çeşit doğal agrega üzerinde yürütülmüştür. Çalışma sonucunda atık agregaların su emmelerinin limit değerlerden yüksek olduğu ve tuğla bazlı atık agregaların su emme değerlerini daha da yükselttiği görülmüştür. Ayrıca atık agregaların titreşimli tokmaklarla sıkıştırılmasının danelerin parçalanmasını azaltacağından faydalı olacağı öne sürülmektedir.

The Investigation of the Effects of Compaction Method on Different Types of Recycled Aggregates

Research Article

Article History:

Received: 18.02.2022

Accepted: 06.07.2022

Published online: 12.12.2022

Keywords:

Construction and demolition wastes

Compaction method

Waste aggregates

Sustainability

Recycling

Fillings

ABSTRACT

In recent years, the recycling and reuse of construction and demolition wastes have become increasingly important due to environmental concerns and economic reasons. In this study, the effect of the compaction method on the compaction of different construction and demolition wastes in order to build a filling was investigated. Accordingly, firstly, five different debris wastes were converted into granular filling material and their physical properties such as water absorption were determined by laboratory tests. After that, compaction tests were carried out on these waste aggregates using separately falling hammers and vibrating hammers. Besides, sieve analyzes were conducted before and after the compaction tests, and so the disintegration of the particles according to the compaction method was investigated. These tests were performed on a type of natural aggregate to compare waste aggregates. As a result of the study, it was observed that the water absorption values of the waste aggregates were greater than the limit values, and also the brick-based waste aggregates were caused to more increase water absorption value. It was also put forward due to the fact that compacting the waste aggregates with vibratory rammers will be beneficial as it will reduce the degradation of the particles.

To Cite: Ok B., Çolakoğlu H. Kompaksiyon Yönteminin Farklı Tip Geri Dönüştürülmüş Agregalar Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 5(3): 1592-1607.

1. Giriş

Agregalar inşaat mühendisliği uygulamalarında en fazla tüketilen doğal kaynaklardan biridir. Sanayi Devrimi sonrasında hızla gelişen teknoloji ve nüfus artışı beraberinde inşaat sektörünün hızlı bir şekilde büyümesine sebep olmuştur. Bunun bir sonucu olarak sınırlı kaynaklara sahip olan doğal agregaya talep artmış ve talepteki artışa paralel olarak da agreganın maliyeti artmıştır. Bu durum taş ocaklarının sayısını arttırmıştır. Ancak yeni açılan taş ocakları ile beraber taş ocaklarının doğal yaşam ve çevre üzerinde oluşturduğu olumsuz etkiler de artmıştır. Bu duruma önlem olarak çevre yönetmelikleri ağırlaştırılmış ve bu da agreganın maliyetini daha da arttırmıştır (Arulrajah ve ark., 2011). Maliyet artışının dışında bir doğal kaynak olan agreganın gelecekte tükenmesi olasıdır. Bütün bu sebepler, agregaya alternatif malzeme seçeneklerinin değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur (Arulrajah ve ark., 2011; Cerni ve ark., 2012; Arulrajah ve ark., 2013; Vieira ve Pereira, 2015).

İnşaat sektörü yoğun olarak atık üreten bir sektör olup (üretilen toplam atıkların yaklaşık yarısına yakını) bu sektörde üretilen atıklar ülkemizde inşaat ve yıkıntı atıkları (İYA), dünya literatüründe ise yaygın bir şekilde “construction and demolition waste” olarak isimlendirilir (Vieira ve Pereira, 2015). Bu atıklar genellikle yapıların yıkımı, onarımı ve inşası gibi inşaat faaliyetleri sonrasında oluşan ve agrega, beton, toprak, tuğla, cam, plastik ve bitümlü karışımlar gibi malzemeleri heterojen bir şekilde içerebilen atıklardır. Ayrıca İYA'nın içerdiği atıkların oranı elde edildiği kaynağa göre değişiklik göstermektedir. Farklı bölgelerde farklı yapı tipleri tercih edilebilmesi, bölgedeki ustaların tecrübeli olduğu inşaat yöntemlerinin kullanılması, bölgeye yakın yapı malzemelerinin daha çok tercih edilmesi, bölgedeki binaların inşa edildiği yıllardaki yönetmelikler, vb. etmenler farklı bölgelerden elde edilen İYA'ların farklı özelliklere sahip olmasına sebep olacaktır. Son yıllarda gelişen inşaat sektörüne paralel olarak İYA'ların üretimi de artmaktadır (Jimenez ve ark., 2012; Cerni ve ark., 2012; Arulrajah ve ark., 2013). Ayrıca bu artış günden güne de artarak devam etmektedir. Örneğin, Avrupa Birliği komisyonunun bir çalışma gurubu 1999'da Avrupa genelinde yılda yaklaşık 180 milyon ton İYA üretildiğini bildirirken, aynı komisyon 2010 yılında 310 ila 720 milyon ton İYA üretildiğini raporlamıştır. Yani üretilen atık miktarı 11 yılda yaklaşık 2-4 katına çıkmıştır (Vieira ve Pereira, 2015; Ok, 2018; Sarıcı, 2019; Ok ve ark., 2020). Bu artışın kentsel yenileme projeleri ile daha da artması beklenmektedir. Bu bağlamda önümüzdeki on yıllık süreçte Türkiye'de 6-7 milyon yapının yıkılması öngörülmektedir (Ok, 2018). Üretilen İYA'ların bir kısmı geri dönüştürülse de (2010 yılında Avrupa'da geri dönüşüm oranı yaklaşık %46) hala büyük bir kısmı depolama alanlarında depolanmaktadır. Bununla birlikte çevre sürdürülebilirliğini arttırmak ve dolayısı ile özellikle son yıllarda küresel çapta büyük problemler yaratan küresel ısınmayı azaltmak için bu atıkların depolanması yerine tekrar kullanılması önem arz etmektedir. Tekrar kullanım sonucunda doğal kaynakların tüketimi, atık depolama maliyetleri ve alanları, sera gazı salınımları ve inşaat maliyetleri azaltılabilirken enerji tasarrufu da

sağlanabilir. Bu bağlamda özellikle son yıllarda yoğunlaşan bir şekilde bu atıkların tekrar kullanımı için yollar aranmaktadır.

Birçok araştırmacı yürüttüğü çalışmalarda İYA vb. atık malzemeler üzerinde elek analizi, Los Angeles deneyi, yassılık indeksi deneyi, su emme deneyi, dane yoğunluğu deneyi gibi deneyler yaparak fiziksel özelliklerini ve ayrıca modifiye kompaksiyon deneyi, serbest basınç deneyi, CBR, esneklik modülü deneyi, üç eksenli deneyi, kesme kutusu deneyi gibi bazı geoteknik deneyleri yaparak geoteknik özelliklerini incelemiştir. Çalışmaların sonucunda bu atıkların çeşitli dolgularda dolgu malzemesi olarak kullanılma potansiyelinin olduğu bildirilmiştir (Bennert ve ark., 2000; Nataatmadja ve Tan, 2001; Molenaar ve van Niekerk, 2002; Sivakumar ve ark., 2004; Poon ve Chan, 2006; Santos ve Vilar, 2008; Arulrajah ve ark., 2011; Leite ve ark., 2011; Cerni ve ark., 2012; Arulrajah ve ark., 2013; Vieira ve Pereira, 2015; Ok ve ark., 2020). Bununla birlikte çalışmalarda İYA'nın içeriğinde barındırdığı beton (Recycled Concrete Aggregate-Geri dönüşümlü Beton Atığı-GBA) ve tuğla parçalarının (Crushed Brick – Tuğla Atığı-TA) İYA'nın fiziksel ve geoteknik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceği açıktır. İYA'nın içerisinde barındırabildiği farklı atıkların araştırılması hem İYA'ların daha iyi anlaşılmasına olanak sağlayarak kullanımını arttırabilecek hem de farklı atık agregaların doğal agregalar yerine kullanılabilmesi durumunun kıyaslanabilmesine imkân verebilecektir. Bu durum İYA'ların kullanımı ile elde edilebilecek ekonomik ve çevresel kazançları arttırabilecektir. Nataatmadja ve Tan (2001), çalışmalarında farklı dayanıma sahip geri dönüşümlü betonlardan elde ettiği GBA'lar üzerinde araştırmalar yaparak dayanım etkisini vurgulamışlardır. Daha sonrasında birçok çalışmada GBA, TA ve doğal agregalar üzerinde deneyler yapılarak İYA'nın büyük oranda içerebileceği atıkların İYA'nın fiziksel ve geoteknik özelliklerine etkisi olacağı ifade ederek konu ile ilgili çalışmaların geliştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. (Sivakumar ve ark., 2004; Poon ve Chan, 2006; Arulrajah ve ark., 2011; Leite ve ark., 2011; Cerni ve ark., 2012; Arulrajah ve ark., 2013). İYA'ların dolgularda doğal agregalara alternatif olarak kullanılabilmesi için kompaksiyon özelliklerinin doğal agregaya göre kıyaslanması gerektiği açıktır. Özellikle İYA'ların içerdiği farklı atık malzemelerin farklı yöntemlerle sıkıştırılması sonucunda optimum sıkıştırma yöntemi belirlenebilir. Bu da İYA'ların kompaksiyon düzeyini geliştireceği için kullanımını arttırabilir. Ancak İYA'ların içeriğine göre uygun sıkıştırma yöntemini araştıran bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Granüler zeminlerin kompaksiyonu, zemin türü (dane şekli, pürüzlülüğü vb.), su içeriği, kompaksiyon enerjisi ve kompaksiyon metodundan büyük oranda etkilenmektedir (Holtz ve Kovacs, 1981; Uzuner, 2016). Doğal granüler zeminlerin sıkıştırılmasında kompaksiyon metodunun etkisi hala araştırılan bir konudur. Son yıllarda bazı araştırmacılar granüler doğal zeminlerin statik yük, dinamik yük (düşen tokmak) ve titreşimli tokmakla sıkıştırılmasının önemli etkiler oluşturabileceğini yaptıkları farklı çalışmalarla vurgulamışlardır (Al-Radi ve ark., 2017; Akan ve Keskin 2018; Ji ve ark., 2021; Zvonaric ve ark., 2021). Yaghoubi ve ark. (2018), yaptıkları çalışmada beton bazlı ve tuğla bazlı geri dönüştürülmüş atık agregaları statik ve dinamik yöntemle

sıkıştırarak yöntemler arasındaki farkı incelemişlerdir. Çalışmalarında statik yükleme ile sıkıştırılan atık agregaların dayanımı ve parçalanmasını da araştırmışlardır. Granüler zeminlerin arazide titreşim yardımı ile sıkıştırılması oldukça yaygındır (Holtz ve Kovacs, 1981; Das ve Sobhan, 2010; Uzuner, 2016). Dolayısı ile titreşimli tokmakla elde edilecek sıkışmanın arazi için bir referans olacağı açıktır. İYA'ların dolgularda granüler malzemeler yerine kullanılması araştırılırken bu malzemelerin sıkıştırılmasında titreşimli sıkıştırma metodunun etkisinin araştırılması arazide yapılacak dolgular açısından önem arz etmektedir. Ayrıca İYA'lar birçok yıkıntı atığını heterojen bir şekilde içerisinde barındırdıkları için sahip oldukları atıkların bileşimi ve dayanımına göre farklı kompaksiyon özellikleri göstermeleri beklenmektedir. Molenaar ve van Niekerk, (2002) ve Leite ve ark. (2011), malzeme içeriğinin kompaksiyon derecesini etkilediğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte atıktaki geri dönüşümlü agregaların bileşimi ve dayanımı değişikçe kompaksiyon sırasında danelerinin aşırı parçalanması ile gradasonunun değişmesi oldukça mümkün görünmektedir. Bu da bu yıkıntı atıklarından inşa edilecek dolgunun kompaksiyonunu ve dolayısı ile mühendislik özelliklerini etkileyecektir. Bu bağlamda literatür incelendiğinde kompaksiyon yönteminin ve atık içeriğinin birlikte atığın kompaksiyonuna etkisini inceleyen çalışmaların arttırılması gerektiği görülmüştür. Literatürde özellikle farklı kompaksiyon yöntemlerine göre atık agregalarda elde edilecek sıkışma düzeylerini inceleyen detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Özellikle atık agregaların yük karşısında doğal agregalara göre daha fazla parçalanma eğiliminde olması, kompaksiyon yönteminin atık agregaların sıkışma düzeyini değiştirebileceği olgusunu ortaya çıkarmıştır. Bu bağlamda kompaksiyon yönteminin atık agregalardaki parçalanma etkisi ve dolayısı ile kompaksiyon yöntemine göre atık agregaların sıkışma düzeylerinin belirlenmesi hem literatüre önemli bir katkı yaparak araştırmacılara daha ileri çalışmalar için fikir verebilecek hem de bu atık agregaların arazideki kompaksiyonunu daha verimli hale getirerek mühendislere katkı sağlayabilecektir. Atık agregaların kompaksiyonunu iyileştirmek için yapılacak işlemler veya öneriler atık malzemenin tekrar kullanımı ve dolayısı ile bertarafını arttıracağı için önemli olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada önce temin edilen atıklar bazı işlemlerden geçirilerek (metal parçaların ayıklanması ve agregaların uygun gradasyona getirilebilmesi için parçalanması) üç farklı içeriğe sahip ve aynı içerikte üç farklı dayanıma sahip atık agregalar elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen bu atık agregaların dane birim hacim ağırlıkları ve su emme yüzdeleri belirlenmiştir. Devamında atık agregalar üzerinde düşen tokmak ve titreşimli tokmak ile modifiye proktor deneyleri yapılarak sıkıştırma yöntemine göre maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su içeriği (ω_{opt}) değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte deney öncesi ve deney sonrası yapılan elek analizleri ile kompaksiyon yönteminin danelerin parçalanmasına olan etkisi araştırılmıştır. Ayrıca dolgularda yaygınca kullanılan bir çeşit doğal agrega (uygun gradasyona sahip) elde edilerek atık agregalar üzerinde yapılan deneyler yapılmış ve sonuçlar atık agregalardan elde edilen sonuçlar ile kıyaslanarak sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada beş tane inşaat ve yıkıntı atıkları temelli ve bir adet doğal agrega olmak üzere altı farklı agrega numunesi üzerinde deneyler yapılmıştır. Atık agregalardan üç tanesi geri dönüşümlü beton bazlıdır. Ancak bu atıkların geri dönüştürülerek elde edildikleri betonun dayanımları farklıdır. Kalan iki atık agregadan bir tanesi yıkılan bir binanın atıklarının doğrudan geri dönüştürülmesi ile elde edilen ve birçok atık agregayı içeren inşaat ve yıkıntı atığıdır. Son atık agrega ise atık tuğlaların geri dönüştürülmesi ile elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan doğal agrega ise atık agregalardan elde edilen sonuçları karşılaştırmak amacıyla temin edilmiştir.

2.1.1. Atık Agregaların Tipleri ve Temini

Bu çalışmada, Çukurova bölgesindeki 'Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun' kapsamında riskli yapı sınıfına giren yaklaşık 30 yıllık bir betonarme konutun yıkılması sonucu ortaya çıkan atıklar toplanmıştır. Yıkılan binadan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan beton basınç dayanımı testleri sonucunda beton basınç dayanımı ortalama 13,4 MPa belirlenmiştir. Elde edilen yıkıntı atıkları çeşitli işlemlerden geçirilerek inşaat ve yıkıntı atığı agregaya (İYA) dönüştürülmüştür.

Yapıların inşası sırasında kullanılan betonun basınç dayanımının istenilen kalitede olup olmadığının belirlenmesi için beton dökümü sırasında kenarı 15 cm olan küp numuneler alınmaktadır. Elde edilen küp numuneler laboratuvarında 7 ve 28 günlük kürlenme işlemine tabi tutulmakta sonrasında beton basınç cihazında test edilerek beton basınç dayanımları elde edilmektedir (TS EN 12390-3). Test sonrası parçalanmış numuneler belli bir süre sonrasında atık olarak depolama sahalarına gönderilmektedir. Beton basınç dayanımı testine tabi tutulduktan sonra atık duruma gelen ve depolanan numunelerden beton sınıfı C40 ve C30 olan numuneler alınmış ve çeşitli işlemlerden geçirilerek geri dönüştürülmüştür. Bu işlem sonucunda iki farklı dayanıma sahip GBA40 (beton sınıfı C40) ve GBA30 (beton sınıfı C30) geri dönüştürülmüş beton agregaları elde edilmiştir. Ayrıca nispeten düşük dayanımlı geri dönüştürülmüş beton agregalar elde etmek için beton bazlı bir malzeme olan ve zamanla deforme olmasından dolayı atık duruma gelen 15 yıllık kilit parke taşları temin edilmiştir. Elde edilen kilit parke taşları üzerinde TS 2824 EN 1338 standardına göre parke yarma deneyi yapılmış ve yarmada çekme dayanımı ortalama 3,85 MPa olarak belirlenmiştir. Daha sonra kilit parke taşları çeşitli işlemlerden geçirilerek dönüştürülmüş kilit parke taşı agregalar (KP) elde edilmiştir. Bunların dışında Çukurova bölgesinde yaklaşık 30 yıl önce üretilen ve atık duruma gelmiş tuğlalar temin edilmiş geri dönüştürülerek tuğla atığı agrega (TA) elde edilmiştir. Elde edilen beş çeşit atık agreganın görüntüsü Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Atık agregalar

2.1.2. Doğal Agregaya

Çalışma kapsamında atık agregaların dolgularda kullanılabilirliğinin değerlendirilebilmesi açısından dolgularda sıkça kullanılan bir çeşit doğal agregaya (DA), Adana ilinde bulunan bir taş ocağından temin edilmiştir. Atık agregalar üzerinde yapılan tüm testler doğal agregaya da uygulanmıştır. DA'nın görüntüsü Şekil 2'de gösterilmektedir.



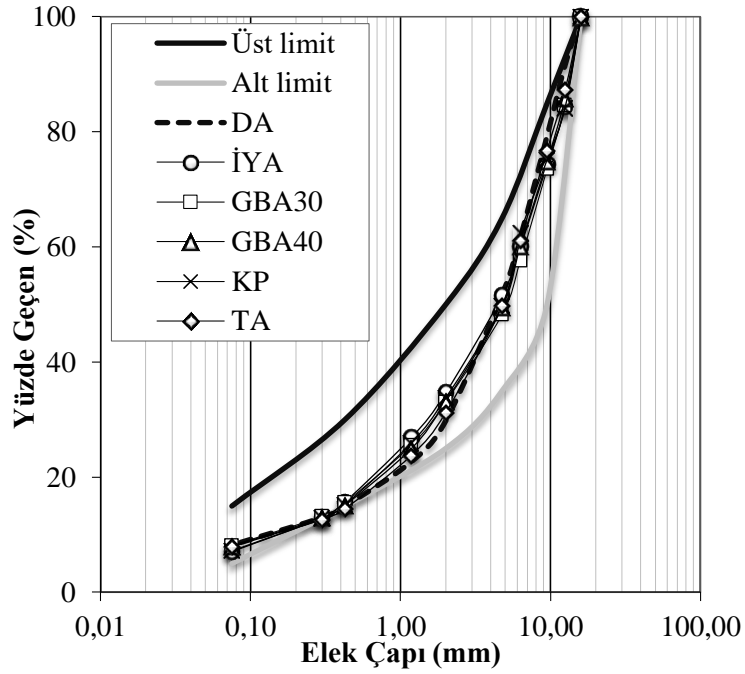
Şekil 2. Doğal agregaya

2.1.3. Atık agregaların geri dönüştürülmesi ve uygun gradasyona getirilmesi

Depreme dayanıksız olduğu için yıkılan binanın molozlarındaki özellikle büyük boyutlu metal parçalar (donatı vb.) hali hazırda ekonomik bir değeri olduğu için binayı yıkan firma tarafından alınmıştır. Kalan yıkıntılardaki metal parçaları el ile ayıklanmıştır. Ayıklanan atık malzemeler iki farklı ağız açıklığına sahip çeneli kırıcılar kullanılarak parçalanmıştır (Şekil 3). Parçalanma sonrasında 15-9 mm, 9-5 mm ve 5-0 mm olarak üç farklı boyutta malzeme elde edilmiş ve bu malzemeler üzerinde elek analizleri yapılarak gradasyonları belirlenmiştir (ASTM D 422-63). Daha sonra farklı boyutlardaki malzemelerden, yol temel/alt temel ve yüzey tabakalarında granüler dolgu malzemesi olarak kullanmaya uygun bir gradasyon elde edebilmek için ASTM D 12141-00 standardındaki C gradasyonu hedef alınarak bir karışım hesabı yapılmıştır. Hesap edilen karışım oranlarına göre karışım yapılarak İYA elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen İYA'nın gradasyonunun uygunluğu elek analizi ile kontrol edilmiştir (ASTM D 422-63). Benzer işlemler GBA40, GBA30, KP ve TA için de yapılarak ASTM D 12141-00 standardının C gradasyonuna uygun atık agregalar elde edilmiştir. Bu atık agregalarda İYA gibi metal parça içermemektedir. Ayrıca farklı boyutlarda temin edilen doğal agregalar karıştırılarak ASTM D 1241-00 standardının C gradasyonuna uygun olarak DA elde edilmiştir. Benzer gradasyon elde edilen beş çeşit atık agregaların (İYA, GBA40, GBA30, TA ve KP) ve doğal agregaya'nın (DA) gradasyonları Şekil 4'te gösterilmektedir. Bu malzemelerin hepsi birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre iyi derecelendirilmiş çakıl (GW) olarak sınıflandırılmıştır (ASTM D 2487-11).



Şekil 3. Farklı ağız açıklığına sahip çeneli kırıcılar (Çolakoğlu ve ark., 2021)



Şekil 4. Atık agregalar ve Doğal agreganın tasarım gradasyonları

2.2. Metot

Kompaksiyon yönteminin kompaksiyonu yakından etkileyen parametrelerden biri olduğu bilinmektedir (Das ve Sobhan, 2010). Dolgularda kullanmak için uygun gradasyona getirilen atık agregalarda kompaksiyon yönteminin kompaksiyona etkisini belirlemek için düşen tokmak ve titreşimli tokmak ile kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Ayrıca sıkıştırma aşamasındaki tokmak darbelerinin atık agregalarda yaratacağı parçalanma miktarı, deneyler sonrasında yapılan elek analizleri ile belirlenmiştir. Benzer işlemler doğal agregalar için de yapılarak tokmak darbelerinin doğal ve atık agregalar üzerindeki aşındırıcı etkisi ile ilgili değerlendirmelerde bulunulmuştur.

2.2.1. Düşen tokmak ile kompaksiyon

Modifiye proktor deneyi, maksimum dane boyutuna göre 3 farklı şekilde yapılmaktadır. Bu çalışmadaki maksimum dane boyutu yaklaşık 15 mm olduğu için ilgili standardın Metot C yöntemindeki prosedürler uygulanarak düşen tokmak ile modifiye proktor deneyleri

gerçekleştirilmiştir. Metot C'ye göre numune deney kabına 5 tabaka halinde yerleştirilir ve her tabakaya 45,7 cm yükseklikten, 4,54 kg'lık tokmak (2,700 kNm/m³) 56 defa serbest düşürülerek sıkıştırılır. Her deney sonrası sıkışan malzemeden bir miktar numune alınarak malzemenin su içeriği belirlenir. Bu işlem farklı su içeriklerindeki numuneler üzerinde tekrar edilerek kompaksiyon eğrisi elde edilir. Kompaksiyon eğrisine göre numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) ve optimum su içeriği (ω) belirlenir. Deneyinde kullanılan tokmak ve deney kabı Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Düşen tokmakla kompaksiyon deney aletleri ve tokmağın uygulanışı

2.2.2 Titreşimli tokmak ile kompaksiyon

Titreşimli tokmakla kompaksiyon deney standardı, maksimum dane boyutuna göre 2 farklı şekilde sıkıştırma prosedürü öne sürmektedir. Bu çalışmadaki maksimum dane boyutu yaklaşık 15 mm olduğu için ilgili standardın Metot A yöntemindeki prosedürler uygulanarak deney gerçekleştirilmiştir. Metot A'ya göre numune deney kabına 3 tabaka halinde yerleştirilir ve bu işlem farklı su içeriklerinde tekrarlanır. Yerleştirme işleminde her tabakaya 60 saniye boyunca zemine titreşim (Frekans, 22-55 Hz) ve ek yük veren bir tokmak (darbe enerjisi, 12 mN) ile gerçekleştirilir (ASTM 7382-08). Deney düşen tokmak ile yapılan deneye benzer şekilde farklı su içeriklerindeki numuneler üzerinde tekrar edilir. Daha sonra kompaksiyon eğrisi çizilerek numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su içeriği belirlenir. Titreşimli tokmak ile kompaksiyon deneyinde kullanılan titreşimli tokmak ve deney moldu Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Titreşimli tokmakla kompaksiyon deney aletleri ve tokmağın uygulandığı

3. Bulgular

3.1. Malzemelerin fiziksel özellikleri

Çalışma kapsamında atık agregalar (İYA, GBA40, GBA30, TA ve KP) ve doğal agreganın (DA) fiziksel özelliklerini belirlemek için özgül ağırlık ve su emme deneyleri yapılmıştır (ASTM C 127-01; ASTM C 128-01; ASTM D 854-02). Malzemelerin dane birim hacim ağırlık ve su emme sonuçları Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Malzemelerin fiziksel özellikleri

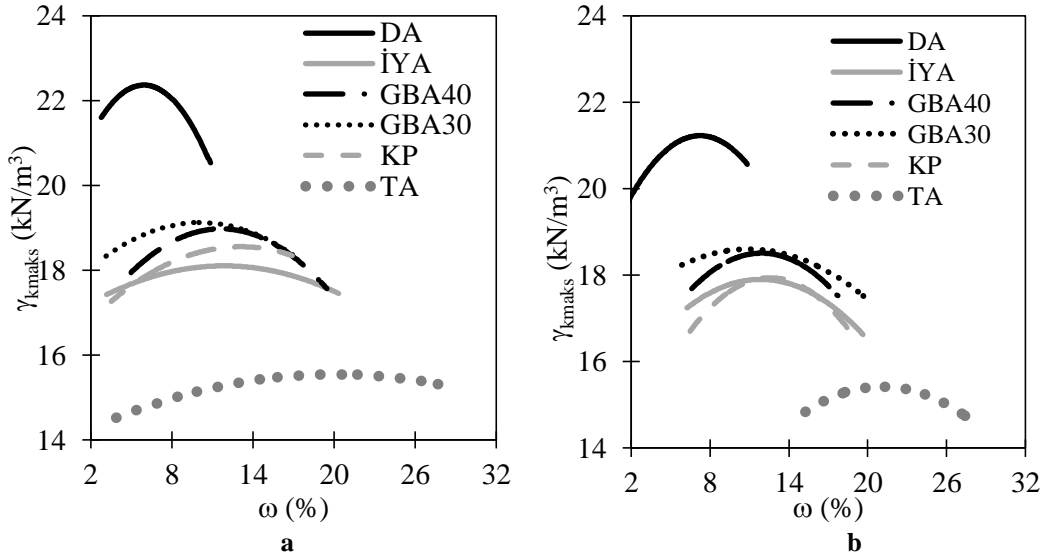
	Birim hacim ağırlık (kN/m ³)		Su emme (%)	
	Kaba	İnce	Kaba	İnce
DA	26,58	26,60	0,83	3,31
İYA	25,76	26,58	7,69	11,37
GBA40	26,11	25,98	5,47	10,52
GBA30	26,09	26,13	5,38	9,10
KP	25,89	26,60	5,12	6,85
TA	26,47	27,27	16,71	20,24

3.2. Malzemelerin kompaksiyon özellikleri

Çalışma kapsamında dolgularda kullanılmak için uygun gradasyona getirilen atık ve doğal agregalar üzerinde iki farklı kompaksiyon yöntemiyle (düşen tokmak ve titreşimli tokmak) yapılan kompaksiyon deneyi sonucunda elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ve optimum su içerikleri Tablo 2’de gösterilmektedir. Ayrıca kompaksiyon eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 7’de sunulmuştur.

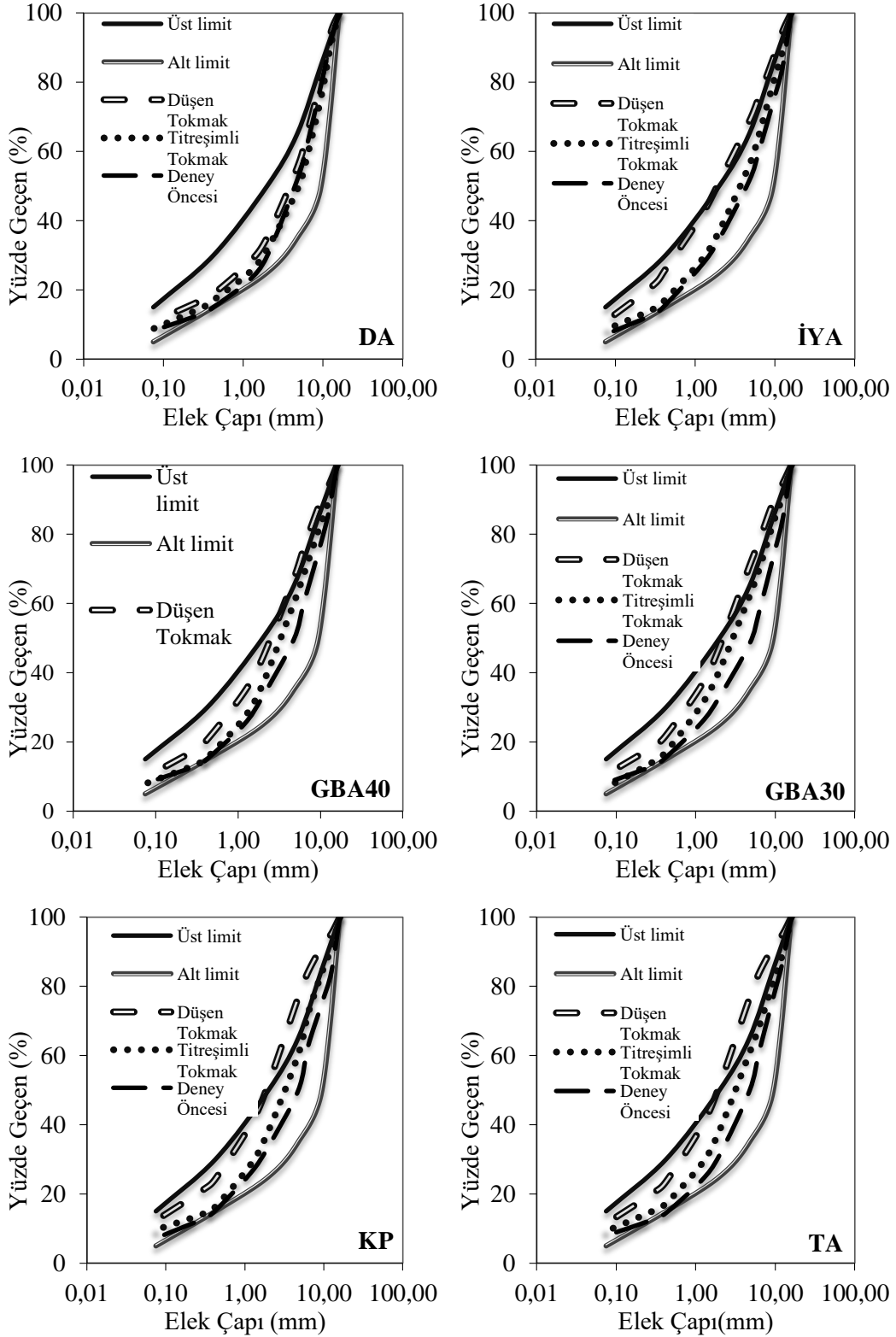
Tablo 2. Atık ve doğal agregalar kompaksiyon parametreleri

Test yöntemi	Düşen Tokmak (ASTM D 1557)		Titreşimli Tokmak (ASTM 7382-08)	
	γ_{kmaxs} (kN/m ³)	ω_{opt} (%)	γ_{kmaxs} (kN/m ³)	ω_{opt} (%)
DA	22,37	6,00	21,24	7,30
İYA	18,10	11,88	17,90	12,00
GBA40	18,97	11,61	18,51	11,95
GBA30	19,13	10,16	18,60	10,95
KP	18,55	12,60	17,95	12,95
TA	15,60	20,13	15,42	21,15

**Şekil 7.** Atık ve doğal agregalar kompaksiyon eğrileri a) Düşen Tokmak b) Titreşimli tokmak

3.3. Kompaksiyon yönteminin danelerin parçalanması üzerine etkisi

İçerdikleri beton vb. atıklardan dolayı genellikle atık agregaların parçalanması doğal agregalara göre daha fazla olmaktadır. Bu bakımdan kompaksiyon yönteminin atık agregaların parçalanma miktarına etkilerinin belirlenebilmesi için kompaksiyon öncesi ve sonrasında elek analizleri yapılmıştır. Ayrıca daha etkin bir değerlendirme yapabilmek adına benzer elek analizleri doğal agregaya üzerinde de yapılmıştır. Elek analizleri sonrasında elde edilen gradasyon değişimleri Şekil 8'de gösterilmektedir. Kompaksiyon yönteminin danelerin parçalanması üzerine etkilerinin daha iyi değerlendirilebilmesi için deney öncesi ve deney sonrası elek analizlerinden elde edilen D10, D50 ve D85 çapları hem atık hem de doğal agregalar için karşılaştırmalı olarak Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 8. Kompaksiyon yönteminin gradasyon üzerindeki etkisi

Tablo 3. Deneş öncesi ve dene sonrası D_{10} , D_{50} ve D_{85} apları

Malzeme	Kompaksiyon sonrası								
	Kompaksiyon öncesi			Düşen tokmak			Titreşimli tokmak		
	D_{10} (m m)	D_{50} (m m)	D_{85} (m m)	D_{10} (m m)	D_{50} (m m)	D_{85} (m m)	D_{10} (m m)	D_{50} (m m)	D_{85} (m m)
DA	0,13	4,90	10,90	0,07	4,00	9,90	0,11	4,70	10,00
İYA	0,13	4,60	11,00	0,07	2,00	8,70	0,12	3,60	10,20
GBA 40	0,13	5,00	11,00	0,07	2,50	8,60	0,13	3,20	10,20
GBA 30	0,13	5,00	10,90	0,07	2,10	8,00	0,12	3,00	10,00
KP	0,14	4,90	11,50	0,05	1,90	6,60	1,00	3,10	9,90
TA	0,14	4,70	11,00	0,06	1,90	6,50	1,00	3,00	10,10

4. Tartışma

Atık ve doğal agregaların kaba kısımları için dane birim hacim ağırlıkları birbirine yakın olmakla birlikte DA'nın dane birim hacim ağırlığı hem beton bazlı atık agregalardan (GBA40, GBA30 ve KP) hem de diğer atık agregalardan (İYA ve TA) daha yüksek çıkmıştır. Kaba dane için en düşük dane birim hacim ağırlığı İYA'dan elde edilirken, kil bazlı tuğla atığı TA'nın birim hacim ağırlığı diğer atık agregalardan yüksek çıkmıştır. Kaba daneler için TA'nın birim hacim ağırlığının diğer atık agregalardan daha yüksek çıkması, ince bir malzeme olan kil bazlı olmasından dolayı dane içerisindeki boşlukların diğer atık agregalara göre biraz daha az olabileceğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum ince agrega kısmında da görülmektedir. Bunun yanı sıra ince agrega için malzeme cinsi ile dane birim hacim ağırlığı arasında belirgin bir ilişki saptanamamıştır.

Çalışmada incelenen doğal agreganın su emme değeri Karayolları Teknik Şartnamesi'ne (2013) göre yol dolgularında alt temel olarak kullanmak için uygun su emme (maksimum %3,5) değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte beton bazlı geri dönüştürülmüş atık agregalar olan GBA40, GBA30 ve KP'nin kaba daneleri için su emme değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Ancak ince danelerde KP'nin su emme değeri GBA40 ve GBA30'un su emme değerlerinin yaklaşık %65 ile %75'i kadar çıkmıştır. Bu durum KP'lerin Karayolları Teknik Şartnamesindeki (2013) su emme sınırı (bütün parça numuneler için su emme değeri sınırı ortalama %6) değerlerine uygun olarak üretilmeye çalışılması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. İYA'nın su emme değeri beton bazlı atık agregalardan yüksek çıkmıştır. Bu duruma İYA'nın içinde bulunan atık tuğla agregaların sebep olduğu düşünülmektedir. Bunu destekler şekilde çalışmada incelenen TA'nın su emme değeri aşırı yüksek çıkmıştır. TA'nın su emme değeri doğal agreganın yaklaşık 6 katı olarak elde edilmiştir. Bazı araştırmacılar tuğla atığıyla yaptıkları çalışmalarda, tuğla atığı agregaların su emme değerlerinin bu çalışmaya benzer şekilde yüksek olduğunu rapor etmişlerdir (Arulrajah ve ark., 2011; Mehrjardi ve ark., 2020). TA'nın aşırı su emme oranının, TA'nın ω_{opt} değerinin diğer atık agregalara yüksek, γ_{kmax} değerinin düşük çıkmasının sebeplerinden bir olduğu tahmin edilmektedir.

Hem atık hem de doğal agregalar için düşen tokmak ile elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlıkların titreşimli tokmakla elde edilene göre daha fazla olduğu optimum su içeriğinin ise daha az

olduğu görülmüştür. Düşen tokmak yönteminde atık agregalarda maksimum kuru birim hacim ağırlıkları titreşimli tokmak yöntemine göre yaklaşık %1-3 daha fazla iken, titreşimli tokmak yönteminde elde edilen optimum su içerikleri düşen tokmak yöntemine göre yaklaşık %7-3 daha fazladır. İki kompaksiyon yöntemi arasındaki fark doğal agregada daha çarpıcıdır. Düşen tokmak yönteminde atık agregalarda doğal agregada maksimum kuru birim hacim ağırlıkları titreşimli tokmak yöntemine göre yaklaşık %5 daha fazla iken, titreşimli tokmak yönteminde elde edilen optimum su içerikleri düşen tokmak yöntemine göre yaklaşık %18 daha fazladır. Bu durumun doğal agregada danelerin sürtünmesinin daha fazla olmasında dolayı titreşimli tokmakla danelerin kolay hareket etmediği, danelerin arasında daha fazla boşluk kaldığı ve düşen ağırlık yöntemi ile titreşimli tokmak metodu arasında atık agregalara göre daha fazla fark elde edildiği düşünülmektedir. Atık agregalarda ise danelerin sürtünmesi doğal agregaya göre az olması sebebi ile titreşimli tokmak yöntemi ile düşen tokmak yöntemine doğal agregalara göre daha yakın kompaksiyon parametreleri elde edilmiştir. Yaghoubi ve ark. (2018) yaptıkları statik yüklemeli kompaksiyon deneyleri sonucunda özellikle statik yüklemde danelerin kenetlenmesi sonucu birbiri üzerinden hareketinin kısıtlandığını ve bu sebeple kısmi bazı bölgelerde boşluk kalabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca iki kompaksiyon yöntemi ile elde edilen kompaksiyon parametrelerinin arasındaki farkta danelerin sürtünmesinin haricinde danelerin parçalanmasının da etkili olduğu düşünülmektedir. Özellikle düşen ağırlık ile sıkıştırmada danelerin parçalanması yüksek olduğunda parçalanmış daneler sebebi ile sıkışmanın daha iyi olduğu düşünülmektedir.

5. Sonuç

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri ile beş tane inşaat ve yıkıntı atıkları temelli ve bir tane doğal agrega olmak üzere altı farklı agreganın fiziksel özellikleri, farklı kompaksiyon yöntemleri sonucunda elde edilen kompaksiyon parametreleri ve kompaksiyon yöntemine bağlı olarak danelerin parçalanması araştırılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bazı önemli sonuçlar aşağıdaki maddelerde özetlenerek verilmektedir.

- Doğal agreganın dane birim hacim ağırlığı tüm atık agregalardan yüksek iken su emme değeri düşüktür.
- Su emme bakımından atık agregalar arasında en iyi performansı KP göstermiş diğer beton bazlı atık agregalar da ona yakın su emme değerlerine sahip olmuşlardır. Ancak TA'nın su emme değeri aşırı fazladır (sınırın yaklaşık 6 katı) ve İYA'nın içerisinde de belli oranda TA bulunması İYA'nın su emme değerinin beton bazlı atık agregalardan biraz daha fazla çıkmasına sebep olmuştur.
- Atık agreganın cinsi su emme değerini büyük ölçüde etkilemesine rağmen bütün atık agregaların su emme değerleri yol alt temel dolgu malzemesinin sahip olması gereken maksimum su emme değerinden yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte GBA40, GBA30, KP ve İYA belli oranlarda su emmesi düşük doğal agregalar ile karıştırılarak kullanılmasının atık agreganın su emme değerlerini önemli ölçüde düşürerek uygun hale getirebileceği ön görülmektedir.

- Atık agregaların düşen tokmak ve titreşimli tokmak ile sıkıştırılması sonucu elde edilen γ_{kmaks} ve ω_{opt} değerleri kendi birbirine yakındır. Ancak düşen tokmak deneyi sonucunda atık agregaların daneleri titreşimli tokmak yöntemine göre çok daha fazla parçalanmıştır. Parçalanmanın artması ile dolgunun mühendislik özelliklerinin azalacağı düşünülerek agregaların titreşimli tokmak ile sıkıştırılması uygun olabileceği düşünülmektedir.
- Fiziksel özellik ve kompaksiyon özelliklerine göre DA'ya en yakın performansı yüksek dayanıma sahip GBA40 ve GBA30'un sergilediği sonrasında İYA, KP ve TA'nın geldiği görüşmüştür. Bu nedenle İYA içerisinde bulunan DA (doğal agrega) ve GBA'nın (beton atığı) performansı olumlu yönde etkilediği TA'nın ise olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir.
- Heterojen atık agrega karışımı olan İYA'nın içerisinde bulunan atık agregaların oranlarının ve dayanımlarının değişmesinin kompaksiyon parametreleri başta olmak üzere performansı doğrudan etkilediği görülmüştür.
- Atık agregalar dolgularda doğal agregalar yerine kullanmak için büyük bir potansiyele sahip olmasına rağmen özellikle su emme değerlerinin azaltılması kompaksiyonu, su sarfiyatı ve dolgu performansı açısından önem arz etmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

- Akan R., Keskin SN. Kompaksiyon yönteminin kohezyonlu zeminlerin serbest basınç mukavemetine etkisi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2018; 6(2): 250-257.
- Al-Radi H., Al-Bukhaiti K., Wei JL. Comparison between static and dynamic laboratory compaction methods. Journal of Engineering and Applied Sciences 2017; 1(1): 34-47.
- Arulrajah A., Piratheepan J., Aatheesan T., Bo MW. Geotechnical properties of recycled crushed brick in pavement applications. J Mater Civ Eng 2011; 23(10): 1444–1452.
- Arulrajah A., Piratheepan J., Disfani MM., Bo MW. Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. J Mater Civ Eng 2013; 25(8): 1077–1088.
- ASTM C 127-01. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. West Conshohocken, USA: ASTM International; 2001.
- ASTM C 128-01. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate. West Conshohocken, USA: ASTM International; 2001.

- ASTM D 1241-00. Specification for Materials for Soil-aggregate Sub-base, Base and Surface Courses. West Conshohocken, USA: ASTM International; 2005.
- ASTM D 1557. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort. West Conshohocken, USA: ASTM International; 2012.
- ASTM D 2487-11. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). West Conshohocken, USA: ASTM International; 2011.
- ASTM D 422-63. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. West Conshohocken, USA: ASTM International; 2009.
- ASTM D 854-02. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. West Conshohocken, USA: ASTM International; 2009.
- ASTM D7382. Test methods for determination of maximum dry unit weight and water content range for effective compaction of granular soils using a vibrating hammer. West Conshohocken, USA: ASTM International; 2008.
- Bennert T., Papp W., Maher A., Gucunski N. Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2000; 1714: 33-39.
- Cerni G., Cardone F., Bocci M. Permanent deformation behaviour of unbound recycled mixtures. *Constr Build Mater* 2012; 37: 573–580.
- Çolakoğlu H., Ok B., Sarıcı T. Geri dönüştürülmüş farklı tip inşaat ve yıkıntı atıklarının kompaksiyon özelliklerinin incelenmesi. *Academic Perspective Procedia* 2021; 4(2): 166-176.
- Das BM., Sobhan K. Principles of geotechnical engineering. Eighth Edition. SI, USA: Cengage Learning, Lampiran, 1, 2010.
- Holtz RD., Kovacs WD. Geoteknik mühendisliğine giriş. Çeviri: Erken, A., 2015. Second edition, Nobel Kitabevi, Ankara, 866, 1981.
- Ji X., Lu H., Dai C., Ye Y., Cui Z., Xiong Y. Characterization of properties of soil–rock mixture prepared by the laboratory vibration compaction method. *Sustainability* 2021; 13: 1-18.
- Jimenez JR., Ayuso J., Agrela F., López M., Galvín AP. Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resour Conserv Recycl* 2012; 58: 88–97.
- Karayolları Teknik Şartnamesi. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye; 2013.
- Leite FC., Motta RS., Vasconcelos KL., Bernucci L. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Constr. Build. Mater.* 2011; 25: 2972–2979.
- Mehrjardi GT., Azizi A., Haji-Azizi A., Asdollafardi G. Evaluating and improving the construction and demolition waste technical properties to use in road construction. *Transportation Geotechnics* 2020; 23: 100349.

- Molenaar AA., van Niekerk AA. Effects of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials. *Transportation Research Record* 2002; 1787: 73-82.
- Nataatmadja A., Tan YL. Resilient response of recycled concrete road aggregates. *Journal of Transportation Engineering* 2001; 127(5): 450-453.
- Ok B. Geosentetiklerle güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı dolguların statik ve tekrarlı yükler altındaki davranışının incelenmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü; 2018.
- Ok B., Sarici T., Talaslioglu T., Yildiz A. Geotechnical properties of recycled construction and demolition materials for filling applications. *Transportation Geotechnics* 2020; 24: 100380.
- Park T. Application of construction and building debris as base and subbase materials in rigid pavement. *J Transp Eng.*, 2003; 129: 558–563.
- Poon CS., Chan D. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushedclay brick as unbound road sub-base. *Constr. Build. Mater.* 2006; 20: 578–585.
- Santos ECG., Vilar OM. Use of recycled construction and demolition wastes (RCDW) as backfill of reinforced soil structures. In: *Proceedings of the Fourth European Geosynthetics Conference, EUROGEO 4*, September 7–10, Edinburg, Scotland; 2008.
- Sarıcı T. Puzolan ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atıklarının granüler dolgu olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi. Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü; 2019.
- Sivakumar V., McKinley JD., Ferguson D. Reuse of construction waste: Performance under repeated loading. *Proc. Inst. Civ. Eng. Geotech. Eng.* 2004; 157: 91–96.
- TS 2824 EN 1338. Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli Şartlar ve Deney 176 Metotları. TSE, Ankara, 2005.
- TS EN 12390-3. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. 2010. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- Vieira CS., Pereira PM. Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. *Resour Conserv Recycl* 2015; 103: 192–204.
- Yaghoubi E., Disfani MM., Arulrajah A., Kodikara J. Impact of compaction method on mechanical characteristics of unbound granular recycled materials. *Road Materials and Pavement Design* 2018; 19(4): 912-934.
- Zvonaric M., Barišic I., Galic M., Minažek K. Influence of laboratory compaction method on compaction and strength characteristics of unbound and cement-bound mixtures. *Appl. Sci.* 2021; 11: 1-12.