



Geride Dönüştürülmüş Beton Agregası Katkısının Kumlu Zeminlerin Mukavemet Parametreleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Effect of Recycled Concrete Aggregate Addition on the Strength Parameters of Sandy Soils

Hüseyin Suha Aksoy* , Atakan Yıldırım 

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

Öz

Yeni binaların inşası ve mevcut yapıların yıkılması sırasında büyük miktarlarda atık ortaya çıkmaktadır. Atıkların açık havada depolanması veya bertaraf edilmesi önemli çevre ve sağlık riskleri oluşturmaktadır. İnşaat projelerinde Geride Dönüştürülmüş Beton Agregasının (GDA) kullanılması, hem finansal hem de çevresel açıdan sürdürülebilir büyüme için çok önemli bir stratejidir. Bu çalışmada, inşaat ve yıkım atıklarıyla güçlendirilmiş kum zeminin mukavemet özellikleri incelenmiştir. Deneylede, sahadaki sıkıştırılmış dolguları modellemek için %80 rölatif sıklık sahip bir zemin kullanılmıştır. Bu kum zemin önce katkısız olarak hazırlanmış ve içsel sürtünme açısını belirlemek için kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Kum zemin daha sonra ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranında 2 mm ile 4.76 mm arasında elenmiş GDA ile karıştırılmış ve her bir GDA oranı için mukavemet parametreleri belirlenmiştir. Aynı deneyler, boyutları 4.76 mm ile 6.30 mm arasında olan GDA kullanılarak tekrarlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, GDA oranı arttıkça zeminin birim hacim ağırlığının %4'e varan oranlarda artış gösterdiği ve içsel sürtünme açısının ise %14'e varan oranlarda artış gösterdiği belirlenmiştir. Artan GDA boyutu ile içsel sürtünme açısının da artış gösterdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Agregası boyutu, geride dönüştürülmüş beton agregası, içsel sürtünme açısı, kesme kutusu deneyi, kumlu zemin

Abstract

Large quantities of waste are generated during the construction of new buildings and demolition of existing structures. Outdoor storage or disposal of waste poses significant environmental and health risks. The use of Recycled Concrete Aggregate (RCA) in construction projects is a crucial strategy for sustainable growth, both financially and environmentally. In this study, the strength properties of sand soil reinforced with construction and demolition waste were investigated. In the experiments, soil with 80% relative density was used to model compacted embankments on site. This sand soil was first prepared without additives and a shear box test was performed to determine the angle of internal friction. The sand soil was then mixed with RCA which sieved between 2 mm and 4.76 mm with 5%, 10%, 15% and 20% by weight. Strength parameters were determined for each RCA ratio. The same experiments were repeated using RCA with dimensions between 4.76 mm and 6.30 mm. As a result of the experiments, it was determined that the unit volume weight of the soil increased by up to 4% and the angle of internal friction increased by up to 14% as the RCA ratio increased. It was also observed that the angle of internal friction increased with increasing RCA ratio.

Keywords: Aggregate size, internal friction angle, recycled concrete aggregate, sandy soil, shear box test

1. Giriş

Enerji kullanımının azaltılması, kaynakların kıt olduğu bir dünyada birçok sektörde olduğu gibi inşaat sektöründe de

bir önceliktir. Atıkların doğal ortamda depolanması veya bertaraf edilmesi, çevre ve sağlık risklerinin yanı sıra inşaat sektörü için de ciddi sorunlar teşkil etmektedir. Bu nedenle inşaat sektöründe de bu sorunların giderilmesi amacıyla malzeme kullanımının azaltılması en önemli hedeflerden biri haline gelmiştir. Buna atık malzeme ve yan ürünlerinin kullanımının yanı sıra çevre de az miktarda bulunan doğal kaynakların kullanımının azaltılması da dahildir (Vural 2019, Gör vd. 2015). Zemin mukavemetini artırmak, oturumları azaltmak, bina maliyetlerini düşürmek ve inşaat

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: saksoy@firat.edu.tr

Hüseyin Suha Aksoy  orcid.org/0000-0003-0564-457X

Atakan Yıldırım  orcid.org/0009-0008-6713-0877



sürelerini kısaltmak için zemin iyileştirmeye yönelik farklı teknikler geliştirilmiştir (Kumar ve Sadana 2012). İnşaat mühendisliği projelerinde kullanılan yapı malzemeleri doğal kaynaklar kullanılarak üretilmektedir. Sürdürülebilir kalkınma için çevrenin ve doğal kaynakların korunması gerekmektedir (Bilgen ve Altuntaş 2023). Nüfus artışı ve endüstriyel gelişim nedeniyle altyapı hızlı bir şekilde inşa edilmelidir. İnşaat projelerinin sayısı hızla artmakta ve doğal kaynaklar daha önce hiç görülmemiş bir oranda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, mevcut yapıların yıkımı ve yeni yapıların inşası muazzam miktarda çöp üretmektedir. Modern inşaat sektörünün karşı karşıya olduğu iki temel sorun, doğal kaynakların tükenmesi ile inşaat ve yıkım atıklarının yönetimidir. Doğal kaynakların korunması ve muhafaza edilmesi için yeni çevre dostu yapı malzemeleri ve tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır (Bilgen 2020a). İnşaat projelerinde en sık kullanılan malzeme betondur. Son yıllarda betonun yoğun kullanımı göz önüne alındığında, betonla ilgili inşaat ve yıkım atıkları çok uzak olmayan bir gelecekte ciddi bir çevre sorunu oluşturacaktır (Ouria vd. 2022). Betonun yapısında yaklaşık olarak 200-300 kg/m³ Portland çimentosu bulunur. Çimento üretimi sırasında, büyük miktarlarda enerji ve hammaddeye kullanılır ve ayrıca bu üretim, çevreyi çeşitli şekillerde ciddi biçimde kirletir (Nidheesh ve Kumar 2019). Ekonomik ve çevresel konular dikkate alındığında, kentsel ve endüstriyel alanların hızlı gelişimi nedeniyle mukavemeti düşük olan zeminler üzerinde inşaat yapılması kaçınılmazdır. Düşük mukavemetli zeminleri iyileştirmenin, zemin güçlendirme teknikleri de dahil olmak üzere çeşitli yolları vardır (Ouria ve Mahmoudi 2018). Çevresel ve finansal açıdan bakıldığında, inşaat projelerinde geri dönüştürülmüş beton agregası (GDA) kullanılması sürdürülebilir büyüme için uygulanabilir bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. GDA asfalt, beton dolgu ve yeni inşaatlar için agrega olarak kullanılabilir (RMRC 2020). Genel olarak, büyük sürtünme açılara sahip kaba taneli malzemeler kullanılarak zemin en iyi şekilde güçlendirilmektedir (Berg vd. 2019). Son yıllarda, inşaat ve yıkım atıkları ile güçlendirilmiş zeminin yapılarca dolgu malzemesi olarak kullanımına ilişkin çok sayıda araştırma yapılmıştır (Arulrajah vd. 2014). Geri dönüştürülmüş beton, köşeli şekilde olup tamamen kırılmış bir malzemedir (RMRC 2020). Geri dönüştürülmüş beton agregasının içsel sürtünme açısı tipik olarak 35 ila 55 derece arasında değişir (Bhuiyan vd. 2015, Sarsby 2013, Soleimanbeigi vd. 2019).

Dolgu, otoyol inşası, yollar ve demiryolları için alt temellerin oluşturulması ve diğer amaçlar için kaba taneli malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır. Son zamanlarda geri dönüştürülmüş beton agregası şev stabilizasyonu, gabion duvarları,

vibro-taş kolonlar ve diğer zemin iyileştirme projeleri için kullanılmaktadırlar. Bu uygulamalarda taş ocaklarından çıkarılmış taşlardan geniş ölçüde yararlanılmaktadır. Birçok Avrupa hükümeti, agrega üretiminden kaynaklanan olumsuz çevresel etkileri azaltmak amacıyla birincil kara kökenli kaynaklardan agrega tedarikini azaltmak için geniş bir hedef belirlemiştir. Ayrıca, atık üretimini azaltarak ve geri kazanılan ve yeniden kullanılan malzeme miktarını artırarak sürdürülebilir kalkınmaya daha fazla katkıda bulunmaları için inşaat sektörünü yönlendirmektedirler (Touahamia vd. 2002). Söylemez ve Bayraktar (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, asfalt yolların aşınma tabakasında GDA kullanımının uygun olduğu belirtilmektedir. Ok ve Demir (2018) tarafından yapılan çalışmada, GDA üzerinde Los Angeles aşınma deneyi yapıldığı ve GDA de önemli bir aşınma kaybı olmadığı tespit edilmiştir. Geri dönüştürülmüş beton agregaları herhangi yerden gelmiş olabilir ve bileşenlerinin doğal agrega türü, su/çimento oranı, çimento tipi, katkı maddeleri ve bunların depolama koşulları gibi özellikler bilinmemektedir. Bu nedenle geri dönüştürülmüş beton agregalarının bileşenlerinin ve saklama koşullarının mekanik bozulma özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak için ek testlerin faydalı olacağı belirtilmiştir (Coban vd. 2022). Deneysel çalışma sonuçlarına göre geri dönüştürülmüş beton agregasının kullanım yüzdesi arttıkça; killi zeminlerin likit limit ve plastisite indisi değerlerinin azaldığı ve zeminin optimum su muhtevasının azalırken birim hacim ağırlığının arttığı belirlenmiştir (Bilgen 2020b). Guler ve Astarci (2009) tarafından yapılan araştırmaya göre zemine takviye olarak eklenen granüler dolguların (çakıl) diğer dolgu türleriyle kıyaslanması sonucunda zeminin içsel sürtünme açısında ki artışta granüler dolguların daha etkili olduğu belirtilmiştir. Chini vd. (2001) Santa Rosa County'de sökülen bir beton kaplamadan elde edilen GDA'yı kullanarak yol temel örneklerinin özelliklerini incelemiştir. Bulgular, araştırmalarında kullanılan GDA'nın işlenmemiş agrega ile son derece karşılaştırılabilir niteliklere sahip olduğunu ve beton agregaları için FHWA (Federal Highway Administration) kriterlerinin çoğuna uyduğunu göstermiştir. Frondistou-Yannas (1977) doğal agrega yerine inşaat ve yıkıntı atıklarından elde edilmiş agrega ile elde edilen beton ile geleneksel betonun mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Geri dönüştürülmüş beton harç yerine çakılla zenginleştirildiğinde, geri dönüştürülmüş betonun mekanik davranışının sıradan betona çok benzediğini tespit etmiştir. Geri dönüştürülmüş agregalı beton, kontrol karışımının %60'ı ile %100'ü arasında bir elastisite modülüne ve en az %76'lık bir basınç dayanımına sahiptir. Hansen ve Narud (1983) diğer değişkenlerin sabit

tutulduğu varsayıldığında, geri dönüştürülmüş betonun basınç dayanımı, orijinal betonun su-çimento oranı ile önemli ölçüde ilişkili olduğunu belirtmiştir. Tavakoli ve Soroushian (1996) tarafından yapılan test sonuçlarına göre, Los Angeles aşınma kaybının yanı sıra geri dönüştürülmüş agreganın su emmesi, orijinal betonun dayanımı, orijinal betondaki iri agrega oranı, orijinal betondaki agreganın üst boyutunun geri dönüştürülmüş agreganın üst boyutuna oranı ve orijinal betonun dayanımı geri dönüştürülmüş agregalı betonun dayanımını etkilemektedir. Ajdukiewicz ve Kliszczewicz (2002) geri dönüştürülmüş agregalar kullanılarak üretilen yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonların mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Araştırmalarında, 40 ila 70 MPa arasında basınç dayanımına sahip betonlardan elde edilen geri dönüştürülmüş agregaları dikkate almışlardır. Aynı işlenebilirliği korumak için geri dönüştürülmüş beton karışım tasarımındaki su içeriğinin değiştirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır. Bulgular, artan su içeriğiyle beraber betonda kullanılan ince agrega türüne bağlı olarak kırılma anındaki basınç dayanımının %8-20 oranında azaldığını, geri dönüştürülmüş malzemeler kullanıldığında ise basınç dayanımının yaklaşık %10 oranında azaldığını göstermiştir.

Yapılmış çalışmalar incelendiğinde, araştırmacıların GDA malzemesini genellikle killi zeminlerin iyileştirilmesinde tercih ettikleri görülmüştür. Ancak özellikle nehir ve deniz kıyısındaki yerleşim birimlerinin çoğu kumlu zeminler üzerine inşa edilmektedir. Dolayısıyla GDA kullanılarak, kumlu zeminlerin iyileştirilmesi de önem arz etmektedir. Bu çalışmada, inşaat ve yıkıntı atığı ile güçlendirilmiş kum zeminin mukavemet parametreleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, arazideki sıkıştırılmış dolguları temsil etmek üzere %80 sıklıkta zemin kullanılmıştır. Bu zemin önce katkısız olarak hazırlanmış ve kesme kutusu deneyi yardımıyla içsel sürtünme açısı belirlenmiştir. Ardından zemine ağırlıkça sırasıyla %5, %10, %15 ve %20 oranlarında önce 2mm - 4.76mm arasında elenmiş GDA karıştırılmış ve her bir GDA oranı için mukavemet parametreleri belirlenmiştir. Aynı deneyler 4.76mm- 6.30mm arasında boyutlarda elenerek hazırlanmış GDA için tekrar edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, GDA yüzdesi arttıkça zeminin birim hacim ağırlığının ve içsel sürtünme açısının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca artan agrega boyutunun içsel sürtünme açısının artmasına neden olduğu görülmüştür.

2. Gereç ve Yöntem(ler)

2.1. Kullanılan Materyaller

2.1.1. Kum Zeminin Özellikleri

Literatüre göre, laboratuvar da yürütülen modelleme çalışmalarının çoğunda (temel modelleri, kazık modelleri, ankraj modelleri vb.) kohezyonsuz zemin, tipik olarak 1 mm'den küçüktür (El Sawwaf 2010, Bağriacık ve Laman 2013, Kahyaoglu vd. 2012, Terzi vd. 2009). Sonuç olarak, çalışmalar başlamadan önce 2 m³ dere kumu laboratuvara getirilmiş, temizlenmiş, elenmiş ve uygun granülometride hazırlanmıştır (Şekil 1). Hazırlanan kum malzemesinin kalınlığı 0,074 mm (No. 200) ile 1 mm (No. 18) arasında değişmektedir. Deneylerde kullanılan zeminin granülometri eğrisi (Şekil 2) görülmektedir.

Deneylerde kullanılan zemin için, ASTM C127-15, ASTM D854-14 ve ASTM D422-63(2007)e2 standartları kullanılarak, rölatif sıklık, elek analizi ve piknometre deneyleri yapılmış ve zeminin endeks parametreleri belirlenmiştir. Zemin parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Kum malzemenin endeks özellikleri

Dane Birim Hacim Ağırlığı, G _s	2.77
D ₁₀ (mm)	0.18
D ₅₀ (mm)	0.45
Maksimum – Minimum Dane Boyutu, D _{max} -D _{min} (mm)	1 – 0.074
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	17.46
Minimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	14.51
Maksimum Boşluk Oranı, e _{max}	0.872
Minimum Boşluk Oranı, e _{min}	0.557

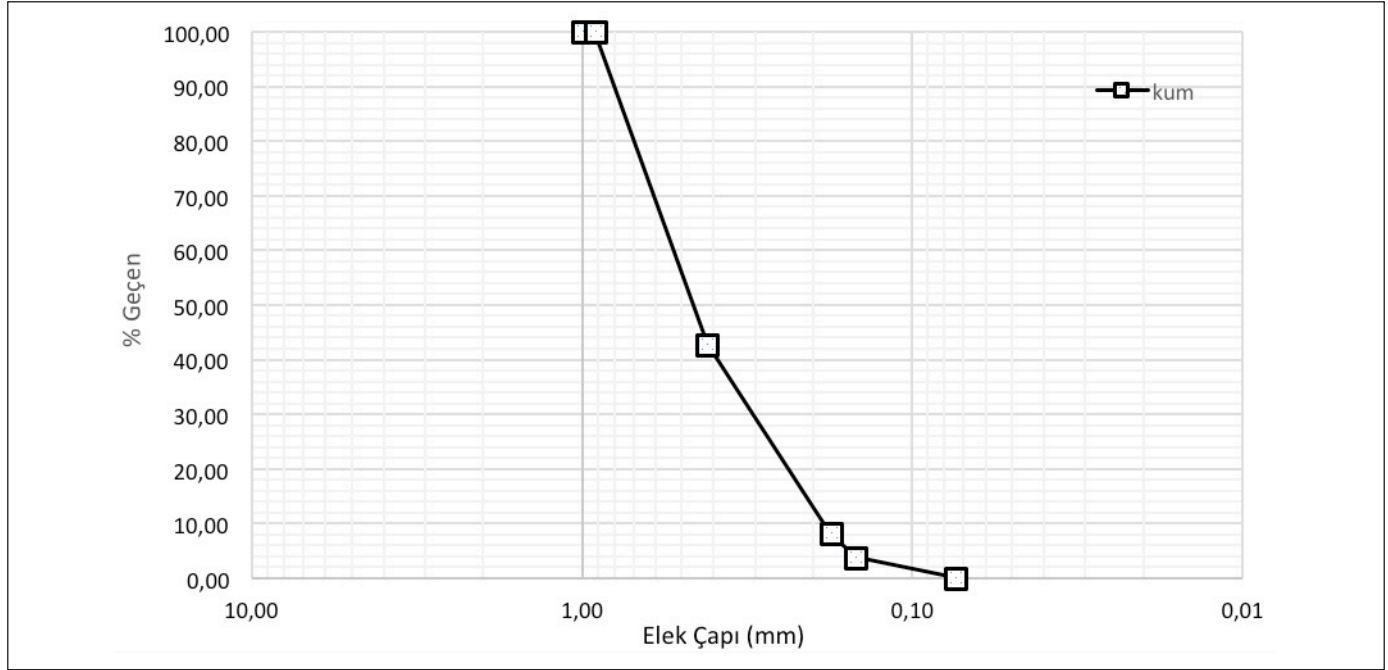


Şekil 1: Kum.

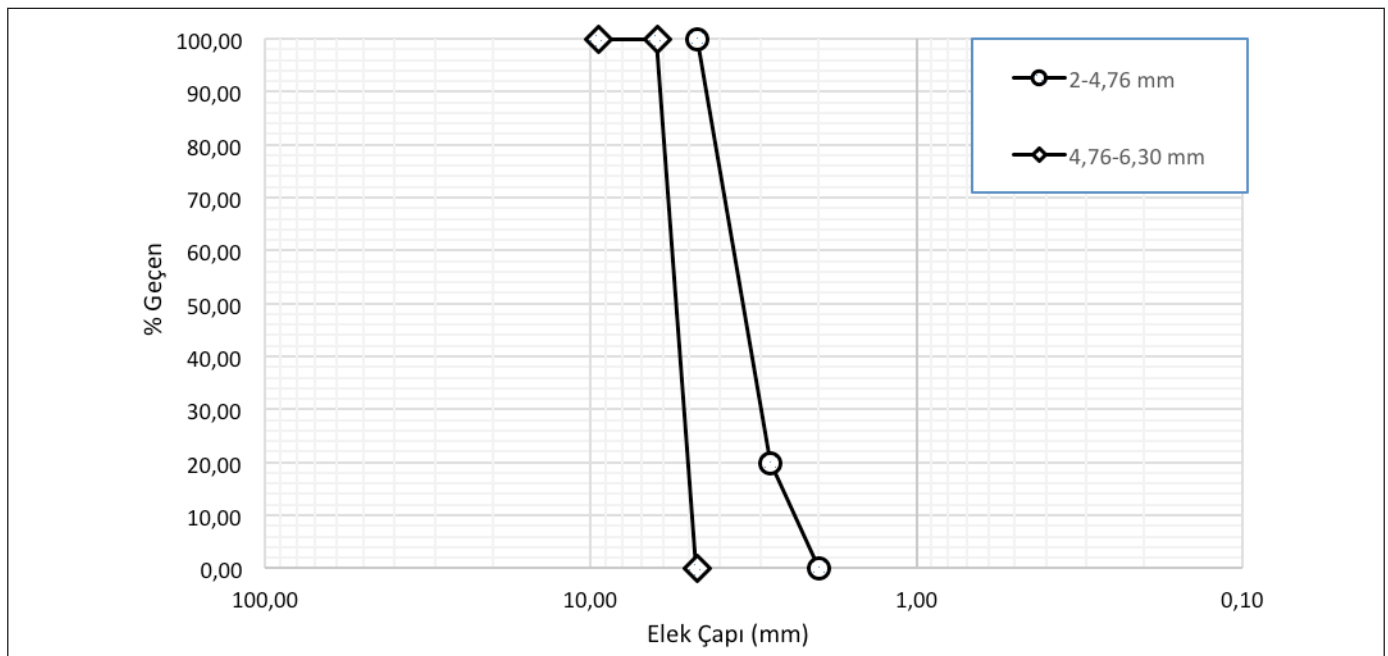
2.1.2. Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası (GDA)

Bu çalışma için kullanılan GDA (Şekil 4), Elazığ ilinde yıkımı yapılan binaların yıkıntısından temin edilmiştir. Moloz malzemeler arasında gözle görülebilen malzemeler (metal, elektrik kablosu, donatı) ayıklanmıştır. Yabancı malzemelerden ayıklanan molozlar taş ocaklarına kırılma işlemi için

gönderilmiştir. Konkasörde kırılma işlemiyle istenilen boyutlar elde edilmiştir. Deneyler de farklı boyutlarda (2mm-4.76 mm ve 4.76mm-6.30 mm) kullanılan GDA'nın elek analizi sonucunda elde edilen granülometri eğrisi görülmektedir (Şekil 3).



Şekil 2: Kullanılan kumun granülometri eğrisi.



Şekil 3: GDA'nın elek analizi sonucunda elde edilen granülometri eğrisi.

2.2. Yöntem

Bu bölümde kum zemine ağırlıkça (%5, %10, %15, %20) ve farklı boyutlarda de (2mm-4.76mm, 4.76mm-6.30mm) GDA karıştırılarak rölatif sıklık ve kesme kutusu deneyleri yapılmış olup, kum zeminin içsel sürtünme açısında, kuru birim hacim ağırlık değerlerinde, boşluk oranında ve hedeflenen sıkışmaya ulaşmak için gereken sürede ki değişimler incelenmiştir.

2.2.1. Rölatif Sıklık Deneyi

Boyutları belirli bir kap içerisine 10 cm yükseklikten ilk olarak yağmurlama yöntemi ile kum dökülmüştür. Farklı sıklıklara ulaşmak için titreşim cihazı ile belirli bir sürede sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Titreşim cihazı ile zemin de istenilen sıklığa (%80) ulaşmak için birçok deneme yapılmıştır. Kum zemine yapılan rölatif sıklık değerleri, kuru birim ağırlık (γ_{korr}) ve boşluk oranı değerleri belirlenmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2 ve Şekil 5' de görüldüğü üzere kum zemine yapılan rölatif sıklık deneyi sonucunda titreşim süresi arttıkça kuru birim hacim ağırlık değerleri artmış olup, boşluk oranlarında azalma görülmüştür.

2.2.2. Kesme Kutusu Deneyi

%80 sıklıkta hazırlanan kum malzemenin içsel sürtünme açısını (ϕ) belirlemek için (6x6x2) cm boyutlarında kesme kutusu deney aparatı kullanılmıştır. Deney cihazı (Şekil 7) üç tipik yükleme koşulu (0.682, 1.238 ve 1.793) kg/cm² altında 0.5 mm/dk kesme hızında çalıştırılarak deneyler yapılmış ve içsel sürtünme açısı (ϕ) belirlenmiştir. Deney sonucunda elde edilen veriler Çizelge 3 ve Şekil 6'da belirtilmiştir.

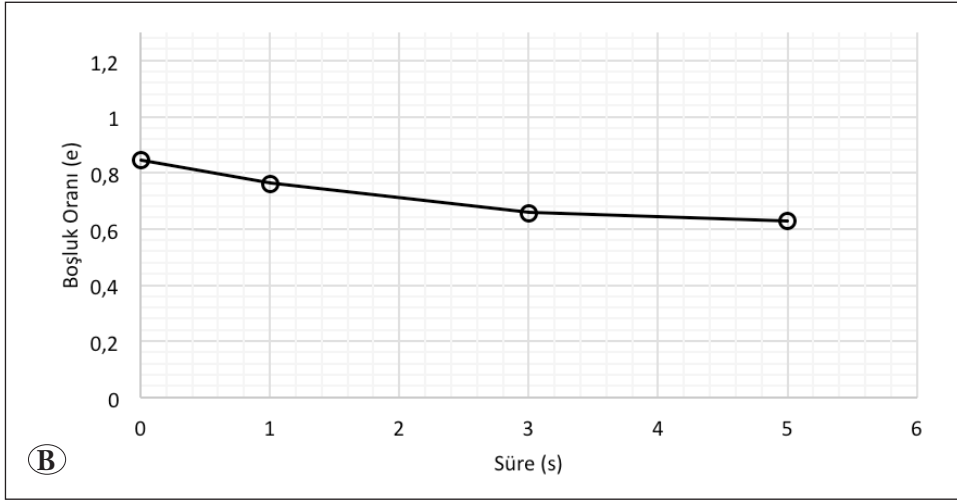
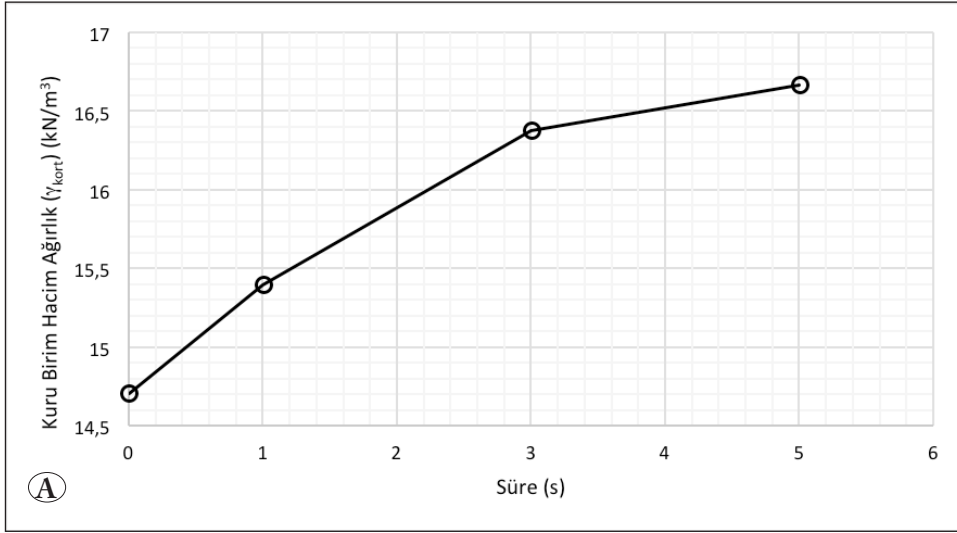
Yapılan hesaplamalar sonucunda kum malzemenin içsel sürtünme açısı (ϕ) 41.4° olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 2. Kum zemine yapılan rölatif sıklık deneyi sonucunda elde edilen değerler

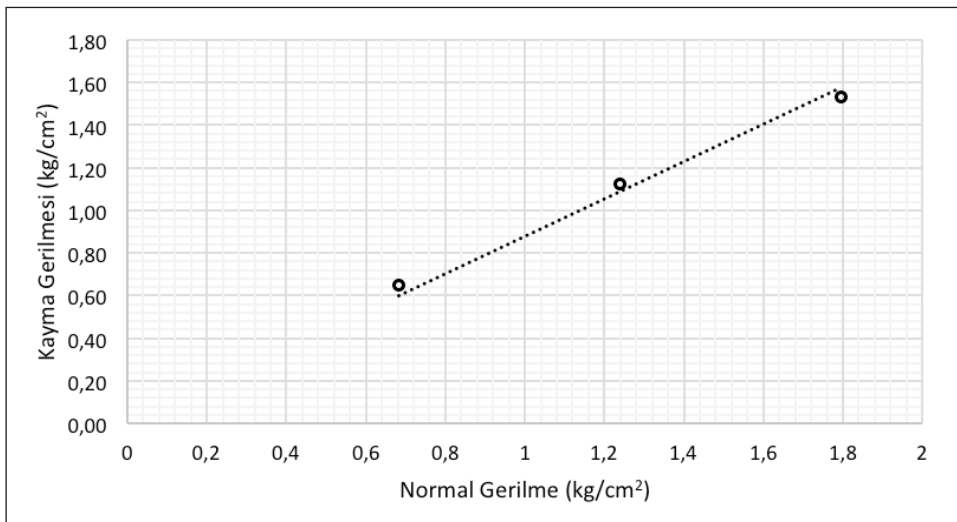
Sıkıştırma Yöntemi	Kuru Birim Hacim Ağırlık (γ_{korr}), (kN/m ³)	Boşluk Oranı (e)	Rölatif Sıklık (D_r , %)
Sadece yağmurlama	14.71	0.847	10
10 cm'den yağmurlama sonrasında 1 saniye titreşim cihazı uygulaması	15.40	0.764	40
10 cm'den yağmurlama sonrasında 3 saniye titreşim cihazı uygulaması	16.38	0.659	65
10 cm'den yağmurlama sonrasında 5 saniye titreşim cihazı uygulaması	16.67	0.629	80



Şekil 4. 4.76 mm-6.30 mm (A) ve 2mm-4.76 mm (B) boyutlarına sahip GDA.



Şekil 5. Kum zeminin kuru birim hacim ağırlık (A) ve boşluk oranı (B) değerleri grafiği.



Şekil 6. Katkısız kum zeminin kesme kutusu deney sonuçları.

Çizelge 3. Katkısız kum zeminin kesme kutusu deney sonuçları.

Gerilme (kg/cm ²)	Kayma Gerilmesi (kg/cm ²)
0.682	0.652
1.238	1.130
1.793	1.534



Şekil 7. Kesme kutusu deney cihazı.

3. Bulgular ve Tartışma

Bölüm 2'de bahsedilmiş olan kum zemine kesme kutusu ve rölatif sıklık deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar yukarıda belirtilmiştir (Çizelge 3 ve Şekil 6). Bu bölümde kum zemine ağırlıkça farklı oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) ve boyutları farklı (2mm-4.76mm ve 4.76mm-6.30mm) GDA karıştırılarak kesme kutusu ve rölatif sıklık deneyleri yapılmış ve kullanılacak karışımların maksimum ve minimum boşluk oranları belirlenmiştir. Kullanılacak karışımlar istenilen sıklıkta kesme kutusu numunesi olarak hazırlanarak GDA oranı ve boyutlarının kum zeminin mukavemet parametrelerindeki değişimine etkisi incelenmiştir.

İlk olarak 2mm-4.76mm boyutlarına sahip olan GDA'nın ağırlıkça farklı oranları (%5, %10, %15 ve %20) kum zemine eklenerek rölatif sıklık deneyleri yapılmıştır. Rölatif sıklık deneyleri eklenen GDA'nın ağırlıkça farklı oranları için %80 sıklığa ulaşana kadar titreşim cihazı yardımıyla (Şekil 8) belirli süreler de deneyerek tekrarlanmıştır. %80 sıklıkta hazırlanmış olan GDA ve kum zemin karışımının kuru birim hacim ağırlık (γ_{korr}), boşluk oranı (e) parametrelerindeki değişimler incelenmiştir.

Kum ve 2mm-4.76mm boyutlarında olan GDA karışımı 10 cm yükseklikten bir kaba dökülerek titreşim cihazı yardımıyla %80 sıklığa ulaşana kadar rölatif sıklık deneyleri tekrarlanmıştır. %80 sıklık için elde edilen (γ_{korr}), (e) değerleri ve istenilen sıklığa ulaşmak için sıkıştırma süresi Çizelge 4'de belirtilmiştir.

Çizelge 4. GDA – kum karışımı zemine yapılan rölatif sıklık deneyi sonucunda elde edilen parametreler.

GDA Oranı (%)	Kuru Birim Hacim Ağırlık (γ_{korr}), (kN/m ³)	Boşluk Oranı (e)	Sıkıştırma Süresi (s)
0	16.67	0.629	5
5	16.70	0.623	3
10	16.77	0.608	3
15	16.97	0.590	3
20	17.06	0.575	3



Şekil 8. Titreşim cihazı yardımıyla GDA – kum karışımı zemine yapılan rölatif sıklık deneyi.

Ağırlıkça farklı oranlarda GDA eklenerek hazırlanan kum zeminde, GDA oranı arttıkça kuru birim hacim ağırlık (γ_{korr}) değerinin artış gösterdiği ve karışımın boşluk oranının (e) azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca eklenen GDA zeminin, titreşim cihazı kullanılarak %80 sıklıkta hazırlanması için gereken sıkıştırma süresinde azalmaya neden olduğu belirlenmiştir.

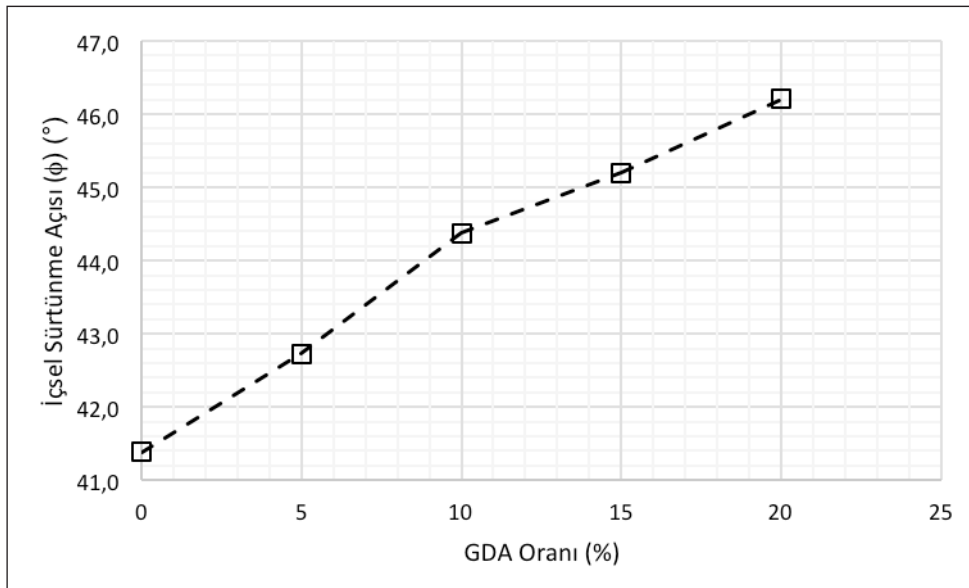
Rölatif sıklık deneyi sonrasında ağırlıkça farklı oranlarda 2mm-4.76 mm boyutlarına sahip GDA eklenerek %80 sıklıkta hazırlanan GDA – kum karışımı zeminin içsel sürtünme açısını (ϕ) belirlemek için kesme kutusu deneyleri yapılmıştır.

2mm-4.76 mm boyutlarındaki GDA eklenerek %80 sıklıkta hazırlanan GDA – kum karışımı zeminin kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri Çizelge 5’de görülmektedir.

Çizelge 5’de görüldüğü üzere eklenen karışım oranının artmasıyla GDA – kum zeminin içsel sürtünme açısı değerle-

Çizelge 5. GDA – kum karışımı zeminin içsel sürtünme açısı değerleri.

GDA Oranı (%)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) (°)
0	41.4
5	42.7
10	44.4
15	45.2
20	46.2



Şekil 9. GDA oranı – içsel sürtünme açısı değişim grafiği.

rinde artış olduğu tespit edilmiştir. 2mm-4.76mm boyutlarına sahip GDA – kum karışımının içsel sürtünme açısındaki (ϕ) değişimler Şekil 9’da verilmiştir.

Kullanılan diğer GDA boyutu için (4.76mm-6.30mm) ağırlıkça farklı oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) kum zemine eklenerek rölatif sıklık deneyleri yapılmıştır. Rölatif sıklık deneyleri eklenen GDA’nın ağırlıkça farklı oranları için %80 sıklığa ulaşana kadar titreşim cihazı yardımıyla belirli süreler de deneyerek tekrarlanmıştır. %80 sıklıkta hazırlanmış olan GDA ve kum zemin karışımının kuru birim hacim ağırlık (γ_{korr}), boşluk oranı (e) parametrelerindeki değişimler incelenmiştir.

Kum ve 4.76mm-6.30mm boyutlarında olan GDA karışımı 10 cm yükseklikten bir kaba dökülerek titreşim cihazı yardımıyla %80 sıklığa ulaşana kadar rölatif sıklık deneyleri tekrarlanmıştır. %80 sıklık için elde edilen (γ_{korr}), (e) değerleri ve istenilen sıklığa ulaşmak için sıkıştırma süresi Çizelge 6’da belirtilmiştir.

Ağırlıkça farklı oranlarda GDA eklenerek hazırlanan kum zeminde, GDA oranı arttıkça kuru birim hacim ağırlık (γ_{korr}) değerinin artış gösterdiği karışımın boşluk oranının (e) azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca eklenen GDA’nın zeminin titreşim cihazı kullanılarak %80 sıklıkta hazırlanması için gereken sıkıştırma süresini azalttığı belirlenmiştir. Rölatif sıklık değerlerini hesaplamak için kullanılan maksimum ve minimum boşluk oranı değerleri Çizelge 7’de görülmektedir.

Rölatif sıklık deneyi sonrasında ağırlıkça farkı oranlarda 4.76mm-6.30mm boyutlarına sahip GDA eklenerek %80 sıklıkta hazırlanan GDA – kum karışımı zeminin içsel sürtünme açısını (ϕ) belirlemek için kesme kutusu deneyi yapılmıştır.

Çizelge 6. GDA – kum karışımı zemine yapılan rölatif sıklık deneyi sonucunda elde edilen parametreler.

GDA Oranı (%)	Kuru Birim Hacim Ağırlık (γ_{korr}), (kN/m ³)	Boşluk Oranı (e)	Sıkıştırma Süresi (s)
0	16.67	0.629	5
5	16.77	0.614	1.5
10	17.06	0.585	1.5
15	17.16	0.564	1.5
20	17.36	0.545	1.5

Çizelge 7. Yapılan rölatif sıklık deneyleri sonucunda elde edilen boşluk oranı değerleri.

Ağırlıkça GDA Oranı %	2mm-4.76mm		4.76mm-6.30mm	
	e_{max}	e_{min}	e_{max}	e_{min}
0	0.872	0.557	0.872	0.557
5	0.852	0.604	0.818	0.565
10	0.833	0.554	0.790	0.534
15	0.791	0.540	0.758	0.516
20	0.784	0.525	0.724	0.499

4.7 6mm-6.30 mm boyutlarına sahip GDA eklenerek %80 sıklıkta hazırlanan GDA – kum karışımı zeminin kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri Çizelge 8’de belirtilmiştir.

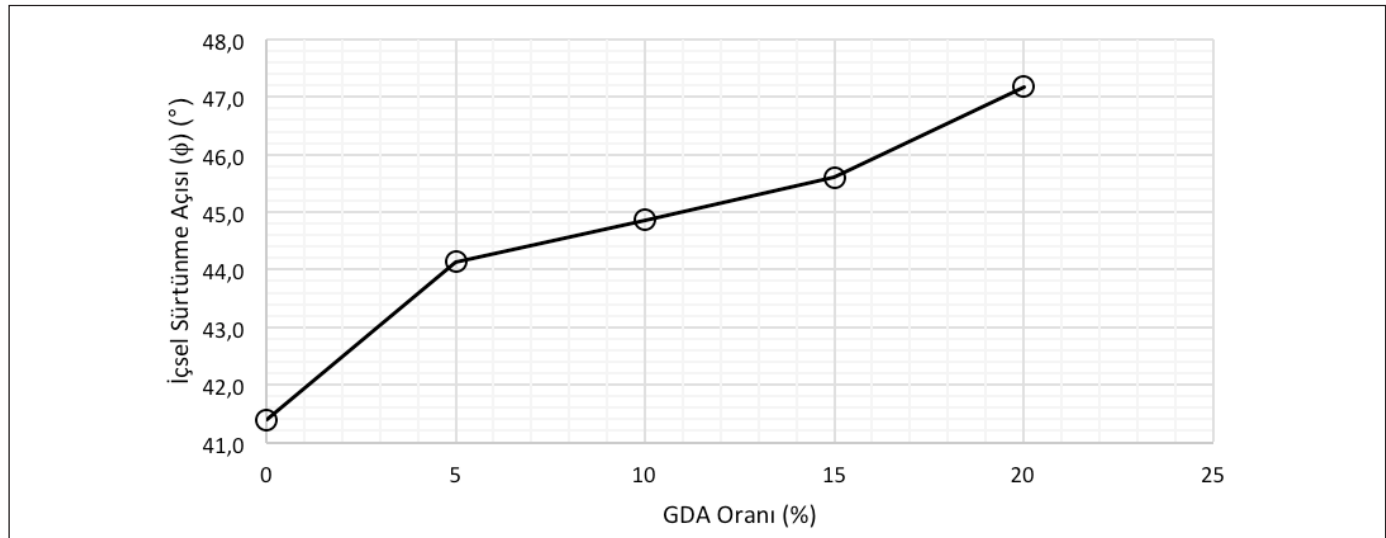
Çizelge 8. GDA – kum karışımı zeminin içsel sürtünme açısı değerleri.

GDA Oranı (%)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) (°)
0	41.4
5	44.1
10	44.9
15	45.6
20	47.2

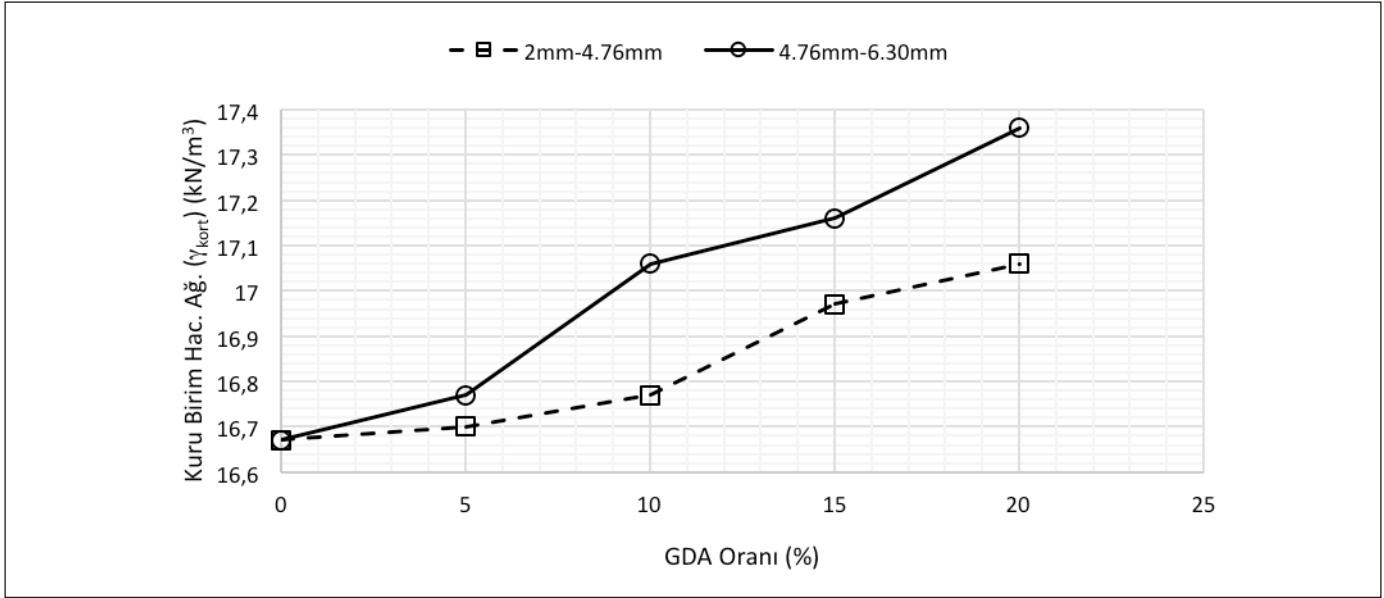
Çizelge 8’de görüldüğü gibi artan GDA oranı ile karışımın içsel sürtünme açısında (ϕ) artmaktadır. Şekil 10’da 4.76mm-6.30mm boyutlarına sahip GDA – kum karışımının içsel sürtünme açısındaki (ϕ) değişimler görülmektedir.

Ayrıca yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilere göre agrega boyutunun artmasıyla zeminin mukavemet parametrelerinin arttığı tespit edilmiştir.

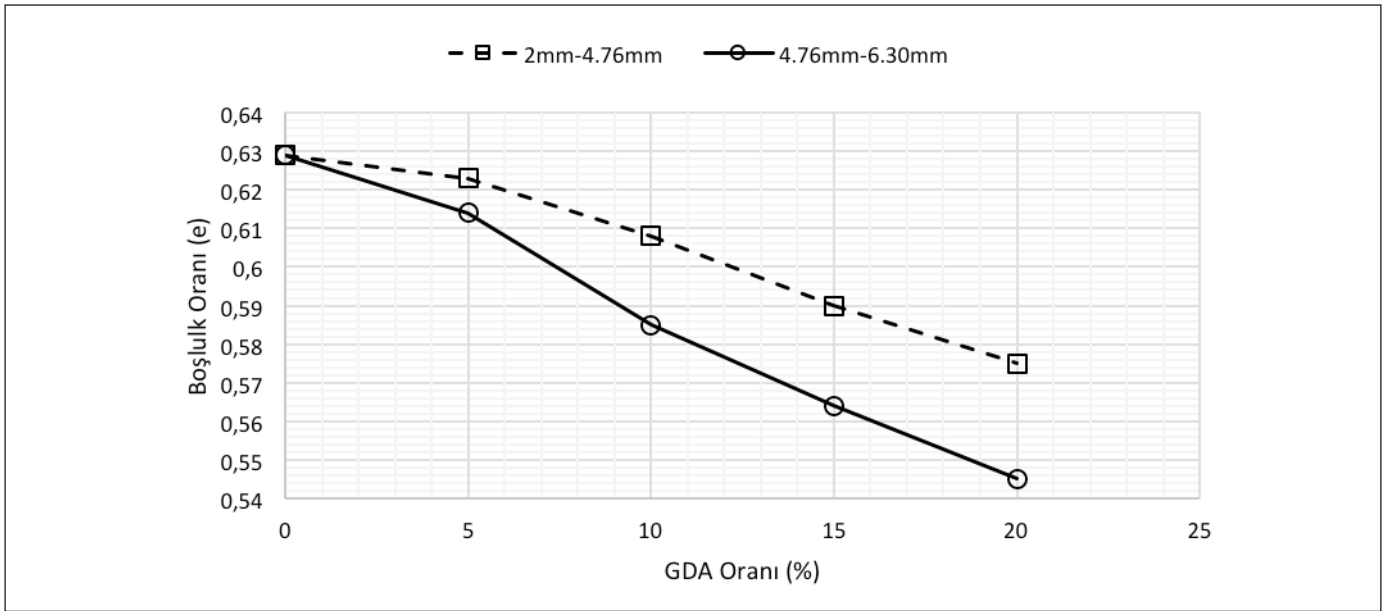
Şekil 11’de her iki GDA boyutu için kuru birim hacim ağırlık değerleri görülmektedir. Artan agrega boyutunun kuru birim hacim ağırlık değerlerinde %1 civarında artışa neden olduğu belirlenmiştir.



Şekil 10. GDA oranı – içsel sürtünme açısı değişim grafiği.



Şekil 11. GDA boyutu –kuru birim hacim ağırlık değişimi..



Şekil 12. GDA boyutu – boşluk oranı ilişkisi.

Agrega boyutunun artması ile GDA – kum karışımında daha düşük boşluk oranları (e) elde edileceği görülmektedir (Şekil 12).

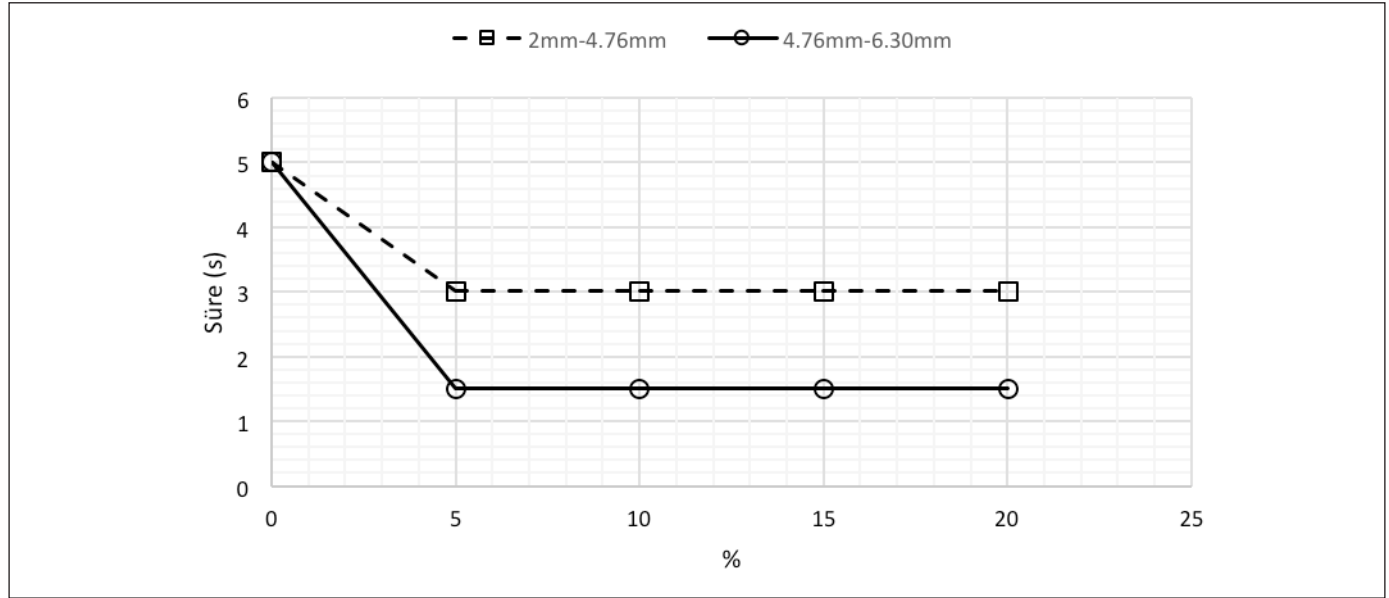
Artan GDA oranı zeminin istenilen sıklığa (%80) ulaşma süresinde azalma meydana getirdiği sonucuna varılmıştır (Şekil 13).

Agrega boyutu arttıkça içsel sürtünme açısında (φ) artışlara neden olmuştur (Şekil 14). Artan agrega boyutunun içsel

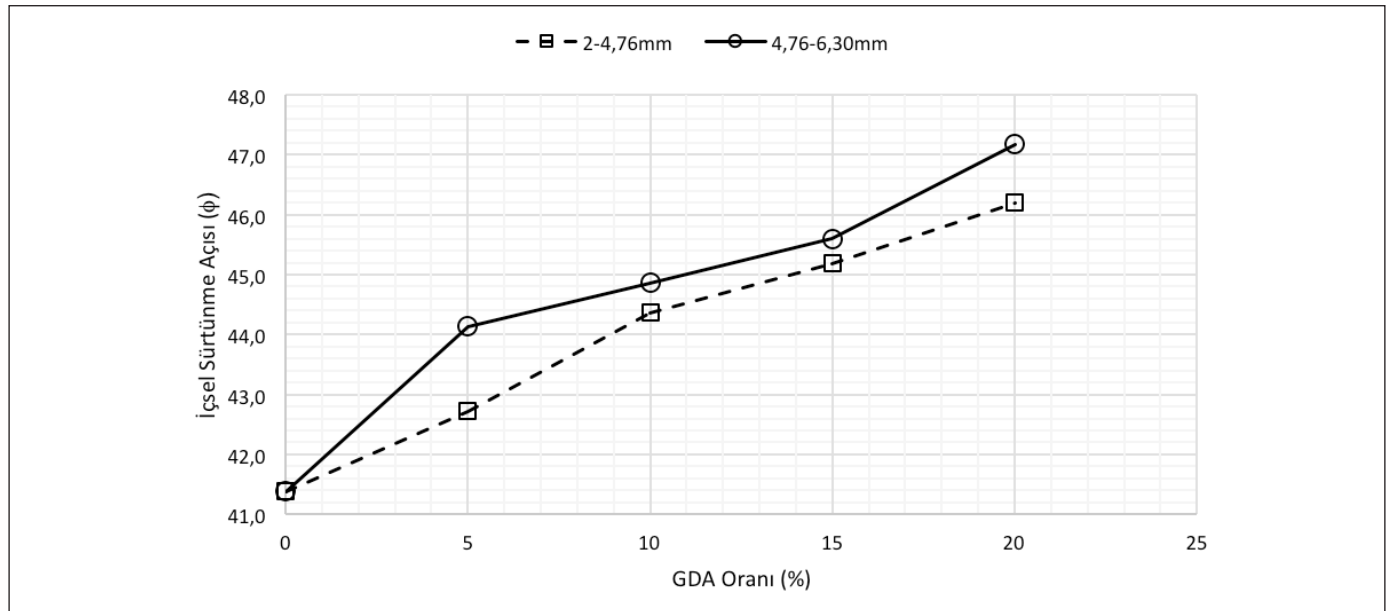
sürtünme açısında yaklaşık olarak %1-3 kadar artışa sebep olduğu belirlenmiştir.

4. Sonuç ve Öneriler

Yapılan deneylerde kum zemine ağırlıkça farklı oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) ve boyutları farklı (2 mm–4.76 mm ve 4.76mm–6.30 mm) olan GDA eklenmiştir. Katkılı zemin üzerinde rölatif sıklık deneyi ve kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda;



Şekil 13. GDA boyutu – titreşim süresi ilişkisi.



Şekil 14. GDA boyutu – içsel sürtünme açısı değerleri arasındaki ilişki..

- Ağırlıkça agregat oranının artmasıyla kuru birim hacim ağırlık değerlerinin yaklaşık %4'e varan oranda arttığı tespit edilmiştir.
- Ağırlıkça agregat oranının artmasıyla boşluk oranında düşüş gözlemlenmiştir.
- Ağırlıkça agregat oranının artmasıyla karışımların içsel sürtünme açısında %14'e varan artışlar olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca iki farklı agregat boyutunu (2 mm-4.76 mm ve 4.76mm-6.30 mm) kıyaslamak gerekirse;

- Artan agregat boyutu ile daha yaklaşık %1 daha büyük kuru birim hacim ağırlık değerleri elde edilmiştir.
- Agregat boyutunun artmasıyla boşluk oranlarında düşüş gözlemlenmiştir.
- Agregat boyutunun artmasıyla istenilen sıklığa ulaşma süresinde düşüş gözlemlenmiştir.

- Artan agrega boyutu ile içsel sürtünme açısında %1-3 arasında artışlar gözlemlenmiştir.

Yapılan deneyler göstermiştir ki Geri dönüştürülmüş Beton Agregasının (GDA) zeminin mukavemet parametrelerini artırdığı ve dolayısı ile toprak işlerinde dolgu malzemesi olarak kullanılabilceği belirlenmiştir. Deney sonuçlarından da görüleceği gibi, GDA oranı arttıkça mukavemet parametreleri de artış göstermiştir.

Daha sonraki çalışmalarda optimum GDA oranının belirlenmesi için daha yüksek GDA oranlarıyla çalışılarak mukavemet parametrelerinin belirlenmesi tavsiye edilmektedir.

5. Kaynaklar

- Ajdkiewicz, A., Kliszczewicz, A. 2002.** Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. Cement and concrete composites, 24(2), 269-279. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00012-9)
- Arulrajah, A., Rahman, MA., Piratheepan, J., Bo, MW., Imteaz, MA. 2014.** Evaluation of interface shear strength properties of geogrid-reinforced construction and demolition materials using a modified large-scale direct shear testing apparatus. Journal of Materials in Civil Engineering, 26(5), 974-982. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000897](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000897)
- ASTM C127-15, 2015.** Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org. <https://doi.org/10.1520/c0127-01>
- ASTMD422-63e2, 2007.** Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org. <https://doi.org/10.1520/d7928-16>
- ASTM D854-14, 2014.** Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org. <https://doi.org/10.1520/d0854-00>
- Bagriacik, B., Laman, M. 2013.** Investigation of the Size Effect at Different Geometries on Stress Distribution of Sandy Soils. International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.177>
- Berg, RR., Samtani, NC., Christopher, BR. 2009.** Design of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes—Volume II (No. FHWA-NHI-10-025). United States. Department of Transportation. Federal Highway Administration. <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/49730>
- Bhuiyan, MZI., Ali, FH., Salman, FA. 2015.** Application of recycled concrete aggregates as alternative granular infills in hollow segmental block systems. Soils and Foundations, 55(2), 296-303. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.02.006>
- Bilgen, G. 2020(a).** Utilization of powdered glass as an additive in clayey soils. Geotechnical and Geological Eng.: 38, 3163-3173. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01215-7>
- Bilgen, G. 2020(b).** Geri Dönüştürülmüş Beton Agregasının Düşük Plastisiteli Bir Kilin Mekanik Özelliklerine Etkisi. Journal of the Institute of Science and Technology, 10(3), 1714-1719. <https://doi.org/10.21597/jist.685938>
- Bilgen, G., Altuntas, OF. 2023.** Sustainable re-use of waste glass, cement and lime treated dredged material as pavement material. Case Studies in Construction Materials, 18, e01815. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01815>
- Chini, AR., Kuo, SS., Armaghani, JM., Duxbury, JP. 2001.** Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track. Journal of Transportation Engineering, 127(6), 486-492. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(2001\)127:6\(486\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(2001)127:6(486))
- Coban, HS., Cetin, B., Edil, TB., Sun, Q. 2022.** Evaluation of mechanical degradation characteristics of recycled and natural aggregates under gyratory compaction effort. Transportation Geotechnics, 34. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100743>
- El Sawwaf, M. 2010.** Experimental study of eccentrically loaded raft with connected and unconnected short piles. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 136(10), 1394-1402. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000341](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000341)
- Frondistou-Yannas, S. 1977.** Waste concrete as aggregate for new concrete. In Journal Proceedings, 74(8), 373-376. <https://doi.org/10.14359/11019>
- Guler, E., Astarci, B. 2009.** Friction between facing elements and geotextiles in geosynthetic reinforced soil retaining structures. In Proceedings of Second International Conference on new development in Soil mechanics and Geotechnical Engineering, Near East University, Nicosia, North Cyprus, 138-145. <https://zm2009.neu.edu.tr/wp-content/uploads/sites/33/2020/01/13/Friction-between-facing-elements-and-geotextiles-in-geosynthetic.pdf>
- Gör, M., Aksoy, HS., Bilgen, G. 2012.** Farklı katkı malzemelerinin kil bir zeminin kıvam limitleri üzerinde zamana bağlı etkisi. 15. Ulusal Kil Sempozyumu, 19-22, Niğde Üniversitesi. <http://kilbilimleri.org/project/ulusal-kil-sempozyumu-2012/>
- Hansen, TC., Narud, H. 1983.** Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. Concrete international, 5(1), 79-83. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal?m=details&ID=9140&cm=details&ID=9140>
- Kahyaoglu, MR., Seçer, M., Kayalar, AŞ. 2012.** Cam elyaf takviyeli plastik profilli pasif kazık grup davranışının deneysel olarak incelenmesi. Teknik Dergi, 23(112), 5931-5950. <https://dergi-park.org.tr/en/download/article-file/136556>
- Kumar, A., Sadana, D. 2012.** Bearing capacity of soil reinforced with vertical columns of recycled concrete aggregates. Australian Journal of Civil Engineering, 10(2), 153-162. <https://doi.org/10.7158/c11-704.2012.10.2>

- Nidheesh, PV., Kumar, MS. 2019.** An overview of environmental sustainability in cement and steel production. *Journal of cleaner production*, 231, 856-871. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.251>
- Ok, B., Demir, AO. 2018.** Yapım yıkım atıklarının yol temellerinde kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 224-236. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.386621>
- Ouria, A., Mahmoudi, A. 2018.** Laboratory and numerical modeling of strip footing on geotextile-reinforced sand with cement-treated interface. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(1), 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.09.003>
- Ouria, A., Heidarli, E., Karamzadegan, S. 2022.** Utilization of recycled concrete aggregates as coarse material sandwich to improve the pullout strength of geosynthetics in a fine sand. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 8(5), 55. <https://doi.org/10.1007/s40891-022-00401-2>
- RMRC 2020.** UG-Mat Reclaimed Concrete Material | Recycled Materials Resource Center. <https://rmrc.wisc.edu/ug-mat-reclaimed-concrete-material/>
- Sarsby, RW. 2013.** Waste materials in geotechnical construction. In *Environmental Geotechnics*, ICE Publishing, <https://doi.org/365-391> 10.1680/eg.41875.393
- Soleimanbeigi, A., Tanyu, BF., Aydilek, AH., Florio, P., Abaspour, A., Dayioğlu, AY., Likos, WJ. 2019.** Evaluation of recycled concrete aggregate backfill for geosynthetic-reinforced MSE walls. *Geosynthetics International*, 26(4), 396-412. <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00025>
- Söylemez, H., Bayraktar, O. Y. 2019.** İnşaat Yıkıntı Atıklarının Asfalt Agregası Olarak Kullanılma Stratejisi. In 3rd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, Ankara, Turkey. http://www.set-science.com/manager/uploads/ISAS2019-ENS_0042/SETSCI_ISAS2019-ENS_0042_0092.pdf
- Tavakoli, M., Soroushian, P. 1996.** Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. *Materials Journal*, 93(2), 178-181. <https://doi.org/10.14359/9802>
- Terzi, NU., Kiliç, H., Gültekin, S. 2009.** Yanal yüklü bir model kazığın kum ortamındaki davranışının deneysel ve nümerik yöntemlerle incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(1), 119-127. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/190908>
- Touahamia, M., Sivakumar, V., McKelvey, D. 2002.** Shear strength of reinforced-recycled material. *Construction and Building Materials*, 16(6), 331-339. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00029-6](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00029-6)
- Vural, İ. 2019.** İnşaat yıkıntı atıklarının zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 7(1), 1-6. <https://doi.org/10.21541/apjes.437288>