



## Demiryolu Yol Altyapısının Parçalanmış Atık Lastik - Kum Karışımları ile Stabilizasyonu

Seyfettin Umut Umu<sup>\*1</sup>, Derviş Volkan Okur<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, 26470, Eskişehir, Türkiye

<sup>2</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, 26480, Eskişehir, Türkiye

\*suumu@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 20.02.2020, Kabul/Accepted: 14.03.2020, Yayımlama/Published: 31.07.2020)

**Öz:** Atık lastiklerin, inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımı son 30-40 yıl içinde oldukça yaygınlaşmıştır. Geoteknik mühendisliği uygulamalarında olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Yol inşaatlarındaki stabilite ve oturma problemlerine karşı, istinat ve dolgu duvarlarında ise hafif malzeme ihtiyacına karşılık geri dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Çalışmanın amacı yapay olarak oluşturulan demiryolu altyapısına etki eden tekrarlı yükler altında malzeme davranışının incelenmesidir. Bu çalışmada, demiryolu altyapısı temel malzemesi olarak seçilen temiz standart kum örneği ile atık araç lastiklerinden parçalama ve öğütülme yolu ile elde edilen toz, çubuk ve amorf malzeme kütlece %5/95, %10/90 ve %15/85 oranlarında karıştırılmış ve oluşturulan karışım numuneler üzerinde rezonant kolon (RC) deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler, 100 kPa efektif basınç altında, %5 oranında toz atık lastik karışımı içeren numunelerin kayma modüllerinin, 100 kPa referans örneğe göre, %0,001 birim kayma deformasyon seviyelerinde %26, %0,01 birim kayma deformasyon seviyelerinde %18 ve %0,1 birim kayma deformasyon seviyelerinde ise %35 civarında daha yüksek olduğunu göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Rezonant kolon, Kayma modülü, Temiz kum, Atık lastik, Demiryolu altyapısı, Stabilizasyon

### Stabilization of Railway Subbase by Shredded Tire Rubber - Sand Mixture

**Abstract:** The use of waste tires in civil engineering applications has become a major issue in recent years and has advantageous in terms of geotechnical engineering. The rubber wastes are lightweight materials that can be used as a filling material in embankments to overcome the stability and settlement problems in road constructions over weak soils. In this study, clean standard sand soil as the base material of railway infrastructure were mixed rubber dust, chips and amorphous piece samples obtained from waste tire in 5%, 10% and 15% by mass. Resonance Column (RC) tests were performed on the mixture samples. The aim is to investigate the shear modulus of artificially constructed railway infrastructure. The shear modulus of samples containing 5% dust waste rubber mixture is about 26% higher than the reference sample at 0,001% shear strain amplitude and 18% higher than the reference sample at 0,01% shear strain amplitude and 35% higher than the reference sample at 0,1% shear strain amplitude under 100 kPa effective pressure.

**Keywords:** Resonant column, Shear modulus, Clean sand, Waste tire rubber, Railway infrastructure, Stabilization.

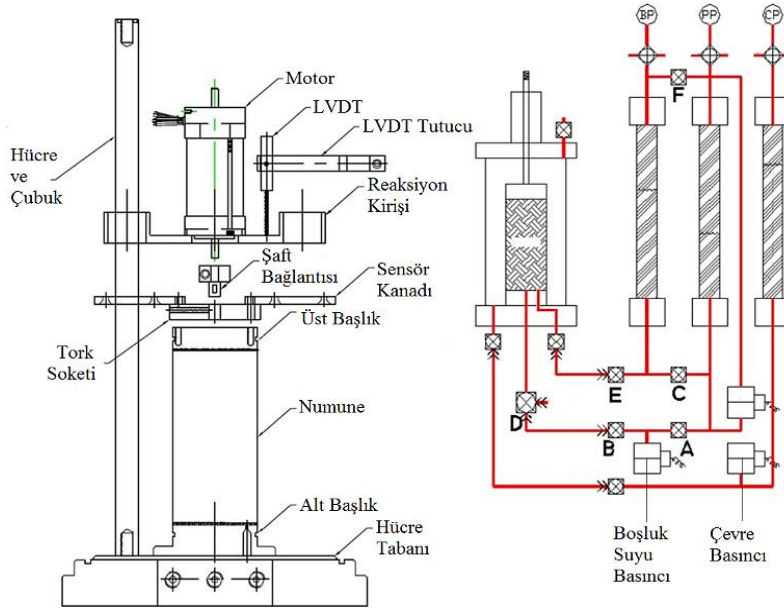
## 1. Giriş

Demiryolu altyapısı, çok özel uygulamalar dışında, doğal zemin kullanılarak inşa edilir. Taşıt özelliklerine bağlı olarak, yüksek hızlı trenler için konvansiyonel hatlara göre daha büyük yarıçaplı yatay ve düşey kurplara, daha düşük boyuna eğimlere gereksinim duyulmaktadır. Hız artışı ile birlikte, üst ve alt yapıya iletilen dinamik yükler de arttığından, üst ve altyapıda oluşan kalıcı şekil değiştirmeler yolun yatay ve düşey geometrisinde bozulmalara, dolayısıyla taşıtlara gelen etkilerin daha da artarak, güvenlik ve konforun düşmesine yol açmaktadır [1]. Dolayısıyla, demiryolu altyapısının, üstyapıdan iletilen statik ve dinamik etkilere karşı gerekli dayanım, rijitlik ve süneklığe sahip olması gerekir.

Son yıllarda, atık lastiklerin kullanımı inşaat mühendisliği alanında da araştırılmakta ve uygulanmaktadır. ABD’de ve dünya çapında yaklaşık olarak 550 milyon lastik stoklanmış halde tutulmaktadır [2-3]. Dolayısıyla hem çevresel problemlerin önüne geçilebilmesi yönünden, hem de sürdürülebilir çevre projeleri kapsamında atık lastik parçaları inşaat mühendisliğinin farklı sahalarında da değerlendirilmektedir. Ayrıca atık lastiklerin kullanıldığı yol altyapısı dolgularının, tren yollarındaki titreşimlerin çevre yapılarına ulaşmasını kısıtlayarak sönümleme etkileri vardır [4].

Atık lastik parçacıkları, lastiklerin mekanik olarak parçalanmasıyla elde edilmektedir. Parçacıklar kullanım amacına göre farklı boyutlarda olabilir. Atık lastiklerin geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanımı çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle yol temel dolgularında, istinat duvarlarında geri dolgu malzemesi olarak tercih edilmektedir.

Yol inşaatlarında karşılaşılan başlıca problemler duraylılık ve oturmalarıdır. Çeşitli hafif malzemeler yol dolgularında kullanılarak, dolgu malzemesinin hafifletilmesi amaçlanmaktadır. Atık lastik parçacıklarının dolgu ve istinat duvarlarında kullanılması da hafiflik açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Sadece zemin kullanılarak doldurulmuş geri duvar dolgusu, zemin ve atık lastik malzeme karışımlarına göre daha ağır olmaktadır. Ayrıca belirli oranlarda zemin ve atık lastik malzemesi karışımlarının kayma dayanımları, göreceli olarak zemine göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu özellikleri sayesinde, dolgu duvarların genişlikleri azalmakta ve yerden tasarruf edilmektedir. Ayrıca atık lastik malzemeler drenaj konusunda da avantajlar sağlamakta ve duraylılık problemlerine yol açan yanal toprak basınçlarının artmasını da engellemektedir. Senetakis, et al., (2012) çalışmasında, kum ve çakılların atık lastik parçacıkları ile karışımlarının geniş aralık deformasyonlarındaki dinamik özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada, farklı oranlarda karıştırılan kum-lastik ve çakıl-lastik karışımları yüksek genlikli rezonant kolon testine tabi tutulmuştur. Karışımlara ait düşük deformasyon kayma modülü değeri ile sönüm oranının, çevre basıncından, karışım oranından (atık karışım miktarından), karışıma giren zemin numunesine ait dinamik özelliklerden ve dane dağılımdan ve ayrıca zemin numunesine karşılık gelen lastiğin göreceli büyüklüğünden etkilendiği görülmüştür [2], [4-12].



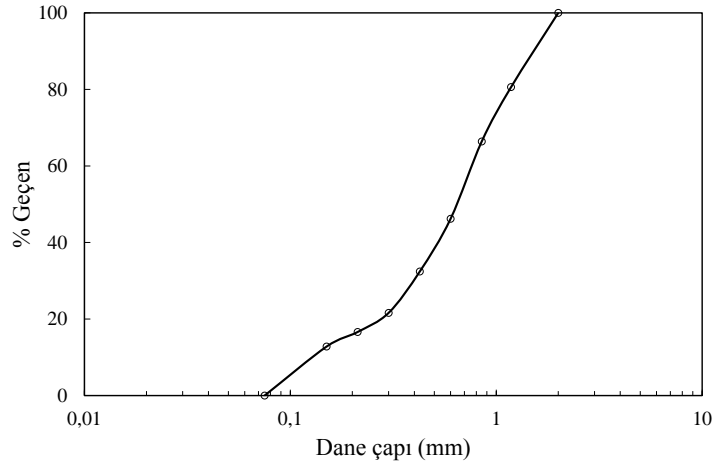
Şekil 1. Deneylerde kullanılan RCTS deney sisteminin ve basınç panelinin boy kesiti

Umu vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada herhangi bir karışım uygulanmayan uniform temiz kum numunesine ait maksimum kayma modülü, sönüm oranı ve modül azalım değerleri rezonant kolon deney aleti kullanılarak belirlenmiş ve eğilim çizgileri verilmiştir [12]. Bu çalışmada, toz, çubuk ve küçük amorf parça olarak hazırlanmış atık lastik malzemeler ile temiz kum numunesi ağırlıkça farklı oranlarda (%5, 10, 15) karıştırılmıştır. Bu karışımların, burulmalı rezonant kolon deney aleti kullanılarak geniş birim kayma deformasyon ( $0,001 < \gamma < 0,1$ ) genliklerindeki maksimum kayma modülü 100 kPa çevre basıncında incelenmiştir. Şekil 1’de burulmalı rezonant kolon deney aletinin ve doyum/basınç panelinin en kesiti görülmektedir.

## 2. Kullanılan Malzemeler ve Deney Koşulları

Dinamik analizlerde kullanılan “maksimum kayma modülü”,  $G_{maks}$ , lineer ve lineer olmayan elastik zemin davranışını tanımlamada önemli bir parametre olup, arazi veya laboratuvar ortamda kayma dalgası hızından hesaplanmaktadır ([13-16]). Bu amaçla kullanılan laboratuvar deneylerinden bir tanesi rezonant kolon (RCTS) deney sistemidir (Şekil 1). Deney sistemi, prizmatik çubuklarda dalga yayılım teorisine dayalı çalışmaktadır. Zeminlerin dinamik özellikleri bu deney sistemi ile  $10^{-6}$  ile  $10^{-3}$  birim kayma deformasyon genliği veya farklı sistem eklentileri ile geniş aralıktaki genliklerde belirlenebilir. Wegener ve Herle tarafından 2010 yılında yapılan bir çalışmada, demiryolları altyapılarında kullanılan farklı zemin tiplerinde kayma deformasyon genliklerinin değişimini araştırılmıştır. Kayma modülü ve kayma dalgası hızı üzerinde durulan çalışmada, kayma deformasyon genliğinin önemi vurgulanmıştır. İlgili çalışmada trenler tarafından oluşturulan kayma deformasyon genliğinin, bu çalışmada seçilen aralıklarla uyumlu olduğu görülmüştür [17].

Bu çalışmada uniform standart temiz kum kullanılmıştır. Uniform kum numunesi ve atık lastikler kullanılarak ağırlıkça farklı oranlarda (%5/95, %10/90, %15/85) karışımlar hazırlanmıştır. Atık lastik malzemeleri toz, çubuk ve amorf parça şeklinde kullanılarak karışımlara katılmıştır. Şekil 2’de kullanılan kum numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi verilmiştir. Tablo 1’de ise kum zemine ait laboratuvar verileri gösterilmiştir. Şekil 3’de, çalışmada kullanılan atık lastik numuneler görülmektedir. Piknometre deneyi ile içeriğinde çelik olmayan atık lastik malzemesinin yaklaşık olarak özgül gravitesi ( $G_s$ ) 0,96 olarak ölçülmüştür [18]



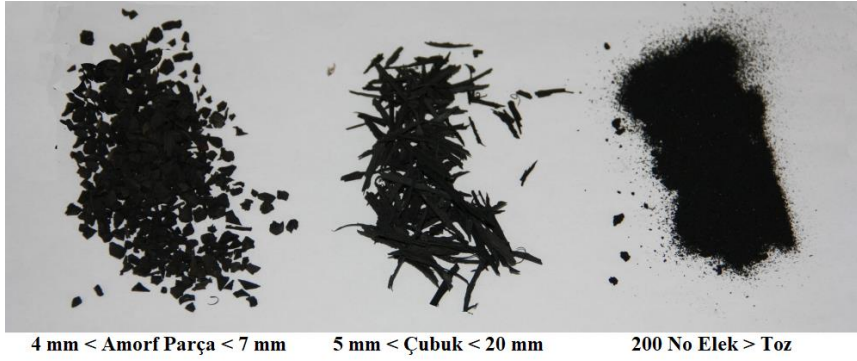
Şekil 2. Deneylerde kullanılan standart temiz kum zemine ait dane dağılım eğrisi

Bu çalışmada gerçekleştirilen Resonant Kolon deneyleri ASTM D4015-15e1, 2015 standardına göre yapılmıştır [19]. 100 kPa efektif çevre basıncı seviyesinde yapılan deneylerde karışım numunelerinin geniş birim kayma deformasyon genliğindeki ( $0,001 < \gamma < 0,1$ ) kayma modülü değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan standart temiz kum zemine ait laboratuvar verileri

D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>10</sub> (mm)	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>	G <sub>s</sub>	e <sub>maks</sub>	e <sub>min</sub>	Zemin Sınıfı (USCS)
0,63	0,13	6	1,28	2,637	0,674	0,415	SW

D<sub>50</sub> = Ortalama dane boyutu; D<sub>10</sub> = Efektif dane çapı; C<sub>u</sub> = Uniformluk Katsayısı; C<sub>c</sub> = Derecelenme Katsayısı; G<sub>s</sub> = Spesifik Gravite; e<sub>maks</sub> = Maksimum boşluk oranı; e<sub>min</sub> = Minimum boşluk oranı



Şekil 3. Çalışmada kullanılan atık lastiklerin yaklaşık dane çapları, uzunlukları ve fotoğrafları

### 3. Numune Hazırlama ve Deneysel Sonuçları

Kum ve atık lastiklerin karışımı ile ilgili olarak Umu vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada temiz kum numunesine ait karışım içermeyen deney sonuçları verilmiştir [12]. Temiz kuma ait 50, 100 ve 200 kPa çevre basıncına karşılık gelen kayma modülü değerlerini tanımlayan eğilim çizgileri hiperbolik modellerle oluşturulmuş ve bu eğilim çizgileri referans kabul edilmiştir. Oluşturulan bu eğilim çizgileri, bu çalışmadaki karışım numunelere ait kayma modülü değerlerini içeren grafiklere eklenmiş ve referans değerlere göre değişim incelenmiştir.

Bu çalışmada ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında toz, çubuk ve amorf parça halinde hazırlanmış atık lastik numunesi kullanılarak temiz kum ile karıştırılmıştır. Deneyler kuru olarak gerçekleştirilmiştir. Standart temiz kum numunesi ile atık lastik karışımları mekanik yollarla yapılmıştır. Her iki numune bir kap içersine dökülerek spatula yardımıyla elle karıştırılmıştır.

Homojen bir görüntü elde edilene kadar karıştırma işlemi devam etmiştir. Daha sonra deney kalıbı içine serbest düşüş ile yerleştirilmiştir.

**Tablo 2.** Karışım numunelerin laboratuvar deney koşulları

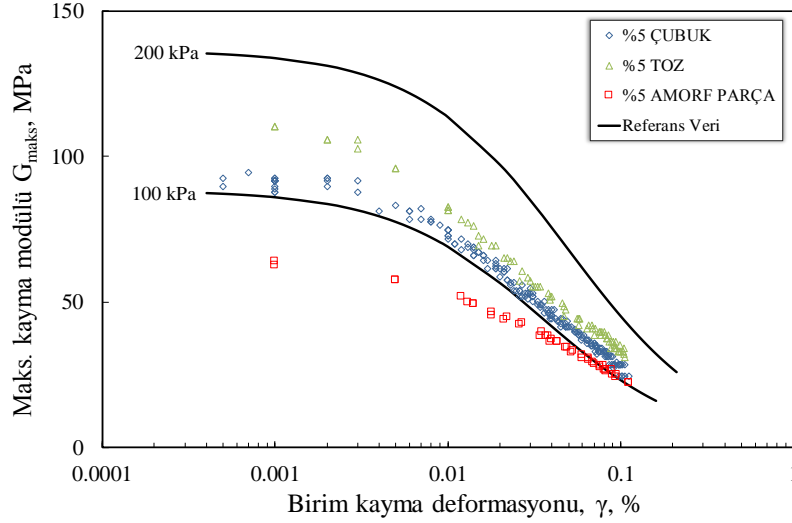
RC Deneyi Numune Kütleşi $M_{top}$ (gr)	RC Deneyi Numune Yüksekliği $h_{kolon}$ (cm)	Atık Lastik Tipi	Atık Lastik Yüzdesi Ağırlıkça %	Atık Lastik Yüzdesi Hacimce %	Eşdeğer Boşluk Oranı $e_{eşdeğer}$
400	12,6-12,8	Toz	5	8,29-8,42	0,50-0,52
400	12,8-12,9	Toz	10	16,45-16,58	0,41-0,42
400	13,1-13,2	Toz	15	24,11-24,30	0,34-0,35
400	12,6-12,8	Çubuk	5	8,29-8,42	0,50-0,52
400	12,8-12,9	Çubuk	10	16,45-16,58	0,41-0,42
400	13,1-13,2	Çubuk	15	24,11-24,30	0,34-0,35
400	12,6-12,8	Amorf Parça	5	8,29-8,42	0,50-0,52
400	12,8-12,9	Amorf Parça	10	16,45-16,58	0,41-0,42
400	13,1-13,2	Amorf Parça	15	24,11-24,30	0,34-0,35

Numuneler yaklaşık olarak belli bir hacim gözetilerek ve her seferinde aynı miktarda numune kalıba konulacak şekilde deneyler yapılmıştır. Bu deneyler ile elde edilen sonuçlar referans kabul edilen karışım içermeyen temiz kum numuneye ait deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tablo 2’de karışım numunelerin deney koşulları verilmiştir. Lastik atıkların hacmi, toplam boşluk hacminin bir parçası olarak kabul edilirken, kum / atık lastik karışımının kayma modülüne katkıda bulunan katı parçacıkların hacminin, kumlu parçacıkların hacmi olduğu varsayılır [10]. İleriki çalışmalarda türetilen referans eğrilere kök oluşturması nedeniyle eşdeğer boşluk oranı değerleri verilmiştir.

### **3.1. %5 Atık lastik + %95 temiz kum karışım numunelerin deney sonuçları**

Şekil 4’de %5 oranında atık lastik içeren karışım numunelerin birim kayma deformasyon genliğine karşılık 100 kPa çevre basıncındaki kayma modülü değerlerinin değişimi gösterilmiştir. %5 oranında toz lastik içeren karışım numunelerin kayma modülü değerleri, referans veri ile karşılaştırıldığında, %0,001 kayma deformasyon genliğinde yaklaşık olarak %26 oranında, kayma deformasyon miktarı %0,01 olduğunda ise %18 civarında ve %0,1 kayma deformasyon miktarında ise yaklaşık %35 civarında yüksek olduğu gözlenmiştir. %5 oranında çubuk atık lastik içeren karışım numunelerin kayma modülü değerlerinin %0,001 - %0,01 ve %0,1 kayma deformasyon genliklerinde, referans temiz kuma ait 100 kPa değerindeki referans veriye göre yaklaşık olarak %5 yüksek değerler aldığı görülmüştür. Buna karşılık %5 oranında amorf parça şeklinde atık lastik içeren numunelerin kayma modülü değerleri, referans kuma göre, %0,001 kayma deformasyon genliğinde yaklaşık olarak %40 daha düşük, kayma deformasyon miktarı %0,01 olduğunda ise %10 civarında daha düşük ve %0,1 kayma deformasyon miktarında referans kum ile aynı değerler aldığı görülmüştür. Tüm veriler deformasyon miktarı arttıkça referans kuma ait kayma modülü değerlerine yakınlaşmakta, ancak toz ve çubuk atık lastik içeren karışım numunelerin kayma modülü değerleri referans kuma göre yüksek devam etmektedir.

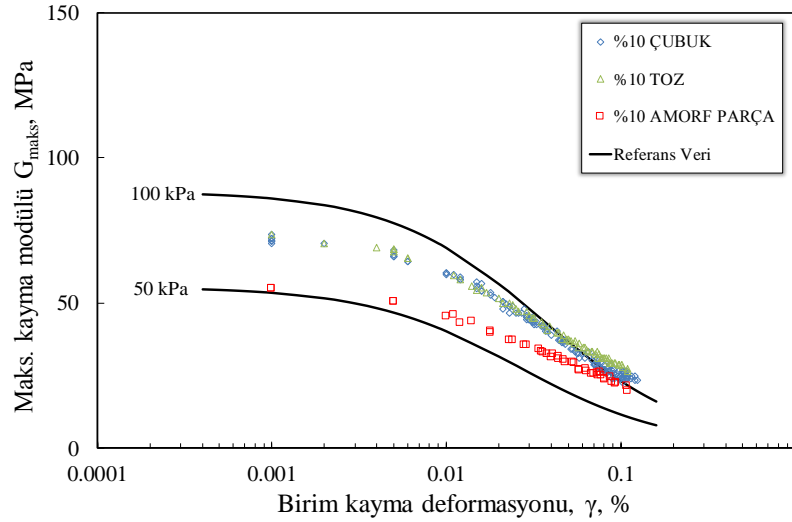
## Demiryolu Mühendisliği



Şekil 4. %5 Atık lastik + %95 temiz kum karışım numunelerin 100 kPa efektif basınç altındaki kayma modülü değerleri ve referans kuma göre değişimi

### 3.2. %10 Atık lastik + %90 temiz kum karışım numunelerin deney sonuçları

Şekil 5’de %10 oranında atık lastik içeren karışım numunelerin birim kayma deformasyon genliğine karşılık 100 kPa çevre basıncındaki kayma modülü değerlerinin değişimi gösterilmiştir. %10 oranında toz ve çubuk atık lastik içeren karışım numunelerin kayma modülü değerleri genel olarak benzer davranış göstermektedir. %0,001 birim kayma deformasyon genliğinde, 100 kPa çevre basıncındaki referans temiz kumun kayma modülü değerlerine göre %18 oranında düşük değerlere sahiptir.



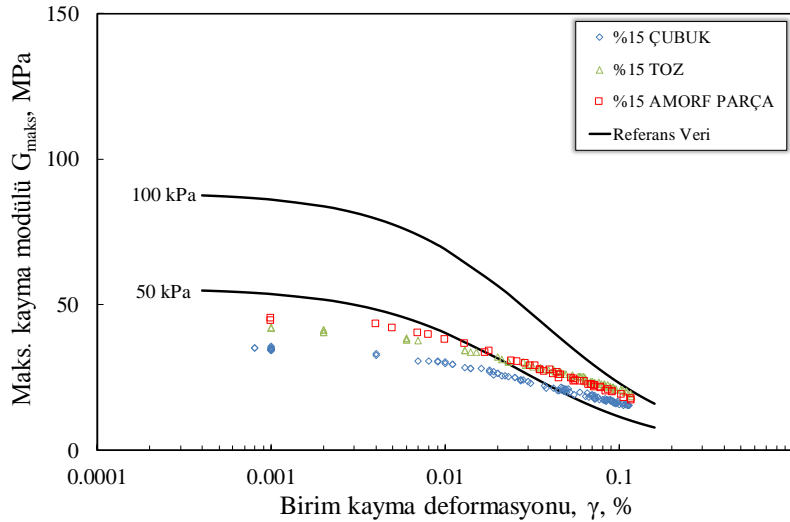
Şekil 5. %10 Atık lastik + %90 temiz kum karışım numunelerin 100 kPa efektif basınç altındaki kayma modülü değerleri ve referans kuma göre değişimi

%0,01 birim kayma deformasyonunda ise bu oran hem toz hem de çubuk numune içeren karışım numuneler için %15 olarak ölçülmüştür. %0,1 birim kayma deformasyon genliğinde ise referans kuma göre %20 oranında yüksek değerler elde edilmiştir. %0,001 birim kayma deformasyon genliğinde, %10 oranında amorf parça şeklinde atık lastik içeren karışım numuneler, 100 kPa çevre basıncındaki referans temiz kumun kayma modülü değerlerine göre %60 oranında düşük değerler elde etmiştir. %10 amorf parça içeren bu karışımlar, %0,01 birim kayma deformasyon genliğinde 100 kPa’lık referans kuma verilerine göre %55 oranında daha düşük değerler almıştır.

%0,1 birim kayma deformasyon değerinde ise amorf parça içeren karışım numuneler 100 kPa referans temiz kum örneğinin kayma modülü değerleri ile aynı değerleri almıştır.

### 3.3. %15 Atık lastik + %85 temiz kum karışım numunelerin deney sonuçları

Şekil 6'da %15 oranında atık lastik içeren karışım numunelerin birim kayma deformasyon genliğine karşılık 100 kPa çevre basıncındaki kayma modülü değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Şekil 6'da %15 karışım oranında amorf parça içeren numunelerde, hem çubuk hem de toz lastik içeren numunelere göre daha yüksek kayma modülü değerleri elde edilmiştir. %15 karışım düzeyinde, üç tip atık lastik arasından en düşük kayma modülü değerlerini çubuk lastik içeren numuneler almıştır. %15 karışım düzeyinde toz ve amorf parça tipinde karışım içeren numunelerde, %0,001 birim kayma deformasyon genliğinde, 100 kPa çevre basıncında, referans temiz kumun 100 kPa verilerine göre %95 oranında düşük kayma modülü değerleri elde edilmiştir. %0,01 kayma deformasyon genliğinde ise amorf parça ve toz atık lastik içeren numune karışımları için referans veriye göre %85 daha düşük ölçülmüştür. %0,1 kayma deformasyon genliğinde her üç tipte karışım içeren numuneler, 100 kPa çevre basıncı altındaki referans veri değerlerine yaklaşırsa da hala %25 civarında düşük kayma deformasyon değerleri elde edilmiştir. %0,001-%0,03 kayma deformasyon değerleri arasında üç tipteki karışım numuneleri referans veriye ait 50 kPa çevre basıncında elde edilmiş kayma modülü değerlerinden daha düşük değerler almıştır.



Şekil 6. %15 Atık lastik + %85 temiz kum karışım numunelerin 100 kPa efektif basınç altındaki kayma modülü değerleri ve referans kuma göre değişimi

## 4. Sonuç ve Yorum

Bu çalışmada atık araç lastiklerinden elde edilen çeşitli tipte parçalanmış malzeme ve kum zemin farklı oranlarda karıştırılarak hazırlanan numuneler üzerinde dinamik deneyler yapılmıştır. Buradaki amaç atık araç lastiklerinin zeminlerle birlikte kullanımını araştırmak ve dinamik analizlerinden önemli bir parametre olan deformasyona bağlı kayma modülü değerinin değişimini araştırmaktır. Çalışmada, 100 kPa çevre basıncında, %5,10 ve 15 oranında çubuk, toz ve amorf parça şeklinde atık lastik ile standart temiz kum ile elde edilmiş karışım numunelerin, %0,001-%0,1 birim kayma deformasyon genliği arasında kayma modülü değerleri, laboratuvar ortamında, rezonant kolon test cihazı ile elde edilmiş ve değerlendirilmiştir. Deneylerde seçilen kayma deformasyon genlik aralıkları, daha önceden yapılan çalışmalar incelendiğinde, demiryollarının alt yapısında karşılaşılan kayma deformasyon genliklerini kapsamaktadır [17]. Bu sonuçlara göre;

## Demiryolu Mühendisliği

- %5 oranında toz lastik içeren karışım numunelerin kayma modülü değerleri, referans veri ile karşılaştırıldığında, %0,001 kayma deformasyon genliğinde yaklaşık olarak %26 oranında, kayma deformasyon miktarı %0,01 olduğunda ise %18 civarında ve %0,1 kayma deformasyon miktarında ise yaklaşık %35 civarında yüksek olduğu gözlenmiştir. Kayma modülünde elde edilen yüksek değerlerin, toz numunenin %5 oranında kullanıldığında kum ile daha iyi adezyona girmesinden ve boşlukları daha iyi doldurmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- %5 oranında çubuk atık lastik içeren karışım numunelerin kayma modülü değerlerinin, referans temiz kuma ait 100 kPa çevre basıncındaki değerlere göre tüm kayma deformasyon düzeylerinde %5 daha yüksek kayma modülü değeri aldığı görülmüştür. Çubuk şeklinde yapısı sayesinde fiber tipte bir güçlendirme elemanı olarak görülebilir.
- Tüm karışım oranlarında, amorf parça şeklinde atık lastik kullanılan numunelerin kayma modülü değerleri, referans temiz kuma ait 100 kPa çevre basıncındaki referans verilerle kıyaslandığında, daha düşük çıkmıştır. Amorf parça şeklindeki atık lastik numunenin rijit yapısının tüm numunenin boşluklarını doldurmadığı ve tüm numune içinde daha fazla boşluk oluşturduğu düşünülmektedir. %15 karışım oranında ise, küp parça şeklindeki atık lastik numune, tüm numunede fazlaca hacim kaplamıştır. Küp parça şeklindeki atık lastik, toz ve çubuk lastiğe göre fazlaca rijit yapıdadır. Bu nedenden dolayı %15 karışım oranında küp parça atık lastik kullanımı, %15 oranında toz ve çubuk atık lastik kullanımına göre kayma modülü açısından daha yüksek elde edilmiştir. Lakin bu değer 100 kPa referans temiz kum verilerine göre çok düşüktür.
- Tüm atık lastik tipleri için, karışım oranı arttıkça, atık lastik oranının artmasından kaynaklı olarak, numuneler beklendiği üzere daha elastik davranış göstermiştir.

### Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri, Proje No:200915006 ile desteklenmiştir.

### Kaynakça

- [1] A. Erel, "Yüksek hızlı demiryollarında altyapının önemi ve tasarım ilkeleri," 7. Ulaştırma Kongresi, İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, Turkey, 2007.
- [2] T. H. Dickson, D. F. Dwyer and D. N. Humphrey, "Prototypes tire-shred embankment construction," *Transportation Research, Record 1755, TRB, National Research Council, Washington, D.C., USA, 2001, pp.160-167.*
- [3] S. Yoon, M. Prezzi, N. Z. Siddiki and K. Bumjoo, "Construction of a test embankment using a sand-tire shred mixture as fill material," *Waste Management, vol. 26, no. 9, pp. 1033-1044, Dec. 2005.*
- [4] S. U. Umu, "Kum – atık lastik karışımlarının lineer olmayan dinamik davranışı," Ph D. dissertation, Civil Engineering Dept., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Turkey, 2013.
- [5] D. N. Humphrey, "Investigation of exothermic reaction in tire shred fill located on SR 100 in Ilwaco, Washington," *Consulting Report to FHWA, US Department of Transportation, 1996.*
- [6] P. J. Bosscher, T.B. Edil and S. Kuraoka, "Design of highway embankments using tire chips," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 123, no. 4, pp. 295-304, Apr. 1997.*
- [7] D. N. Humphrey and L. E. Katz, "Five year study of the effect of tire TDA placed above the water table on groundwater quality," *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, vol. 1714, no. 1, pp. 18-24, Jan. 2000.*
- [8] J. G. Zornberg, A. R. Cabral and C. Viratjandr, "Behaviour of tire shred-sand mixtures," *Canadian Geotechnical Journal, vol. 41, no.2, pp. 227-241, Apr. 2004.*
- [9] S. Akbulut, A. S. Hasiloglu and S. Pamukcu, "Data generation for shear modulus and damping ratio in reinforced sands using adaptive neuro-fuzzy inference system," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 24, no. 11, pp.805-814, July 2004.*
- [10] K. Senetakis, A. Anastasiadis and K. Ptilakis, "Dynamic properties of dry sand/rubber (SRM) and gravel/rubber (GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 33, no. 1, pp.38-53, Febr. 2012.*



- [11] S. Keskin and M. Laman, "Atık lastik - kum karışımlarının kayma mukavemetinin laboratuvar deneyleriyle incelenmesi," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 27, no. 2, pp. 27-35, 2012.
- [12] S. U. Umu, D. V. Okur, G. Yılmaz and S. Fırat, "Dinamik yükleme şartlarında kum/lastik karışımlarının rijitlik ve sönüm özelliklerinin incelenmesi," *Politeknik Dergisi*, vol. 17, no. 1, pp. 11-19, 2014.
- [13] Jr. F. E. Richart, Jr. J. R. Hall and R. D. Woods. *Vibration of soils and foundations*. New Jersey, USA: Prentice Hall Press, 1970.
- [14] G. Viggiani, "Dynamic measurements of small strain stiffness of fine grained soils in the triaxial apparatus," *Experimental Characterization and Modeling of Soils and Soft Rocks*, Proceedings of the Workshop in Napoli, 1991, pp. 75-97.
- [15] P. De Alba, K. C. Baldwin, "Use of bender elements in soil dynamics experiments," *Recent Advances in Instrumentation, Data Acquisition and Testing in Soil Dynamics, Geotechnical Special Publication*, Proceedings of ASCE, vol. 12., no. 29, 1991, pp. 86-101.
- [16] J. Youn, Y. Choo, Y. and D. Kim, "Measurement of small-strain shear modulus  $G_{max}$  of dry and saturated sands by bender element, resonant column and torsional shear tests," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 45, no. 10, pp. 1426-1438, Sept. 2008.
- [17] D. Wegener and I. Herle, "Investigation of shear strain amplitude induced by railroad traffic in soils," *Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, San Diego, California, USA, 2010.
- [18] *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, ASTM International, ASTM D854-14, West Conshohocken, PA, 2014.
- [19] *Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices*, ASTM International, ASTM D4015-15e1, West Conshohocken, PA, 2015.

## Özgeçmiş



### Seyfettin Umut UMU

1980 yılında Kütahya'da doğmuştur. İlk, orta ve lise eğitimini burada tamamlamıştır. 2005 ve 2008 yıllarında sırasıyla Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği ve İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği programlarından mezun olmuştur. 2013 yılında, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi'nde Geoteknik Mühendisi olarak doktor unvanını almıştır. Halen Doktor Öğretim Üyesi olarak Eskişehir Teknik Üniversitesi Ulaştırma Meslek Yüksekokulunda görev yapmaktadır.



### Volkan OKUR

1969 yılında Eskişehir'de doğmuştur. Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi, yüksek lisans ve doktora eğitimlerini İstanbul Teknik Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalında Profesör olarak çalışmalarına devam etmektedir.

## Beyanlar

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Tüm yazarların eşit oranda katkısı olmuştur.