



## Freeze and thaw effect on the stiffness properties of recycled concrete aggregate used in the road embankment

Merve Akbaş\*<sup>ID</sup>, Recep İyisan<sup>ID</sup>

Istanbul Technical University, Civil Engineering Faculty, 34469 Maslak, İstanbul, Turkey

### Highlights:

- Effect of the freeze thaw on the resilient modulus and permanent deformation properties of recycled concrete aggregate
- Determination of material behavior according to permanent deformation
- A model proposal considering the freeze-thaw effect for resilient modulus estimation

### Keywords:

- Recycled concrete aggregates
- Freeze and thaw
- Resilient modulus
- Permanent deformation

### Article Info:

Research Article  
Received: 15.09.2020  
Accepted: 07.12.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.795379

### Correspondence:

Author: Merve Akbaş  
e-mail: akbas@itu.edu.tr  
phone: +90 539 575 8226

### Graphical/Tabular Abstract

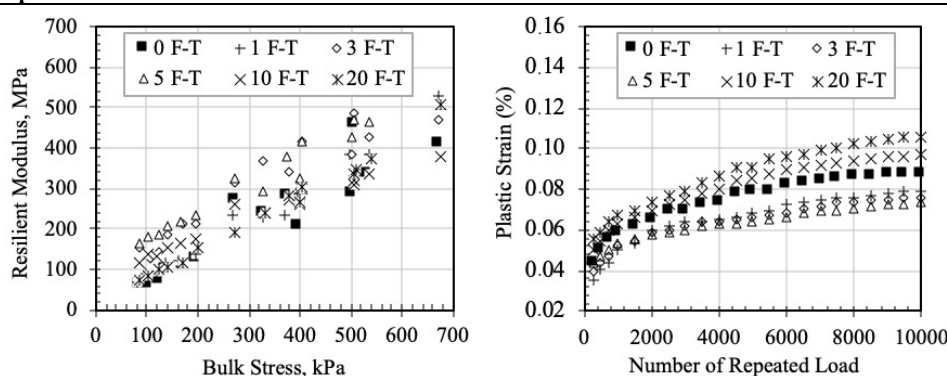


Figure A. Effects of F-T cycles on resilient modulus and plastic strain of the base samples

**Purpose:** Freeze-thaw (F-T) process is mostly observed in cold regions cause significant damage on roads and have a drastic effect on the long-term performance of the pavements. Thus, it should be considered when designing and constructing the roads due to the potential change it will make in the structure, arrangement and properties of materials used in road construction. This study attempted to understand the effect of F-T cycles on the stiffness properties of recycled concrete aggregate (RCA). For this purpose, base and sub-base samples prepared with different gradations of RCA are subjected to varying numbers of F-T cycles, and a series of resilient modulus and permanent deformation tests were conducted.

### Theory and Methods:

The behavior of the material used in a sub-base or base course under repeated wheel loads is an important issue affecting the performance of the flexible pavements. Resilient modulus and permanent deformation tests were conducted on both non-frozen and samples exposed to freeze-thaw cycles to evaluate stiffness properties of base and sub-base samples.

### Results:

Resilient Modulus Test performed on the sub-base and base samples subjected to F-T cycles shows that the relationship between the bulk stresses and the resilient modulus is almost linear for all samples. Power, Uzan, and MEPD models were employed to provide the most accurate estimation of the long-term resilience behavior of granular materials. The MEPD model was the most suitable model for both base and sub-base samples, in which regression lines drawn for each F-T cycle lie in the almost same direction. Based on the identification of the permanent strain response of the test samples with respect to shakedown theory, it is seen that most of the RCA samples exposed to F-T cycles accumulate permanent strains with a plastic creep behavior.

### Conclusion:

The geotechnical engineering properties of RCA originated from Istanbul-Turkey are suitable for utilization as an unbound base or sub-base course materials. The stiffness assessment, the highest resilient modulus was obtained after 5 F-T and then decreased, but no significant changes were observed in MR values compared to non-frozen samples.



## Yol dolgusunda kullanılan geri dönüştürülmüş beton agregasının esneklik özelliklerine donma çözülme etkisi

Merve Akbaş\*<sup>ORCID</sup>, Recep İyisan<sup>ORCID</sup>

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469 Maslak, İstanbul, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Geri dönüştürülmüş beton agregasının esneklik modülü ve kalıcı deformasyon özelliklerine donma çözülme etkisi
- Kalıcı deformasyona bağlı malzeme davranışının belirlenmesi
- Esneklik modülü tahmini için donma çözülme etkisini dikkate alan bir model önerisi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 15.09.2020

Kabul: 07.12.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.795379

### Anahtar Kelimeler:

Geri dönüştürülmüş beton agregaları,  
donma ve çözülme,  
esneklik modülü,  
kalıcı deformasyon

### ÖZET

Geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA) yol performansını etkileyen esneklik özellikleri yol alt temel ve temel tabakasında kullanılmadan önce belirlenmelidir. Diğer taraftan donma ve çözülme (D-Ç) süreci de yol uzun dönem performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu çalışmada, İstanbul kentsel dönüşüm projesinden elde edilmiş GDBA'nın esneklik özelliklerine donma ve çözülme etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla hazırlanan numuneler üzerinde, 1, 3, 5, 10 ve 20 D-Ç çevrimi sonrasında esneklik modülü ve kalıcı deformasyon deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları esneklik modülünün 5 D-Ç çevrimine kadar arttığını, bu eşik değerden sonra azalma eğiliminde olduğunu, D-Ç çevrimlerinden sonra plastik deformasyon değerlerindeki değişimin %0,02 mertebesinde olduğunu, GDBA'nın plastik sünme davranışı sergilediğini göstermiştir. Yol alt temel ve temel dolgularında, ilgili şartnameler dikkate alınarak doğal agrega yerine %100 oranında GDBA kullanımının uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca donma çözülme etkisini dikkate alan ve pratik amaçlar doğrultusunda esneklik modülü tahmininde kullanılmak üzere bir model önerilmiştir.

## Freeze and thaw effect on the stiffness properties of recycled concrete aggregate used in the road embankment

### H I G H L I G H T S

- Effect of the freeze-thaw on the resilient modulus and permanent deformation properties of recycled concrete aggregate
- Determination of material behavior according to permanent deformation
- A model proposal considering the freeze-thaw effect for resilient modulus estimation

### Article Info

Research Article

Received: 15.09.2020

Accepted: 07.12.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.795379

### Keywords:

Recycled concrete aggregates,  
freeze and thaw,  
resilient modulus,  
permanent deformation

### ABSTRACT

Stiffness properties affecting the road performance of recycled concrete aggregates (RCA) should be determined before using them in the road subbase and base course. On the other hand, the freeze and thaw (F-T) negatively affects the long-term performance of the road. In this study, the F-T effect on the stiffness properties of RCA obtained from the Istanbul urban transformation project was experimentally investigated. For this purpose, a series of resilient modulus and permanent deformation tests were performed on samples prepared with RCA after 1, 3, 5, 10 and 20 numbers of F-T cycles. The experiment results showed that the resilient modulus increases up to 5 F-T cycle and tends to decrease after this threshold value, that the change in plastic deformation values after F-T cycles is in the order of 0.02%, that the material exhibits plastic creep behavior. It has been determined that 100% RCA instead of natural aggregate can be used in the subbase and base by considering the relevant specifications. In addition, a model that takes into account the freeze-thaw effect and to be used in the estimation of resilient modulus for practical purposes is proposed.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de hızlı nüfus artışının gereği endüstriyel, konut ve ticari faaliyetler ile birlikte oluşan inşaat atık miktarı her geçen gün artmakta, bu durum ise depolama ve önemli çevre sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Ancak gelişen çevre bilinci ve sürdürülebilirlik kavramı ile bu atık malzemelerden yararlanmak için yapılan çalışmalar da son yıllarda önem kazanmaktadır [1-3]. İnşaat yapım ve yıkım atıklarının geri dönüşüm oranı ülkelerin gelişmişlik düzeyine ve belirlenen politikalara göre değişiklik göstermektedir. Hollanda, İsveç, Danimarka, Avusturya, Fransa ve İsviçre gibi ülkelerde inşaat atıklarının %80-90'ını geri dönüştürülürken Singapur'da bu oran %100'dür [4]. Türkiye'de ise yılda 125 milyon ton hafriyat atığının bertaraf edildiği tahmin edilirken, 2012 yılında İstanbul'da başlayan kentsel dönüşüm projeleri ile yılda 10 milyon tonu geçmeyecek miktarda inşaat atığı üretmek ve bunun 6 milyon tonunu geri dönüştürmek hedeflenirken, geri dönüşüm miktarı hakkında net veriler halen elde edilememektedir [5].

Geri dönüştürülebilir inşaat atıklarının önemli bir kısmını beton atıkları oluşturmaktadır. Geri dönüştürülmüş beton agregaları (GDBA), başta dolgu malzemesi olmak üzere çeşitli geoteknik mühendisliğini uygulamalarında kullanılmaktadır [6]. Yol projelerinde alt temel ve temel tabakasının imalatı yüksek miktarda doğal agrega tüketimini gerektirmektedir. Doğal agrega ile kıyaslandığında düşük maliyeti, sürdürülebilirliği ve doğal kaynakların korunması gibi sağladığı faydalardan dolayı GDBA'nın yol inşaatlarında kullanımı alternatif bir çözüm olarak görülmektedir [7-9]. Ayrıca, geoteknik mühendisliğinde yolların tasarımı ve inşasında uzun dönem performansı olumsuz yönde etkileyen donma çözülme olayı kritik bir konu olup, servis ömürleri boyunca bir kez bile donma-çözülme döngüsüne maruz kalan yol dolgu malzemelerinin geoteknik özelliklerinde önemli değişikliklerin olabileceği bilinmektedir. Donma çözülme etkisi ile değişen esneklik ve kalıcı deformasyon özellikleri yüksek standartlı yol tasarımı ve inşasında alt temel ve temel tabakasında kullanılacak malzemelerinin seçiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, yol alt yapısında kullanılması düşünülen GDBA'nın dane çapı dağılımı, sıkıştırma, CBR gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinin yanında, esneklik modülü ve kalıcı deformasyon gibi dinamik ve mukavemet özellikleri de belirlenmelidir [10]. Literatürde GDBA'nın mekanik ve mukavemet özellikleri üzerine çok sayıda araştırma yer alsa da GDBA'nın esneklik özellikleri ve bunun üzerinde donma ve çözülme etkisi hakkında sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Hem geri dönüştürülmüş agregaların hem de doğal zeminleri konu alan önceki çalışmalar, birçok faktörün hem esneklik modülü hem de kalıcı deformasyon değerlerini etkilediğini göstermektedir. Yılmaz [11] ülkemizde yol inşaatlarında kullanılmakta olan volkanik kökenli agrega karışımlarının esneklik modüllerini belirleyerek, esneklik modülü tahmini için bir model önermiştir. Li vd. [12] yaptıkları çalışmada, donma çözülme maruz kalan

zeminlerin elasto-plastik davranışına etki eden faktörleri araştırmış; başlangıç gerilme oranının, başlangıç ortalama geriliminin, tekrarlanan gerilme genliğinin, sıcaklığın ve başlangıç su muhtevasının plastik deformasyon değerlerini etkilediği sonucuna ulaşmıştır. Bozyurt vd. [13], Amerika Birleşik Devletleri'nin dört bir yanından toplanan GDBA kullanmış ve esneklik modülü ile dane şekli, bağlayıcı tipi, agrega mineralojisi arasındaki ilişkileri incelemiştir. Bazı araştırmacılar ise yol performansını doğru bir şekilde analiz etmek için GDBA'nın esneklik özelliklerini ve donma çözülmenin bu özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Rosa vd. [14] donma ve çözme döngüsü sürecinde GDBA'nın esneklik modülünün belli bir D-Ç döngüsüne kadar arttığını, sonraki D-Ç döngülerinde ise azaldığını gözlemlemiştir. Bassani ve Tefa [15] yaptığı çalışmada ise inşaat atıklarından elde edilen beton ve tuğla agregalarının esneklik modülünün artan D-Ç döngüleri ile azaldığını belirtmiştir.

Ülkemizde ise 2012 yılında başlayan kentsel dönüşüm projeleri ile inşaat atıkları İstanbul için önemli bir sorun haline gelmiş, ancak inşaat atıklarının çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanımının yaygınlaştırılması hedefi ile yol alt temel ve temel tabakasında doğal agrega ikamesi olarak veya doğal agregalarla karıştırılarak kullanılması yüksek kaliteli bir alternatif olarak görülmeye başlanmıştır [16]. Fakat GDBA'nın mühendislik özelliklerin elde edilen kaynağa bağlı olarak değişmesi bu agregaların kullanılmadan önce esneklik özelliklerinin belirlenmesini gerekli kılmaktadır [17]. Önceki çalışmalar incelendiğinde GDBA'nın doğal agregalarla karşılaştırılması, GDBA içerisine belli oranlarda farklı malzeme karıştırılarak özelliklerinin incelenmesi, D-Ç davranışının ve esneklik özelliklerinin belirlenmesi konuları genel olarak ayrı ayrı işlenmiştir. Ancak %100 GDBA ile hazırlanmış alt temel ve temel numunelerinin esneklik modülü ve kalıcı deformasyon özelliklerine donma çözülme çevrimlerinin etkisinin incelendiği araştırmalara çok rastlanılmamaktadır. Bu çalışmada, İstanbul'da kentsel dönüşüm projesinden temin edilen GDBA'nın standart geoteknik özellikleri belirlenmiş, D-Ç sonrası değişen esneklik ve kalıcı deformasyon özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla sırasıyla 1, 3, 5, 10 ve 20 D-Ç döngülerine tabi tutulan GDBA'nın esneklik özellikleri esneklik modülü ve kalıcı deformasyon deneyleri ile belirlenmiş, elde edilen sonuçlar donma çözülme maruz bırakılmayan numuneler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, esneklik modülü ve plastik deformasyonun belirlenmesi için kullanılan deney aletinin ülkemizde yaygın olarak bulunmaması, deneyin yapılmasının zaman ve maliyet gerektirmesi gibi sebeplerden dolayı, literatürde esneklik özelliklerinin tahmini için kullanılan birçok model incelenerek değerlendirilmiş ve bu çalışmada kullanılan GDBA için uygun olabileceği öngörülen 3 model dikkate alınmış ve model parametreleri belirlenmiş, sonuçlar karşılaştırılmalı olarak açıklanarak sunulmuştur. Yapılan deneysel çalışma İstanbul kentsel dönüşüm projesinden temin edilen geri dönüştürülmüş beton agregalardan Karayolları Teknik Şartnamesinde tanımlanmış dane çapı dağılımına

uygun olarak hazırlanmış yol alt temel ve temel tabakası numuneleri üzerinde yürütülmüştür. Numunelerin önce geoteknik özellikleri belirlenmiş, sonrasında donma çözünme çevrimlerine maruz bırakılmış, ardından belirlenen gerilme genliklerinde tekrarlı esneklik modülü ve kalıcı deformasyon deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen bulgularla incelenen modeller karşılaştırılmış, pratik amaçlar doğrultusunda esneklik modülünü tahmin edebilmek için bir korelasyon bağıntısı önerilmiştir. Önerilen bağıntının geçerlilik sınırları belirlenmiş ve önceki çalışmalarla karşılaştırılması yapılmıştır.

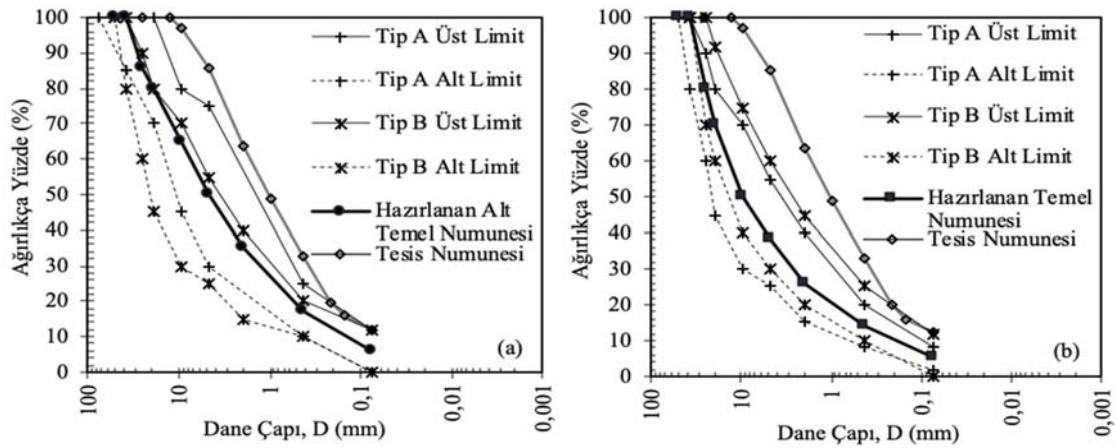
## 2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada, 2012 yılında İstanbul'da başlayan Kentsel Dönüşüm Projesi kapsamında yıkılan binalardan elde edilen inşaat atıklarının türüne göre ayrıştırıldığı (tuğla, beton, mermer vb.) ve depolandığı Göktürk Atık Bertaraf Tesisinden temin edilmiş ve dane çapı en fazla 30 mm olan GDBA kullanılmıştır. Tesisten alınan GDBA üzerinde sınıflandırma deneyleri yapılarak fiziksel özellikleri belirlenmiştir. GDBA'nın Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'nde kötü derecelenmiş siltli kum (SP-SM) ve Amerikan Karayolları Sınıflandırma Sistemi'nde ise A-1-b sınıfında yer aldığı anlaşılmıştır. Kıvam limitleri deney sonuçları malzemenin non-plastik olduğuna göstermektedir. Tesisten alınan GDBA'nın dane çapı dağılımı Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTŞ, 2013) [18] A ve B Tipi alt temel ve temel tabakası için belirtilen dane çapı sınır koşulları arasında yer almamaktadır. Bu nedenle şartnamede alt temel ve temel tabakasında kullanılacak malzemelerin dane çapı dağılımı için tanımlanmış alt ve üst sınırlar dikkate alınarak tesis malzemesi laboratuvar ortamında uygun dane çapı dağılımına sahip alt temel ve temel numuneleri haline getirilmiştir. Tesisten alınan ve şartname koşullarını sağlayacak şekilde laboratuvar ortamında hazırlanan numunelerin dane çapı dağılımı, alt temel ve temel numuneleri için şartnamede belirtilen alt ve üst sınırlar ile birlikte Şekil 1'de gösterilmiştir. KTŞ, 2013'e uygun dane çapı dağılımında hazırlanmış numuneler üzerinde laboratuvar ortamında dane birim

hacim ağırlık, standart ve modifiye proktor, CBR, farklı hidrolik eğimler altında sabit seviyeli geçirimsizlik ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan GDBA için dane özgül ağırlık 2,72 olarak belirlenmiştir. Alt temel ve temel numunelerinin sıkıştırma özelliklerini belirlemek için yapılan standart proktor deneyinden maksimum kuru birim hacim ağırlık sırasıyla  $\gamma_{k,maks}=19,40-20,10$  kN/m<sup>3</sup> ve optimum su muhtevası ise  $w_{opt}=\%11-10$  olarak elde edilmiş, Modifiye proktor deneyinden ise bu değerler 19,80-20,50 kN/m<sup>3</sup> ve %8-7'a ulaşmıştır. Standart proktor sıkılığında hazırlanmış temel ve alt temel numunesinin hidrolik özelliklerini belirlemek amacıyla 5 farklı hidrolik eğim (i) altında sabit seviyeli olarak yapılan deneylerden ortalama geçirimsizlik katsayıları sırasıyla  $k=5,64 \times 10^{-7}$  ve  $5,87 \times 10^{-7}$  m/s olarak elde edilmiştir. Kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek amacıyla büyük ölçekli kesme kutusu deney düzeneğinde yapılan deneylerden kayma mukavemeti açısı alt temel ve temel numuneleri için sırasıyla  $\phi=32-48^\circ$  olarak bulunmuştur. Yine standart proktor sıkılığında hazırlanmış numuneler üzerinde kendi su muhtevalarında ve suya doymun durumlara yapılan deneyleri, CBR değerleri hem alt temel hem temel numuneleri için her durumda %100'den büyük elde edilmiştir.

### 2.1. Esneklik Modülü ve Plastik Deformasyon Deneyi (Resilient Modulus and Plastic Deformation Test)

Yol alt yapı tabakalarında kullanılan malzemenin tekrarlı yükler altındaki davranışı, esnek üst yapının performansını da etkilemektedir. Trafik yükleri gibi dinamik etkiler altında elasto-plastik davranış sergileyen iri daneli alt temel ve temel malzemelerin geri kazanılan deformasyon değerlerini elde etmek için esneklik modülü deneyi geliştirilmiştir. Yol alt temel ve temel tabakasında tek yüklemeye oluşan plastik deformasyonlar görece yüksek olurken, yüklemeye sayısı arttıkça kalıcı deformasyon artışı azalmakta ve 100-200 yük tekrardan sonra pratik olarak malzemenin elastik davranış gösterdiği kabul edilmektedir [19]. Bu çalışma kapsamında GDBA kullanılarak imal edilecek yol alt yapısının uzun dönem performans değerlendirilmesinde kullanılacak



Şekil 1. KTŞ, 2013 [18]'e uygun olarak hazırlanan (a) alt temel ve (b) temel numunesi dane çapı dağılımları  
(a) sub-base and (b) base sample grain size distribution prepared in accordance with Turkish State Highway Specification [18])

esneklik modülü değerleri AASHTO T-307 [20]'ye göre gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri ile elde edilmiştir. Bir tür dinamik üç eksenli basınç deneyi olan esneklik modülü deneyinde, hazırlanan numuneye farklı çevre basınçlarında belirlenen gerilme genliğinde tekrarlı yükler uygulanmaktadır. Deney sonucunda uygulanan deviatör gerilme ( $\sigma_d$ ) altında oluşan elastik birim şekil değiştirme ( $\epsilon_r$ ) ile esneklik modülü ( $M_R$ ) hesaplanmaktadır. Yukarıda verilen standartta göre alt temel ve temel malzemeleri, dane çapı dağılımı ve kıvam limitlerine bağlı olarak Tip-1 ve Tip-2 olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Buna göre No.10 (2 mm) ve No. 200 (0.075 mm) eleklerden geçen ağırlıkça yüzdeler sırasıyla %70 ve %20'den az ve plastisite indisleri %10'un altında olduğunda malzeme Tip-1, aksi durumda Tip-2 olarak sınıflandırılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan malzemeden hazırlanmış olan alt temel ve temel numunelerinin sınıfı Tip-1 olarak belirlenmiş, esneklik modülü deneyleri de bu sınıf için tanımlanmış yükleme koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Esneklik modülü deney numuneleri modifiye proktor deneyinden elde edilen optimum su muhtevası değerinde, iç yüzeyi kauçuk bir membran ile çevrelenmiş, 150 mm çapında ve 315 mm yüksekliğindeki kalıplarda titreşimli tokmak ile sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Deney sırasında haversine şeklinde bir yük 0,1 saniye numuneye uygulanmış, 0,9 saniyede ise numune üzerinden kaldırılmaktadır. Tip-1 numunelere farklı yükleme serilerinde uygulanan çevre basıncı, maksimum deviatör gerilme ve yük tekrar sayısı Tablo 1'de özetlenmiştir. Bir örnek teşkil etmesi açısından çevre basıncının  $\sigma_3=20,7$  kPa ve maksimum deviatör gerilmenin  $\sigma_{d,maks}=62,1$  kPa olduğu 3 numaralı yükleme serisinde 96. yük tekrar sayısına karşı gelen deviatör gerilmenin ve deformasyonun zamana bağlı değişimi Şekil 2'de verilmiştir.

Uygulanan dinamik deviatör gerilmenin ( $\sigma_d$ ) elastik (geri kazanılan) birim şekil değiştirmeye ( $\epsilon_r$ ) oranı olarak tanımlanan Esneklik modülünün ( $M_R$ ) tahmini için birçok araştırmacı tarafından gerilme koşullarını dikkate alan çok sayıda model önerilmiştir. Bu çalışmada literatürdeki birçok model incelenmiş, alt temel ve temel malzemelerin esneklik özelliklerini en iyi şekilde yansıtabileceği düşünülen 3 model Üssel Model [21] Uzan Model [22] ve MEPD Model [23] kullanılarak  $M_R$  değerleri sırasıyla Eş. 1, Eş. 2 ve Eş. 3'e göre hesaplanmıştır. NCHRP Raporu 01-28A [24]'da ise toplam gerilmenin  $\theta=208$  kPa ve oktahedral kayma gerilmesinin  $\tau_{oct}=48,6$  kPa için hesaplanan  $M_R$  değerleri Özet Esneklik Modülü (SMR) olarak adlandırılmakta olup, her üç model için bu gerilmelerde SMR değerleri hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Asal gerilme eksenleriyle eşit açılar yapan bir normale sahip düzlemdeki gerilmelerden biri olan oktahedral kayma gerilmesi, tekrarlı yüklerin malzeme davranışı üzerindeki etkilerini şekil değiştirme açısından incelenmesinde mühendislikte yaygın olarak kullanılmaktadır [25].

$$M_R = k_1 \theta^{k_2} \quad (1)$$

$$M_R = k_1 P_a \left( \frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_3} \quad (2)$$

$$M_R = k_1 P_a \left( \frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (3)$$

Burada;

- $M_R$  : Esneklik Modülü  
 $k_1, k_2, k_3$ : Model parametreleri  
 $P_a$  : Atmosfer Basıncı  
 $\theta$  : Toplam gerilme ( $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$  ve  $\sigma_1 = \sigma_2$ )  
 $\sigma_d$  : Deviatör gerilme ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )  
 $\tau_{oct}$  : Oktahedral kayma gerilmesi ( $1/3[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{1/2}$ )

**Tablo 1.** Esneklik modülü deneyinde alt temel ve temel numunelerine uygulanan yükleme serileri [20]  
(Load sequences applied to subbase and base samples for resilient modulus test)

Yükleme Seri No	Çevre Basıncı ( $\sigma_3$ ), kPa	Maks. Deviatör Gerilme ( $\sigma_{d,maks}$ ), kPa	Yük Tekrar Sayısı
Ön koşullandırma	103,4	103,4	500-1000
1	20,7	20,7	100
2	20,7	41,4	100
3	20,7	62,1	100
4	34,5	34,5	100
5	34,5	68,9	100
6	34,5	103,4	100
7	68,9	68,9	100
8	68,9	137,9	100
9	68,9	206,8	100
10	103,4	68,9	100
11	103,4	103,4	100
12	103,4	206,8	100
13	137,9	103,4	100
14	137,9	137,9	100
15	137,9	275,8	100

Tekrarlı trafik yüklerine maruz kalan malzemelerin elastoplastik davranışını değerlendirmede tek başına esneklik modülü deneyi yeterli olmayıp, plastik deformasyon deneyi ile beraber değerlendirilmesi gerekmektedir. Üzerinde esneklik modülü deneyleri yapılan bütün numunelerin kalıcı düşey birim deformasyon değerleri %3'e ulaşmadığı için üç eksenli çerçeveden çıkarılmadan plastik deformasyon deneylerine tabi tutulmuştur [26]. Plastik deformasyon deneyleri, Amerikan Ulusal Kooperatif Karayolu Araştırma Programı (NCHRP) 01-28A Projesinde [24] önerildiği gibi uygulanmıştır. Buna göre esneklik modülü deneyindeki aynı ön koşullandırma serisi plastik deformasyon deneyinde de izlenmiş, sonrasında numunelere  $\sigma_3=38,7$  kPa sabit çevre basıncında  $\sigma_d=108$  kPa değerindeki deviatör gerilme 10000 (on bin) yük tekrarına kadar uygulanmıştır. Ölçülen toplam deformasyon değerleri geri kazanılan deformasyon değerlerinden çıkarılarak farklı yük tekrar sayılarındaki plastik deformasyon değerleri hesaplanmıştır.

Yol dolgu malzemelerinin plastik davranışının değerlendirilmesinde Shakedown Teorisi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teoriye göre belirli sayılardaki yük tekrarlarında elde edilen plastik deformasyonlar arasındaki farka göre malzemeler, A, B ve C olmak üzere 3 grupta değerlendirilmektedir [27, 28]. A grubunda yer alan bir malzeme plastik davranışı sadece sınırlı sayıda yük tekrarlarına kadar gösterirken, sıkışması tamamladıktan sonra elastik davranış sergilemektedir. B grubunda yer alan malzemeler başlangıçta görece yüksek seviyede plastik deformasyon yaparken, yük tekrar sayısı arttıkça plastik deformasyon değerleri sabit kalmaktadır. C grubundaki malzemelerde ise yüksek yük seviyelerinde artan tekrar sayısı ile her zaman plastik davranış görülmektedir. Werkmeister [28] tarafından, belirli tekrar sayılarında elde edilen kalıcı deformasyon değerlerine göre plastik davranış tahmin amacıyla Grup A, B ve C için sırasıyla Eş. 4, Eş. 5 ve Eş. 6'da verilen sınır değerleri önerilmiştir.

$$\text{Grup A: } \varepsilon_{p\ 5000} - \varepsilon_{p\ 3000} < 0,045 \times 10^{-3} \quad (4)$$

$$\text{Grup B: } 0,045 \times 10^{-3} < \varepsilon_{p\ 5000} - \varepsilon_{p\ 3000} < 0,40 \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$\text{Grup C: } \varepsilon_{p\ 5000} - \varepsilon_{p\ 3000} > 0,40 \times 10^{-3} \quad (6)$$

## 2.2. Donma Çözülme Çevrimi (Freeze and Thaw Cycling)

Yol güzergahlarında D-Ç sürecinin alt temel ve temel numunelerinin esneklik özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla numuneler ASTM D6035'e göre D-Ç çevrimlerine maruz bırakılmış, modifiye proktor deneyinden elde edilen sıkıştırma özelliklerini sağlayacak şekilde 152 mm çapında ve 304 mm yüksekliğinde kalıplarda titreşimli tokmak ile sıkıştırılarak hazırlanmıştır. D-Ç sırasında su kaybını önlemek için kalıplardan çıkarılan numuneler streç film ile sarılmış, dondurma ve çözme sıcaklığı sırasıyla -20°C ve 20°C olarak seçilmiştir. Tüm numuneler için bir dondurma çözme çevrimi önce 24 saat donma ve sonra 24 saat çözülme olarak tanımlanmış, sırasıyla 1, 3, 5, 10 ve 20 D-Ç çevrimine maruz bırakılarak esneklik özelliklerindeki değişim incelenmiştir.

## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

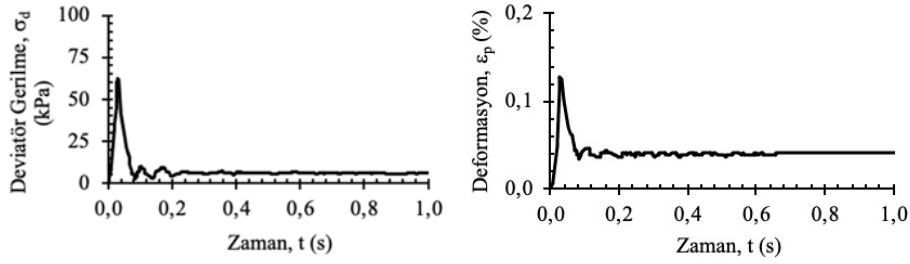
### 3.1. Donma Çözülme Çevrimlerinin Esneklik Modülüne Etkisi (Effect of the F-T Cycles on the Resilient Modulus)

Bu çalışma kapsamında GDBA'dan hazırlanmış alt temel ve temel numunelerinin esneklik özelliklerine D-Ç çevrimlerinin etkisini araştırmak amacıyla bir laboratuvar deney programı yürütülmüştür. Bu amaç doğrultusunda hazırlanmış numuneler sırasıyla 1, 3, 5, 10 ve 20 kez D-Ç çevrimlerine maruz bırakılmış, her çevrim sonrasında esneklik modülü deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar standart numuneler ile karşılaştırılmıştır. D-Ç çevrimine maruz kalmayan alt temel ve temel numuneleri bu çalışmada standart numune olarak isimlendirilmiştir. Önceki bölümde Tablo 1'de verilmiş olan her bir yüklem serisinde son 5 yük tekrarından elde edilen ortalama esneklik

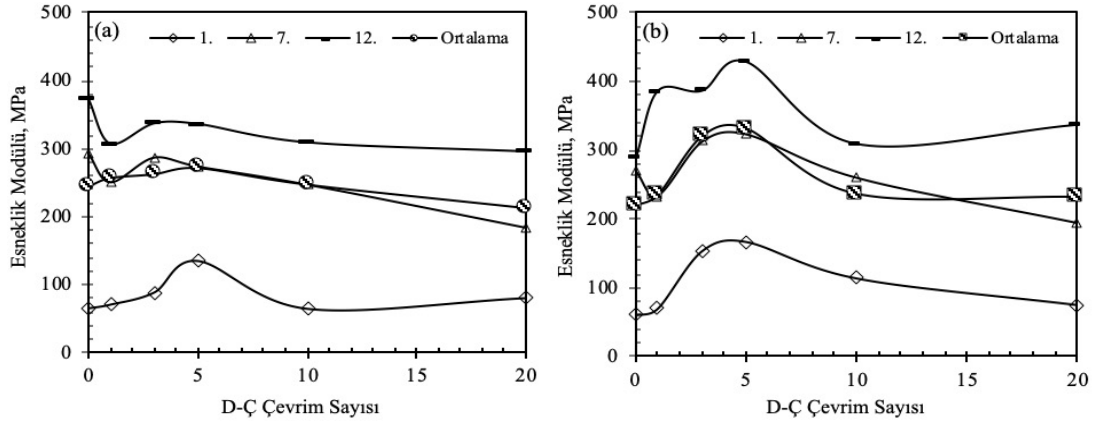
modülleri 15 yük serisi için ayrı ayrı hesaplanmıştır. D-Ç etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi açısından hesaplanan bu ortalama  $M_R$  değerlerinin çevre basıncının sırasıyla yaklaşık 21, 69 ve 103 kPa olduğu 1, 7 ve 12. yüklem serilerinde D-Ç çevrim sayısı ile değişimi alt temel ve temel numuneleri için ayrı ayrı Şekil 3'te verilmiştir.

Şekilden de izlenebileceği üzere, ortalama  $M_R$  değerlerinin 1'den 5'e kadar olan donma çözülme çevrimleri arasında arttığı ve daha sonra ise artan donma çözülme sayısı ile azaldığı anlaşılmaktadır. Yaklaşık 5 çevrime kadar  $M_R$  değerlerinde gözlenen bu artış, su ve artık çimentonun reaksiyona girmesi sonucunda numunelerde meydana gelen sertleşme ile açıklanabilmektedir [29, 30]. Ayrıca, ezilmiş betonda agregaları çevreleyen çimento harcı, daha ince parçacıklara ayrılma eğiliminde olup bu ince agregalar hidrasyona uğradığında emme basıncının ve dolayısıyla rijitliğin artmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan çimentolanma reaksiyonunun esneklik özellikleri üzerindeki iyileştirici etkisine rağmen daha fazla donma çözülme çevriminden sonra  $M_R$  değerlerindeki düşüş, zayıflayan ve daha kırılğan hale gelen zemin iskeleti ile açıklanmaktadır [31]. Yapılan deneyler sonucunda hem donma çözülme çevrimine maruz kalan numunelerin hem de standart alt temel ve temel numunelerinin esneklik modülünün ( $M_R$ ) toplam gerilme ( $\theta$ ) ile değişimi Şekil 4'te gösterilmiştir. Standart alt temel ve temel numunelerinin  $M_R$  değerlerinin sırasıyla 60 ila 410 MPa ve 65 MPa ila 430 MPa arasında değiştiği görülmektedir. Yüklem serilerinde çevre basıncının artmasından kaynaklı artan toplam gerilme ile esneklik modülünde bir artış elde edilmiştir [32, 33].

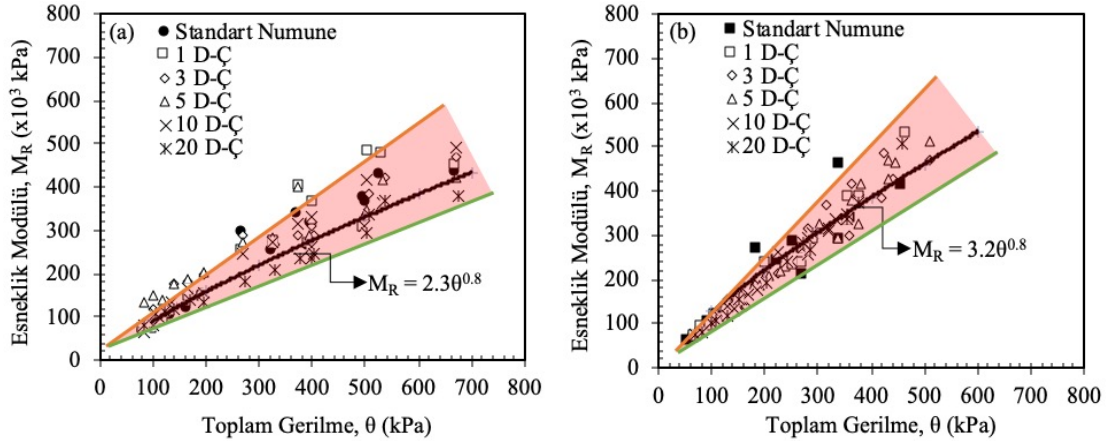
Şekil 3 ve 4 birlikte değerlendirildiğinde, aynı yüklem çevrimleri altında  $M_R$  değerlerinin 5 donma çözülme çevrimine kadar yükselmesi ve daha sonra azalması, farklı toplam gerilmelerdeki ortalama  $M_R$  değerlerinde gözlenen azalma ile aynı eğilimdir. Ancak 5 D-Ç sonrasında görülen bu azalışa rağmen standart numuneler ile donma çözülme maruz kalmış numunelerin  $M_R$  değerlerinde kayda değer bir azalış gözlenmemiştir. 10 ve 20 donma çözülme çevrimine maruz kalan numunelerin hem ortalama hem de belirlenen yüklem serilerinde  $M_R$  değerlerindeki düşüşe rağmen, standart numunelere göre önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu sonuçlar toplam gerilmenin, farklı yüklem koşulları altında doğrusal olmayan davranışa sahip iri daneli alt temel ve temel numunenin esneklik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Benzer sonuçlar geçmiş çalışmalarda da elde edilmiş, yol temel tabakasında doğal agrega yerine kullanılan geri dönüştürülmüş agregaların esneklik özellikleri belirlenmiş ve toplam gerilme ile esneklik modülü arasındaki ilişkinin neredeyse doğrusal olduğu gösterilmiştir [31, 34]. Ayrıca, donma ve çözülme işleminin inşaat atıklarının esneklik özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen Bassani ve Tefa [15],  $w_{opt}$  ve  $w_{opt}+2\%$  oranında sıkıştırılan inşaat atıklarının esneklik modülünde önemli bir artışa neden olduğunu belirtmiştir. Soleimanbeigi vd. [9], D-Ç çevrimlerinin  $M_R$  üzerindeki etkisini incelemiş, 20 D-Ç çevriminden sonra GDBA'nın esneklik özelliklerinde görülen iyileşmeyi



Şekil 2. 3 numaralı yükleme serinde 96. yük tekrarında deviyatör gerilmenin ve deformasyonun zamana bağlı değişimi  
(Time dependent variation of deviator stress and deformation at 96th repetition of the 3rd load series)



Şekil 3. Ortalama  $M_R$  değerlerinin (a) alt temel, (b) temel numuneleri için donma çözülme çevrim sayısı ile değişimi  
(The variation of the mean  $M_R$  values with the number of freeze-thaw cycles for (a) subbase and (b) base samples)



Şekil 4. Donma çözülme sonrası (a) alt temel ve (b) temel numunelerinin farklı toplam gerilmelerde esneklik modülleri  
(Resilient modulus of (a) subbase and (b) base samples at different total stresses after the freeze-thaw)

çimento hidratasyonu ile açıklamıştır. Camargo vd. [35], uçucu kül ile stabilize edilmiş ve D-Ç çevrimlerine maruz bırakılan GDBA üzerinde çalışmış, 5 D-Ç çevriminden sonra uçucu külün  $M_R$  değerinde sadece ihmal edilebilir değişikliklere sebep olduğunu tespit etmiştir. Bu sonuçlar, iri daneli malzemelerin esneklik özelliklerinin, agrega tipi, parçacık şekli ve dane boyutu, ince malzeme yüzdesi, su içeriği, sıkıştırma yöntemi, gerilme koşulları, yükleme süresi ve sıklığı gibi birçok faktörden etkilendiğini göstermektedir [36]. Yol alt yapı tabakalarında kullanılan malzemenin tekrarlı yükler altındaki davranışının belirlenmesinde esneklik modülü önemli bir mühendislik özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Esneklik modülü, çok özel donanım

sahip, dinamik üç eksenli deney sistemlerinde uygulanan tekrarlı deviyatör gerilme altında oluşan elastik birim şekil değiştirme değerlerinden hesaplanmaktadır. Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre esneklik modülünün tahmin edilmesinde birçok araştırmacı tarafından gerilme koşullarını dikkate alan çok sayıda model önerilmiştir. Bunlar arasında en yaygın olarak kullanılan  $M_R = k_1 \theta^{k_2}$  şeklinde ifade edilen model olup, terimlerin anlamı önceki bölümlerde verilmiştir. Bu çalışma kapsamında geri dönüştürülmüş beton agregalarından uygun dane çapı dağılımında hazırlanmış, 1-20 çevrim donma çözülmeye mazur kalmış alt temel ve temel numuneleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda hesaplanan esneklik modülünün toplam

gerilme ile değişimi incelendiğinde aralarında iyi bir uyum olduğu ve dar bir alanda değiştiği anlaşılmaktadır. Yapılan deneylerden elde edilen veriler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda, deney imkanının olmadığı durumlarda pratik amaçlar doğrultusunda, donma çözülme çevrimleri etkisinde kalmış alt temel ve temel tabakası için  $M_R$  esneklik modülünün tahmin edilebilmesi amacıyla Eş. 7 ve Eş. 8'deki bağıntılar önerilmektedir.

$$\text{Alt temel} \rightarrow M_R = 2300 \times \theta^{0.8} \quad (7)$$

$$\text{Temel} \rightarrow M_R = 3200 \times \theta^{0.8} \quad (8)$$

Korelasyon katsayısı yaklaşık %90 olan bağıntıda  $\theta$  kPa biriminde yerine konulmalıdır. Önerilen bağıntıların deney sonuçları ile karşılaştırması, belirlenen alt ve üst sınırlar ile birlikte yukarıdaki şekilde verilmiştir.

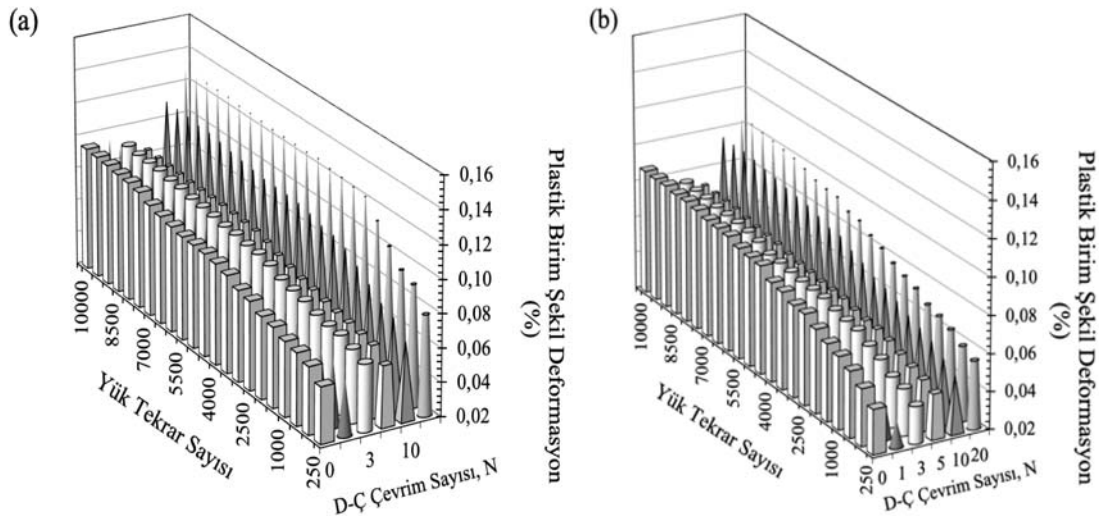
Laboratuvarda geri dönüştürülmüş beton agregalardan hazırlanmış sınırlı sayıda numuneler üzerinde yapılan donma çözülme ve esneklik deneylerinden elde edilen bu bağıntıların, deneylerin yerini tutması düşünülmemelidir. Mühendislik uygulamalarında bir ön bilgi edinilmesi açısından yararlı olabileceği düşünülen bu bağıntıların, faklı malzeme ve numunelerden elde edilecek verilerle geliştirilmesi ve değiştirilmesi mümkün olacaktır.

### 3.2. Donma Çözülme Çevrimlerinin Plastik Deformasyona Etkisi (Effect of the F-T cycles on the plastic deformations)

Uzun dönem yol performansının doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için dolgu malzemelerinin esneklik özelliklerinin tam olarak belirlenmesi, plastik deformasyon değerlerinin esneklik modülü ile birlikte dikkate alınması gerekmektedir. Bu amaçla, GDBA'dan hazırlanan numunelerin plastik deformasyon değerlerine donma çözülme etkisi uygulanan plastik deformasyon deneyleri ile araştırılmıştır. Belirlenen tekrarlı gerilme genliğinde 10000 (on bin) yük tekrar sayısına kadar numuneler üzerinde

yapılan deneylerden elde edilen plastik deformasyon değerleri, donma çözülme ve yük tekrar sayısına bağlı sütun grafik olarak alt temel ve temel numuneleri için Şekil 5'te gösterilmiştir.

Bu şekilde de görüldüğü gibi hem standart hem de D-Ç çevrimine maruz kalan alt temel numuneleri, temel numuneleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek plastik deformasyon değerlerine sahiptir. Diğer bir deyişle temel numunesi aynı yükleme ve donma çözülme çevrimlerinde diğerine göre daha elastik davranış sergilemektedir. Bu durum temel numunelerinin alt temel numunelerine göre içerdiği ince malzeme nedeniyle daha iyi parçacık kenetlenmesine ve daneler arası daha yüksek temas alanına sahip olması ile açıklanabilmektedir [14]. Danelerin etrafını saran artık çimentonun su ile reaksiyona sonucunda oluşan nispeten daha rijit bölge, 5 D-Ç çevrimine kadar artan çevrim sayısı ile hem alt temel hem de temel numunelerinin plastik deformasyon değerlerini azaltmıştır [37]. Elde edilen deney sonuçları, esneklik modülü deneyinde olduğu gibi kalıcı deformasyon değerlerinin değişiminde de numunelerde çimento reaksiyonu ile gerçekleşen sertleşmenin ve emmenin önemli olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte 5 D-Ç çevriminden sonra aynı sayıdaki tekrarlı yük altında numunelerin D-Ç çevrimlerine karşı duyarlılıklarının ve plastik deformasyon değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu sonucun ana nedeni, artan donma çözülme çevrim sayısı ile zemin danelerinin birbiri üzerinde kayması ve yeni dane dizilimi ile yapının bozulması numune özelliklerinin değişmesi, dolayısıyla plastik deformasyona daha duyarlı hale gelmesi olarak görülmektedir [38]. Bu durumda yol alt yapısı zarar görmekte ve yüzeyde yapısal tekerlek izleri belirgin hale gelmekte ve yol performansı düşmektedir [39]. Bununla birlikte, 5 D-Ç çevriminden sonra artan plastik deformasyon değerleri, oluşan buz kristallerinin danelerinin dizilim düzenindeki değişikliklerden kaynaklı artan yapısal gözeneklilik üzerindeki donma çözülme etkisini açıkça ortaya koymaktadır [40]. Geçmişte inşaat atıklarından elde



Şekil 5. Donma çözülme sonrası (a) alt temel ve (b) temel numunelerinin plastik deformasyon değerleri (Plastic deformation values of (a) subbase and (b) base samples after the freeze-thaw)



edilen geri dönüştürülmüş malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar genellikle esneklik özellikleri ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisi üzerinde yoğunlaşmış, donma-çözülme çevrimlerinin malzemenin plastik deformasyon özelliklerine etkileri konusunda araştırmalar sınırlı kalmıştır. Li vd. [41] yaptığı çalışmada farklı oranlarda geri dönüştürülmüş inşaat atıklarında hazırlanan numunelerin plastik deformasyonlarındaki değişimi 5, 10, 15, 20 D-Ç sonrasında incelemiş ve donma çözülme sayısı arttıkça numunelerin plastik deformasyonlarında artış gözlemlendiğini belirtmiştir. Soleimanbeigi vd. [9] ise GDBA'nın plastik deformasyon değerleri üzerinde sıcak değişiminin önemli bir etkisi olmadığını ve bu etkinin göz ardı edilebileceğini belirtmiştir.

### 3.3. Plastik davranışın Shakedown teorisi ile değerlendirilmesi

(Evaluating of the plastic behavior with Shakedown Theory)

Plastik deformasyon tahmini uzun dönem yol performans değerlendirmesi için gerekli olup, çok sayıda küçük plastik deformasyon artışının birikmesi, biriken toplam kalıcı deformasyonun artışı yollarda nihai bozulmalara yol açabilmektedir. Bu nedenle iri daneli dolguların uzun dönem davranışı modellenirken, yük uygulama sayısı ile kademeli olarak artan plastik deformasyon birikiminin birlikte değerlendirilmesi yük altında malzeme davranışı hakkında önemli bilgiler vermektedir. Numunelerin kalıcı deformasyona sebep olan plastik davranışının Shakedown Teorisine dayanan Werkmeister [28] tarafından önerilen sınır değerlere göre sınıflandırılması Tablo 2'de sunulmuştur.

**Tablo 2:** Numunelerin plastik davranışının Shakedown Teorisine dayanarak sınıflandırılması  
(Classification of the plastic behavior of the samples based on Shakedown Theory)

D-Ç Sayısı	Malzeme	$\epsilon_{p,5000} - \epsilon_{p,3000}$ ( $\times 10^{-3}$ )	Grup
0	Alt Temel	0,075	B
	Temel	0,095	B
1	Alt Temel	0,090	B
	Temel	0,040	A
3	Alt Temel	0,074	B
	Temel	0,046	B
5	Alt Temel	0,095	B
	Temel	0,040	A
10	Alt Temel	0,044	A
	Temel	0,110	B
20	Alt Temel	0,015	A
	Temel	0,120	B

Tablo 3'te görüldüğü gibi, numunelerin çoğu Grup B'de yer almış yani plastik sünme davranışı göstermiştir. Bu da deney sonu biriken toplam plastik deformasyonun çoğunun ilk 5000 yük tekrarına kadar tamamlandığını daha sonra artan yük tekrarının ise plastik deformasyon değerlerinde önemli bir artış olmadığına işaret etmektedir. A grubunda yer alan malzemelerin çoğunun da  $\epsilon_p = 0.045 \times 10^{-3}$  sınır değerine çok yakın olarak bu grupta yer alması, yalnızca 20 D-Ç döngüsüne maruz bırakılan alt temel numunesinin plastik

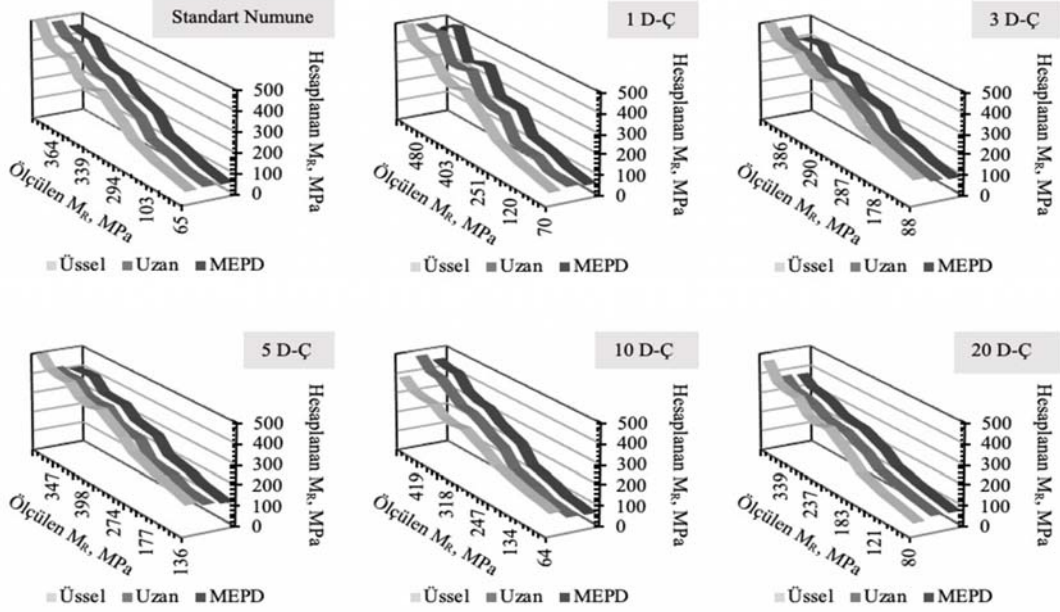
deformasyon değerlerinin çoğunu 5000 yük tekrarına kadar tamamladığını göstermektedir. Bu durum 20 kez dondurulup çözdürülen alt temel numunesinin dane dizilim yapısının bozulması nedeni ile aynı yük tekrarının numunenin sıkışmasına, dane iskeletinin tekrar kurulmasına sebep olması ve sonraki yük tekrarlarında oluşan plastik deformasyonların birikimi ile nihai plastik deformasyona ulaşması ile açıklanmaktadır [40]. Benzer sonuçlar geçmiş çalışmalarda da elde edilmiş, Mohammadinia vd. [42], Shakedown Teorisine dayanarak farklı yükleme koşulları altında GDBA'nın A veya B Grubunda yer alabileceğini; Saberian ve Li [43] ise kullandıkları GDBA'nın Grup B'de yer aldığını yani plastik sünme davranışı sergilediğini bildirmiştir.

### 3.4. Esneklik Modülü Değerlerinin Farklı Modeller ile Tahmini

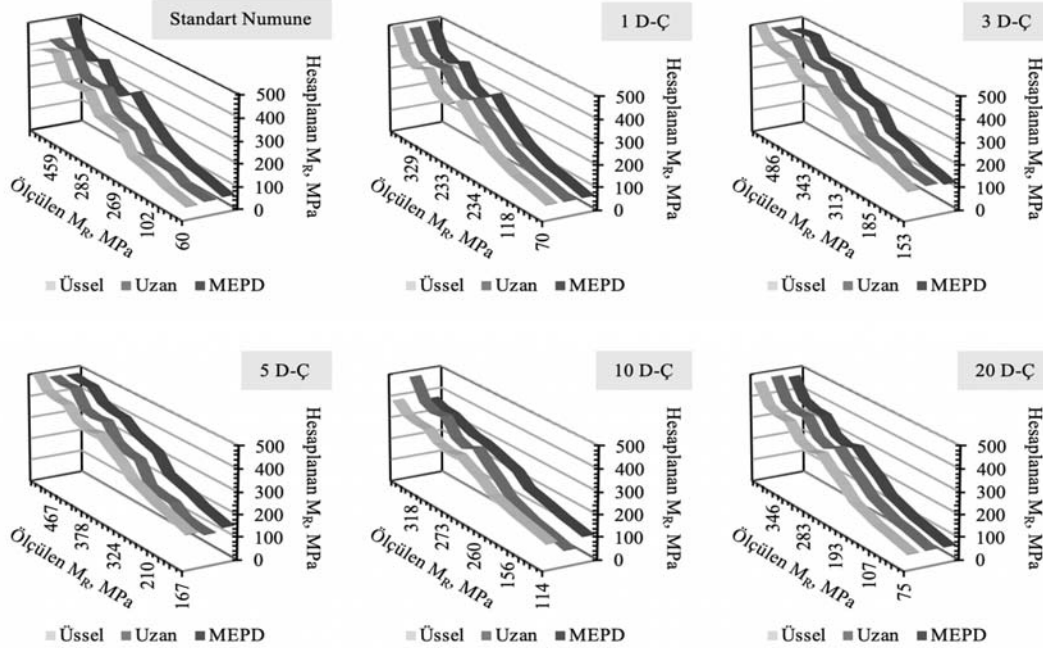
(Prediction of the Resilient Modulus Values with Different Models)

Esneklik modülünün ( $M_R$ ) iri daneli malzemelerin uzun vadeli davranışıyla ilişkisi göz önüne alındığında, bu özelliğin doğru değerleriyle çalışılması gerek tasarım gerekse performans değerlendirilmesinde önemli olmaktadır. Bu nedenle birçok araştırmacı tarafından dolgu malzemelerinin  $M_R$  değerlerinin tahmin edildiği birçok model geliştirilmiştir. Bu çalışmada alt temel ve temel numuneleri için yaygın kullanım alanı bulan ve genel bağıntıları önceki bölümde verilmiş olan Üssel, Uzan ve MEPD model sunulmuştur. Belirlenen modeller kullanılarak uygulanan deneylerden elde edilen verilerden yararlanılarak numuneler için esneklik modülü değerleri tahmin edilmiş, D-Ç çevrimlerine maruz bırakılan numuneler için ölçülen ve farklı 3 model ile tahmin edilen  $M_R$  değerleri alt temel ve temel numuneleri için sırası ile Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Ayrıca temel numuneleri için her modelde elde edilen model parametreleri, SMR ve  $R^2$  değerleri ile birlikte Tablo 3'te, alt temel numuneleri için ise bu Tablo 4'te verilmiştir.

Şekil 6 ve 7 ile ve Tablo 3 ve 4'ten de görüleceği üzere, önerilen esneklik modülü modellerinin her birinin, bütün alt temel ve temel numuneleri için yüksek korelasyon katsayına ( $R^2$ ) sahip olduğu ve tahmin edilen ile ölçülen  $M_R$  değerleri arasındaki farkın kabul edilebilir seviyede olduğu anlaşılmaktadır. Temel numuneleri için Üssel Modelde ölçülen ve tahmin edilen  $M_R$  değerlerinin tüm D-Ç çevrimlerinde minimum sapma ile neredeyse tek yönde uzanırken, Uzan Model'de 5 çevrimden fazla donma çözülmeye maruz kalan temel numuneler için nispeten daha yüksek bir sapma gözlenmiştir. Bununla birlikte hem alt temel hem temel numuneleri için en başarılı model, her bir D-Ç döngüsü için ölçülen ve tahmin edilen  $M_R$  değerlerinin minimum sapma ile aynı yönde uzandığı MEPD modeldir. Değişen D-Ç çevrim sayıları ile numunelerin model parametreleri arasında ise genel olarak belirli bir eğilimin olmadığını göstermektedir. Sırasıyla esneklik modülü ile orantılı olan ve toplam gerilimin üssü olan daha yüksek  $k_1$  ve  $k_2$  değerleri, esneklik modülünde artışa ve numune sertleşmesine işaret etmektedir.  $k_3$  katsayısı, su içeriğine,



Şekil 6. D-Ç sonrası alt temel numunelerinin Üssel, Uzan ve MEPD Model ile ölçülen ve hesaplanan  $M_R$  değerleri (Measured vs predicted Resilient Modulus with Exponential, Uzan and MEPD models for sub-base samples after F-T)



Şekil 7. D-Ç sonrası temel numunelerinin Üssel, Uzan ve MEPD Model ile ölçülen ve hesaplanan  $M_R$  değerleri. (Measured vs predicted Resilient Modulus with Exponential, Uzan and MEPD models for base samples after F-T)

doğunluk derecelerine ve boşluk oranına bağlı olarak hem negatif hem de pozitif değerlere sahip olabilmekte, bu da malzemenin kayma nedeniyle yumuşayabileceği (daha düşük  $M_R$ ) veya sertleşebileceği anlamına gelmektedir [44]. Ancak, en yüksek SMR değerine sahip 5 D-Ç döngüsünde minimum  $k_3$  değerinin elde edilmesi,  $M_R$  değerlerini belirlemede model parametrelerinden  $k_1$  ve  $k_2$ 'nin  $k_3$ 'ten daha

baskın olduğunu göstermektedir. Ayrıca deney sonuçları alt temel numunelerinin SMR değerlerinin temel numunelerine kıyasla  $k_3$  parametresine karşı daha duyarlı olduğu ve toplam gerilme ile kayma gerilmelerinin dilatasyon nedeniyle  $M_R$  değerlerinin tahmininde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Bu durum aynı zamanda, temel numuneleri için Üssel ve MEPD modellerinden elde edilen

**Tablo 3.** Donma çözülme sonrası temel numunesi için elde edilen model parametreleri ve SMR değerleri  
(Model parameters and SMR values obtained for the base sample after freeze-thaw)

Model	Model Parametreleri				SMR (Mpa)
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$R^2$	
<b>Power Model</b>					
Standart Numune	702,89	0,99	-	0,86	142,24
1 D-Ç	1289,77	0,90	-	0,97	161,49
3 D-Ç	6814,66	0,66	-	0,91	234,40
5 D-Ç	12352,97	0,57	-	0,96	260,16
10 D-Ç	9227,47	0,57	-	0,98	192,81
20 D-Ç	1195,46	0,91	-	0,98	157,07
<b>Uzan Model</b>					
Standart Numune	577,43	1,28	-0,33	0,94	120,90
1 D-Ç	1314,69	0,87	0,03	0,97	164,15
3 D-Ç	5933,35	0,86	-0,22	0,95	210,18
5 D-Ç	11137,31	0,71	-0,15	0,98	240,68
10 D-Ç	8763,57	0,64	-0,08	0,96	185,01
20 D-Ç	1174,43	0,94	-0,02	0,98	155,06
<b>MEPD Model</b>					
Standart Numune	782,20	1,23	-1,03	0,93	128,74
1 D-Ç	803,49	0,84	0,26	0,98	165,36
3 D-Ç	1547,74	0,80	-0,60	0,95	220,85
5 D-Ç	1785,51	0,66	-0,39	0,97	250,28
10 D-Ç	1302,46	0,63	-0,24	0,98	188,29
20 D-Ç	803,26	0,91	0,00	0,99	157,09

**Tablo 4.** Donma çözülme sonrası alt temel numunesi için elde edilen model parametreleri ve SMR değerleri  
(Model parameters and SMR values obtained for the subbase sample after the freeze-thaw)

Model	Model Parametreleri				SMR (Mpa)
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$R^2$	
<b>Power Model</b>					
Standart Numune	931,89	0,97	-	0,93	163,78
1 D-Ç	800,74	1,00	-	0,87	168,21
3 D-Ç	4212,52	0,72	-	0,96	199,48
5 D-Ç	9491,95	0,59	-	0,91	220,18
10 D-Ç	1346,55	0,91	-	0,95	171,18
20 D-Ç	3399,70	0,72	-	0,97	159,94
<b>Uzan Model</b>					
Standart Numune	850,05	1,12	-0,17	0,96	150,91
1 D-Ç	647,80	1,33	-0,37	0,98	140,30
3 D-Ç	4120,10	0,75	-0,04	0,96	195,94
5 D-Ç	8489,63	0,76	-0,19	0,95	200,44
10 D-Ç	1238,89	1,03	-0,14	0,96	159,97
20 D-Ç	3285,22	0,77	-0,05	0,97	155,68
<b>MEPD Model</b>					
Standart Numune	878,64	1,12	-0,65	0,96	154,35
1 D-Ç	948,73	1,29	-1,23	0,99	149,69
3 D-Ç	1199,10	0,77	-0,19	0,95	195,93
5 D-Ç	1519,59	0,71	-0,52	0,94	209,44
10 D-Ç	945,56	1,04	-0,57	0,96	162,12
20 D-Ç	958,23	0,76	-0,15	0,97	157,62

sonuçların birbirine yakınlığını ve alt temel numuneleri için ise Uzan ve MEPD modellerinin benzerliğini de açıklamaktadır. Jayakody vd. [45] yol dolgu malzemesi olarak GDBA'nın performansını değerlendirmiş, esneklik modülü tahmininde bu çalışmada kullanılan Üssel, Uzan ve MEPD modelleri kullanış ve bu modellerin GDBA'nın esneklik modülü tahmininde başarılı bir şekilde kullanıldığını belirtmiştir. Bozyurt vd. [46] yol temel tabakasında GDBA'nın kullanımını incelemiş, 7 farklı

kaynaktan temin edilen GDBA'nın esneklik modülü tahmininde MEPD modelin başarılı bir şekilde uygulanabileceği sonucuna varmıştır.

#### 4. SİMGELER (SYMBOLS)

$k$  : Geçirimlilik katsayısı  
 $k_1, k_2, k_3$  : Esneklik modülü model parametreleri  
 $M_R$  : Esneklik modülü

$P_a$	: Atmosfer basıncı
$\sigma_d$	: Deviyatör gerilme
$\sigma_{d,maks}$	: Maksimum deviyatör gerilme
$\sigma_3$	: Çevre basıncı
$W_{opt}$	: Optimum su muhtevası
$\gamma_{k,maks}$	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
$\theta$	: Toplam gerilme
$\tau_{oct}$	: Oktahedral kayma gerilmesi
$\epsilon_p$	: Plastik birim deformasyon
$\epsilon_{p,3000}$	: 3000. yük tekrarında elde edilen plastik birim deformasyon
$\epsilon_{p,5000}$	: 5000. yük tekrarında elde edilen plastik birim deformasyon
$\epsilon_r$	: Elastik (geri gelen) birim şekil değiştirme
$\phi$	: Kayma mukavemeti açısı

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA), doğal kaynakların korunması ve düşük maliyetli bir çözüm sunması açısından inşaat mühendisliğinde sürdürülebilir yol projelerinde alt temel ve temel tabakasında dolgu malzemesi olarak tercih edilmektedir. Bu çalışmada, İstanbul kentsel dönüşüm projesinden inşaat yıkım atıklarından elde edilmiş GDBA'dan yol dolgularında alt temel ve temel malzemesi olarak kullanılmak üzere hazırlanmış numunelerin esneklik modülü ve kalıcı deformasyon özelliklerine donma ve çözülme (D-Ç) çevrimlerinin etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmanın bulguları aşağıda özetlenmiştir:

- D-Ç çevrimine maruz kalmamış standart numuneler ile 1, 3, 5, 10 ve 20 defa donma çözülme çevrimi etkisinde kalmış numuneler üzerinde gerçekleşen tüm esneklik modülü deneylerinde, toplam gerilme ile esneklik modülü değerlerinin arttığı, bu artışın doğrusala yakın ve aynı gerilme altında temel numunesinde diğerine göre yaklaşık %40 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Numunelerin esneklik modülü değerleri yük tekrar sayısına bağlı olarak yaklaşık 80-420 MPa arasında değişmektedir.
- Esneklik modülü değerlerinde belli bir D-Ç çevrim sayıya kadar başlangıç değerine göre alt temel ve temel numunelerinde sırasıyla ortalama %25-%40 oranında artış olduğu, bir eşik değerden sonra artan çevrim sayısı ile modüllerin tedrici olarak yine yaklaşık aynı oranda azaldığı ancak D-Ç çevrimine maruz bırakılmayan standart numune için elde edilen değerlerin altına inmediği görülmüştür. Bu çalışma kapsamında esneklik modülünün en yüksek değere ulaştığı eşik D-Ç çevrim sayısı 5 olarak belirlenmiştir. Bu durum suyun ve artık çimentonun reaksiyona girmesi ile numunelerdeki sertleşme ve eşik donma çözülme çevrim sayısından sonra artan çevrim sayısı ile zemin iskeletinde meydana gelen daha zayıf ve daha kırılabilir zemin yapısı ile açıklanmaktadır.
- D-Ç etkisinin esneklik modülü üzerindeki etkisi plastik deformasyon deneylerinde de gözlenmiş ve eşik D-Ç sayısına kadar azalan plastik deformasyon değerleri bu D-Ç sayısından sonra artmıştır. En büyük kalıcı deformasyon

20 D-Ç sonrasında 10000 yük tekrarı altında %0,012 olarak elde edilmiştir. Bu durum esneklik modülünde olduğu gibi oluşan daha rijit alan ve emme etkisiyle iyileşen esneklik özelliklerinin kritik D-Ç sayısı sonrası oluşan buz kristallerinin etkisiyle danelerinin dizilim düzeninde meydana gelen değişikliklerden kaynaklı artan yapısal gözeneklilik ve zayıflaması ile açıklanmıştır.

- Alt temel numunelerinde temel numunelerine göre her D-Ç çevriminde yaklaşık %10-20 daha yüksek plastik deformasyon değerlerinin elde edilmesi ise temel numunelerinin dane çapı dağılımına bağlı olarak sahip olduğu daha iyi parçacık kenetlenmesi ve daha yüksek dane temas alanı ile açıklanmıştır. Esneklik özellikleri bir bütün olarak değerlendirildiğinde ise 5 D-Ç çevrimi İstanbul'dan temin edilen GDBA'nın esneklik özellikleri üzerinde donma çözülme etkisi için kritik durum değeri olarak belirlenmiştir.
- Alt temel ve temel numunelerin plastik davranışı Shakedown teorisine dayandırılarak değerlendirildiğinde 20 D-Ç çevrimine maruz kalan alt temel numunesi hariç numunelerin çoğunun sünme davranışı sergilediği belirlenmiştir. Yani numuneler ilk 5000 yük tekrarından önce sınır nihai plastik deformasyon  $\epsilon_p = 0,045 \times 10^{-3}$  değerlerine ulaşmış, 5000 yük tekrarından sonra plastik deformasyon değerlerinde önemli bir artış gözlenmemiştir. Bu durumda numunelerin genellikle  $0,045 \times 10^{-3} < \epsilon_{p5000} - \epsilon_{p3000} < 0,40 \times 10^{-3}$  koşulunu sağladığı ve B grubunda yer aldığı yani plastik sünme davranışı gösterdiği anlaşılmaktadır.
- Esneklik modülü tahmininde kullanılan modeller ile deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, temel numuneleri için ölçülen ve Üssel model ile tahmin edilen  $M_R$  değerleri arasında önemli bir uyum olduğu, değerlerin neredeyse örtüştüğü, alt temel numuneleri için aynı durumun Uzan modelde olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum  $M_R$  tahmininde doğru modellerin seçilmesi gerektiğini göstermektedir.
- Esneklik modülünü tahmin etmek için kullanılan modellere ait parametreler ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ) ile donma çözülme çevrimleri arasında anlamlı bir ilişkinin olmadığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte toplam ve oktahedral kayma gerilmesinin belli değerlerinde hesaplanan özet esneklik modülü değerlerinin 5 D-Ç çevrimin sonunda en yüksek değere ulaşması,  $M_R$  değerlerini belirlemede  $k_1$  ve toplam gerilmeye bağlı  $k_2$  parametresinin, kayma gerilmesini içeren  $k_3$  parametresinden daha etkin olduğunu göstermektedir.
- D-Ç etkisi dikkate alınarak %100 oranında geri dönüştürülmüş beton agregalarından hazırlanan alt temel ve temel malzemesi toplam gerilme ile esneklik modüllerindeki değişim incelendiğinde, farklı D-Ç sayısı ve toplam gerilmeler altında elde edilen  $M_R$  değerlerinin dar bir alanda değiştiği gözlenmiştir. Buradan hareketle, donma çözülme çevrimleri sonucunda yol alt temel ve temel tabakasının esneklik modülünü pratik amaçlar doğrultusunda toplam gerilmelere ( $\theta$ ) bağlı olarak tahmin edebilmek amacıyla alt temel için  $M_R = 2300 \theta^{0.8}$  ve temel tabakası için  $M_R = 3200 \theta^{0.8}$  korelasyon bağıntıları önerilmiştir. İstanbul kentsel dönüşüm projesinden elde edilen GDBA kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde

yapılan deney sonuçlarından elde edilen bu bağıntıların laboratuvar deneylerin yerini tutması beklenilmemelidir. Değişen veri sayısı ile bağıntıların geliştirilmesi ve değiştirilmesi mümkün olacaktır.

Bu deneysel çalışma, donma çözülme döngülerine maruz kalan GDBA'nın esneklik özellikleri hakkında literatüre katkı sağlamayı ve ülkemizde bu agregaların kullanımında engel olarak görülebilecek potansiyel mühendislik kaygıları gidermeyi amaçlamıştır. Ülkemizdeki kentsel dönüşüm projelerinden elde edilen GDBA'nın alt temel ve temel dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda, çalışmada belirlenen model parametreleri ile esneklik modülü ve plastik deformasyon değerlerinin hesaplanarak uzun dönem yol performans analizlerinde kullanılmasının yarar sağlayacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte, GDBA'nın elde edilen kaynağa göre değişen esneklik özelliklerinden dolayı, elde edilen sonuçların İstanbul kentsel dönüşüm projesinden temin edilen GDBA için geçerli olduğu ve farklı kaynaklardan elde edilen malzemelerin için bu özelliklerin deneysel olarak belirlenmesi gerektiği açıktır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından verilen desteğe yazarlar teşekkür ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Cabalar A. F., Abdulnafa M. D., Karabash Z., Influences of various construction and demolition materials on the behavior of a clay, *Environmental Earth Sciences*, 75 (9), 841, 2016.
2. Durmuş G., Şimsek O., Dayı M., The effects of coarse recycled concrete aggregates on concrete properties, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 24 (1), 183-189, 2009.
3. Cabalar A. F., Hassan D. I., Abdulnafa M. D., Use of waste ceramic tiles for road pavement subgrade, *Road Materials and Pavement Design*, 18 (4), 882-896, 2016.
4. Building Materials & Technology Promotion Council Ministry of Housing & Urban Affairs Government of India. Utilization of Recycled Produce of Construction & Demolition Waste A Ready Reckoner. [https://www.bmtpc.org/\\_DataFiles/CMS/file/PDF\\_Files/C&D\\_Ready\\_Reckoner\\_BMTPC\\_web.pdf](https://www.bmtpc.org/_DataFiles/CMS/file/PDF_Files/C&D_Ready_Reckoner_BMTPC_web.pdf). Yayın tarihi Ekim 2020. Erişim tarihi Ağustos 20, 2020.
5. T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Genel Müdürlüğü. Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planı 2014-2017. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ugds/ustmenu/ustmenu615.pdf>. Yayın tarihi Aralık 30, 2014. Erişim tarihi Mayıs 10, 2020.
6. Kawalec J., Kwiecien S., Pilipenko A., Rybak J., Application of Crushed Concrete in Geotechnical Engineering-Selected Issues, *World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2017)*, Prague-Czech Republic, 022057, 11-15 September, 2017.
7. Arulrajah A., Disfani M. M., Haghghi H., Horpibulsuk S., Modulus of rupture evaluation of cement stabilized recycled glass/recycled concrete aggregate blends, *Construction and Building Materials*, 84, 146-155, 2015.
8. Cabalar A. F., Zardikawi O. A. A., Abdulnafa M. D., Utilisation of construction and demolition materials with clay for road pavement subgrade, *Road Materials and Pavement Design*, 20 (3), 702-714, 2017.
9. Soleimanbeigi A., Shedivy R.F., Tinjum J.M., Edil T.B., Climatic effect on resilient modulus of recycled unbound aggregates, *Road Materials and Pavement Design*, 16 (4), 836-853, 2015.
10. Cardoso R., Silva R. V., Brito J. de, Dhir R., Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review, *Waste Management*, 49, 131-145, 2016.
11. Yılmaz A., Prediction of base and subbase resilient modulus ( $M_r$ ) using regression methodology, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (1), 507-517, 2020.
12. Li Q., Ling X., Sheng D, Elasto-plastic behaviour of frozen soil subjected to long-term low-level repeated loading, Part I: Experimental investigation, *Cold Regions Science and Technology*, 125, 138-151, 2016.
13. Bozyurt O., Keene, A. K., Tinjum J. M., Edil T. B., Fratta D., Freeze-Thaw Effects on Stiffness of Unbound Recycled Road Base, *Mechanical Properties of Frozen Soil*, Editor: Zubeck, H., Yang Z., West Conshohocken, USD, PA: ASTM International, 3-21, 2013.
14. Rosa M. G., Cetin B., Edil T. B., Benson C. H., Freeze-thaw performance of fly ash-stabilized materials and recycled pavement materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29 (6), 04017015, 2017.
15. Bassani M., Tefa L., Compaction and freeze-thaw degradation assessment of recycled aggregates from unseparated construction and demolition waste, *Construction and Building Materials*, 160, 180-195, 2018.
16. Esin T., Cosgun N., A study conducted to reduce construction waste generation in Turkey, *Building and Environment*, 42 (4), 1667-1674, 2007.
17. Reza F., Wilde W.J., Evaluation of Recycled Aggregates Test Section Performance, U.S. Dep. of Transportation, Minnesota, Report MN/RC 2017-06, 2017.
18. T.C Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü. Karayolları Teknik Şartnamesi-2013. [https://www.tamyol.com.tr/UserFiles/Content/KGM\\_Teknik\\_Sartnamesi\\_2013.pdf](https://www.tamyol.com.tr/UserFiles/Content/KGM_Teknik_Sartnamesi_2013.pdf). Yayın tarihi Kasım 4, 2013. Erişim tarihi Haziran 12, 2020.
19. T.C Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi. [https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Baskanliklar/BaskanliklarTeknikArastirma/Yeni%20Klasör/Yayımlar/USTYAPI\\_PROJELENDI\\_RME\\_REHBERI\\_2008-600.pdf](https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Baskanliklar/BaskanliklarTeknikArastirma/Yeni%20Klasör/Yayımlar/USTYAPI_PROJELENDI_RME_REHBERI_2008-600.pdf). Yayın tarihi 2008. Erişim tarihi Temmuz 15, 2020.

20. AASHTO T-307, Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials, American Society for Testing and Materials, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., USA, 2017.
21. Hicks R.G., Monismith C.L., Factors influencing the resilient properties of granular materials, *Transportation Research Record*, 345, 15-31, 1971.
22. Uzan J., Granular material characterization, *Transportation Research Record*, 1022, 52-59, 1985.
23. Transportation Research Board National Research Council, Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, NCHRP Report 01-37A, Washington, D.C., USA, 2004.
24. Transportation Research Board National Research Council, Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, NCHRP Report 01-28A, Washington, D.C., USA, 2003.
25. Omurtag M. H., Mukavemet – Cilt 2, 4. Baskı, Birsen Yayinevi, İstanbul, 2018.
26. Bilodeau J.P., Dore G., Schwarz C., Effect of seasonal frost conditions on the permanent strain behaviour of compacted granular materials used as base course, *International Journal of Pavement Engineering*, 12 (5), 507-518, 2011.
27. Erlingsson S., Rahman M.S., Evaluation of permanent deformation characteristics of unbound granular materials by means of multistage repeated-load triaxial tests, *Transportation Research Record*, 2369 (1), 11-19, 2013.
28. Werkmeister S., Permanent deformation behavior of unbound granular materials, Ph.D. Dissertation, Dresden University of Technology, Dresden, Germany, 2003.
29. Kaloop M. R., Gabr A. R., El-Badawy S. M., Arisha A., Shwally S., Hu J. W., Predicting resilient modulus of recycled concrete and clay masonry blends for pavement applications using soft computing techniques, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13, 1379-1392, 2019.
30. Artuso F., Lukiantchuki J. A., Evaluation of the self-cementing effect of Construction and Demotion Waste (CDW) on mechanical performance over time for pavement support layers purpose, *Ambiente Construído*, 19 (2), 59-77, 2019.
31. Bestgen J. O., Hatipoglu M., Cetin B., Aydilek A. H., Mechanical and environmental suitability of recycled concrete aggregate as a highway base material, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (9), 04016067, 2016.
32. Cetin B., Aydilek A. H., Guney Y., Stabilization of recycled base material using high carbon fly ash, *Resources, Conservation and Recycling*, 54 (11), 879-892, 2010.
33. Haider I., Kaya Z., Cetin A., Hatipoglu M., Cetin B., Aydilek A. H., Drainage and mechanical behavior of highway base materials, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140 (6), 04014012, 2014.
34. Dayioglu A., Hatipoglu M., Aydilek A. H., Comparative Evaluation of Mechanical Performance of Steel Slag and Earthen Granular Aggregates, *Transportation Research Board 97th Annual Meeting*, Washington DC-United States, 18-04065, 7-11 January, 2018.
35. Camargo F.F., Edil T.B., Benson C.H., Strength and stiffness of recycled materials stabilized with fly ash: a laboratory study, *Road Materials and Pavement Design*, 14, 504-517, 2013.
36. Kancherla A., Resilient Modulus and Permanent Deformation Testing of Unbound Granular Materials, Texas A&M University, College Station, Texas, U.S., 2004.
37. Arm M., Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: Results from triaxial tests and field tests, *Waste Management*, 21 (3), 235-239, 2001.
38. Wang F., Cao P., Wang Y., Hao R., Meng J., Shang J., Combined effects of cyclic load and temperature fluctuation on the mechanical behavior of porous sandstones, *Engineering Geology*, 105466, 2019.
39. Öztürk H.I., Tan E.B., Şengün E., Yaman İ.Ö., Comparison of jointed plain concrete pavement systems designed by mechanistic-empirical (M-E) method for different traffic, subgrade, material and climatic conditions, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 771-783, 2019.
40. Zhang Y., Johnson A. E., White D. J., Laboratory freeze-thaw assessment of cement, fly ash, and fiber stabilized pavement foundation materials, *Cold Regions Science and Technology*, 122, 50-57, 2016.
41. Li Z., Liu L., Yan S., Zhang M., Xia J., Xie Y., Effect of freeze-thaw cycles on mechanical and porosity properties of recycled construction waste mixtures, *Construction and Building Materials*, 210, 347-363, 2019.
42. Mohammadinia A., Naeini M., Arulrajah A., Horpibulsuk S., Leong M., Shakedown analysis of recycled materials as railway capping layer under cyclic loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 139, 106423, 2020.
43. Saberian M., Li J., Long-term permanent deformation behaviour of recycled concrete aggregate with addition of crumb rubber in base and sub-base applications, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121, 436-441, 2019.
44. Stolle D., Guo P., Liu Y., Resilient modulus properties of granular highway materials, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36 (4), 639-654, 2009.
45. Jayakody S., Gallage C., Ramanujam J., Performance characteristics of recycled concrete aggregate as an unbound pavement material, *Heliyon*, 5 (9), e02494, 2019.
46. Bozyurt O., Tinjum J.M., Son Y.H., Edil T. B., Benson C. H., Resilient Modulus of Recycled Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate, in: *Geo-Congress*, USA, 2012.