

## GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGASININ ESNEKLİK MODÜLÜ VE KALICI DEFORMASYON ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

### DETERMINATION OF RESILIENT MODULUS AND PERMANENT DEFORMATION PROPERTIES OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE

Ekrem Burak TOKA<sup>1</sup>, Murat OLGUN<sup>2</sup>

#### ÖZET

Bu çalışmada, esnek yol üstyapısı katmanlarından olan granüler yol temel (GYT) ve granüler yol alttemel (GYAT) tabakalarında kırmataş agregası (KA) yerine, yıkılmış yapılardan elde edilen geri dönüştürülmüş beton agregasının (GDBA) kullanılması durumu tekrarlı yükleme ile değerlendirilmiştir. Bir kırmataş tesisinden temin edilmiş KA ve yıkılmış binaların atık betonlarından elde edilmiş GDBA'ların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. GDBA'ların toplam malzeme kütlelerinin %25-50-75'i oranlarında kullanıldığı karışımlar ve malzemelerin saf halleri ile oluşturulan numunelerin esneklik modülü ( $M_r$ ) ve kalıcı deformasyon ( $\epsilon_p$ ) değerleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan KA için elde edilen  $M_r$  ve  $\epsilon_p$  değerleri GYT ve GYAT'de kullanılabilmesi için yeterli olmuştur. GDBA'ların  $M_r$  ve  $\epsilon_p$  değerleri KA kadar iyi olmasa bile GYT ve GYAT'de kullanılabilmesi için uygun olmuştur. Deneysel çalışma sonucunda, GYT ve GYAT'de GDBA'ların saf halde veya GDBA-KA karışımı şeklinde kullanımının  $M_r$  ve  $\epsilon_p$  değerleri bakımından mümkün olduğu belirlenmiştir. Böylece, atık betondan elde edilen GDBA'ların GYT ve GYAT malzemesi olarak değerlendirilmesi geri dönüşüme ve ekonomik sürdürülebilirliğe büyük katkı sağlayacaktır. **Anahtar Kelimeler:** Granüler yol temeli, granüler yol alttemeli, geri dönüştürülmüş beton agregası, esneklik modülü, kalıcı deformasyon

#### ABSTRACT

In this study, the use of recycled concrete aggregate (RCA) obtained from demolished structures instead of crushed aggregate (CA) in granular road base (GRB) and granular road subbase (GRSB) layers, which are flexible road pavement layers, was evaluated by cyclic loading. The physical and mechanical properties of CA obtained from a stone crushing plant and RCAs obtained from waste concrete of demolished buildings were determined. Resilient modulus ( $M_r$ ) and permanent deformation ( $\epsilon_p$ ) values were determined for the

<sup>1</sup> Araştırma Görevlisi, Konya Teknik Üniversitesi, ebtoka@ktun.edu.tr (Sorumlu yazar)

<sup>2</sup> Profesör Doktor, Konya Teknik Üniversitesi, molgun@ktun.edu.tr

mixtures in which RCAs were used at the ratios of 25-50-75% of the total material mass and for the samples formed with the pure forms of the materials. The  $M_r$  and  $\epsilon_p$  values obtained for CA used in this study were sufficient for CA to be used in GRB and GRSB. Even though the  $M_r$  and  $\epsilon_p$  values of RCAs were not as good as CA, they were suitable to be used in GRB and GRSB. As a result, it was determined that it is possible to use RCAs in pure form or as a RCA-CA mixture in GRB and GRSB in terms of  $M_r$  and  $\epsilon_p$  values. Thus, the use of RCA obtained from waste concrete as GRB and GRSB material will make substantial contribution to recycling and economic sustainability.

**Keywords:** *Granular road base, granular road subbase, recycled concrete aggregate, resilient modulus, permanent deformation*

## 1. GİRİŞ

İnşaat yapım ve yıkım işlemleri sonucunda plastik, ahşap, demir, beton vb. birçok inşaat atığı ortaya çıkmaktadır. Atık malzeme olarak görülen bu malzemelerin yeniden kullanılması, ithal edilmesi gereken malzemelerin ve hammadde tüketiminin azalması ile birlikte ekonomik fayda sağlamaktadır. Bu sayede, geri dönüşüm malzemelerinin kullanılması ülke ekonomilerinin sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır. Ayrıca bu atıkların geri dönüşüme kazandırılmasıyla düzenli depolama sahalarında depolama önlenmekte, doğaya karışabilecek ve çevreye zarar verebilecek tehlikeli maddeler azaltılabilmektedir. Bu durum, düzenli depolama sahası olarak tahsis edilen arazinin daha verimli kullanılmasının önünü açmaktadır.

Beton atıkları, inşaat yapım ve yıkım atıklarının yaklaşık %75'ini oluşturmaktadır (Arabani ve Azarhoosh, 2012). Beton atıklarının geri dönüşümü inşaat sektöründe kullanımları ile mümkün olmaktadır. İnşaat yapım ve yıkım atıklarının sürekli ortaya çıkması ve inşaat süreçlerinde agregaya devamlı ihtiyacın olması, özellikle doğal agrega yerine beton atığının kullanılması için büyük bir fırsat yaratmaktadır (Sanger vd., 2020). Bu atıkların yeni beton üretiminde ve yol üstü yapı tabakalarında kullanılması ile ocaklardan elde edilen doğal agregaların tükenmesi önemli ölçüde önlenabilir. Amerika Birleşik Devletleri'nde 2017 yılı itibarıyla inşaat yapım ve yıkım atıklarının %69,7'si yaklaşık 397 milyon ton ile beton atıkları olmuştur (USEPA, 2019). Küresel ölçekte yaklaşık %50-60'ı beton olan inşaat yapım ve yıkım atığı miktarı 3 milyar tonu aşmaktadır (Akhtar ve Sarmah, 2018). İnşaat sektörü için gerekli olan agrega miktarı ise 51,7 milyar tondur (Freedonia, 2016). Bu bilgilere göre, doğal agrega yerine inşaat yapım ve yıkım atığı olarak ortaya çıkan betondan elde edilen GDBA'nın seçilmesi, doğal agreganın hızlı ve bilinçsiz bir şekilde tüketilmesini önleyebilir.

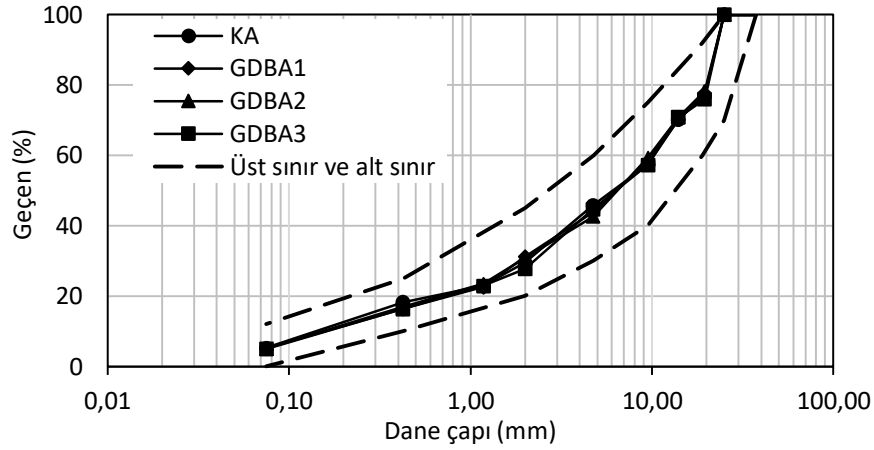
GYT veya GYAT'de, GDBA'ların kullanılmaya uygunluğu CBR, geçirimsizlik, esneklik modülü ve kalıcı deformasyon gibi mekanik özellikler ile değerlendirilebilir. GYT ve GYAT'de sürekli trafiğin etkisini en iyi şekilde temsil edebilen malzeme özellikleri  $M_r$  ve  $\epsilon_p$  değerleridir. Literatürde, GDBA'ların  $M_r$  ve  $\epsilon_p$  değerlerinin belirlenmesi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Bozyurt vd. (2012) GDBA'ların  $M_r$  değerlerinin geleneksel agregalara göre daha yüksek,  $\epsilon_p$  değerlerinin ise daha düşük olduğunu bulmuştur. Benzer bir çalışmada Gabr ve Cameron (2012) GDBA'ların esneklik modülü ve kalıcı deformasyon davranışı açısından doğal agregalardan daha üstün olduğunu belirtmişlerdir. Nataatmadja ve Tan (2001), farklı beton basınç dayanımlarına sahip GDBA'ların esneklik modülü davranışını araştırmışlardır. Araştırmacılar, GDBA'ların elde edildiği betonun basınç dayanımının esneklik modülü

davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve tüm kalite koşullarını sağlayacak şekilde üretilmeleri halinde GDBA'ların GYT ve GYAT için kullanılmasının bir zararının olmadığını belirtmişlerdir. Bestgen vd. (2016), GDBA'ların GYT'de kullanımını dayanım, esneklik modülü, kalıcı deformasyon ve dayanıklılık deneyleri ile araştırmışlar, GDBA'ların geleneksel agregalardan daha iyi mekanik özelliklere; ancak yüksek kalıcı deformasyonlara sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Saberian ve Li (2021), donma ve çözülme etkisi altında kırıntı kauçuk ve GDBA karışımları ile oluşturulan numunelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Donma aşamasında GDBA daneleri tarafından nem absorpsiyonunun artması ve çözülme aşamasında hızlı buharlaşmanın bir sonucu olarak danelerin birbirine yaklaşması nedeniyle rijitliğin ve dolayısıyla  $M_r$  değerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Alnedawi ve Rahman (2021), geogrid ile güçlendirilmiş GDBA performansını araştırdıkları çalışmada, geogrid ile güçlendirilmiş GDBA'nın  $M_r$  değerlerinin, güçlendirilmemiş GDBA'ya göre daha yüksek, geogrid ile güçlendirilmiş GDBA'nın  $\epsilon_p$  değerlerinin ise güçlendirilmemiş GDBA'ninkinden daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Donma ve çözülmenin etkisini dikkate alan Akbaş vd. (2021), donma-çözülme döngülerinden sonra GDBA'lı GYT ve GYAT için donmamış duruma göre daha yüksek  $M_r$  değeri elde etmişlerdir (20 donma-çözülme döngüsündeki GYAT numunesi hariç). Ayrıca donma-çözülme döngülerinden sonra  $\epsilon_p$  değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığını da bulmuşlardır. Literatürde konuyla ilgili çalışmalar olmasına rağmen, GDBA'ların çevrimli yükler altındaki mekanik davranışlarına ilişkin araştırmalar halen yetersizdir ve bu konuda daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır (Jayakody vd., 2019).

Bu çalışmada GDBA, KA ve bunların kütlece %25-50-75 oranlarında karışımından oluşan 13 farklı tasarımın esneklik modülü ve kalıcı deformasyon özellikleri laboratuvar deneyleri ile belirlenmiştir. Sonuçlar analiz edilmiş, GDBA kullanımı ile  $M_r$  ve  $\epsilon_p$  değerlerinin değişimi incelenmiştir.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

GDBA'lar, Konya ilinde kentsel dönüşüm sürecinde yıkılan üç farklı bina yıkıntısından elde edilen beton bloklardan üretilmiştir. Bu yapılar, yapılardan alınan karot numunelerinin basınç dayanımlarına göre belirlenmiştir. GYT ve GYAT'de geleneksel olarak kullanılan KA, bir kırma taş tesisinden elde edilmiştir. Yıkılan binalardan elde edilen beton bloklar, maksimum dane çapı 25 mm olacak şekilde laboratuvar tipi çeneli kırıcı kullanılarak kırılmıştır. Kırma işleminden sonra, GDBA'lar ve KA uygun eleklerden elenmiş ve GYT ve GYAT için Karayolu Teknik Şartnamesi'nde (KTŞ, 2013) belirlenen uygun gradasyona getirilmiştir (Şekil 1). Deneysel çalışma için, GDBA'ların ve KA'nın saf hali ve GDBA'ların KA ile kütlece %25-50-75 oranlarında karıştırılmasıyla tasarımlar oluşturulmuştur (Tablo 3). Örnek bir tasarımın adlandırılması şu şekildedir: 50KA 50GDBA1 tasarımı kütlece %50 KA ve %50 GDBA1 içermektedir. Bu terminolojide GDBA1, GDBA2 ve GDBA3, yıkılan üç farklı binadan elde edilen geri dönüşüm atıklarını temsil etmektedir. GDBA1, GDBA2 ve GDBA3 için karot numune basınç dayanımları sırasıyla 18,5 MPa, 15,2 MPa ve 11,7 MPa olarak elde edilmiştir. Tüm GDBA'ların ve KA'nın zemin sınıfı, Şekil 1'deki dane boyutu dağılımları dikkate alındığında, ASTM D2487'ye (2017) (USCS) göre iyi derecelenmiş çakıl (GW) ve AASHTO M145-91'e (2004) göre A-1-a olmuştur. Malzemelerin fiziksel özellikleri ve kompaksiyon parametreleri Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Malzemelerin dane çapı dağılımı eğrileri

Tablo 1. Malzemelerin kıvam limitleri ve dayanıklılık özellikleri

| Tasarım         | Likit limit (%) | Plastik limit (%) | Plastisite indisi (%) | Los Angeles aşınma (%) | MgSO <sub>4</sub> dayanıklılığı (%) | Yassılık indeksi (%) |
|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 100KA           | 23,00           | -                 | NP                    | 31,09                  | 2,33                                | 19,14                |
| 100GDBA1        | 28,71           | -                 | NP                    | 46,66                  | 26,94                               | 6,72                 |
| 100GDBA2        | 29,68           | -                 | NP                    | 40,39                  | 25,31                               | 7,20                 |
| 100GDBA3        | 30,72           | -                 | NP                    | 45,03                  | 22,94                               | 6,34                 |
| GYT için sınır  | NP              | NP                | NP                    | ≤ 35                   | ≤ 20                                | ≤ 25                 |
| GYAT için sınır | ≤ 25            | -                 | ≤ 6                   | ≤ 45                   | ≤ 25                                | ≤ 30                 |

Tablo 2. Malzemelerin su emme ve yoğunluk değerleri ile kompaksiyon parametreleri

| Tasarım         | İri danelerin dane yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> ) | İnce danelerin dane yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> ) | İri danelerin su emmesi (%) | İnce danelerin su emmesi (%) | Optimum su içeriği (%) | Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------|
| 100KA           | 2,75                                              | 2,48                                               | 0,63                        | 0,78                         | 5,35                   | 21,97                                                  |
| 100GDBA1        | 2,62                                              | 2,35                                               | 4,63                        | 6,59                         | 9,75                   | 19,48                                                  |
| 100GDBA2        | 2,67                                              | 2,39                                               | 2,88                        | 6,00                         | 8,60                   | 19,69                                                  |
| 100GDBA3        | 2,69                                              | 2,40                                               | 3,56                        | 6,75                         | 9,60                   | 19,70                                                  |
| GYT için sınır  | -                                                 | -                                                  | ≤ 3                         | ≤ 3                          | -                      | -                                                      |
| GYAT için sınır | -                                                 | -                                                  | ≤ 3,5                       | ≤ 3,5                        | -                      | -                                                      |

GYT ve GYAT'nin trafik yükü altındaki performansı, tekrarlı yüklemeli üç eksenli basınç deneylerinden (TYÜEBD) elde edilen  $M_r$  değerleri ile değerlendirilmektedir.  $M_r$  değeri, deviator gerilmenin elastik deplasmana oranı olarak tanımlanmaktadır. Esnek üstyapı için GYT ve GYAT tabaka kalınlıklarının hesaplanmasında kullanılan bir malzeme özelliği olan  $M_r$ 'nin doğru bir şekilde belirlenmesi esastır. Üstyapı tasarım yöntemleri AASHTO (1993) ve NCHRP 1-37A (2004) (Mekanistik-Ampirik Tasarım Kılavuzu (MEPDG)),  $M_r$  değerine bağlı olarak kalınlığın hesaplanmasına yönelik yöntemlerdir. Bu çalışmada, AASHTO T307-99 (2012) takip edilerek her bir tasarım için tekrarlı yükleme altında  $M_r$  değeri belirlenmiştir. Bu deney yöntemi, farklı hücre basınçlarının ve deviator gerilmelerin uygulandığı 15 farklı adımdan oluşmaktadır. Her adım 100 çevrimde oluşur ve 100 çevrimden sonra yeni bir

yüklemeye adımı başlatılır. Her adımın son 5 çevriminin ortalama  $M_r$  değeri, o adımdaki gerilmeler için elde edilen  $M_r$  değeridir. Her yüklemeye çevrimi, 0,1 saniyelik bir yüklemeye aşamasından ve 0,9 saniyelik bir boşaltma aşamasından oluşur. Bu çalışmada yüklemeye pnömatik piston ile yapılmıştır.

$M_r$  değeri, gerilme seviyelerine bağlı olarak değişmektedir.  $M_r$  değerinin gerilmelere bağlı bu değişimi bazı modellerle temsil edilebilir. Bu çalışmada AASHTO (Eşitlik 1), Uzan (1985) (Eşitlik 2) ve MEPDG (Eşitlik 3) modelleri kullanılarak, deneyden elde edilen  $M_r$  değeri ile numuneye uygulanan gerilmeler arasında bir ilişki kurulmuştur. Eşitlikler; esneklik modülü ( $M_r$ ), regresyon katsayıları ( $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$  ve  $k_8$ ), toplam gerilme ( $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ), atmosfer basıncı ( $\sigma_{atm}$ ), deviatör gerilme ( $\sigma_d$ ) ve oktahedral gerilmelerden ( $\tau_{oct}$ ) meydana gelmektedir.

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

$$\frac{M_r}{\sigma_{atm}} = k_3 \times \left( \frac{\theta}{\sigma_{atm}} \right)^{k_4} \times \left( \frac{\sigma_d}{\sigma_{atm}} \right)^{k_5} \quad (2)$$

$$\frac{M_r}{\sigma_{atm}} = k_6 \times \left( \frac{\theta}{\sigma_{atm}} \right)^{k_7} \times \left( \frac{\tau_{oct}}{\sigma_{atm}} + 1 \right)^{k_8} \quad (3)$$

Kalıcı deformasyon deneyi, esneklik modülü için yapılan TYÜEBD'nin devamı şeklinde gerçekleştirilmiştir. TYÜEBD'nin son adımı olan 15. adımdan sonra 16. adım tanımlanmış ve bu adımda uygulanan gerilmeler 15. adımda uygulanan gerilmelerle aynı seçilmiştir. Kalıcı deformasyon deneyi ile malzemelerin daha fazla çevrim altındaki davranışının değerlendirilmesi istendiğinden, 16. adımdaki çevrim sayısı 10000 olarak seçilmiştir. Bu durumda,  $\epsilon_p$  değerleri toplamda 1000 (ön koşullandırma çevrimi) + 1500 + 10000 = 12500 çevrim sonunda belirlenmiştir. Belirli bir gerilme seviyesindeki  $\epsilon_p$  değerleri ile çevrim sayısı arasındaki ilişki Eşitlik 4'te verilen modele göre incelenmiştir (Sweere 1990). Eşitlik 4'te gerilmeye bağlı terim olmadığı için bu çalışmada, gerilmelerin değişmediği ve aynı gerilmelerde çok sayıda çevrimin olduğu son 10000 (16. adım) + 100 (15. adım) = 10100 çevrimde elde edilen  $\epsilon_p$  değerlerinin modele uygunluğu incelenmiştir. Eşitlik 4;  $\epsilon_p$ , regresyon katsayıları ( $\alpha$  ve  $b$ ) ve yüklemeye çevrim sayısından ( $N$ ) oluşmaktadır. İlk 2400 çevrimde gerilmeler sürekli değiştiği için bu çevrimlerde oluşan  $\epsilon_p$  değerleri model için uygun olmamıştır.

$$\epsilon_p = \alpha \times N^b \quad (4)$$

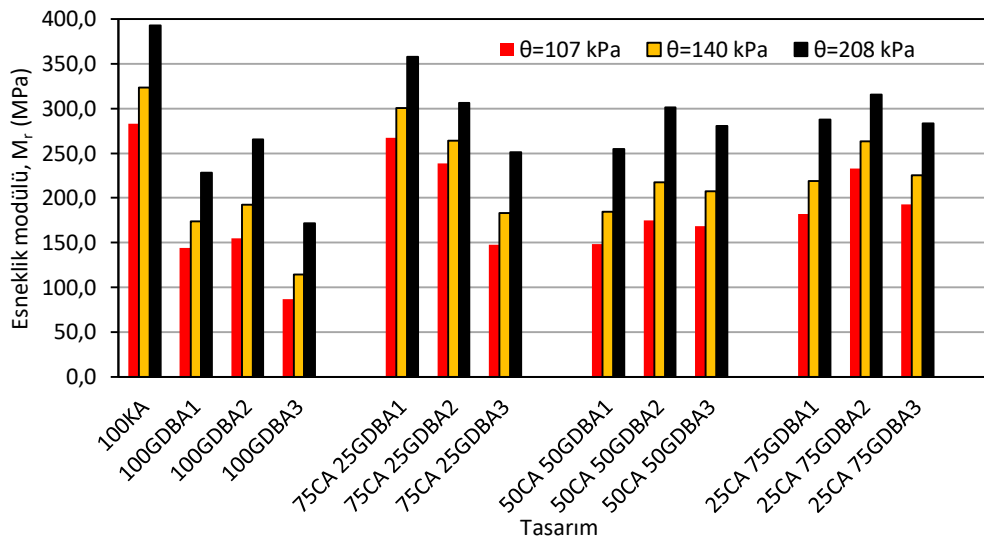
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Esneklik Modülü

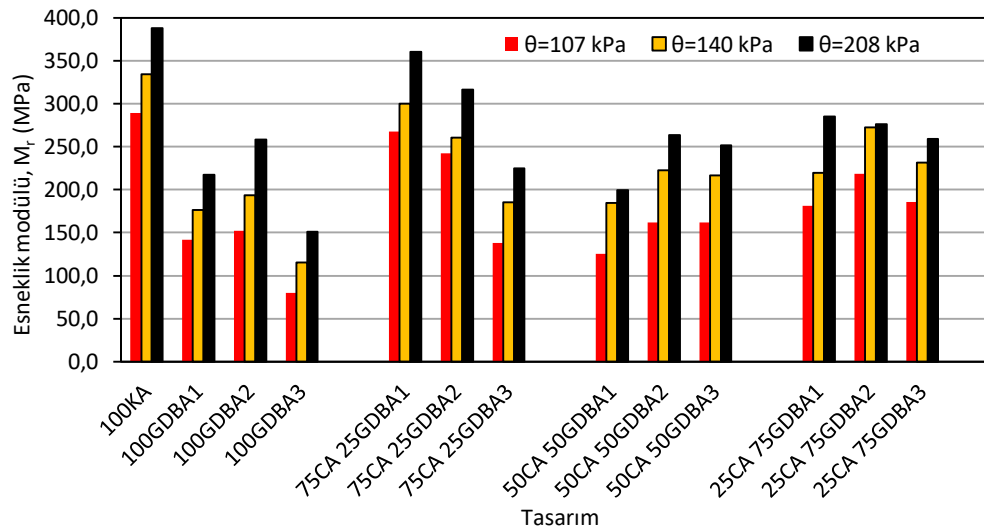
Modellerin regresyon katsayıları belirlendikten sonra, her bir modelde 107, 140 ve 208 kPa toplam gerilmeler için  $M_r$  değerleri hesaplanmıştır. Uzan (1985) ve MEPDG modellerinin ikinci terimleri için uygun deviatör ve oktahedral gerilmeler seçilmiştir. Uzan modelinde, 107, 140 ve 208 kPa toplam gerilmeler için sırasıyla 22, 35 ve 35 kPa hücre basınçları ve bunlara karşılık gelen 41, 35 ve 103 kPa deviatör gerilmeler dikkate alınmıştır. MEPDG modelinde 22, 35 ve 35 kPa'lık hücre basınçları ve bunlara karşılık gelen 19,33, 16,50 ve 48

kPa'lık oktahedral gerilmeler seçilmiştir. Bu gerilmeler, aynı toplam gerilme için, modellerden elde edilen  $M_r$  değerlerinin karşılaştırılmasına izin vermiştir.

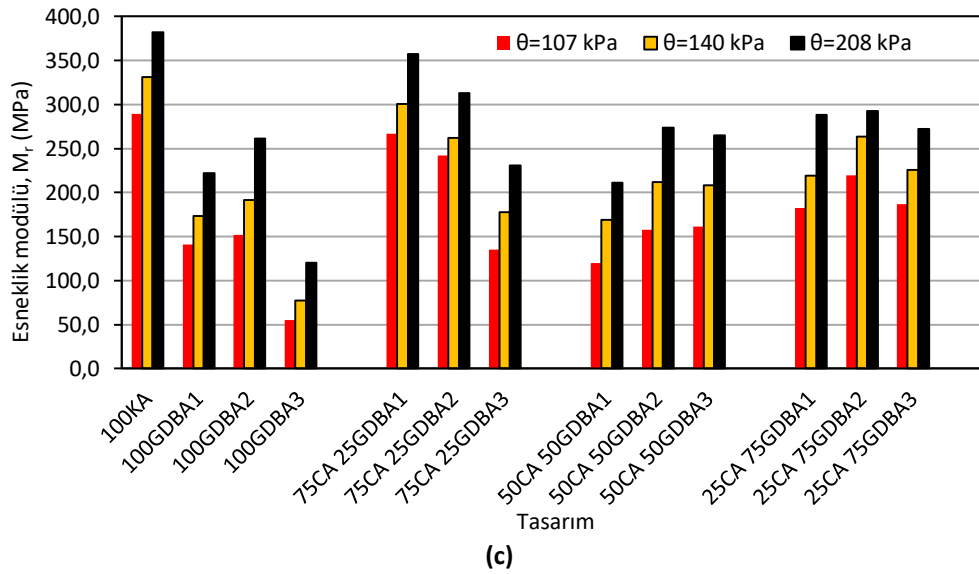
AASHTO (1993), Uzan (1985) ve MEPDG modelleri için elde edilen  $M_r$  değerleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Tüm karışım ve saf tasarımlar dikkate alındığında en yüksek  $M_r$  değeri 100KA için elde edilmiştir. 100GDBA'ların  $M_r$  değerleri, ortalama olarak, 100KA'nın  $M_r$  değerlerinin yaklaşık %26-67'si kadar olmuştur. Ancak geri dönüştürülmüş agregalı numunelerde geleneksel agregalara göre daha yüksek  $M_r$  değerleri elde etmek de mümkündür (Ashtiani ve Saeed, 2012); fakat mevcut çalışmada bu durum gerçekleşmemiştir. Saf tasarımlar için, 100KA'nın 100GDBA'lardan daha yüksek  $M_r$  değerine sahip olması, KA'nın öz dayanımının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. 100GDBA'ların öz dayanımı ise, yapışık çimento harcı nedeniyle daha düşüktür.



(a)



(b)



Şekil 2. Esneklik modülü modellerine göre  $M_r$  değerleri; (a) AASHTO modeli, (b) Uzan modeli, (c) MEPDG modeli

Tüm tasarımlar dikkate alındığında beton basınç dayanımları ile  $M_r$  değerleri arasında tutarlı bir ilişki elde edilememiştir. GDBA1 ve karışımlarının GDBA2 ve GDBA3 ile bunların karışımlarından daha yüksek  $M_r$  değerlerine sahip olması beklenmiş; fakat bu durum gerçekleşmemiştir. GDBA'ların elde edildiği betonların basınç dayanımları arasındaki farkın fazla olmaması ve beton basınç dayanımlarının nispeten düşük olması, beton basınç dayanımlarının sonuçlar üzerinde çok etkili olmadığını göstermiştir. Bu nedenle, GDBA oranı ile  $M_r$  değerleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Genel olarak, en düşük  $M_r$  değerleri 100GDBA'lar için elde edilmiştir; çünkü 100GDBA'lar, yapışık çimento harcı nedeniyle daha düşük bir öz dayanıma sahip olmuştur. 50GDBA'ların  $M_r$  değerleri 100GDBA'lardan biraz daha yüksek olmasına rağmen, yine de diğer tasarımlardan daha düşük olmuştur. Bu durumun öne çıkan nedeni, kötü dane yerleşimidir; çünkü 50GDBA'lar, farklı dane yüzeylerine ve yapılarına sahip en yüksek dane oranına sahip olmuştur. 50GDBA'lara kıyasla 75GDBA'larda daha yüksek  $M_r$  değerleri elde edilmiştir; çünkü kötü dane yerleşiminin etkisi bir miktar azalmıştır. 75GDBA'lara kıyasla 25GDBA'larda daha yüksek  $M_r$  değerleri bulunmuştur. Karışımda, yüksek öz dayanıma sahip olan KA oranının artması bu duruma neden olmuştur. Tüm esneklik modülü modelleri ve toplam gerilmeler için yapılan istatistiksel analizler sonucunda, GDBA oranı ve GDBA türünün etkili olabileceği kübik ilişki modelleri kurulmuş ve bu kübik modellerin  $R^2$  değerleri ortalama %70 civarında olmuştur. Kübik modellerde GDBA türünün biraz etkili olduğu gözlenmiş ancak bu etkinin fiziksel bir açıklaması belirlenememiştir. Yani GDBA'ların beton basınç dayanımı artarken beklentilerin aksine  $M_r$  değerinin düştüğü tasarımlar bile olmuştur.

Esneklik modülü modellerine göre elde edilen sonuçlar arasında önemli bir fark gözlenmemiştir. Çoğu tasarımda, AASHTO (1993) modelinin  $M_r$  değerleri 107 ve 208 kPa toplam gerilme için diğer modellerden daha yüksek olmuş, ancak 140 kPa toplam gerilme için Uzan (1985) modelinde  $M_r$  değerleri daha yüksek olmuştur. Bunun nedeni, her modelin regresyon katsayıları ve terimlerinin farklı olması ve terimlerinin farklı bir gerilme durumunu göstermesidir. NCHRP 1-37A (2004), 208 kPa toplam gerilmedeki  $M_r$  değerinin üstyapı tasarımında GYT için kullanılabileceğini önermektedir. MEPDG modeline göre 208

kPa toplam gerilme için 100KA'nın  $M_r$  değerinin 100GDBA'larinkinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Tüm modellerde, literatürde belirtildiği gibi (Arulrajah vd., 2013), toplam gerilmenin artmasıyla birlikte  $M_r$  değerlerinde artış gözlemlenmiştir. GDBA'lar için  $M_r$  değerleri bazı araştırmacılar tarafından 91 - 295 MPa (Bestgen vd., 2016) ve 490 - 1020 MPa (Gabr ve Cameron, 2012) olarak elde edilmiştir.

MEPDG ve Uzan (1985) modellerinden elde edilen  $M_r$  değerlerinin TYÜEBD'de malzemenin davranışını oldukça iyi temsil ettiği bilinmektedir. MEPDG modeli için 2. terimin katsayısı olan  $k_8$ 'in iki tasarım dışında negatif, 1. terimin katsayısı olan  $k_7$ 'nin ise pozitif olduğu belirlenmiştir. Bu durumda, ilk terim, gerilmeyle pekleşmeyi ve danelerin birbirine kenetlenmesini göstermektedir. Tüm modeller için yüksek  $R^2$  değerleri (Tablo 3), gerilmeyle pekleşen malzeme davranışının (Arulrajah vd., 2013; Haider vd., 2014) bu çalışmada kullanılan numuneler için de geçerli olduğunu göstermiştir.

Tablo 3. Esneklik modülü modellerinin regresyon katsayıları ve  $R^2$  değerleri

| Tasarım      | AASHTO modeli regresyon katsayıları ve $R^2$ değerleri |       |       | Uzan modeli regresyon katsayıları ve $R^2$ değerleri |       |        |       | MEPDG modeli regresyon katsayıları ve $R^2$ değerleri |       |        |       |
|--------------|--------------------------------------------------------|-------|-------|------------------------------------------------------|-------|--------|-------|-------------------------------------------------------|-------|--------|-------|
|              | $k_1$                                                  | $k_2$ | $R^2$ | $k_3$                                                | $k_4$ | $k_5$  | $R^2$ | $k_6$                                                 | $k_7$ | $k_8$  | $R^2$ |
| 100KA        | 28314,5                                                | 0,493 | 0,74  | 2652,2                                               | 0,512 | -0,050 | 0,85  | 2885,1                                                | 0,488 | -0,214 | 0,92  |
| 100GDBA1     | 5747,2                                                 | 0,690 | 0,95  | 1234,4                                               | 0,773 | -0,089 | 0,95  | 1386,3                                                | 0,752 | -0,213 | 0,95  |
| 100GDBA2     | 3447,6                                                 | 0,814 | 0,97  | 1371,4                                               | 0,863 | -0,049 | 0,97  | 1461,2                                                | 0,849 | -0,109 | 0,97  |
| 100GDBA3     | 711,9                                                  | 1,028 | 0,95  | 613,4                                                | 1,240 | -0,204 | 0,97  | 526,2                                                 | 1,240 | -0,204 | 0,97  |
| 75KA 25GDBA1 | 34277,2                                                | 0,439 | 0,92  | 2615,2                                               | 0,427 | 0,013  | 0,92  | 2577,1                                                | 0,442 | -0,008 | 0,92  |
| 75KA 25GDBA2 | 41788,4                                                | 0,373 | 0,65  | 2493,5                                               | 0,313 | 0,066  | 0,66  | 2262,2                                                | 0,318 | 0,215  | 0,66  |
| 75KA 25GDBA3 | 3557,8                                                 | 0,798 | 0,91  | 1101,3                                               | 0,980 | -0,178 | 0,93  | 1389,0                                                | 0,969 | -0,517 | 0,93  |
| 50KA 50GDBA1 | 3266,5                                                 | 0,816 | 0,79  | 823,1                                                | 1,220 | -0,375 | 0,88  | 1332,2                                                | 1,190 | -1,051 | 0,90  |
| 50KA 50GDBA2 | 3822,2                                                 | 0,818 | 0,87  | 1220,3                                               | 1,057 | -0,232 | 0,90  | 1647,3                                                | 1,030 | -0,632 | 0,91  |
| 50KA 50GDBA3 | 4713,3                                                 | 0,766 | 0,65  | 1252,2                                               | 0,957 | -0,214 | 0,67  | 1651,1                                                | 0,899 | -0,479 | 0,72  |
| 25KA 75GDBA1 | 7296,1                                                 | 0,688 | 0,96  | 1700,3                                               | 0,702 | -0,014 | 0,96  | 1729,1                                                | 0,681 | 0,026  | 0,96  |
| 25KA 75GDBA2 | 27576,2                                                | 0,457 | 0,67  | 1679,3                                               | 0,680 | -0,236 | 0,75  | 2324,9                                                | 0,624 | -0,594 | 0,74  |
| 25KA 75GDBA3 | 12785,5                                                | 0,581 | 0,88  | 1519,1                                               | 0,730 | -0,162 | 0,91  | 1888,8                                                | 0,676 | -0,346 | 0,90  |

### 3.2. Kalıcı Deformasyon

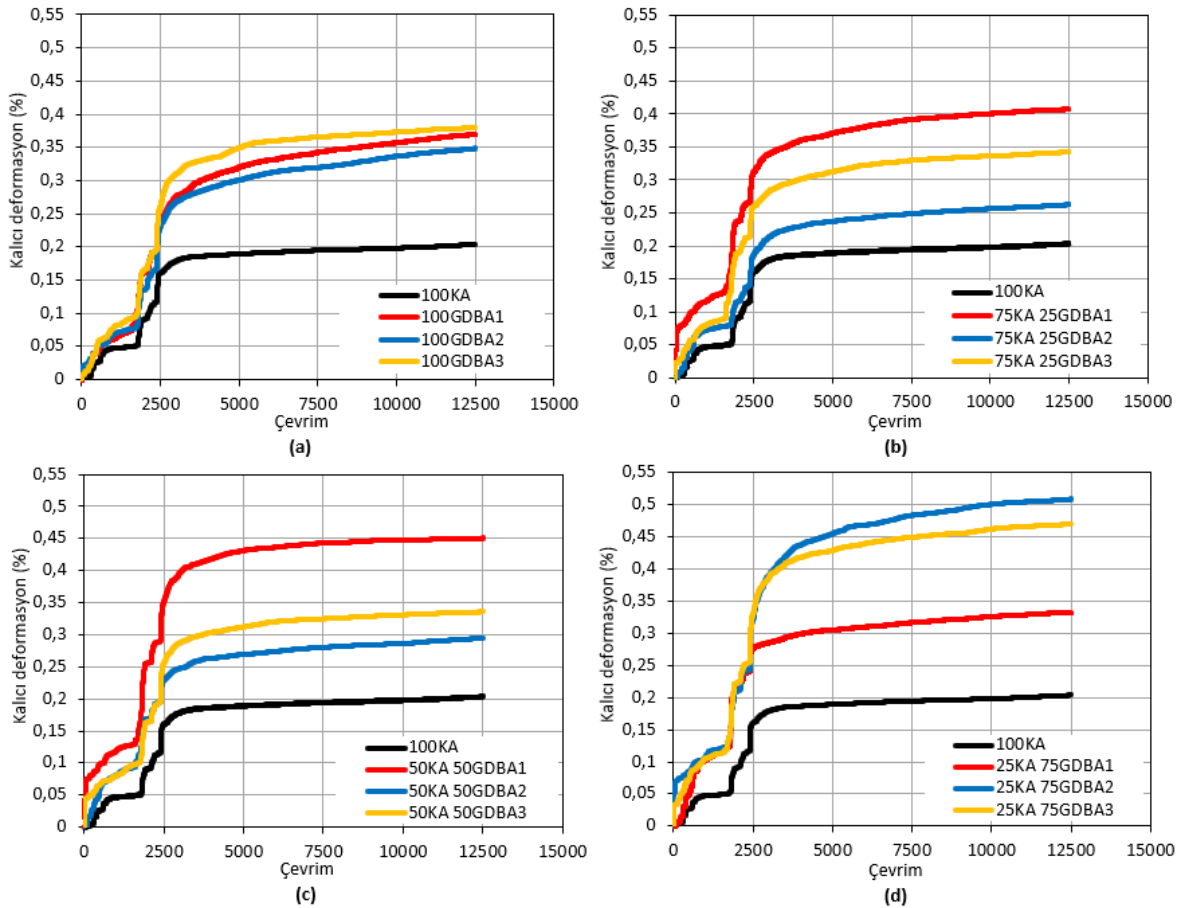
GYT ve GYAT tabakalarının trafik yükleri altındaki performansını etkileyen ve belirleyen bir diğer faktör de kalıcı deformasyondur. Sürekli trafikten kaynaklanan tekrarlı yükleme ile kalıcı deformasyonlar meydana gelir. Bu nedenle bu çalışmada, esneklik modülü deneyine ek olarak kalıcı deformasyon deneyi ile malzemelerin tekrarlı yükler altındaki davranışları incelenmiştir.

Şekil 3, her tasarım için çevrim sayısına bağlı olarak  $\epsilon_p$  değerlerinin değişimini göstermektedir. 100GDBA'lar için %0,349 ile %0,380 arasında  $\epsilon_p$  değerleri elde edilmişken, 100KA'nın  $\epsilon_p$  değeri %0,215 olmuştur. Bazı karışım tasarımları için (50KA 50GDBA2, 50KA 50GDBA3, 75KA 25GDBA2, 75KA 25GDBA3 ve 25KA 75GDBA1)  $\epsilon_p$  değerleri 100KA ile 100GDBA'ların arasında iken, bazı karışım tasarımları için (75KA 25GDBA1, 50KA 50GDBA1, 25KA 75GDBA2 ve 25KA 75GDBA3)  $\epsilon_p$  değerleri 100GDBA'lardan daha yüksek olmuştur.



Karışımlardaki kötü dane yerleşiminin yüksek kalıcı deformasyonlara neden olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca 100GDBA'lı tasarımlarda ve karışım tasarımlarında deney süresinin uzun olması nedeniyle, yapışık çimento harcı deney sırasında kırılır ve parçalanır (Bestgen vd., 2016). Dolayısıyla, malzeme matrisindeki ince danelerin artmasıyla kalıcı deformasyonlar artar (Mishra ve Tutumluer, 2012). Buna göre, uzun süreli deney (yaklaşık 3,5 saat) süresince yapışık çimento harcının her numune için beklenmedik miktarlarda kırılması mümkün olduğundan, GDBA oranı ve türü ile  $\epsilon_p$  değerleri arasında güçlü bir ilişki elde edilememiştir. GDBA'lar için literatürde %0,35 - %2,30 (Molin vd., 2004), %0,1 - %0,2 (Haider vd., 2014)  $\epsilon_p$  değerleri elde edilen çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada da değerlerin literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

Deney sonuçlarının kalıcı deformasyon modeline uygunluğu incelenmiştir. 2400-12500 çevrimler arasındaki 10100 çevrimde en düşük  $R^2$  değeri %94,7 olarak elde edilmiştir (Tablo 4). Bu nedenle, bu çalışmada elde edilen  $\epsilon_p$  değerleri için kalıcı deformasyon modeli tutarlı ve geçerli olmuştur.



Şekil 3. Tasarımların çevrim sayısına bağlı olarak kalıcı deformasyon davranışları; (a) saf tasarımlar, (b) 25GDBA'lı tasarımlar, (c) 50GDBA'lı tasarımlar, (d) 75GDBA'lı tasarımlar

Tablo 4. Kalıcı deformasyon modelinin regresyon katsayıları ve R<sup>2</sup> değerleri

| Tasarım      | Toplam kalıcı deformasyon (%) | 2400-12500. çevrimler arasındaki kalıcı defromasyon (%) | $\alpha$ | b       | R <sup>2</sup> |
|--------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------|----------|---------|----------------|
| 100KA        | 0,215                         | 0,0756                                                  | 0,01779  | 0,15422 | 0,965          |
| 100GDBA1     | 0,371                         | 0,1644                                                  | 0,01063  | 0,29851 | 0,987          |
| 100GDBA2     | 0,349                         | 0,1592                                                  | 0,01577  | 0,24929 | 0,993          |
| 100GDBA3     | 0,380                         | 0,1661                                                  | 0,02728  | 0,19983 | 0,972          |
| 75KA 25GDBA1 | 0,408                         | 0,1341                                                  | 0,01440  | 0,24366 | 0,989          |
| 75KA 25GDBA2 | 0,263                         | 0,1064                                                  | 0,01395  | 0,22097 | 0,982          |
| 75KA 25GDBA3 | 0,343                         | 0,1087                                                  | 0,00835  | 0,28199 | 0,977          |
| 50KA 50GDBA1 | 0,451                         | 0,1491                                                  | 0,03033  | 0,17803 | 0,947          |
| 50KA 50GDBA2 | 0,295                         | 0,0851                                                  | 0,00710  | 0,26860 | 0,988          |
| 50KA 50GDBA3 | 0,336                         | 0,1255                                                  | 0,02471  | 0,17841 | 0,985          |
| 25KA 75GDBA1 | 0,333                         | 0,0709                                                  | 0,00315  | 0,33564 | 0,982          |
| 25KA 75GDBA2 | 0,509                         | 0,2373                                                  | 0,02350  | 0,25655 | 0,969          |
| 25KA 75GDBA3 | 0,471                         | 0,1999                                                  | 0,03293  | 0,19802 | 0,978          |

#### 4. SONUÇLAR

GDBA'nın GYT ve GYAT'de kullanılabilirliğinin incelendiği bu çalışmada; tekrarlı trafik yüklerinin temsil edilebilmesi amacıyla  $M_r$  ve  $\epsilon_p$  değerleri ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır:

- GDBA'ların saf halde veya KA ile beraber kullanılmaları durumunda elde edilen  $M_r$  değerleri, hem GYAT hem de GYT'de kullanılabilme yönünden uygun olmuştur.
- 100GDBA'lar üzerinde bulunan yapışık çimento harcı, GDBA-KA karışımlarındaki kötü dane yerleşimi ve yapışık çimento harcının birlikte etkisi  $M_r$  değerlerinin değişimleri üzerinde etkili olmuştur.
- 100GDBA'lı ve GDBA oranının arttığı GDBA-KA karışımlarında  $\epsilon_p$  değerleri yüksek bulunmuştur.
- Kalıcı deformasyon deneyindeki uzun süren çevrimler nedeniyle yapışık çimento harcının ufalanma durumu ve kötü dane yerleşimi GDBA'larda  $\epsilon_p$  değerlerinin yüksek olmasına neden olmuştur.
- GDBA'nın elde edildiği betonun basınç dayanımından ziyade GDBA oranı, GDBA'nın ve GDBA-KA karışımlarının tekrarlı yükleme altındaki davranışı üzerinde daha fazla etkili olmuştur.
- GYT ve GYAT tabakalarının oluşturulmasında KA yerine GDBA-KA karışımlarının kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışma sonucunda, tekrarlı yüklerin etkisi altında gerekli ön çalışmaların ve değerlendirmelerin yapılması durumunda GDBA'ların kullanılabileceği belirlenmiştir.

#### TEŞEKKÜR

*Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenmiş ve "Kentsel Dönüşüm Uygulamalarından Elde Edilen Geri Dönüştürülmüş Beton Agregasının Yol Temel ve Alttemel Tabakasında*

*Kullanılabilirliğinin Araştırılması” başlıklı TÜBİTAK projesi (Proje No: 217M969) kapsamında yapılmıştır.*

## KAYNAKLAR

- AASHTO, (1993), “Guide for Design of Pavement Structure”, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- AASHTO M145-91, (2004), “Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes”, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- AASHTO T307-99, (2012). “Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials”, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- Akbaş, M., İyisan, R., Dayıoğlu, A. Y. ve Hatipoğlu, M. (2021), "Stiffness Properties of Recycled Concrete Aggregates as Unbound Base and Subbase Materials Under Freeze and Thaw Cycles", Arabian Journal for Science and Engineering, Cilt 46, Sayı 11, 10569-10584.
- Akhtar, A. ve Sarmah, A. K. (2018), "Construction and Demolition Waste Generation and Properties of Recycled Aggregate Concrete: A Global Perspective", Journal of Cleaner Production, Cilt 186, 262-281.
- Alnedawi, A. ve Rahman, M. A. (2021), "Recycled Concrete Aggregate as Alternative Pavement Materials: Experimental and Parametric Study", Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, Cilt 147, Sayı 1, 04020076.
- Arabani, M. ve Azarhoosh, A. (2012) "The Effect of Recycled Concrete Aggregate and Steel Slag on the Dynamic Properties of Asphalt Mixtures", Construction and Building Materials, Cilt 35, 1-7.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M. M. ve Bo, M. W. (2013), "Resilient Moduli Response of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications", Journal of Materials in Civil Engineering, Cilt 25, Sayı 12, 1920-1928.
- Ashtiani, R. ve Saeed, A. (2012), "Laboratory Performance Characterization of Pavements Incorporating Recycled Materials", GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering, Oakland, California, 1582-1591.
- ASTM D2487, (2017). “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”, ASTM International.
- Bestgen, J. O., Hatipoğlu, M., Çetin, B. ve Aydılek, A. H. (2016), "Mechanical and Environmental Suitability of Recycled Concrete Aggregate as a Highway Base Material", Journal of Materials in Civil Engineering, Cilt 28, Sayı 9, 04016067.
- Bozyurt, O., Tinjum, J. M., Son, Y.-H., Edil, T. B. ve Benson, C. H. (2012), "Resilient Modulus of Recycled Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate", GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering, Oakland, California, 3901-3910.
- Freedonia, (2016), "World Construction Aggregates", The Freedonia Group, Cleveland, Ohio.
- Gabr, A. R. ve Cameron, D. A. (2012), "Properties of Recycled Concrete Aggregate for Unbound Pavement Construction", Journal of Materials in Civil Engineering, Cilt 24, Sayı 6, 754-764.

- Haider, I., Çetin, B., Kaya, Z., Hatipoğlu, M., Çetin, A. ve Ahmet, H. A. (2014), "Evaluation of the Mechanical Performance of Recycled Concrete Aggregates Used in Highway Base Layers", Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability, Atlanta, Georgia, 3686-3694.
- Jayakody, S., Gallage, C. ve Ramanujam, J. (2019), "Effects of Reclaimed Asphalt Materials on Geotechnical Characteristics of Recycled Concrete Aggregates as a Pavement Material", Road Materials and Pavement Design, Cilt 20, Sayı 4, 754-772.
- KTŞ, (2013). "Karayolu Teknik Şartnamesi", Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Mishra, D. ve Tutumluer, E. (2012), "Aggregate Physical Properties Affecting Modulus and Deformation Characteristics of Unsurfaced Pavements", Journal of Materials in Civil Engineering, Cilt 24, Sayı 9, 1144-1152.
- Molin, C., Larsson, K. ve Arvidsson, H. (2004), "Quality of Reused Crushed Concrete Strength, Contamination and Crushing Technique", International RILEM Conference On The Use Of Recycled Materials In Buildings And Structures, Barcelona, 150-155.
- Nataatmadja, A. ve Tan, Y. L. (2001), "Resilient Response of Recycled Concrete Road Aggregates", Journal of Transportation Engineering, Cilt 127, Sayı 5, 450-453.
- NCHRP 1-37A, (2004). "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures", National Cooperative Highway Research Program.
- Saberian, M. ve Li, J. (2021), "Effect of Freeze–Thaw Cycles on the Resilient Moduli and Unconfined Compressive Strength of Rubberized Recycled Concrete Aggregate as Pavement Base/Subbase", Transportation Geotechnics, Cilt 27, 100477.
- Sanger, M., Natarajan, B. M., Wang, B., Edil, T. ve Ginder-Vogel, M. (2020), "Recycled Concrete Aggregate in Base Course Applications: Review of Field and Laboratory Investigations of Leachate Ph", Journal of Hazardous Materials, Cilt 385, 121562.
- Sweere, G. T. H. (1990), "Unbound granular bases for roads", Doktora Tezi, Delft Üniversitesi.
- USEPA, (2019), "Advancing Sustainable Materials Management: 2017 Fact Sheet", United States Environmental Protection Agency.
- Uzan, J. (1985), "Characterization of Granular Material", Transportation Research Record, Cilt 1022, Sayı 1, 52-59.

## SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ

| Sembol                                       | Açıklama                                        | Kısaltma | Açıklama                            |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------|-------------------------------------|
| $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$ ve $k_8$ | Esneklik modülü modelleri regresyon katsayıları | GDBA     | Geri dönüştürülmüş beton agregası   |
| N                                            | Çevrim sayısı                                   | GYAT     | Granüler yol alttemeli              |
| $\alpha$ and $b$                             | Kalıcı deformasyon modeli regresyon katsayıları | GYT      | Granüler yol temeli                 |
| $\epsilon_p$                                 | Kalıcı deformasyon                              | KA       | Kırmataş agregası                   |
| $\theta$                                     | Toplam gerilme                                  | MEPDG    | Mekanistik-ampirik tasarım kılavuzu |
| $\sigma_{atm}$                               | Atmosfer basıncı                                |          |                                     |
| $\sigma_d$                                   | Deviatör gerilme                                |          |                                     |
| $\tau_{oct}$                                 | Oktahedral gerilme                              |          |                                     |