

YOL TEMEL MALZEMELERİNDE DONMA-ÇÖZÜLME ETKİSİ: DOĞAL VE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGALARININ KARŞILAŞTIRILMASI

FREEZE-THAW EFFECTS ON ROAD BASE MATERIALS: COMPARING NATURAL AND RECYCLED AGGREGATES

Merve AKBAŞ¹, Ozan SUBAŞI², Recep İYİSAN³

ÖZET

Günümüzde, altyapı ve özellikle yol yapım projelerinde kullanılan geleneksel doğal agrega (DA), çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle önemli sürdürülebilirlik sorunları yaratmaktadır. Bu malzemenin yoğun şekilde kullanılması, doğal habitatların tahribatına, ekosistem dengelerinin bozulmasına ve karbon ayak izinin artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, doğal kaynakların giderek azalan mevcudiyeti, bu malzemelerin maliyetlerinde artışa yol açmakta ve bu da altyapı projelerinin toplam maliyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, daha sürdürülebilir ve maliyet etkin alternatiflerin araştırılması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, yolların yapımında sürdürülebilir ve maliyet açısından daha ekonomik bir çözüm sunan, doğal agrega (DA) alternatifi olarak geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) kullanımının incelenmesini konu almaktadır. %100 DA %50 DA+%50 GDBA ve %100 GDBA içeren yol temel numunelerin, donma-çözülme (D-Ç) döngüleri altında esneklik modülü ve kalıcı deformasyon değerleri belirlenmiş ve D-Ç döngülerine maruz kalmamış kontrol numuneleriyle karşılaştırılmıştır. D-Ç döngüleri, karışım bileşimi ve esneklik birbiriyle ilişkili olup DA-GDBA karışımlarının esneklik modülleri 5 D-Ç döngüsüne kadar artmış, sonrasında hafifçe düşmüştür. %50 DA ve %50 GDBA karışımı, tüm D-Ç döngülerinde en az plastik deformasyonu göstermiş, bu da GDBA'nın yol yapımında etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu sonuçlar, performanstan ödün vermeden sürdürülebilir yol yapımını desteklemektedir. Gelecek araştırmaların, bulguları doğrulamak ve uzun vadeli performansı değerlendirmek için çeşitli ortamlarda GDBA ve DA karışımlarının saha testlerine odaklanması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir yol tasarımı, GDBA-DA karışımları, esneklik modülü deneyi, plastik deformasyon deneyi, D-Ç çevrimleri

¹ Araş. Gör. Dr., İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Geoteknik Mühendisliği, akbas@itu.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Araş. Gör. Dr., Türk Alman Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, subasi@tau.edu.tr

³ Prof. Dr., İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Geoteknik Mühendisliği, iyisan@itu.edu.tr



ABSTRACT

In modern infrastructure and particularly in road construction projects, the extensive use of traditional natural aggregate (NA) poses significant sustainability challenges due to its adverse environmental impacts. The intensive exploitation of this material leads to the destruction of natural habitats, disruption of ecosystem balances, and an increase in carbon footprint. Moreover, the diminishing availability of natural resources is driving up the costs of these materials, significantly affecting the total cost of infrastructure projects. In this context, exploring more sustainable and cost-effective alternatives is of paramount importance. This study investigates the use of recycled concrete aggregate (RCA) as a sustainable and economically viable alternative to natural aggregate (NA) in road construction. Samples containing 100% NA, 50% NA + 50% RCA, and 100% RCA were tested under freeze-thaw (F-T) cycles for their resilient modulus and permanent deformation and compared with control samples not subjected to F-T cycles. The F-T cycles, mixture composition, and resilient modulus were found to be interrelated, with the resilient modulus of NA-RCA mixtures increasing up to 5 F-T cycles before slightly decreasing. The 50% NA and 50% RCA mixture exhibited the least plastic deformation across all F-T cycles, indicating the effective use of RCA in road construction. These results support sustainable road construction without compromising performance. Future research should focus on field tests of various RCA and NA mixtures in different environments to validate these findings and assess long-term performance.

Keywords: Sustainable Road Design, RCA-NA Mixtures, Resilient Modulus Test, Plastic Deformation Test, Freeze-Thaw Cycles

1. GİRİŞ

Artan nüfus nedeniyle yeni altyapı talebi ve özellikle inşaat sektörü tarafından üretilen önemli miktarda katı atık, çevre üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Yüksek kaliteli malzemelerin azalması ve doğal agreganın artan maliyeti nedeniyle, inşaat yapım ve yıkım atıkları (İYYA) giderek daha değerli bir kaynak olarak tanınmaktadır. İnşaat atıklarının yaklaşık %70'ini oluşturan geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA), yüksek performanslı ve dayanıklı esnek yolların geliştirilmesi için kullanım uygunluğu birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Yol üstyapısının bir parçası olan temel tabakalarının performansı, büyük ölçüde esneklik modülü ve plastik deformasyon değerleri tarafından belirlenmektedir. Bu değerler, yolun yük taşıma kapasitesini ve deformasyon ile çatlak oluşumuna karşı direncini ortaya koymaktadır. Esneklik modülü, yol malzemesinin bir yük altında deformasyona uğradıktan sonra orijinal şekline dönme yeteneğinin bir ölçüsüdür ve yolun trafik yüklerinden enerjiyi ne kadar iyi sönmeyeceğini ve dağıtabileceğini belirlemede kritik öneme sahiptir. Daha yüksek bir esneklik modülü, malzemenin yük altında deformasyona daha iyi direnebileceğini göstermekte ve bu da daha düzgün, daha kararlı bir yol yüzeyine yol açmaktadır. Öte yandan, plastik deformasyon, yük altında yol malzemesinin şeklinde kalıcı bir değişiklik olarak tanımlanmaktadır. Aşırı plastik deformasyon, yol yüzeyinde çukurlar, oyuklar ve diğer hasar türlerine yol açabilmektedir. Bu nedenle, esneklik modülünü

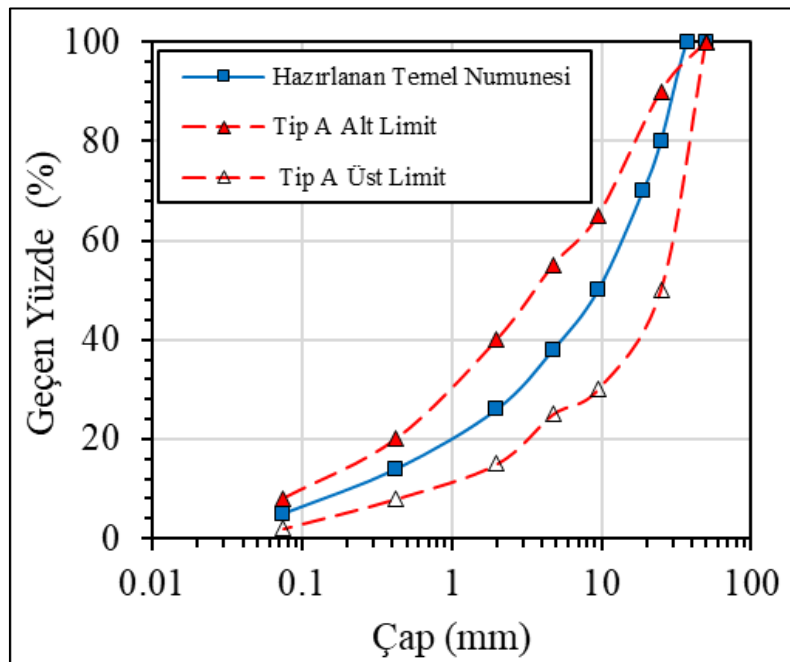


optimize etmek ve plastik deformasyonu en aza indirmek, sürekli trafik yüklerine dayanabilecek dayanıklı yol temel tabakaları tasarlamada anahtar faktörlerdir. Donma-çözülme (D- Ç) döngüleri, soğuk iklim koşullarında yol altyapısını oluşturan tabakaların dayanıklılığını önemli ölçüde etkileyebilmekte, yol temel tabakasında kullanılan malzemenin yapısını değiştirerek genel yol performansını bozabilmekte ve esneklik modülü ve plastik deformasyon değerini olumsuz yönde etkilemektedir (Zhi vd., 2023).

Bu araştırma, %100 DA %50 DA+%50 GDBA ve %100 GDBA içeren numunelerin esneklik modülü ve plastik deformasyon özellikleri üzerindeki 1, 5, 10 ve 20 D-Ç çevriminin etkisini değerlendirmeyi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak numunelerin fiziksel, mekanik ve hidrolojik özellikleri değerlendirilerek 1, 5, 10 ve 20 D-Ç döngüsüne tabi tutulmuştur. Bu döngülerden sonra, esneklik modülü ve plastik deformasyon değerleri belirlenmiş ve sonuçlar D- Ç döngülerine maruz bırakılmamış numunelerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

İstanbul'daki kentsel dönüşüm projelerinden elde edilen inşaat yapım ve yıkım atıkları (İYYA) geri dönüşüm merkezlerinde işlenmiştir. Deneysel araştırmanın kapsamında, GDBA türüne göre kırılarak ve ayrılarak maksimum 30 mm tane boyutuna getirilmiştir. DA ise İstanbul Arnavutköy bölgesindeki bir ocaktan temin edilmiştir. Yol performansı, D-Ç döngülerinin farklı sayılarında; %100 DA, %50 DA+%50 GDBA ve %100 GDBA numuneleri için değerlendirilmiştir. Yol temel tabakasında kullanım uygunluğunu değerlendirmek için deneye tabi tutulan numuneler, farklı dane boyutlarındaki agregaların karıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Belirtilen dane boyutu dağılımlarına sahip bu numuneler, AASHTO Yol Yüzeyleri Tasarımı Kılavuzu (1993) tarafından belirlenen fiziksel, hidrolik ve mekanik özellikleri karşılamıştır. Şekil 1, bu çalışmada kullanılan numunelerin dane çapı dağılımını göstermektedir.



Şekil 1. Hazırlanan numunelerin dane çapı dağılımı



Hazırlanan yol temel tabakası numuneleri, çeşitli donma-çözülme (D-Ç) koşullarında bir dizi esneklik modülü ve plastik deformasyon deneyleri yaparak değerlendirilmiştir. Başlangıçta, D-Ç döngülerinden geçmemiş %100 DA, %50 DA ile %50 GDBA birleşimi ve %100 GDBA numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler kontrol numuneleri olarak tanımlanmıştır. Daha sonra, D-Ç döngülerinin etkisi, 1, 5, 10 ve 20 D-Ç döngüsüne tabi tutulan numunelerin esneklik modülü ve plastik deformasyon ölçümleriyle değerlendirilmiştir.

2.1. Esneklik Modülü ve Plastik Deformasyon Deneyi

Elek analizi ve Atterberg limit test sonuçlarına dayanarak, No. 10 (2 mm) ve No. 200 (0.074 mm) eleklerden geçen dane yüzdeleri %70'ten ve %20'den az olduğu ve plastisite indeksi %10'un altında kaldığı için karışımlar, AASHTO T-307'ye göre Tip 1 olarak tanımlanmıştır. Esneklik modülü deneyi, drenaj hattını bağlama ve yükleme cihazını hizalama gibi gerekli adımları izleyerek AASHTO T-307'ye uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon deneyleri ise bu numunelerin çeşitli koşullar altında nasıl tepki gösterdiklerine dair önemli bilgiler sağlayarak, yol temel tabakalarında kullanıldıklarında dayanıklılıkları ve güvenilirlikleri hakkında bir fikir vermesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Esneklik modülü deneylerinin tamamlanmasının ardından, numuneler deney aletinden çıkartılmadan muhafaza edilmiştir. Esneklik modülü deneyinde kullanılan ve AASHTO T-307'de belirtilen aynı ön koşullandırma yük dizisi plastik deformasyon deneylerinde de kullanılmıştır. Daha sonra numunelere, önceki çalışmalara uygun olarak sürekli 38.7 kPa olan bir çevre basınç (σ_3) ve 108 kPa olan bir deviator gerilme (σ_d) uygulanmıştır. Bu yükleme serisi toplam 10000 yük tekrarı için uygulanmıştır (Bilodeau vd., 2011).

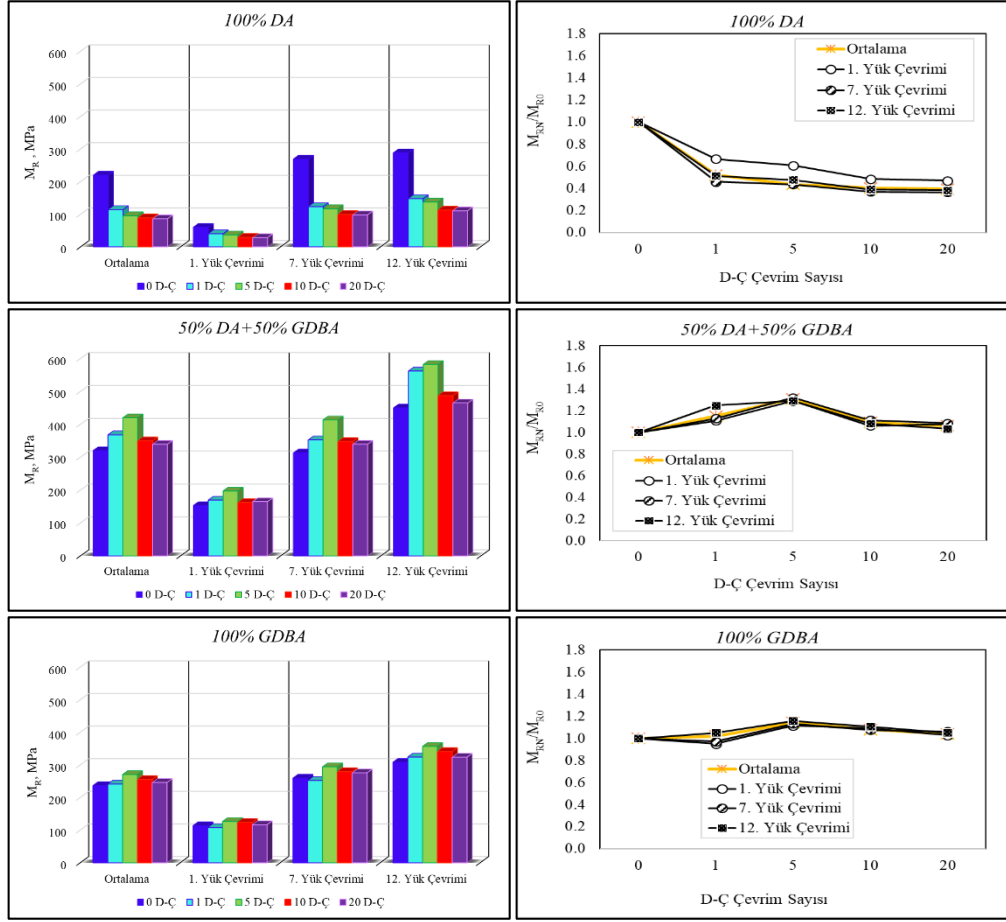
2.2. D-Ç Çevrimleri

ASTM D6035 standardı, numunelerin esneklik özellikleri üzerindeki donma-çözülme (D-Ç) döngülerinin uzun vadeli etkilerini incelemek için kullanılmıştır. D-Ç döngülerinin donma ve çözülme sıcaklıkları sırasıyla -20°C ve 20°C olarak belirlenmiştir. D-Ç döngüsü, öncelikle numunelerin dondurulmasını ve ardından tamamen çözülmesine izin verilmesini içermektedir. Numuneler 1, 5, 10 ve 20 D-Ç döngüsüne maruz bırakılmıştır. Her D-Ç döngüsünün sonunda, numuneler üzerinde esneklik modülü deneyleri ve plastik deformasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Esneklik modülü deneyleri, numunelerin esnekliğinin DA ve GDBA oranlarına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. D-Ç döngülerinin etkisi, karışımların 1, 5, 10 ve 20 D-Ç döngüsüne tabi tutularak, ardından esneklik modülü (M_R) ve plastik deformasyonun ölçülmesiyle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, D-Ç döngüsüne maruz kalmamış kontrol numuneleri için elde edilen esneklik özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 2, numunelerin M_R değerleri üzerindeki D-Ç döngülerinin etkisini, 1. (yaklaşık 21 kPa izotropik çevre basıncı), 7. (yaklaşık 69 kPa izotropik çevre basıncı) ve 12. (yaklaşık 103 kPa izotropik çevre basıncı) serilerde göstermektedir. Ayrıca şekilde her D-Ç döngüsündeki M_R , herhangi bir D-Ç döngüsünden önceki ilk M_R değerine bölünerek (M_{RN}/M_{R0}) elde edilen normalleştirilmiş M_R değerleri gösterilmiştir.



Şekil 2. D-Ç çevrim sayısının M_R ve normalize M_R değerleri üzerine etkisi

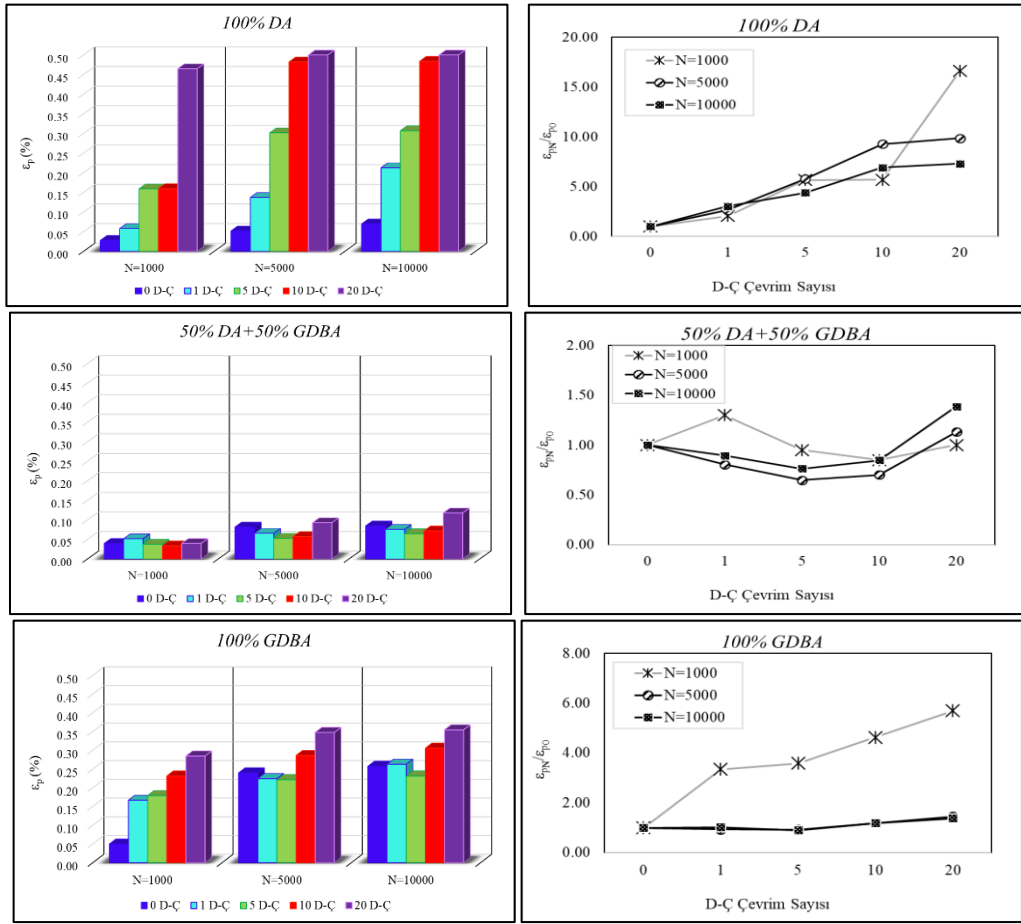
İlk yükleme serisinde, numuneler henüz yoğun yükleme altına alınmadığı için tüm numuneler beklenildiği gibi en düşük esneklik modülü (M_R) değerlerini göstermiştir. M_R değerleri genellikle 7. ve 12. yükleme serilerinde artmıştır. Bu, malzeme tekrarlanan yükleme altına alındığında meydana gelen sıkışma veya yoğunlaşma etkileri ile açıklanmıştır. %100 DA kontrol numunesinin ortalama esneklik modülü 220 MPa olarak elde edilmiştir. Beklenmedik bir şekilde, %50 DA+%50 GDBA numunesi için 321 MPa ile en yüksek M_R değerlerine ulaşılmıştır; %100 GDBA numunesinin ortalama M_R değeri 237 MPa olarak bulunmuştur. Bazı araştırmacılar, GDBA'nın DA'dan daha yüksek bir esneklik modülüne sahip olduğunu ve böylece GDBA'nın yol temel tabakalarının esnekliğini artırabileceğini ortaya koymuştur (Radević vd., 2010).

D-Ç döngüleri, %100 DA karışımı üzerinde hemen etkili olmuş ve M_R değeri %52 oranında düşmüştür. Bu, 20. döngüde %39 daha da azalmış ve esneklikte belirgin bir azalma göstermiştir. 20. D-Ç döngüsünde, daha düşük yükleme koşullarına sahip 1. yükleme serisinde, normalleştirilmiş M_R , başlangıç değerinin 0.47 katı olmuş, bu da düşük yükleme altında bile esnekliğin azaldığını göstermiştir. Bu sonuçlar, D-Ç döngülerindeki buz lenslerinin temel tabakasından kaynaklı asfalt tabakalarında çatlaklara yol açabileceğini ve böylece yol kalitesini bozabileceğini göstermektedir (Li vd., 2013). Beklenmedik bir şekilde, %50 DA+%50 GDBA numunesi, ilk D-Ç döngüsünden sonra artan M_R değerleri göstermiş; 5. D-Ç döngüsünde, kontrol numunesinin 1.31 katına ulaşan önemli bir esneklik artışı elde edilmiştir. Bu durum numunelerdeki çimentonun su ile etkileştiğinde yarattığı



konsolidasyon etkisi olarak bilinmektedir (Manu vd., 2020). Ancak, %50 DA+%50 GDBA numunesi için, MR 20. D-Ç döngüsünde başlangıç değerinin 1.06 katına düşmüştür. Bu durum, tekrarlanan D-Ç döngülerinin başlangıçtaki konsolidasyon etkisini aşarak net bir esneklik azalmasına neden olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, D ve Ç döngüleri, malzeme bileşimi ve esneklik arasındaki karmaşık, doğrusal olmayan bir ilişkiyi göstermektedir. Bu durum da yol tasarımı ve malzeme seçiminde bu faktörlerin dikkate alınmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

Farklı sayıda D-Ç döngülerinden sonra hazırlanan numuneler üzerinde plastik deformasyon deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Farklı yük tekrarlarında elde edilen plastik deformasyon (ϵ_p) değerleri ve her bir D-Ç döngüsündeki plastik deformasyon (ϵ_{pN}) değerinin herhangi bir D-Ç döngüsünden önceki başlangıç plastik deformasyon değerine (ϵ_{p0}) bölünerek elde edilen normalleştirilmiş plastik deformasyon değerleri Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. D-Ç çevrim sayısının ϵ_p ve $\epsilon_{pN}/\epsilon_{p0}$ değerleri üzerine etkisi

%100 DA karışımının plastik deformasyonu, 250-10000 yük döngülerinde %0.015'ten %0.070'ye doğrusal bir modelde artmış, bu da strese karşı tutarlı bir tepki verdiğini göstermektedir. %50 DA + %50 GDBA numunesi, 250 yük döngüsünde %0.010 deformasyon oranına sahipken, 10000 yük döngülerinde bu değer %0.085'e yükselmiştir. %100 GDBA karışımı, 4500 yük döngüsüne kadar kademeli olarak artan düşük bir deformasyon oranına sahip olup; sonrasında deformasyon değerinde önemli bir değişiklik



gözlenmemiş, bu da malzemenin plastik limitine ulaşmış olabileceğini işaret etmektedir. Bu bulgular, GDBA numunelerinin DA numunelerine göre plastik deformasyona daha yatkın olduğunu önermektedir. GDBA içeren numunelerin daha büyük plastik deformasyon değerleri, ince agrega parçacıklarına yapışan çimento harcının kırılması, iri agrega parçacıklarının ayrılması, başlangıçtaki hataların varlığı ve GDBA'daki eski harç gibi çeşitli nedenlere bağlanabilir (Jayakody vd., 2019).

Ayrıca, plastik deformasyon değerleri artan D-Ç döngü sayısı ile artmıştır. %100 DA numuneleri için, bir D-Ç döngüsü, aynı sayıda yük döngüsünden sonra deformasyonda büyük bir artışa neden olmuştur. D-Ç döngü sayısı arttıkça, deformasyon değerleri yükselmiştir. Bu artışlar, mikro yapıyı etkileyen döngüsel yükleme ve çevresel koşullar nedeniyle gerçekleşmiştir. %50 DA + %50 GDBA numunesi için, 1000 yük döngüsünde deformasyon 0 D-Ç döngüsünde %0.040 olup, diğer numunelerden daha yüksek olarak bulunmuştur. Şaşırtıcı bir şekilde, D-Ç döngüleri 5'e yükseldiğinde deformasyon değeri düşmüştür. Bu durum, %50 DA + %50 GDBA numunesinin tek bir D-Ç döngüsünden sonra deformasyon direncini kaybedebileceğini, ancak daha yüksek D-Ç döngülerinde bir miktarını geri kazanabileceğini göstermektedir. %100 GDBA numuneleri ise düşük D-Ç döngülerinde ve yüksek yük döngülerinde bir miktar dayanıklılık göstermiş, ancak daha fazla D-Ç döngüsüyle deformasyon artmış, 5000 yük döngüsünde ise bazı dalgalanmalar gözlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, çeşitli doğal agrega (DA) ve geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) oranlarına sahip yol temel tabakasında kullanılacak karışımlarının donma-çözülme (D-Ç) döngülerine nasıl tepki verdiğini ve deformasyona uğradığını değerlendirmiştir. %100 DA, %50 DA+%50 GDBA ve %100 GDBA karışımları üzerinde esneklik modülü ve plastik deformasyon deneyleri yapılarak elde sonuçlar sunulmuştur.

D-Ç döngüleri numunelerin esnekliğini değiştirmiş olup; %100 DA numunesinde ilk D-Ç çevrimi esnekliği azaltırken, GDBA içeren numunelerin esneklik modülü artmıştır. %50 DA+%50 GDBA numunesi en yüksek esneklik modülü değerlerine sahip olup, D-Ç döngüsüne karşı dirençli karışımlar olarak belirlenmişlerdir. %100 GDBA numuneleri ise diğer numunelere göre daha düşük esneklik modülü değerlerine sahiptir. Bu durum, daha yüksek GDBA içeriğine sahip karışımların mekanik ve çevresel strese daha yatkın olması ile açıklanmıştır. %50 DA + %50 GDBA ve %100 GDBA numuneleri, ilk D-Ç döngüsünden sonra başlangıçta plastik deformasyon değerinde artış göstermiş, ancak daha yüksek D-Ç döngülerinde direncini geri kazanmıştır. Bu, deformasyon davranışını şekillendiren mekanik ve çevresel stresörler arasındaki karmaşık etkileşimi vurgulamaktadır.

Sonuçlar, özellikle büyük sıcaklık değişikliklerinin olduğu sahalarda yol tasarımları için malzeme seçerken bu dinamikleri göz önünde bulundurmanın önemini vurgulamaktadır. Bundan sonraki araştırmalarda; farklı D-Ç döngülerinde karışımların mikro yapısal değişikliklerini inceleyerek malzeme özelliklerini ile performansın optimize edilmesi önerilmektedir.



TEŞEKKÜR

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından "Özel Çağrılı Genel Araştırma Projesi" kapsamında desteklenmiştir. Pazarcık-Kahramanmaraş'ta Meydana Gelen Deprem Sonrası Oluşan İnşaat Atıklarının Yol Üstyapısında Kullanım Uygunluğunun İnşaat ve Çevre Mühendisliği Açısından İncelenmesi (Proje No: 44494) başlıklı projeye sağladıkları finansal destekten dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- AASHTO T307-99 (2007), "Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials", American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington D.C.
- AASHTO (1993), "Guide for Design of Pavement Structures", American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington D.C.
- Bilodeau, J. P., Doré, G. ve Schwarz, C. (2011), "Effect of seasonal frost conditions on the permanent strain behaviour of compacted unbound granular materials used as base course", International Journal of Pavement Engineering, Vol 12, 507-518.
- Jayakody, S., Gallage, C. ve Ramanujam, J. (2019), "Performance characteristics of recycled concrete aggregate as an unbound pavement material", Heliyon, Vol 5, e02494.
- Li, L., Saboundjian, S., Liu, J. ve Zhang, X. (2013), "Permanent deformation behavior of Alaskan granular base materials", ISCORD 2013: Planning for Sustainable Cold Regions, 428-435.
- Monu, K., RN, G. R., Pandey, G. S. ve Singh, S. (2020), "Performance evaluation of recycled-concrete aggregates and reclaimed-asphalt pavements for foam-mix asphalt mixes", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 32, 04020295.
- Radević, A., Isailović, I., Wistuba, M. P., Zakić, D., Orešković, M. ve Mladenović, G. (2020), "The impact of recycled concrete aggregate on the stiffness, fatigue, and low-temperature performance of asphalt mixtures for road construction", Sustainability, Vol 12, 3949.
- Zhi, D., Gong, F., Wang, Z., Zhao, Y. ve Ueda, T. (2023), "RBSM-based mesoscale study of frost deterioration for recycled concrete considering air-entrainment in old and new mortar", Journal of Building Engineering, Vol 68, 106210.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama
M_R	Esneklik Modülü
ϵ_p	Plastik Deformasyon

