

Geri Dönüştürülmüş Farklı İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Yol Temellerinde Kullanımının Maliyet ve Esnek Üstyapı Kalınlığına Etkisinin Araştırılması

Orhan KAYA^{1*}, Bahadır OK²

Öz

Günümüzde hem üretiminin sınırlı olması hem de üretim aşamalarının çevreyi tahrip etmesinden dolayı doğal kırma taş agregaya (DA) alternatif olabilecek sürdürülebilir yol malzemelerini araştırmak ön plana çıkmıştır. Bu bağlamda, bu çalışmanın amacı geri dönüştürülmüş agregaların plant miks temel (PMT) olarak kullanımının esnek üstyapı kalınlığına ve yol yapım maliyetine etkisinin araştırılmasıdır. Bu çalışma kapsamında DA ve dört farklı atık agrega PMT’de kullanılacak şekilde AASHTO 93 üstyapı tasarım yönteminde değerlendirilmiş ve üç farklı yol sınıfı, tabii zemin taşıma gücü ve trafik yoğunluğu olmak üzere (5x3x3x3) 135 farklı tasarım senaryosu için üstyapı kalınlıkları ile Karayolları 2023 yılı birim fiyatları kullanılarak yaklaşık yol yapım maliyetleri hesaplanmıştır. DA ile teşkil edilen PMT kullanıldığında toplam kaplama kalınlığının atık agregalarla teşkil edilen PMT’nin kullanılma durumuna göre daha az olduğu görülmüştür. Kaplama kalınlıklarındaki farklılıklara rağmen atık agregalarla inşa edilen yolların yapım maliyetleri DA ile inşa edilene göre daha düşük olmuştur. Kaplama kalınlığında fazla bir artış olmaması, yol yapım maliyetinin DA’ya göre daha az olması ve çevresel faydaları sebebi ile atık agregaların esnek üstyapı PMT tabakalarında kullanılma potansiyeline sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Esnek üstyapı, İnşaat ve yıkıntı atıkları, PMT, AASHTO 93.

Economic and Structural Evaluation of the Flexible Pavements Constructed with Different Construction and Demolition Wastes as Aggregates in Their Granular Bases

Abstract

Recently, many studies have been searching for alternative sustainable road materials to natural crushed stone aggregate (NA) due to both its limited production and the destruction of the environment in the production stages. In this context, the aim of this study is to investigate the effect of the use of recycled aggregates as a granular base material, the granular base has specific gradation and aggregate properties, called plant mix base (PMT), on flexible pavement thickness and road construction cost. Within the scope of this study, NA and four different waste aggregates used in PMT were evaluated and pavement thicknesses for 135 different design scenarios, including three different road classes, natural soil bearing capacities and traffic conditions (5x3x3x3) were determined based on the AASHTO 93 pavement design method. The estimated road construction costs were also determined by using the unit prices of Turkish General Directory of Highway in 2023. When PMT formed with NA is used, it has been observed that the total asphalt pavement thickness was less than when using PMT formed with waste aggregates. Despite the differences in asphalt pavement thicknesses, the construction costs of the roads built with waste aggregates were found to be lower than those built with NA. It has been concluded that waste aggregates have the potential to be used in flexible pavement PMT layers due to the lack of excessive pavement thickness increase, the lower cost of road construction compared to that of NA and environmental benefits.

Keywords: Flexible pavements, CDW, Granular base, AASHTO 93.

¹Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye, okaya@atu.edu.tr

²Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye, bahadirok@atu.edu.tr

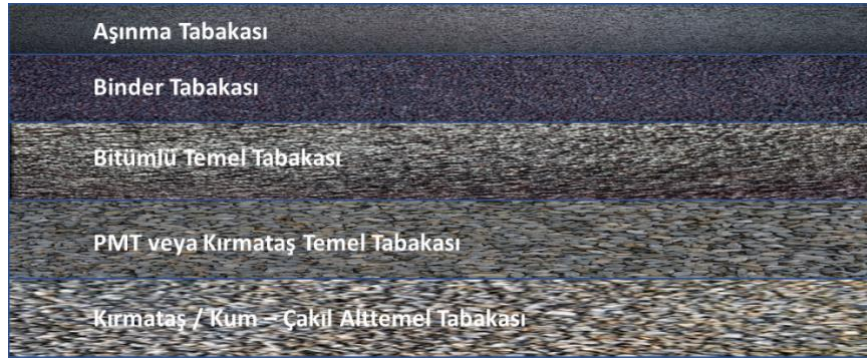
¹<https://orcid.org/0000-0001-6072-3882>

²<https://orcid.org/0000-0001-8333-5671>

1. Giriş

Karayolu üstyapısı, trafik yükünü taban yüzeyine güvenli bir şekilde aktarabilmek için projelendirilen katmanlı bir sistemdir. Üstyapılar kullanılan malzemeler ve davranışları ile ele alındığında esnek üstyapılar ve rijit üstyapılar şeklinde iki gruba ayrılır (Ağar ve ark., 1998). Esnek üstyapılar bitümlü kaplama, temel ve alt temel tabakalarından oluşurken, rijit üstyapılar ise alt temel ve beton plak tabakasından oluşur. Taban zemininin özellikleri, trafik yükü, çevre koşulları ve ekonomik faktörler göz önünde bulundurularak en uygun üstyapı tipi seçilir.

Ülkemizde esnek üstyapılar yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla aşınma, binder, bitümlü temel tabakası, plent-miks temel (PMT) ya da kırmataş temel tabakası ve gerektiğinde kırmataş / kum – çakıl alt temel tabakası şeklinde yapılmaktadır (Şekil 1) (KGM, 2013). Aşınma, binder ve bitümlü temel tabakaları bitümlü sıcak karışımdan (BSK) oluşur. BSK karışımından oluşan bu tabakalar, en üst tabaka olan aşınma tabakasından başlayıp üstyapının üzerine gelen trafik yüklerini aşağıya doğru azaltarak alt katmanlara aktarır.



Şekil 1. Esnek üstyapı tabakalarının dizilimleri.

Esnek üstyapılar maruz kaldıkları trafik yüklerinin etkisiyle viskoelastoplastik deformasyonlara uğradıkları kabul görülen tabakalardan oluşur. Bu tabakaların elastisite modülleri aşağıdan yukarı doğru artacak şekilde sınırlandırılır. Esnek üstyapılar dingil yüklerinin sürekliliğinden ve mevcut çevre koşullarının etkisinde zamanla yorulmaya başlar. Bununla birlikte yapıda kalıcı deformasyonlar, çatlamlar ve çeşitli bozukluklar görülür. Bozulmaların ulaşımı sekteye uğratabileceği aşamada üstyapı çeşitli takviye yöntemleri ile onarılır. Böylece yapının hizmet ömrü ve taşıma gücü bir miktar arttırılmış olur.

Alt temel tabakası, taban zemininin taşıma gücünü aşabileceği yüksek gerilmeleri ve tabanda oluşabilecek don etkisinin üstyapıya zarar vermesini engelleyecek niteliklere sahip olması gereklidir. Alt temel malzemesi, ekonomik faktörler göz önüne alınarak bölgede mevcut kaliteli, seçme malzemelerden temin edilmelidir. Temel tabakası, üstyapının ana yapısal elemanlarından biridir. Alt temele ve tabana gelecek olan basınç gerilmelerini kabul edilebilir bir seviyeye indirgeceği gibi aynı

zamanda üstyapıya esneklik kazandırarak kaplama tabakalarının kırılmasını engeller. Bu sebeple temel tabakası belirli standartlara sahip seçme malzemelerden yapılmalıdır. Kaplama tabakası, BSK' dan meydana gelen aşınma ve binder katmanlarından oluşur. Kaplama tabakası trafik yüklerine doğrudan maruz kaldığından, üstyapıyı oluşturan diğer katmanlara kıyasla çok daha yüksek bir elastisite modülüne sahip olmalıdır. Kaplama tabakasının trafiğin aşındırıcı etkisine karşı koymak, temel tabakasına iletilen basınç ve kayma gerilmelerini azaltmak, yüzey sularının temel tabakasına geçmesini engellemek, konforlu ve güvenli bir sürüş sağlamak, üstyapıyı kalıcı deformasyonlardan korumak gibi işlevlere sahiptir.

Alt temel ve temel katmanlarının çoğunluğunda yapı malzemesi olarak kırma taş agregalar kullanılmaktadır. Bu agregalar genellikle inşa edilecek yol çevresindeki taş ocaklarından temin edilmeye çalışılmaktadır. Ancak bu taş ocakları hem buldukları doğal ortamı yok etmekte hem de ürettikleri toz ile çevresindeki doğal ortamlara zarar vermektedir. Ayrıca taş ocaklarının uygun maliyetli kırma taş agrega üretim kapasitesi sınırlıdır. Dahası kapatılan taş ocaklarının bulunduğu yerler tekrar eski doğal hayatına döndürülememektedir. Günümüzde hem üretiminin sınırlı olması hem de üretim aşamalarının çevreyi tahrip etmesinden dolayı doğal kırma taş agregaya (DA) alternatif olabilecek sürdürülebilir malzemeleri araştırmak ön plana çıkmıştır. Birçok araştırmacı yıkılan betonarme yapılardan elde edilen ve inşaat ve yıkıntı atıkları (İYA) olarak isimlendirilen atık malzemelerin doğal kırma taş agregaya bir alternatif olabileceği yönünde çalışmalar yürütmüşlerdir (Poon ve Chan, 2006; Arulrajah ve ark., 2011; Gabr ve Cameron, 2012; Jiménez ve ark., 2012a; Jiménez ve ark., 2012b; Arulrajah ve ark., 2013; Sangiorgi ve ark., 2013; Ok ve Demir, 2018). İYA'ların dönüştürülerek tekrar kullanılması hem atık olan bir malzemenin tekrar kullanılmasının yolunu açarak sürdürülebilirliğe katkı sağlayabilecek hem de çevre tahribatını azaltabilecektir. Ayrıca bu atık malzemelerin tekrar kullanımı, atığın ücretsiz olarak temin edilebilen bir malzeme olması ve hali hazırda bertaraf işleminin de bir maliyeti olması sebebi ile ekonomiye katkı sağlayabilecektir. Birçok çalışmada İYA'ların DA'lara alternatif olabileceği belirtilse de dayanım ve bazı fiziksel özellikler bakımından İYA'ların DA'lardan kısmen olumsuz yönleri olduğu da bildirilmiştir. (Arulrajah ve ark., 2016; Yaghoubi ve ark., 2017; Mohammadinia ve ark., 2019a, Mohammadinia ve ark., 2019b; Perera ve ark., 2019; Ok ve ark., 2020; Mehrjardi ve ark., 2020; Geçkil ve ark., 2022). Agreganın kalitesi yol üstyapısı kalınlığının belirlenmesinde önemli bir faktördür. Kalitesi doğal kırma taş agregalara göre nispeten daha düşük olan inşaat ve yıkıntı atıkları ile inşa edilecek yollardan doğal agrega performansı bekleniyorsa dolgu veya kaplama kalınlığının belli oranlarda artırılması bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır.

Ülkemizde gerekli kaplama kalınlığı Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi'ne göre belirlenmektedir (KGM, 2008). Bu rehberdeki tasarım metodolojisi temelde AASHTO 93 tasarım metodolojisi üzerine inşa edilmiştir (AASHTO, 1993). AASHTO 93 tasarım metodolojisi ise

Amerika Birleşik Devletleri'nde 1956-1961 yıllarında gerçekleşen AASHO yol testleri (AASHO Road Tests) sonucunda geliştirilen ampirik bağlantıları kullanan bir tasarım metodolojisidir. İYA'ların ücretsiz olarak temin edilebilen bir ürün olması sebebi ile bu malzeme ile inşa edilecek yollarda, yolun temel ve alt temel üretim maliyetinin düşmesi beklenmektedir. Ancak İYA'ların DA'lardan daha düşük kaliteli olması sebebi ile gerekli kaplama kalınlığı artacağı için kaplama maliyetinde artış olması da beklenmektedir. Bu bağlamda İYA'lar ile inşa edilecek temel ve alt temel tabakalı yollarda gerekli kaplama kalınlığını ve dolayısı ile yolun maliyetini DA'larla kıyaslayan kayda değer bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca İYA'lar atık beton, atık tuğla, atık seramik ve atık agrega gibi bileşenleri heterojen olarak içermektedir. Bu atıklar İYA'lardan ayrıştırılarak ayrı ayrı da kullanılabilir gibi İYA olarak karışık halde de kullanılabilir (Sarıcı ve ark., 2022; Ok ve ark., 2023). İYA'ların ihtiva ettiği atıkları ayrı ayrı ve karışık olarak araştıran bir çalışmanın, hem hangi atık agreganın DA'lara göre ne kadar fazla kaplama kalınlığına ihtiyaç duyacağını belirlemek hem de bunun maliyete etkisinin ne olacağını incelemek literatüre önemli katkılar sağlayabilecektir.

Bu çalışmanın temel amacı geri dönüştürülmüş agregaların plent miks temel olarak kullanımının esnek üstyapı kalınlığına etkisinin araştırılmasıdır. Ayrıca esnek üstyapı kalınlığı değişiminin yol yapım maliyetine etkisini incelemek de bu çalışmanın bir konusu olarak değerlendirilebilir. Bu bağlamda, dört farklı atık agrega ve bu atıklarla karşılaştırmak için doğal agrega malzemesi seçilmiştir. Sonrasında, bu malzemelerden elde edilen veriler plent miks temelde (PMT) kullanılacak şekilde AASHTO 93 üstyapı tasarım yönteminde değerlendirilmiş ve üç farklı yol sınıfı, tabii zemin taşıma gücü ve trafik yoğunluğu olmak üzere (5x3x3x3) 135 farklı tasarım senaryosu için üstyapı kalınlıkları hesaplanmıştır. Bütün durumlar için gerekli üstyapı kalınlıkları belirlenerek birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca üstyapı kalınlıklarına göre bir maliyet analizi yapılarak sonuçlar karşılaştırmalı şekilde sunulmuştur.

2. Materyal

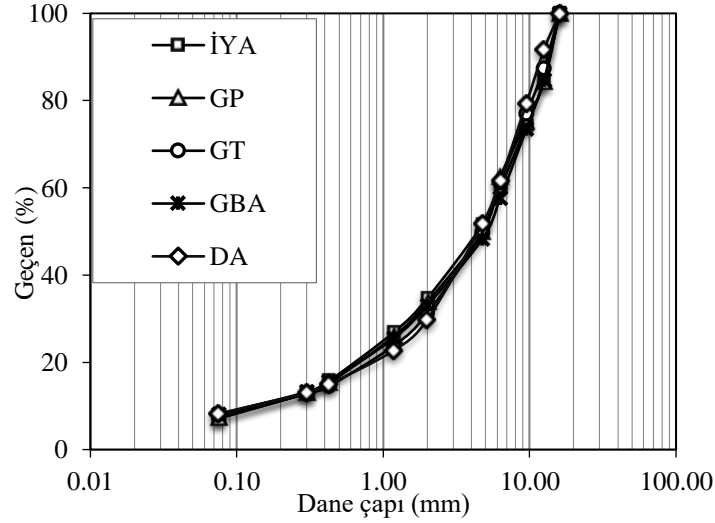
2.1 Agregaların bileşimi

Çalışma kapsamında dört adet geri dönüştürülmüş agrega numunesi ve bunların performanslarının değerlendirilebilmesi için bir adet doğal agrega numunesi (DA) seçilmiştir. Geri dönüştürülmüş agregalar tuğla, beton ve atık agregaları içeren inşaat yıkıntı atığı malzeme (İYA), sadece beton atığı içeren geri dönüştürülmüş beton agrega numunesi (GBA), beton bazlı atık parke parçaları içeren geri dönüştürülmüş parke numunesi (GP) ve sadece atık tuğla içeren geri dönüştürülmüş tuğla numunesinden (GT) oluşmaktadır. İYA numunesi günümüzde yürürlükte olmayan ama 1990'lı yılların başındaki yönetmeliklere tabii olarak inşa edilen betonarme binaların

yıkıntılarında oluşturulmuştur. Bu numuneler yaklaşık %60 oranında atık beton içerirken, yaklaşık %30 doğal agrega atığı ve %10'u ise tuğla atığı içermektedir (Ok ve Çolakoğlu, 2022). Analiz başlangıcında İYA numunesi konkasörde parçalandıktan sonra dolguda kullanılmaya uygun gradasyona getirilmiştir. GBA numunesi betonarme yapıların inşası sırasında kontrol amaçlı alınan 15 cm x 15 cm x15 cm küp numunelerin kırılması sonrasında atık hale gelen numunelerden elde edilmiştir. Alınan küp numunelerin beton sınıfı C30'dur. Bu küp numuneler, konkasörlerle parçalanarak dolguda kullanılmak için uygun gradasyona getirilmişlerdir (Çolakoğlu ve ark., 2021). GP numunesi yaklaşık 15 yıl kullanıldıktan sonra deforme olduğu veya kırıldığı için atık haline gelmiş kilit parkelerin konkasörlerle parçalanarak uygun gradasyona getirilmesi ile elde edilmiştir. Kilit parkeler betondan imal edilmiş olup yarmada çekme dayanımı ortalama 3,85 MPa'dır (Çolakoğlu ve ark., 2021). GT numunesi eski (en az 30 yıllık) ve deforme olduğu veya kırıldığı için atık haline gelmiş tuğlaların konkasörlerle parçalanarak uygun gradasyona getirilmesi ile elde edilmiştir (Ok ve Çolakoğlu, 2022). DA numunesi ise atık agregaların dolgularda kullanılabilirliğinin değerlendirilebilmesi açısından bir taş ocağından diğer numunelerin gradasyonları ile aynı gradasyonlu olarak elde edilmiştir (Çolakoğlu ve ark., 2021).

2.2. Agrega numunelerinin fiziksel/geoteknik özellikleri

Hem atık hem de doğal agrega numunelerinin gradasyonu yol dolgularında dolgu malzemesi olarak kullanılmaya uygundur (ASTM D 12141-00). Numunelerin gradasyon eğrileri Şekil 2'de sunulmaktadır (ASTM D 422-63). Numuneler üzerinde daha önce yassılık indeksi, Los Angeles aşınma, birim hacim ağırlık, su emme ve kompaksiyon (ASTM C 127-01; ASTM C 128-01; ASTM D 1557; ASTM D 854-02; ASTM C 131-03) gibi deneyler gerçekleştirilmiş olup bu deneylerin sonucunda elde edilen parametreler Tablo 1'de gösterilmiştir (Çolakoğlu ve ark., 2021; Ok ve Çolakoğlu 2022). Numunelerin zemin sınıfı ise iyi derecelendirilmiş çakıl (GW) olarak belirlenmiştir (ASTM D 2487-11).



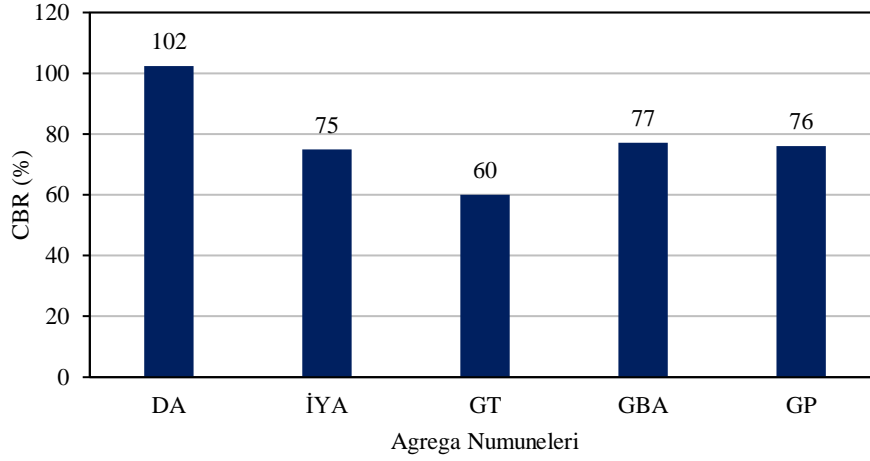
Şekil 2. Numunelerin gradasyon eğrileri.

Tablo 1. Agregaların fiziksel/geoteknik özellikleri.

Özellik	İYA	GT	GBA	GP	DA
C_u	19.2	12	9.1	14	14.4
C_c	1.2	1.2	1.5	1.4	1.6
YI (%)	10.4	26.3	14.3	10.5	9.9
LA (%)	38.6	26.9	38.2	41.8	28.3
γ_s (kN/m ³) (Ort.)	26.2	26.9	26.1	26.2	26.6
WA (%) (Ort.)	9.5	18.2	7.24	6	2.1
γ_{kmax} (kN/m ³)	17.9	15.4	18.6	17.9	21.2
ω_{opt} (%)	12	21.2	10.9	12.9	7.3
Zemin sınıfı	GW	GW	GW	GW	GW

Ort: İnce ve kaba malzemelerin ortalaması, C_u : Uniformluk katsayısı, C_c : Derecelendirme katsayısı, YI: Yassılık İndeksi, LA: Los Angeles aşınma kaybı, γ_s : Dane yoğunluğu, WA: Su emme, γ_{kmax} : Maksimum kuru birim hacim ağırlık, ω_{opt} : Optimum su içeriği

Numunelerin dayanımlarının belirlenmesi adına optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığına getirilen numuneler üzerinde Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerinde gerçekleştirilen CBR deneyleri sonucunda elde edilen değerler birbirleri ile karşılaştırmalı olarak yüzde cinsinden Şekil 3'te verilmektedir (ASTM D 1883–99). Buna göre en yüksek CBR değeri DA'da elde edilirken atık agregaların CBR değerleri %60-80 civarında kalmıştır. Bu durumda dane dayanımları ve su emme değerlerinin etkin olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 3. Agregra numunelerinin CBR değerleri.

3. Metot

Daha önce de belirtildiği üzere, Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi temelde AASHTO 93 tasarım metodolojisi üzerine inşa edilmiştir. Bu tasarım metodolojisine göre tasarımı gerçekleştirmek için tasarımda kullanılacak çeşitli parametrelerle ilgili verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma kapsamında 135 farklı tasarım senaryosu için kullanılan tasarım parametreleri ve söz konusu parametreler için bu çalışmada kullanılan tüm alternatif değerler Tablo 2’de sunulmuştur. Bu parametreler incelendiğinde, bazı parametreler için alternatif değerlerin kullanılmadığı görülmektedir. Bunun sebebi, bu parametrelerin Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi’ne göre tasarımdan bağımsız sabit değerlere sahip olmalarıdır (KGM, 2008). Bu rehberde göre bu parametrelerden tasarım ömrü parametresinin 20 yıl olarak, toplam standart sapma parametresinin 0.45 olarak, ilk servis kabiliyet sınıfı parametresinin ise 4.2 olarak alınması mecburidir. Bunun haricinde, güvenilirlik ve son servis kabiliyeti parametreleri için, yol sınıfına bağlı olarak Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi’nde belirtilen değerler kullanılmıştır (Tablo 2). Trafik değerleri için Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü sorumluluk sahası içerisinde yer alan üç farklı yol sınıfı için trafik yoğunluğu verileri incelenmiş ve bu veriler ışığında çok yoğun, orta yoğun ve az yoğun trafik değerleri tespit edilmiştir. Bu trafik kategorilerine ait günlük trafik değerleri kullanılarak 20 yıllık proje süresi boyunca yolun maruz kalması öngörülen toplam standart dingil yükü tekerrür sayıları hesaplanmış ve Tablo 2’de sunulmuştur. Üstyapıda kullanılacak PMT kalınlıkları ise Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi’nde belirtildiği şekilde 20 yıllık proje süresi boyunca yolun maruz kalması öngörülen toplam standart dingil yükü tekerrür sayıları 3-15 milyon olan yollarda 15 cm, 15 milyon ve üzerinde olan yollarda ise 20 cm olarak alınmıştır. Üstyapı tabanı, taşıma gücü açısından farklı taşıma gücü değerlerine sahip zeminleri kapsayacak şekilde değerlendirilmiş ve tasarım senaryoları olarak üç farklı CBR değerine sahip zeminler

değerlendirilmiştir. Zemin taşıma gücü olarak minimum %10 CBR değerinin kullanılması, Karayolları Teknik Şartnamesi'nde CBR değeri %10'dan küçük zeminlerin zayıf zemin olarak sınıflandırılmasından kaynaklanmaktadır (KGM, 2013). AASHTO 93 tasarım yönteminde zeminin taşıma gücü zeminin elastisite modülü cinsinden ifade edilmektedir. Bu çalışma kapsamında, zemin CBR değerleri ise taban zemininin elastisite modülüne (M_r) Denklem (1) kullanılarak çevrilmiştir (NCHRP, 2004).

$$M_r = 2555 \times CBR^{0.64} \quad (1)$$

Esnek üstyapı tabakalarının göreceli dayanım parametreleri AASHTO 93 tasarım yöntemine göre izafi mukavemet katsayısı (a) değerlerine göre belirlenmektedir. Karayolları Teknik Şartnamesi'ne uygun standart malzemelerle üretilmiş esnek üstyapı tabakalarının izafi mukavemet katsayıları Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi'nde şu şekilde yer almaktadır:

- Asfalt Betonu Aşınma: 0.42
- Asfalt Betonu Binder: 0.40
- Bitümlü Temel: 0.36

Bu çalışma kapsamında tasarımda kullanılan aşınma, binder ve bitümlü temel tabakalarının izafi mukavemet katsayıları olarak Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi'nde yer alan ve yukarıda da ifade edilen değerler kullanılmıştır. Doğal agrega ile üretilmiş PMT tabakasının izafi mukavemet katsayısı ise Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi'nde belirtildiği şekilde 0.15 olarak alınmıştır. Dört adet geri dönüştürülmüş agrega numunesi kullanılarak üretilen PMT tabakalarının izafi mukavemet katsayıları ise sırasıyla şöyle hesaplanmıştır: Şekil 3'te herbir malzeme için CBR test sonuçları sunulmuştur. Bu test sonuçları ve Denklem (1) kullanılarak, herbir malzemenin M_r değeri hesaplanmıştır. Son olarak da hesaplanan M_r değerleri Karayolları Esnek Üstyapılar projelendirme Rehberi'nde yer alan Denklem (2) kullanılarak, a değerlerine çevrilmiştir.

$$a = 0.0045 \times M_r^{1/3} \quad (2)$$

Tablo 2. Tasarım senaryolarında kullanılan parametreler ve değerleri.

Parametre	Yol Sınıfı		
	Otoyol	Devlet Yolu	İl Yolu
Güvenilirlik (%)	95	85	70
Tasarım Ömrü (yıl)	20	20	20
Proje Trafığı (Toplam Standart Dingil Yükü Tekerrür Sayısı) (milyon)	34, 153, 275	3, 45, 83	3, 10, 21
Toplam Standart Sapma (S_0)	0.45	0.45	0.45
İlk Servis Kabiliyeti (P_0)	4.2	4.2	4.2

Son Servis Kabiliyeti (P_1)	2.5	2.5	2.0
Üstyapı Tabanı CBR Değeri (%)	10, 30, 50	10, 30, 50	10, 30, 50
PMT'de kullanılan agrega çeşidi	DA, İYA, GT, GBA, GP	DA, İYA, GT, GBA, GP	DA, İYA, GT, GBA, GP

Çalışma kapsamında Tablo 2'de yer alan her bir tasarım senaryosu için (toplamda 135 senaryo) aşınma, binder ve bitümlü temel kalınlıkları hesaplanmış ve toplam kaplama kalınlıkları hesaplanıp sunulmuştur. Daha sonra ise bu kalınlıklar ve PMT kalınlıkları da dikkate alınarak Karayolları 2023 yılı birim fiyatları (KGM, 2023) kullanılarak yaklaşık yol yapım maliyetleri çıkarılmıştır.

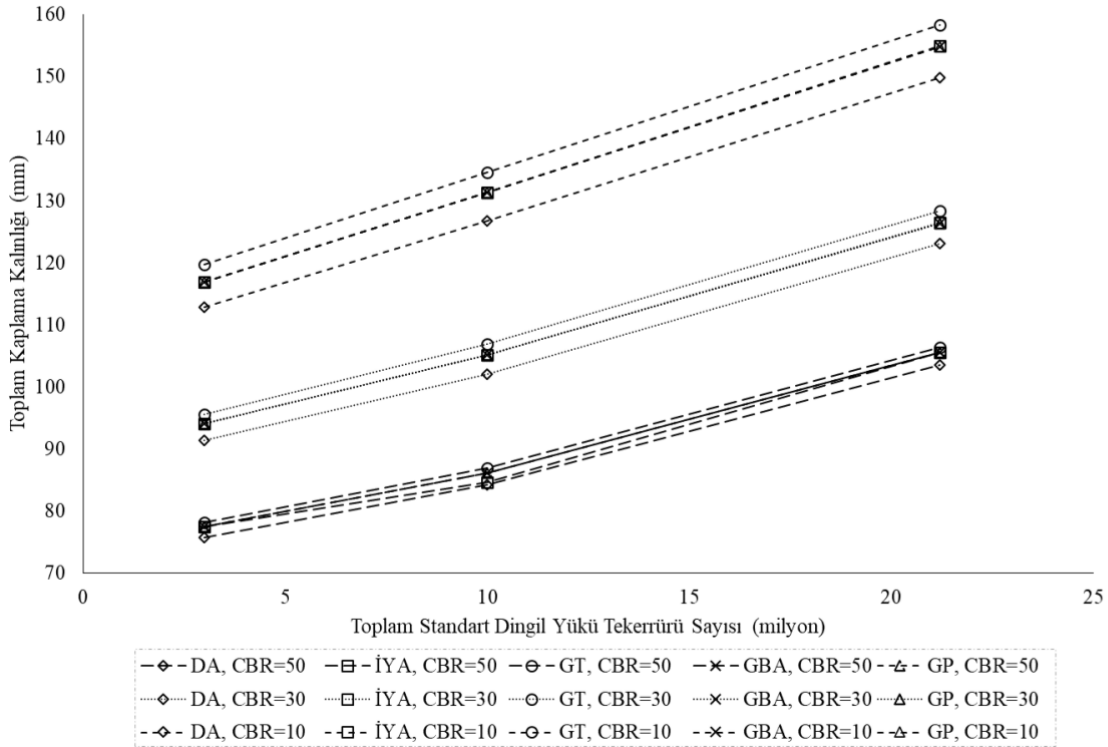
4. Esnek Üstyapı Tabaka Kalınlıkları Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6 sırasıyla il yolları, devlet yolları ve otoyollar için üç farklı tabii zemin CBR değeri (10%, 30% ve 50%) ve beş farklı PMT malzemesi (DA, İYA, GT, GBA, GP) kullanılarak oluşturulan tasarım senaryoları için yolun tasarım ömrü boyunca maruz kalacağı proje trafiği (toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı) arttıkça hesaplanan toplam kaplama kalınlıklarının değişimini göstermektedir. Her bir şekil incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır:

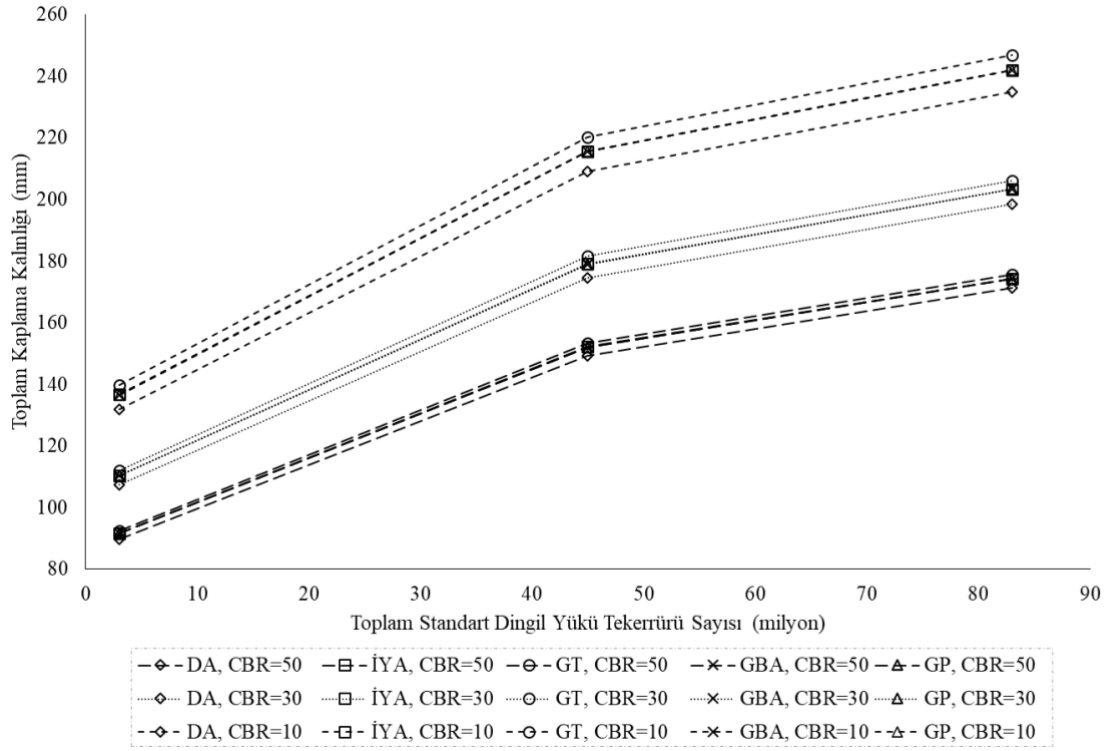
- Otoyolların tasarımında hem daha yüksek güvenilirlik katsayısı (%95) hem de daha yüksek proje trafiği değerleri kullanıldığından otoyollar için hesaplanan toplam kaplama kalınlık değerleri devlet yolları ve il yollarına göre daha yüksek çıkmıştır. Benzer şekilde il yolları ile devlet yolları için hesaplanan kaplama kalınlıkları karşılaştırıldığında, devlet yollarının tasarımında hem daha yüksek güvenilirlik katsayısı (%85) hem de daha yüksek proje trafiği değerleri kullanıldığından devlet yolları için hesaplanan toplam kaplama kalınlık değerleri il yollarına göre daha yüksek bulunmuştur.
- Her bir yol sınıfı kendi içinde değerlendirildiğinde, üç yol sınıfında da ortak olarak yolun tasarım ömrü boyunca maruz kalacağı toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı değeri arttıkça ve tabii zemin CBR değeri azaldıkça hesaplanan toplam kaplama kalınlıklarının arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi yol üstyapısından gelen yüklerin zayıf zeminin taşıma gücünü aşmaması için kaplama kalınlığının artırılarak zayıf zemine aktarılacak yükün azaltılmasıdır.
- DA ve dört farklı atık agrega kullanılarak oluşturulan PMT tabakalarının toplam kaplama kalınlığına etkisi incelendiğinde, her üç yol sınıfı durumu için de ortak olarak aynı proje trafiği ve tabii zemin CBR değerleri için en yüksek kaplama kalınlığının GT, en düşük kalınlığının ise DA kullanılarak oluşturulan PMT'ler kullanıldığında meydana geldiği gözlemlenmiştir. Toplam kaplama kalınlıkları arasındaki farkın tabii zemin CBR değeri arttığında azaldığı görülmektedir. İYA, GBA ve GP kullanılarak teşkil edilen PMT tabakalarının toplam kaplama kalınlığına etkisinin benzer olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi olarak da her üç malzemenin Şekil 3'te de

belirtildiği şekilde benzer CBR değerleri ve dolayısıyla da benzer izafi mukavemet katsayılarına sahip olmaları gösterilebilir.

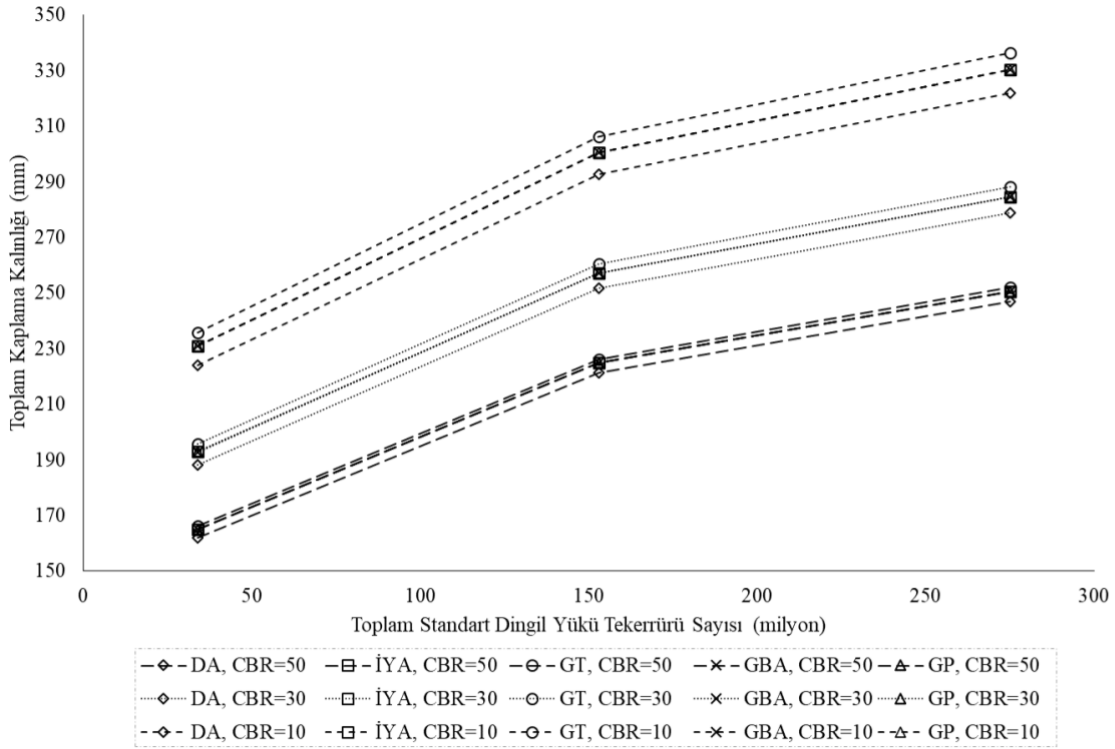
- Hesaplanan toplam kaplama kalınlıkları incelendiğinde her üç yol tipi için de en yüksek kaplama kalınlıklarının aynı proje trafiği değerleri için tabi zemin CBR değerinin %10 olması durumunda gerçekleştiği gözlemlenmiştir. DA ve GT ile teşkil edilen PMT tabakaları kullanıldığında hesaplanan toplam kaplama kalınlıkları arasındaki farkın tabi zemin CBR değerinin %10 olması durumunda il yolları, devlet yolları ve otoyollar için sırasıyla 7.7 mm, 10.3 mm ve 13.2 mm olduğu hesaplanmıştır. Dahası, bu farkın tabi zemin CBR değerinin %50 olması durumunda il yolları, devlet yolları ve otoyollar için sırasıyla 2.6 mm, 3.6 mm ve 4.7 mm olduğu bulunmuştur. DA, İYA, GBA ve GP ile teşkil edilen PMT tabakaları kullanıldığında hesaplanan toplam kaplama kalınlıkları arasındaki farkın DA ile her üç atık agrega için tabi zemin CBR değerinin %10 olması durumunda benzer şekilde il yolları, devlet yolları ve otoyollar için sırasıyla ortalama 4.6 mm, 6.1 mm ve 7.8 mm olduğu hesaplanmıştır. Bu veriler incelendiğinde hesaplanan kaplama kalınlıkları arasındaki en yüksek farkın DA ve GT ile teşkil edilen PMT tabakaları kullanıldığında gerçekleştiği ve aradaki farkın en yüksek (tabi zemin CBR değerinin %10 olması durumunda) ortalama değerinin 10 mm, her üç tabi zemin CBR durumu için ise ortalama 6.9 mm olduğu görülmüştür. DA ile diğer üç atık agrega (İYA, GBA ve GP) ile teşkil edilen PMT tabakasının toplam kaplama kalınlığına etkisinin daha sınırlı olduğu (CBR değerinin 10% olması durumunda ortalama 6.1 mm toplam kaplama kalınlığı farkı) gözlemlenmiştir.



Şekil 4. İl yolları için farklı trafik ve zemin CBR değerleri ile beş farklı PMT malzemesi kullanılarak oluşturulan tasarım senaryoları için hesaplanan toplam kaplama kalınlıklarının değişimi



Şekil 5. Devlet yolları için farklı trafik ve zemin CBR değerleri ile beş farklı PMT malzemesi kullanılarak oluşturulan tasarım senaryoları için hesaplanan toplam kaplama kalınlıklarının değişimi



Şekil 6. Otoyollar için farklı trafik ve zemin CBR değerleri ile beş farklı PMT malzemesi kullanılarak oluşturulan tasarım senaryoları için hesaplanan toplam kaplama kalınlıklarının değişimi

5. Maliyet Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

135 farklı tasarım sonucu elde edilen herbir esnek üstyapı tabaka kalınlığı (aşınma, binder ve bitümlü sıcak temel tabakası) ile beş farklı agrega (DA ile dört farklı atık agrega) ile üretilen PMT kalınlıkları dikkate alınarak 135 farklı yol üstyapı tasarımının yaklaşık yapım maliyetleri de bu çalışma kapsamında karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu maliyet analizinin amacı dört farklı atık agrega ile üretilen PMT tabakasının yol üstyapısı toplam yapım maliyetine DA ile üretilen PMT tabakasının göre etkisinin karşılaştırmalı olarak analiz edilmesidir. Maliyet analizinde KGM 2023 birim fiyatları dikkate alınmıştır (KGM, 2023). Tablo 3'te maliyet analizinde kullanılan her bir esnek üstyapı tabakasının 2023 yılı yaklaşık yapım maliyetleri hem birim fiyat hem de m²/cm cinsinden sunulmuştur. Tablo 3'te görüldüğü gibi kaplama tabakalarının (aşınma, binder ve bitümlü sıcak temel) birim fiyatları ilgili pozlarda m² cinsinden belirlenmiş, PMT birim fiyatı ise ton cinsinden tanımlanmıştır. 135 farklı tasarım senaryosunun yaklaşık yapım maliyetini hesaplamak için herbir tabakanın öncelikle birim maliyetleri m²/cm cinsinden hesaplanmış daha sonra ise önceki bölümde hesaplanan tabaka kalınlıkları dikkate alınarak yol yapım maliyetleri TL/m² cinsinden bulunmuştur.

Tablo 3. Tasarım senaryolarında kullanılan esnek üstyapı tabakalarının 2023 yılı birim fiyat ve maliyetleri

Poz no	Tanım	Birim	Birim Fiyat	Maliyet (TL)	
				m ² /cm	m ²
KGM/6405/S-M	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapımı	m ²	53.55	10.71	53.55
KGM/6307	7 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu binder tabakası yapımı	m ²	57.19	8.17	57.19
KGM/6208	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapımı	m ²	62.03	7.75	62.03
KGM/6100/3	Plentmix temel yapılması (Yoğunluk : 2.4 g/cm ³) (20 cm sıkışmış kalınlıkta)	ton	188.45	4.52	90.46

Tablo 3'te yer alan KGM/6100/3 poz numaralı PMT yapılması işi standart doğal agrega ile PMT tabakasının teşkil edilmesi işini kapsamaktadır. PMT yapılması işinin KGM/6100/3 poz detayı incelendiğinde (Tablo 4) iş farklı gradasyonlara sahip doğal agrega temini, karışımın hazırlanması, tartılması, sıkıştırılması ve sulanmasını kapsamaktadır. Ayrıca ilgili poz 150 m mesafeye kadar ocak ile konkasör arası malzemeyi taşıma işini de kapsamaktadır. Bu mesafeden daha fazla taşıma işi için taşıma mesafesine bağlı olarak ek maliyet gerekmektedir (KGM, 2023). Bu çalışma kapsamında DA ile teşkil edilen PMT için birim fiyat olarak Tablo 3'te yer alan KGM/6100/3 poz numaralı işin birim maliyeti (4.52 TL (m²/cm)) direkt olarak kullanılmıştır. Atık agregalar kullanılarak PMT yapılması işi birim maliyet hesabında da atık agrega temini maliyetlerinin (KGM/4101/B, KGM/4102/B, KGM/4105/B ve KGM/4107/B) olmadığı ve diğer maliyetlerin de (KGM/4465/3, KGM/4269, KGM/4466/5 ve KGM/15.047) Tablo 4'te gösterilen KGM/6100/3 poz detayındaki miktar ve birim fiyatlarla aynı olduğu değerlendirilmiştir. Dolayısıyla atık agrega ile teşkil edilen PMT yapılmasının

birim maliyetinin 1.97 TL (m²/cm) olduğu hesaplanmıştır. Hem DA ile üretilen hem de diğer atık agregalar ile üretilen PMT tabakasının teşkilinde ocak-konkasör arası malzeme taşıma mesafesinin 150 m'den az olduğu varsayılmış ve her iki durumda da ek bir malzeme taşıma maliyeti öngörülmemiştir.

Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9 sırasıyla il yolları, devlet yolları ve otoyollar için tabi zemin CBR değerinin %30 olması durumunda ve beş farklı PMT malzemesi (DA, İYA, GT, GBA, GP) kullanılarak oluşturulan tasarım senaryoları için hesaplanan esnek üstyapı kaplama tabakaları kalınlıkları ve PMT kalınlıkları ile ilgili birim maliyetler dikkate alınarak yolun tasarım ömrü boyunca maruz kalacağı proje trafiğine (toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı) bağlı olarak hesaplanan yaklaşık yol yapım maliyetlerini göstermektedir. Söz konusu şekiller incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar çıkmaktadır:

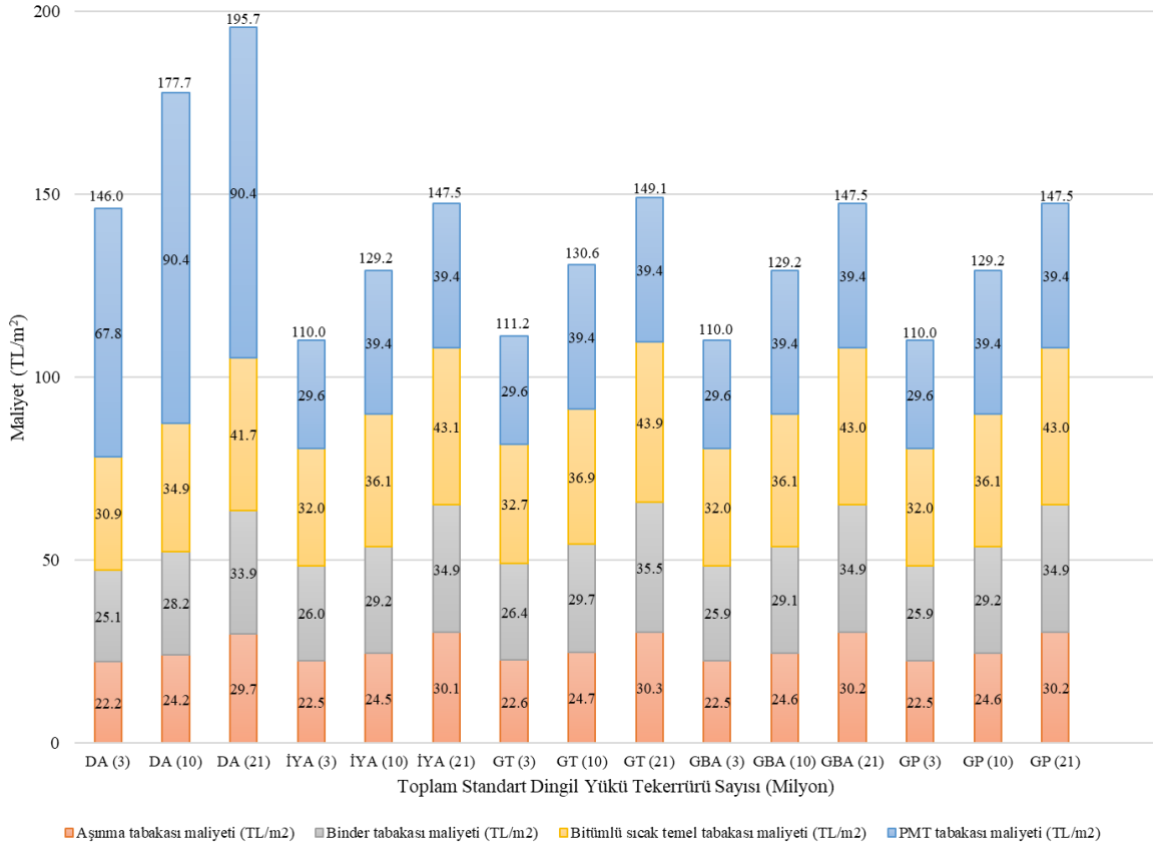
Tablo 4. KGM/6100/3 poz detayı

Rayiç No	Tanım	Birim	Birim Fiyat (TL)	Miktar
KGM/4101/B	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 37,5 mm (1 1/2")'lik agregası hazırlanması	ton	108.09	0.239
KGM/4102/B	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 25 mm (1") ve 19 mm (3/4")'lik agregası hazırlanması	ton	104.85	0.239
KGM/4105/B	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 12,5 mm (1/2") ve 9,5 mm (3/8")'lik agregası hazırlanması	ton	119.35	0.239
KGM/4107/B	Ocak taşından kırılmış ve elenmiş 4,75 mm (No.4) ve daha küçük agregası hazırlanması	ton	126.51	0.24
KGM/4465/3	Plent-miks alttemel ve temel karışımı hazırlanması	ton	24.74	1
KGM/4269	Malzemenin kantar ile tartılması	ton	0.29	1
KGM/4466/5	Plent-miks alttemel ve temel karışımlarının elektronik duyargalı finişerle serilmesi ve silindire sıkıştırılması	ton	56.65	1
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	ton	49.23	0.01

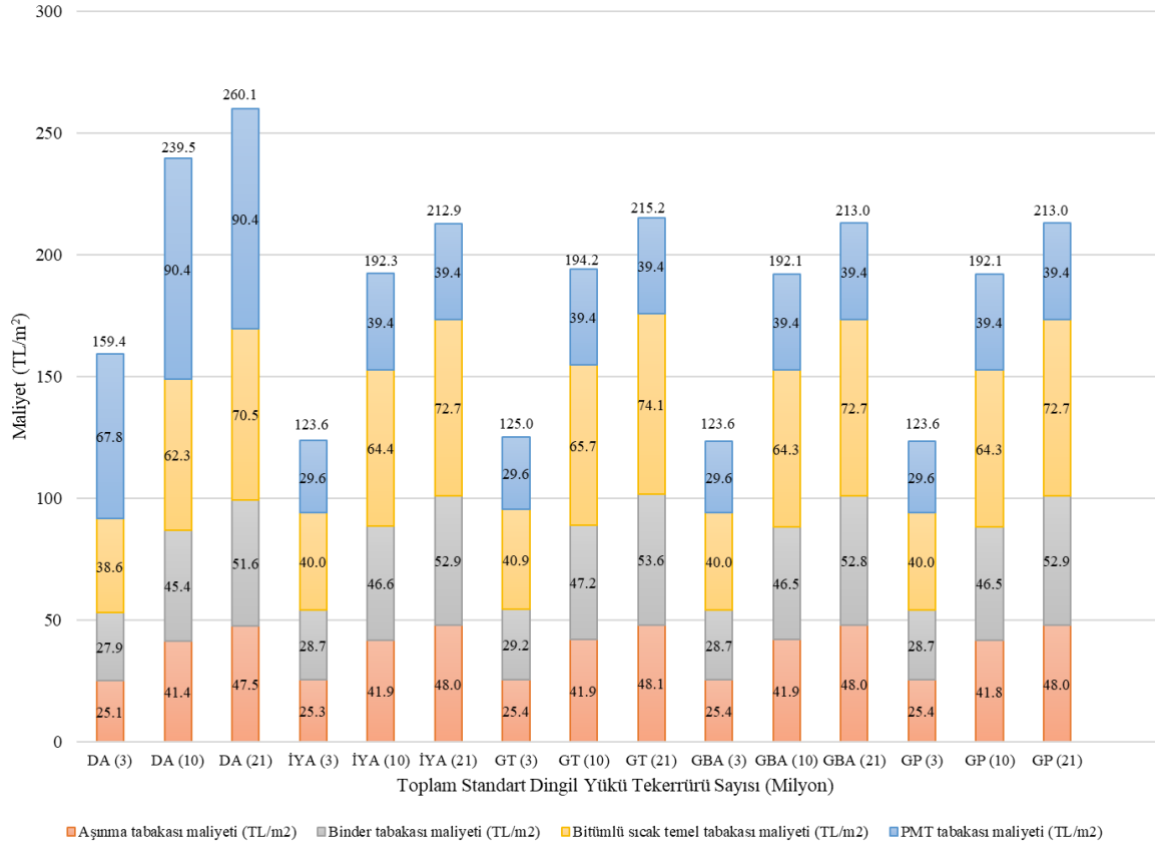
- Yol sınıflarına göre yaklaşık yol yapım maliyetleri karşılaştırıldığında önceki kısımda hesaplanan kaplama kalınlığı sonuçlarına paralel olarak yol yapım maliyetleri büyükten küçüğe otoyollar, devlet yolları ve il yolları şeklinde bulunmuştur. Benzer şekilde, tüm yol sınıflarında kaplama kalınlığı sonuçlarına paralel olarak proje trafiği değerleri arttıkça yol yapım maliyetlerinde artış gözlemlenmiştir.
- DA ve dört farklı atık agregası kullanılarak oluşturulan PMT tabakalarının yol yapım maliyetine etkisi incelendiğinde, her üç yol sınıfı durumu için de ortak olarak aynı proje trafiği değerleri için en yüksek yol yapım maliyetinin DA ile oluşturulan PMT'ler kullanıldığında olduğu, en düşük yol yapım maliyetinin ise İYA, GBA ve GP ile teşkil edilen PMT tabakalarının kullanıldığında olduğu gözlemlenmiştir. GT ile teşkil edilen PMT tabakalarının kullanıldığı yollardaki yol

yapım maliyetlerinin diğer üç atık agrega ile teşkil edilen PMT tabakalarının kullanıldığı duruma göre çok az miktarda fazla olmakla birlikte onlarınkine benzer olduğu tespit edilmiştir. DA ile teşkil edilen PMT'lerin kullanıldığı yollardaki yol yapım maliyetlerinin atık agrega kullanılan yollardakinden fazla oluşu DA ile üretilen PMT tabakalarının birim maliyetlerinin doğal agrega temini maliyetlerini de içermesi ve dolayısıyla atık agregalarla üretilen PMT tabakalarına göre m^2/cm cinsinden birim maliyetlerinin yaklaşık 2.3 kat daha fazla oluşundandır. Her ne kadar PMT yapım maliyetleri m^2/cm cinsinden kaplama tabakalarına göre daha düşük olsa da PMT tabaka kalınlıklarının diğer kaplama kalınlıklarına nispeten daha fazla oluşu PMT yapım maliyetlerinin toplam yol yapım maliyetindeki etkisini arttırmıştır.

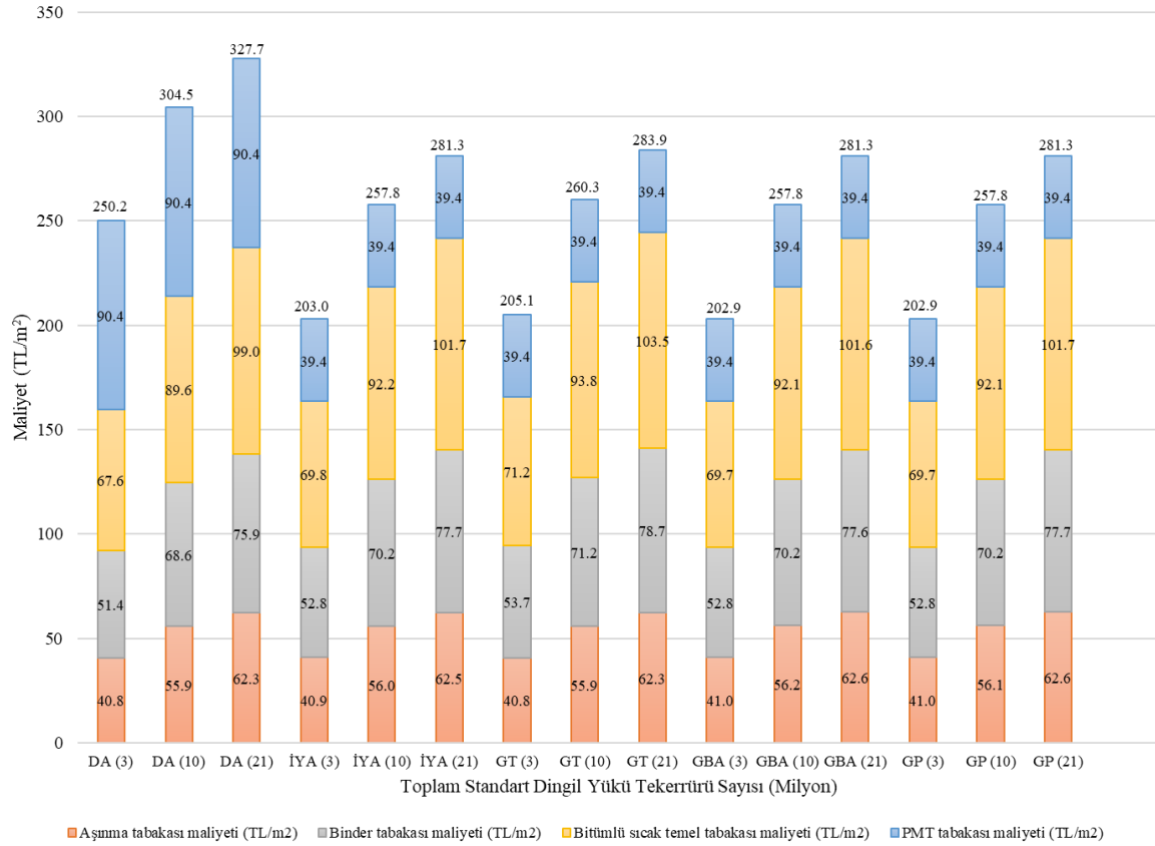
- DA ile teşkil edilen PMT tabakasının kullanıldığı yolların yol yapım maliyetleri, atık agregalar ile teşkil edilen PMT tabakasının kullanıldığı yolların yol yapım maliyetlerine göre sırasıyla otoyollar, devlet yolları ve il yolları için ortalama %19, %25 ve %32 fazla çıkmıştır.



Şekil 7. İl yolları için farklı proje trafiği değerleri ile beş farklı PMT malzemesi kullanılarak oluşturulan tasarım senaryoları için hesaplanan yaklaşık yol yapım maliyetlerinin dağılımı



Şekil 8. Devlet yolları için farklı proje trafiği değerleri ile beş farklı PMT malzemesi kullanılarak oluşturulan tasarım senaryoları için hesaplanan yaklaşık yol yapım maliyetlerinin dağılımı



Şekil 9. Otoyollar için farklı proje trafiği değerleri ile beş farklı PMT malzemesi kullanılarak oluşturulan tasarım senaryoları için hesaplanan yaklaşık yol yapım maliyetlerinin dağılımı

6. Sonuçlar ve neriler

Bu alışma kapsamında toplamda 135 tasarım senaryosu için aşınma, binder ve bitümlü temel kalınlıkları ile toplam kaplama kalınlıkları hesaplanmıştır. Daha sonra ise bu kalınlıklar ve PMT kalınlıkları dikkate alınarak ve Karayolları 2023 yılı birim fiyatları kullanılarak yaklaşık yol yapım maliyetleri belirlenmiştir. Elde edilen dikkate değer sonuçlar aşağıdaki maddelerde sunulmaktadır:

- Tabi zemin CBR değeri, yolun güvenilirlik düzeyi, PMT malzemesinin CBR değeri ve toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı kaplama kalınlığını ve dolayısı ile yolun yapım maliyetini etkileyen faktörlerdendir. Tabi zemin CBR değeri arttıka PMT malzemesinin kaplama kalınlığına etkisi oldukça azalmıştır.
- Tabi zemin CBR değerinin %50 olduğu durumda il yolları için PMT'nin DA ile teşkil edilmesi ile diğer geri dönüşümlü agregalar (İYA, GBA, GT, GB) ile teşkil edilmesi durumunda çok kayda değer kaplama kalınlığı farkı görülmemesi bu tip yollar için geri dönüşümlü agregaların kullanımının iyi bir alternatif yaratabileceğini göstermektedir.
- Kaplama kalınlıklarındaki farklılara rağmen geri dönüşümlü agregalarla (İYA, GBA, GT, GB) inşa edilen yolların maliyetleri DA ile inşa edilene göre daha az olmuştur. Bununla birlikte GT ile inşa edilen yolların maliyeti diğer atık agregalarla (İYA, GBA, GB) inşa edilene göre çok az daha fazla çıkmıştır.
- Ařırđ kaplama kalınlığı artışı olmaması, yol maliyetinin DA'ya göre daha az olması ve çevresel faydaları sebebi ile atık agregaların esnek styapı PMT tabakalarında kullanılma potansiyeline sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

ıkar atışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar atışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- AASHTO (1993). *AASHTO guide for design of pavement structures*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Ağar E., Süttaş İ., Öztaş G. (1998). *Beton yollar*. İTÜ.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Aatheesan., T., and Bo, M. W. (2011). Geotechnical properties of recycled crushed brick in pavement applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(10): 1444-1452, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000319](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000319).
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M. M., and Bo, M. W. (2013). Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8): 1077-1088, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000652](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000652).
- Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Phummiphan, I., Horpibulsuk, S., and Samingthong W. (2016). Stabilization of recycled demolition aggregates by geopolymers comprising calcium carbide residue, fly ash and slag precursors. *Construction and Building Materials*, 114: 864-73, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.150>.
- ASTM C 127-01 (2001). Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- ASTM C 128-01 (2001). Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- ASTM D 1241-00 (2005). Specification for Materials for Soil-aggregate Sub-base, Base and Surface Courses. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- ASTM D 1557 (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- ASTM D 2487-11 (2011). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). West Conshohocken, USA: ASTM International.
- ASTM D 422-63 (2009). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- ASTM D 854-02 (2009). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- ASTM D 1883-99 (1999). Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- ASTM C 131-03 (2003). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. West Conshohocken, USA: ASTM International.
- Çolakoğlu, H., Ok, B., and Sarıcı, T. (2021). Geri Dönüştürülmüş Farklı Tip İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kompaksiyon Özelliklerinin İncelenmesi. *5th International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management*, Kasım 5-7, Sakarya, Türkiye. <https://doi.org/10.33793/acperpro.04.02.47>.
- Gabr, A. R., and Cameron, D.A. (2012). Properties of recycled concrete aggregate for unbound pavement construction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(6): 754-764, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000447](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000447).
- Geçkil, T., Sarıcı, T., and Ok, B. (2022). Model studies on recycled whole rubber tyre reinforced granular fillings on weak soil. *Revista de la Construcción*, 21(2): 264-280. <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.21.2.264>.
- Jiménez, J. R., Ayuso, J., Agrela, F., López, M., and Galvín, A. P. (2012a). Utilisation of unbound recycled aggregates from selected cdw in unpaved rural roads. *Resources, Conservation and Recycling*, 58:88-97.
- Jiménez, J. R., Ayuso, J., Galvín, A. P., López, M., and Agrela, F., (2012b). Use of Mixed Recycled Aggregates with a Low Embodied Energy From Non-Selected CDW in Unpaved Rural Roads. *Construction and Building Materials*, 34:34-43.
- KGM (2008). *Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberi*.
- KGM (2013). *Karayolları teknik şartnamesi*.
- KGM (2013). Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı ve Bölge Araştırma ve Geliştirme Başmühendisliklerinin Görevleriyle İlgili Hizmetler İçin 2023 Yılı 1. Dönemi Birim Fiyat Listesi. <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/MerkezBirimler/ProgramIzlemeDairesiBaskanligi/2023YiliBirimFiyatListesi.pdf>.

- Mehrijardi, G. T., Azizi, A., Haji-Azizi, A., and Asdollafardi, G. (2020). Evaluating and improving the construction and demolition waste technical properties to use in road construction. *Transportation Geotechnics*, 23: 100349, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100349>.
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., and Shourijeh, P. T. (2019a). Impact of potassium cations on the light chemical stabilization of construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*, 203: 69-74, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.083>.
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Phummiphan, I., Horpibulsuk, S., and Mirzababaei, M. (2019b). Flexural fatigue strength of demolition aggregates stabilized with alkali-activated calcium carbide residue. *Construction and Building Materials*, 199: 115-23, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.031>.
- NCHRP (2004). *Guide for mechanistic–empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final Report, NCHRP Project 1–37A. TRB, National Research Council, Washington, D.C.*, <http://trb.org/mepdg/guide.htm>.
- Ok, B., and Demir, A. (2018). Yapım Yıkım Atıklarının Yol Temellerinde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7 (1), 224-236.
- Ok, B., Sarici, T., Talaslioglu, T., and Yildiz, A. (2020). Geotechnical properties of recycled construction and demolition materials for filling applications. *Transportation Geotechnics*, 24: 100380, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100380>.
- Ok, B., Çolakoğlu, H. (2022). Kompaksiyon yönteminin farklı tip geri dönüştürülmüş agregalar üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(3): 1592-1607.
- Ok, B., Sarici, T., Demir, A., Talaslioglu, T., and Yildiz A. (2023). Investigation of construction and demolition materials reinforced by geosynthetics. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability*. <https://doi.org/10.1680/jensu.22.00077>
- Perera, S., Arulrajah, A., Wong, Y. C., Horpibulsuk, S., and Maghool, F. (2019). Utilizing recycled PET blends with demolition wastes as construction materials. *Construction and Building Materials*, 221: 200–209, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.047>.
- Poon, C. S., and Chan, D. (2006). Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and Building Materials*, 20: 578–585, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.045>.
- Sangiorgi, C., Lantieri, C., and Dondi, G. (2013). Construction and demolition waste recycling: an application for road construction. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(6): 530-537, <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2014.943134>.
- Sarıcı, T., Ok, B., Mert, A., and Comez, S. (2022). The resilient modulus of hybrid construction and demolition wastes reinforced by a geogrid. *Acta Geotechnica Slovenica*, 2022(2): 2-14. <https://doi.org/10.18690/actageotechslov.19.2.2-14.2022>
- Yaghoubi, E., Arulrajah, A., Wong, Y. C., and Horpibulsuk, S. (2017). Stiffness properties of recycled concrete aggregate with polyethylene plastic granules in unbound pavement applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(4): 1-7, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001821](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001821).