



## Investigation of soil stabilization with waste marble powder according to mechanistic-empirical design method

Mustafa Kardeşin<sup>1</sup>, Ahmet Hüsrev Yıldız<sup>2</sup>, Murat Vergi Taciroğlu<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Istanbul Gelişim University, 34310, Avcılar Istanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Sonmez Petrol, Construction, Tourism Limited Company, 15300, Bucak, Burdur, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mersin University, 33343, Yenişehir, Mersin, Türkiye

### Highlights:

- Improved strength properties of clayey soils
- Required pavement thickness reduction was achieved
- Increased highway critical rutting life

### Keywords:

- Waste Marble Powder
- Soil Stabilization
- Pavement Thickness
- Mechanical-Empirical Design
- KENPAVE

### Article Info:

Research Article

Received: 02.06.2022

Accepted: 25.08.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1125457

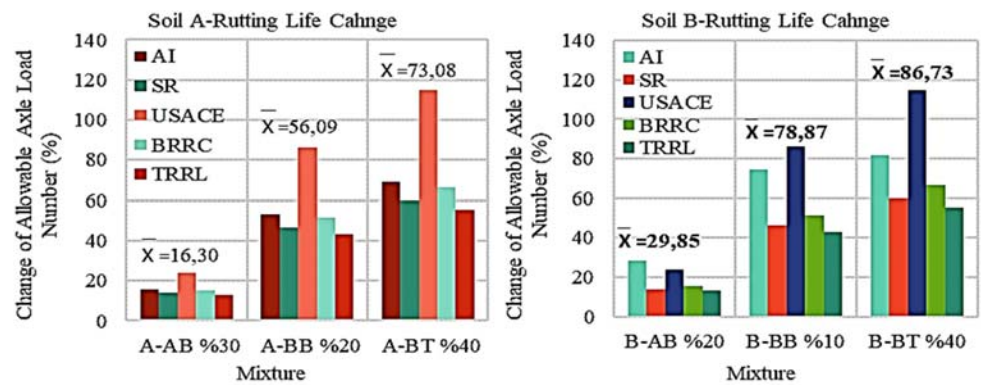
### Acknowledgement:

This research was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) [grant numbers 105M-019].

### Correspondence:

Author: Murat Vergi  
Taciroğlu  
e-mail:  
mtaciroglu@mersin.edu.tr  
phone: +90 532 588 1651

### Graphical/Tabular Abstract



**Figure A.** Variation of critical rutting life increase values calculated with coefficients suggested by different organisations for 80 kN axle load (AI: Asphalt Institute; SR: Shell Research; BRRC: Belgian Road Research Center; USACE: US Army Corps of Engineers; TRRL: Transport and Road Research Laboratory)

**Purpose:** This study focused on investigating the effect of highway subgrade stabilization with waste marble dust according to the mechanistic-empirical pavement design method. It's aimed to find an ecological and economical solution to the problems created by waste marble dust.

### Theory and Methods:

Three different types of waste marble powder (Afyon White (AB), Burdur Beige (BB), Burdur Travertine (BT)) were added at 0-10-20-30% and 40% ratios to two different low plasticity clayey soils (Soil A (SA), Soil B (SB)), and the changes in the engineering properties of the soils were observed by applying Atterberg limits, standard Proctor, shear box and California bearing ratio (CBR) tests. At the end of the study, pavement design calculations were made according to the CBR, AASHTO-1993 and Mechanistic-Empirical methods based on the test data.

### Results:

The test results showed that when 10%-20% waste marble powder was added to low plasticity clayey soils, the plasticity index values of the soils decreased, the cohesion, internal friction angle, and CBR values also increased. In addition, pavement design calculations predicted that the stabilization using 10%-20% waste marble powder, the required pavement thickness can be reduced by almost half according to the CBR method, and 1 score SN reduction can be achieved according to the AASHTO-93 method. Furthermore, with the calculations of KENPAVE software, according to the Mechanistic-Empirical method, it was predicted that the critical rutting life of the pavement could increase up to 86% on average (Figure A).

### Conclusion:

Considering all the data obtained; It has been concluded that it is appropriate to use waste marble powder as a stabilization material in low plasticity clayey soils at rates varying between 10-20% in road infrastructure. It offers very economical solutions in locations where it is a sustainable practice to use waste marble powder instead of materials used in ground stabilization such as Portland cement, lime dust, or chemical products, and where waste marble powder is abundant.



## Atık mermer tozu ile zemin stabilizasyonunun mekanistik-amprik tasarım yöntemine göre incelenmesi

Mustafa Karaşahin<sup>1</sup> , Ahmet Hüsrev Yıldız<sup>2</sup> , Murat Vergi Taciroğlu<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34310, Avcılar, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Sönmez Petrol, İnşaat, Turizm Limited Şirketi, 15300, Bucak, Burdur, Türkiye

<sup>3</sup>Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 33343, Yenişehir Mersin, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Killi zeminlerin dayanım özellikleri iyileştirildi
- Gereken üstyapı kalınlığında azalma sağlandı
- Karayolunun kritik tekerlek izi oturması ömrü arttı

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 02.06.2022

Kabul: 25.08.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1125457

### Anahtar Kelimeler:

Atık mermer tozu,  
zemin stabilizasyonu,  
karayolu üstyapı kalınlığı,  
mekanistik-amprik dizayn,  
KENPAVE

### ÖZ

Mermer kullanımının artmasına bağlı olarak, ortaya çıkan mermer atıkları dünya çapında önemli bir çevre sorunu haline gelmiştir. Sürdürülebilirliğin önemli olduğu günümüzde bu tür atıklar inşaat işlerinde çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Sürdürülebilirliğe en büyük katkı, atık maddelerin yeniden kullanımındır. Yapılan deneysel ve hesaplamalı çalışmada, üç farklı atık mermer tozunun zemin stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmanın deneysel kısmında atık mermer tozları %0-10-20-30 ve 40 oranlarında iki farklı CL sınıfı killi zemine eklenmiş ve zeminlerin mukavemet özelliklerindeki değişiklikler Atterberg limitleri, standart Proctor sıkıştırma, kesme kutusu, ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) testleri ile izlenmiştir. Hesaplamalı kısımda ise CBR ve AASHTO-93 yöntemleri kullanılarak yapılan stabilizasyonun üstyapı kalınlığına etkileri belirlenirken, KENPAVE yazılımı ile Mekanistik-Amprik tasarım metoduna uygun olarak mermer tozu iyileştirmesinin üstyapının yorulma ömrüne olan katkısı araştırılmıştır. Elde edilen test sonuçları mermer toz atıklarıyla stabilize edilen düşük plastisiteli killerin dayanım özelliklerinin iyileştirdiğini göstermiştir. CBR ve AASHTO-93 metodları ile bu iyileştirmenin gereken üstyapı kalınlığını azaltabileceği, SN sayısındaki azalma ile karayolu imalatında yüzlerce metreküp malzeme kazancı sağlanabileceği hesaplanmıştır. Mekanistik-Amprik yöntem ile yapılan hesaplar da atık mermer tozu stabilizasyonu ile üstyapının kritik tekerlek izi oturması ömrünün ortalama %86'ya kadar artabileceğini öngörmektedir.

## Investigation of soil stabilization with waste marble powder according to mechanistic-empirical design method

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

- Improved strength properties of clayey soils
- Required pavement thickness reduction was achieved
- Increased highway critical rutting life

### Article Info

Research Article

Received: 02.06.2022

Accepted: 25.08.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1125457

### Keywords:

Waste marble powder,  
soil stabilization,  
highway pavement thickness,  
mechanical-empirical design,  
KENPAVE

### ABSTRACT

Marble waste has become a critical environmental issue worldwide due to the increase in the use of marble. Nowadays, where sustainability is essential, such wastes are used for various purposes in construction works. The main contribution to sustainability is the reuse of marble waste. In the experimental and computational study, the usability of three different waste marble powders as soil stabilization material was investigated. In the experimental part of the study, waste marble powders were added to the CL type of two different clay soils at 0-10-20-30 and 40% rates. The changes in the strength properties of the stabilized soil were monitored by Atterberg limits, standard Proctor compression, shear box, and California Bearing Ratio (CBR) tests. In the computational part, while the effects of stabilization made using CBR and AASHTO-93 methods on pavement thickness were determined, the contribution of marble powder improvement to the fatigue life of the pavement was investigated in compliance with the Mechanistic-Empirical design method with KENPAVE software. The test results showed that the strength properties of low plasticity clays stabilized with marble dust wastes improved. With CBR and AASHTO-93 methods, it has been calculated that this improvement can reduce the required pavement thickness, and hundreds of cubic meters of material can be saved in highway construction with a reduction in the number of SN. Calculations made by the Mechanistic-Empirical method also predict that the critical rutting life of the pavement can increase up to 86% on average with the stabilization of waste marble dust.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : mkarasahin@gelisim.edu.tr, hybucak@gmail.com, \*mtacioglu@mersin.edu.tr / Tel: +90 532 588 1651

## 1. Giriş (Introduction)

Karayolu inşaatında, taban zemini tabakalı karayolu üstyapısının en alt tabakasıdır. Üzerindeki tüm tabakaları taşıyan bu katman çevresel etkiler ve trafik yüklerinin neden olduğu gerilmelere karşı yeterli dayanıma sahip olmalıdır. Karayolu üstyapı inşaatında, en çok karşılaşılan sorunlardan biri, taban zeminin karayolu üstyapısı için gereken mühendislik özelliklerine sahip olmamasıdır [1]. Bu nedenle yol yapım çalışmalarında karşılaşılan kalitesiz zeminler daha kaliteli malzemelerle değiştirilmeli veya mukavemet özellikleri iyileştirilmelidir. Bu yöntemler arasında, uygun olmayan zeminin daha kaliteli malzemelerle değiştirilmesinden çok zemin stabilizasyonu tercih edilmektedir. Çünkü düşük taşıma kapasiteli zeminleri uzaklaştırarak, toprak ikamesi daha az ekonomik olmakla beraber çevresel etkilerde göz önüne alındığında ekolojik değildir [2]. Zemin kütlelerinin güçlendirilmesinin birincil amacı, stabiliteyi artırmak, taşıma kapasitesini artırmak, oturmaları ve yanal deformasyonları azaltmaktır [3]. Mekanik yöntemler ve çeşitli katkı maddelerinin zemine eklenmesi sıklıkla uygulanan iyileştirme yöntemleridir. Katkı maddeleri ile iyileştirme, zayıf zemin yapısına bir veya daha fazla farklı malzeme eklenerek gerçekleştirilir [4]. Bu tür işlemlerde genellikle çimento, kireç, sodyum klorür (NaCl), kalsiyum klorür (CaCl), sodyum hidroksit (NaOH), magnezyum klorür (MgCl), kimyasal gibi katkı maddeleri kullanılır [5-7]. Ancak, düşük taşıma kapasiteli zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için çimento, klorür ve diğer kimyasal katkı maddelerinin kullanılması, atmosfere CO<sub>2</sub> emisyonlarında artışa neden olur. İnşaat işlerinde kullanılan her ton Portland çimentosu için, eşit miktarda CO<sub>2</sub> atmosfere salınır ve küresel ısınmaya katkıda bulunur [8]. Ayrıca bu malzemeleri kullanmak inşaat maliyetlerini de oldukça artırır. Yukarıda belirtilen dezavantajları göz önünde bulundurarak, katı atıkların zemin iyileştirmesinde kullanılması sürdürülebilirlik açısından oldukça önem kazanmaktadır.

Karayolu inşaatı ve yapı işlerinde endüstriyel veya mineral atık malzemelerden yararlanma, sadece inşaat malzemeleri açısından yeni malzeme kullanımını azaltarak olası tasarruflar sağlamakla kalmaz, aynı zamanda doğal inşaat malzemelerine olan talebi de azaltır. Ayrıca imha gerektiren atık madde miktarı azaltılarak çevrenin korunmasına katkı sağlanırken ve tasarruf da sağlanabilir [9]. Karayolu yapım uygulamaları için, alternatif malzeme kullanımına olan ilgi daha yıkım malzemeleri, yakma kalıntıları ve kullanılmış lastikler gibi atıkları içeren geniş malzeme çeşitliliğine yayılmıştır. [10].

Mermer ve traverten gibi doğal taş ürünleri, mimaride estetik yapılar için yaygın olarak kullanılmaktadır ve her iki malzemede genellikle "mermer" olarak adlandırılmaktadır. İnşaat sektörünün hızla gelişmesinden dolayı, bu ürünlerin tüketimi sürekli artmakta ve sonuç olarak doğal taş endüstrisi kesme ve cilalama işlemlerinde yüksek miktarda atık mermer tozu üretmektedir [11]. Aslında mermer toz atıkları, çamur kıvamında su ile karışık halde bulunan malzemelerdir. Çeşitli işlemlerden geçtikten sonra bir mermer bloğunda ağırlık olarak yaklaşık %30 oranında mermer tozu oluşur ve taneciklerinin %90'ı 200 µm 'nin altındadır [12, 13]. Diğer bir deyişle asfalt karışımında filler olarak isimlendirilen malzemeye karşılık gelmektedir. Tehlikeli atık sınıfına girmeyen, kireçtaşı kaynaklı bu atık malzeme, herhangi bir endüstride genellikle doğrudan kullanılmaz ve geri dönüştürülmezse toprağın su süzme kapasitesini düşürme, bitki örtüsünün gelişmesini engelleme, küçük partiküllerin havada uçarak hava kirlenmesine neden olma, göl ve göletlerin su tutma kapasitesini azaltma, çevrenin estetiği bozma gibi birçok çevre sorununa neden olmaktadır [14]. Bazı çalışmalarda mermer tozunun yüksek kimyasal içeriğinden dolayı çevreyi olumsuz etkileyebileceği ve bu atıkların geri dönüştürülmesi gerektiği belirtilmiştir [15, 16]

Birçok araştırmacı farklı kullanım şekilleri deneyerek atık mermer tozlarının geri dönüşümü ile ilgili araştırmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar arasında atık mermer tozlarının zayıf zeminlerin stabilizasyonunda kullanımı ile ilgili çalışmalar önemli bir yer tutmaktadır. Bu konu da ilk araştırmalardan biri Okagbue ve Onyeaobi'nin [17] mermer toz atıklarını kırmızı çöl kumlarının stabilizasyonunda kullanılabilirliği ile ilgili yaptıkları çalışmadır. Araştırmacılar malzemenin uygunluğunu belirlemek için, Proctor, Kaliforniya taşıma oranı (CBR), ve Atterberg limitleri testleri uygulanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar atık mermer tozları ile stabilize edilen kırmızı çöl kumlarının plastisitesinin düştüğünü ve CBR değerlerini yükseldiğini göstermiştir. Bu çalışmanın üzerinden 20 yıldan uzun bir süre geçmesine rağmen günümüzde dünya çapında 100 milyon tonluk üretim kapasitesine ulaşan mermer endüstrisinin ortaya çıkardığı atıklar nedeniyle mermer toz atıklarının tek başlarına veya başka malzemelerle karıştırılarak zayıf zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için kullanımıyla ilgili araştırmalar halen sürmektedir [18]. Saygılı [19] araştırmasında şişen killerin stabilizasyonu için atık mermer tozunun kullanılma olasılığını, kesme mukavemeti parametreleri ve mikro yapısal değişimleri inceleyerek ele almıştır. Test sonuçları, mermer tozu ilavesinin, kil numunelerinin kesme mukavemeti parametrelerini iyileştirdiğini ve şişme potansiyelini azalttığını göstermiştir. Gürbüz [20] donma-çözülme etkileri altındaki bir yol yapımında killi zeminin stabilizasyonu için mermer tozu kullanımının etkinliğini değerlendirmiştir. Elde ettiği test sonuçlarına göre killi zeminde mermer tozu içeriği %10'a ulaştığında, numunelerin serbest basınç dayanımı en üst noktaya yükseldiği ve donma-çözülme döngülerinin sonunda mermer tozu ile stabilize edilmiş killi zeminlerin dayanıklılık davranışı kriteri olarak kütle kaybı yaklaşık %5 olduğu belirlenmiştir. Yarbaşı [21] çalışmasında, kırmızı kil zemine farklı oranlarda mermer tozu ve atık lastik karıştırarak deneyler yapmış ve sonuçta mermer tozunun zeminde mukavemet artışı sağlandığını, atık lastik ilavesinin de zemine elastikiyet kazandırdığı tespit etmiştir. Zorluer ve Gücek [22] yüksek plastisiteli inorganik kile farklı oranlarında mermer tozu ve %10 oranında şişme özelliği gösteren montmorillonit kili ekleyerek hazırladıkları karışımlarda, mermer tozu oranı arttıkça şişme yüzdesinin azaldığını tespit etmişlerdir. Eltwati ve Saleh [23] farklı oranlarda mermer tozu ile karıştırılmış killi zeminlerin performansını CBR ve modifiye proktor testleri ile ölçmüştür. Test sonuçlarına dayanarak yapılan istatistiksel analiz, %10 oranında mermer tozu katkısının killi zeminlerin özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Jain, vd. [24] çalışmalarından elde ettikleri sonuçlara göre atık mermer tozunun zemin plastisitesini iyileştirmek ve şişme davranışını kontrol etmek için etkin bir şekilde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Sivrikaya vd. [25] çalışmalarında kalsitli mermer tozunun ve dolomitik mermer tozunun CH ve MH tipi zeminlerin stabilizasyonunda etkili olduğunu göstermişlerdir. Yılmaz [26], çalışmasında düşük plastisiteli killi bir zemine uçucu kül ve değişik oranlarda mermer tozu ekleyerek zeminin donma-çözülme çevrimi sonucundaki dayanım değerlerini incelemiş ve uçucu kül+mermer tozu karışımlarının sadece uçucu kül içeren karışımlara göre daha yüksek dayanım sağladığını tespit etmiştir. Abdelkader vd. [27] atık mermer tozunu şişen killi zeminler üzerindeki olumlu etkisini belirlemek üzere hazırladıkları numunelere Atterberg limitleri, standart Proctor sıkıştırma, serbest basınç dayanımı, California taşıma oranı, şişme yüzdesi, doğrusal büzülme testleri, XRF ve XRD analizleri yapmışlardır. Elsiragy [28] yumuşak killi zeminin stabilizasyonunda atık mermer tozu kullanımının etkinliğini bir dizi plastisite ve konsolidasyon testleri uygulayarak ölçmüştür. Kullanılan mermer tozu katkısı sayesinde hacimsel büzülme azaltılmış daha az oturma ve daha yüksek kesme mukavemeti ile izotropik sıkıştırılabilir sünek malzeme üretilmiştir. Waheed vd. [29] çalışmalarında değişen oranlarda atık mermer tozu ilavesinin CL-ML tipi zeminlerin göçme potansiyelini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermişlerdir. Yılmaz ve

Demir [30] araştırmalarında kireç ve mermer tozu ile stabilize edilmiş kil zeminin donma-çözülme ve ıslanma-kuruma çevrimleri sonundaki dayanım ve durabilite değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Bazı araştırmalarda mermer toz atıkları filler olarak asfalt karışımı içerisine karıştırılmış ve şehir içi yollarda kaplama tabakasında kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir [31-33]. Dhanapandian vd. çalışmalarında mermer ve granit tozlarının ağırlıkça %50 oranında kil tuğla üretiminde kullanılabileceğini tespit etmişlerdir [34]. Ayrıca Bilgin vd. mermer tozu katkısının endüstriyel tuğlaların fiziksel, kimyasal ve mekanik dayanımına olumlu katkı yaptığını belirtmişlerdir [35]. Balkis çalışmasında polimer elyaf ve atık mermer tozu kullanılarak üretilen kerpiç numunelerin mekanik özelliklerinin iyileştiği sonucuna varmıştır [36]. Çelikten ve Atabey araştırmalarında harç karışımlarını alkali ile aktive etmek amacıyla atık mermer tozu kullanıldığından bahsetmişlerdir [37]. Özdemir çevre kirliliği ve sürdürülebilirlik açısından kendiliğinden yerleşen hafif beton üretiminde %15 oranında atık mermer tozu kullanımının uygun olduğunu belirtmiştir [38]. Elabade çalışmasında köpük beton üretiminde kum ikamesi olarak atık mermer tozu kullanmanın köpük betonun mekanik özellikleri üzerine olumlu katkıları olduğunu tespit etmiştir [39].

Karayolu üstyapısının tasarımında temel amaç, proje süresi boyunca, yol üzerinden geçecek trafiği, büyük deformasyonlara maruz kalmadan, güvenli bir şekilde taşıyabilecek üstyapının toplam kalınlığının ve üstyapıda kullanılacak malzemelerin özelliklerinin saptanmasıdır. Grup indeksi metodu, CBR metodu, AASHTO metodu ve Mekanistik-Ampirik yöntem başlıca üstyapı tasarım yöntemleridir. CBR metodunda zeminin veya granüler malzemenin CBR değeri göz önüne alınarak üstyapı kalınlığı belirlenir. AASHTO metodu, 1960 yıllarında Amerika'da yapılan yol testlerine dayanmakla beraber, üstyapı tasarımında taban zemini taşıma gücü, trafik yükleri, yerel koşullar ve üstyapıda kullanılan malzemelerin direnç özelliklerini dikkate almaktadır. AASHTO metodu yıllar içinde birden fazla revize edilmiştir. 1993 yılında çıkan AASHTO projelendirme rehberinde üstyapının performansı esneklik modülü değeri ile ilişkilendirilmiştir. Esneklik modülü bir malzemenin tekrar eden yük altındaki elastiklik modülüdür [40] Mekanistik-Ampirik tasarım yönteminde ise yük, yükleme alanı, üstyapı tabaka kalınlıkları, malzeme özellikleri ve çevresel etkiler gibi parametreler kullanılarak, üstyapı tabakalarında gerilme ve birim şekil değiştirme hesabı yapılmaktadır. Burada bitümlü kaplama tabakası altında oluşan çekme gerilmelerine bağlı yorulma çatlakları ve taban zemini üzerinde oluşan basınç gerilmelerine bağlı tekerlek izinde oturma üstyapının yük altındaki tepkisini gösteren iki kritik parametredir. Bu şekil değiştirme değerleri hesaplandıktan sonra transfer fonksiyonları kullanılarak üstyapının tahmini ömrü hesaplanabilmektedir [41].

Bu çalışmada, üç farklı tipteki mermer toz atığının çevre üzerindeki olumsuz etkisini en aza indirmek amacıyla bu atıkların iki farklı problemleri karayolu taban zeminin stabilizasyonu için kullanılabilirliği ve literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak yapılan stabilizasyonun üstyapı kalınlığına ve üstyapının tasarım ömrüne olan katkısı araştırılmıştır. Atık mermer tozları %0-10-20-30 ve 40 oranlarında zeminlere eklenmiş ve zeminlerin özelliklerindeki değişiklikler Atterberg limitleri deneyleri, standart Proctor sıkıştırma deneyleri, kesme kutusu deneyleri ve California taşıma oranı (CBR) deneyleri uygulanarak gözlenmiştir. Çalışmanın sonunda test verilerine dayanarak CBR, AASHTO-93 ve Mekanistik-Ampirik

tasarım yöntemleri kullanılarak üstyapı hesaplamaları yapılmıştır. CBR ve AASHTO-93 metodları ile yapılan hesaplamalarda mermer tozu stabilizasyonunun üstyapının kalınlığına olan etkisi belirlenmiştir. Mekanistik-Ampirik tasarım yöntemine dayalı hesaplamalarda ise üstyapıda oluşan gerilme ve şekil değiştirmelere bağlı olarak yapılan stabilizasyonun yolun ömrüne olan katkısı belirlenmiştir. Bu hesaplamalar için KENPAVE yazılımı kullanılmıştır. Deneylerin sonuçlarına göre mermer toz atıklarının zemin stabilizasyonunu artırdığı, atıklar içinde daha ince tane boyutlu olanların iyi performans gösterdiği ve homojen tane dağılımlı atıkların mukavemeti artırdığı tespit edilmiştir. CBR yöntemi ile yapılan gereken üstyapı kalınlığı hesaplarında mermer toz atığı ile yapılan stabilizasyon sayesinde üstyapı kalınlığının yarı yarıya azaltılabileceği, AASHTO-93 yöntemi ile yapılan hesaplamalarda ise SN sayısında 1 puanlık düşüş sağlanabileceği tespit edilmiştir. SN sayısındaki düşüşün karayolu üstyapısı inşaatına olan katkısını belirlemek için 10 metre platform genişliğinde 1 km'lik yol kesimi için hesaplar yapılmış, bitümlü ve granüler tabakalarda kullanılan farklı tiplerdeki malzemelerden yüzlerce metre küp tasarruf sağlanabileceği tespit edilmiştir. KENPAVE yazılımı ile yapılan hesaplamalar da yapılan iyileştirme sayesinde düşük plastisiteli killi zeminler üzerine inşa edilecek üstyapıların tekerlek izi ömrünün ortalama %86 oranına kadar artabileceğini göstermiştir.

## 2. Malzeme ve Yöntemler (Materials and Methods)

### 2.1. Malzemelerin Toplanması ve Özellikleri (Collection and Properties of Materials)

Mermer toz atıklarının stabilizatör olarak kullanımını test etmek üzere iki farklı özellikte zemin numunesi seçilmiştir. Zemin numuneleri Türkiye'nin Batı Akdeniz bölgesindeki üç farklı karayolu güzergahından alınmıştır [42]. Bunların birincisi Burdur ilinin Bucak ilçesi Karapınar mevkiinden yüksek kil oranlı bir malzeme (Zemin-A), diğeri ise yine Bucak sınırları içinde Antalya-Burdur karayolunda Kahveler mevkiini beşinci kilometresi civarından orta derece kil içeren çakıllı bir malzemedir. (Zemin-B). Bitki örtüsünün engellemesi nedeniyle zemin örnekleri yüzeyin 30 cm altından toplanmıştır [43]. Numunelerin araziden alınması TS1901 (1975) standardına göre yapılmıştır. Orijinal zemin örneklerinin Atterberg limitleri, özgül ağırlıkları ve tane büyüklüğü dağılımı belirlenmiş ve Tablo 1'de ASTM'ye göre sınıflandırması sunulmuştur [44-46].

Bu çalışmada kullanılan atık mermer tozları ise yine Türkiye'nin Batı Akdeniz bölgesindeki farklı fabrikalardan (Portsan Marble Co, AsGüreller Co, Kooperatif Marble Co) alınmıştır [42]. Seçilen atık tozlar, Afyon Şeker Beyazı mermeri (AB), Burdur Bej mermeri (BB), Bucak Traverten (BT) dir. AB, BB ve BT'nin mühendislik özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Atıklar %56 kalsiyum oksit içeriği ve %43 tutuşma kaybı (LOI) ile kirece yakındır. Bu durum aynı zamanda bölge doğal taş kaynaklarının kireçli bir yapıya sahip olduğunu gösterir [47]. Fiziksel özellikler, özgül ağırlık, tane boyutu dağılımı ve incelik her MT için farklıdır.

### 2.2. Örneklerin Hazırlanması ve Test Prosedürleri (Sample Preparation and Test Procedures)

Stabilizatör olarak seçilen atık mermer tozlarının çalışmaya konu olan zeminlerin mühendislik özelliklerine olan etkisini belirlemek için

**Tablo 1.** Zemin numunelerinin mühendislik özellikleri. (Engineering properties of soil samples.)

| Zemin        | Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) | Atterberg Limitleri (%) |      |      | Tane Boyutu (%) |     |      | Zemin Sınıfı |      |
|--------------|------------------------------------|-------------------------|------|------|-----------------|-----|------|--------------|------|
|              |                                    | LL                      | PL   | PI   | Çakıl           | Kum | Silt | Kil          | USCS |
| Zemin A (ZA) | 2,67                               | 42,2                    | 21,6 | 20,6 | 38              | 19  | 16   | 27           | CL   |
| Zemin B (ZB) | 2,63                               | 46,0                    | 20,6 | 25,4 | 6               | 21  | 26   | 47           | CL   |

farklı oranlarda mermer tozu ve zemin örneklerinden oluşan karışımlara sırasıyla Atterberg limitleri, proktor sıkıştırma, kesme kutusu ve California taşıma oranı (CBR) testleri yapılmıştır. Stabilizatörler %0, 10, 20, 30 ve 40 oranlarında Zemin-A ve Zemin-B'nin her birine ayrı ayrı eklenmiş ve toplamda 26 farklı karışım elde edilmiştir.

**Tablo 2.** Atık mermer tozlarının mühendislik özellikleri  
(Engineering properties of waste marble powders.)

| Kimyasal Bileşim                    | Birim | AB    | BB    | BT    |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>                    | %     | 0,13  | 0,08  | 0,24  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | %     | 0,06  | 0,03  | 0,08  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | %     | <,04  | <,04  | 0,06  |
| MgO                                 | %     | 1,14  | 0,38  | 0,46  |
| CaO                                 | %     | 56,18 | 56,39 | 56,02 |
| Na <sub>2</sub> O                   | %     | <,01  | 0,02  | 0,01  |
| K <sub>2</sub> O                    | %     | <,04  | <,04  | <,04  |
| TiO <sub>2</sub>                    | %     | <,01  | <,01  | <,01  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>       | %     | 0,02  | 0,02  | <,01  |
| MnO                                 | %     | <,01  | <,01  | <,01  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | %     | 0,001 | 0,002 | 0,019 |
| Ba                                  | ppm   | <5    | 8     | 22    |
| Ni                                  | ppm   | <5    | <5    | <5    |
| Sr                                  | ppm   | 86    | 179   | 325   |
| Zr                                  | ppm   | <5    | <5    | <5    |
| Y                                   | ppm   | <5    | <5    | <5    |
| Nb                                  | ppm   | <5    | <5    | <5    |
| Sc                                  | ppm   | <1    | <1    | <1    |
| LOI                                 | %     | 42,4  | 43    | 43    |
| <b>Fiziksel Özellikler</b>          |       |       |       |       |
| Tane Boyutu (mm)                    |       |       |       |       |
| <0,002 mm                           | %     | 5     | 19    | 58    |
| 0,002-0,5 mm                        | %     | 95    | 81    | 42    |
| Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> ) |       | 2,33  | 2,35  | 2,30  |
| İncelik (m <sup>2</sup> /g)         |       | 4,9   | 6,7   | 7,4   |
| Nem oranı (%)                       |       | 6,8   | 8,0   | 8,5   |

Atterberg limitleri testi ASTM D 4318'e uygun olarak yapılmıştır. Zemin ve mermer tozu numuneleri etüvde kurutulduktan sonra 0,075 mm'lik elekten elendi. Sonra ki aşamada farklı oranlarda mermer tozu zemin numunelerine eklendi ve homojen kuru karışımlar sağlamak amacıyla uygun bir kaşıkla yaklaşık yedi dakika karıştırıldı. Daha sonra hazırlanan örneklerle uygun miktarlarda damıtılmış su eklendi. Macun kıvamında hazırlanan numunelere likit limit ve plastik limit testleri uygulanmıştır [45].

Atık mermer tozlarının zeminlerin optimum su içeriğine ve maksimum kuru birim ağırlığına olan etkilerini belirlemek için ASTM D698'e uygun olarak standart proktor testleri yapılmıştır. Zemin örnekleri 4,75 mm'lik elekten elendi ve daha sonra karışım oranlarına uygun olarak atık mermer tozu örnekleri ile yaklaşık on dakika karıştırıldı [43,46]. Kuru karışımlara uygun miktar su eklendikten sonra 2,5 kg ağırlıklı tokmak kullanılarak her tabaka da 25 vuruşla 3 tabaka halinde standart proktor kalıbın da karışımlar sıkıştırıldı.

Stabilize edilmiş zemin numunelerinin kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için ASTM D 3080'e göre bir dizi kesme kutusu testi yapılmıştır [48]. Tüm numuneler başlangıçta bir standart Proktor kalıbında optimum su içeriğinde ve maksimum kuru birim ağırlıkta sıkıştırılmıştır. Daha sonra bir kesme halkası kullanılarak proktor kalıbı içerisinden dairesel numuneler alınmıştır. Bu testler için, örnekler 60 mm çapında ve 35 mm yüksekliğinde standart kesme

kutusu aparatına yerleştirildi. Kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi kayma mukavemeti parametrelerini elde etmek için, kayma gerilimi( $\tau$ ) değerleri ile normal gerilme( $\sigma$ ) değerleri arasında ilişkiyi gösteren grafik elde edilmiştir. Deney sonuçları  $\tau$ - $\sigma$  eksen takımında işaretlendikten sonra çizilen yenileme zarfı kullanılarak numunelerin kohezyon değerleri ve içsel sürtünme açıları hesaplanmıştır [49].

CBR testi için numuneler, standart Proktor sıkıştırma testinde olduğu gibi optimum su içeriğinde ve maksimum kuru birim ağırlıkta CBR kalıbında sıkıştırılmıştır (ASTM D1883-99) [50]. Gerekli ağırlıklı yerleştirildikten sonra kalıp içindeki numuneler CBR cihazına yerleştirildi ve 19,35 cm<sup>2</sup> kesit alanlı bir pistonun 1,27 mm / dk hızla numunelere batırılmasıyla CBR testleri gerçekleştirildi. CBR değerleri 2,54 mm penetrasyona karşılık gelecek şekilde hesaplanmıştır, çünkü bu her zaman 5,08 mm penetrasyonda elde edilen değerden daha yüksektir [43].

### 2.3. Üstyapı Kalınlığı Hesaplamaları (Pavement Thickness Calculations)

Bu çalışmadan elde edilen deneysel bulgular yardımıyla atık mermer tozu ile zemin iyileştirmesinin üstyapı kalınlığına etkisini belirlemek üzere "CBR" ve "AASHTO-93" metodlarına göre üstyapı tasarımı hesaplamaları yapılmıştır.

CBR metodunda zeminin veya granüler malzemenin CBR değeri göz önüne alınarak üstyapı kalınlığı belirlenir. Belirli bir tabakanın üstüne konması gereken tabakaların kalınlıkları, trafik yüküne bağlı olarak CBR abaqından okunur. Bu yöntemde üstyapının toplam kalınlığı belirlenebildiği gibi üstyapıyı oluşturan tabakaların tek tek kalınlıkları da belirlenebilir. [51]

AASHTO-93 metoduna göre herhangi bir zeminin taşıma gücü zeminin esneklik modülü ( $M_R$ ) ile belirlenebilir. Esneklik modülü laboratuvar deneyleri ile belirlenebildiği gibi malzemelerin fiziksel özelliklerinin değişken olarak kullanıldığı amprik formüller yardımı ile de tahmin edilebilir. Esneklik modülü zemin yapısı, su içeriği ve gerilme koşullarına bağlı olduğundan, her üstyapı tabakasında farklılık göstermektedir. T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Üstyapı Şubesi Müdürlüğü'nde Türkiye'nin farklı bölgelerinden farklı özelliklerdeki malzemeleri temsil edecek şekilde alınan temel, alttemel ve taban zemini numunelerine esneklik modülü deneyi yapılmış, elde edilen deney sonuçlarına göre aşağıdaki genel formül (Eş. 1) geliştirilmiştir [52]:

$$M_R = 1750(D_{BSK} + k)^{0,436} * CBR^{0,4}$$

$$* \left( \frac{1}{1 + \log(\text{No}200)} \right)^{0,35(LL+PI+1)^{0,06}} * \left( \frac{Y_{maks}^2}{\text{No}4} \right)^{0,09 \log(\omega_{opt})} \quad (1)$$

Burada  $M_R$ ; esneklik modülü (psi),  $D_{BSK}$ ; bitümlü sıcak karışım tabakalarının toplam kalınlığı (cm), k; derinlik düzeltme faktörü (cm), CBR; Kaliforniya taşıma oranı (%), No200; 200 nolu elekten geçen malzeme yüzdesi, LL; likit limit (%), PI; plastisite indeksi (%),  $Y_{maks}$ ; maksimum kuru birim ağırlık (g/cm<sup>3</sup>), No4; 4 nolu elekten geçen malzeme yüzdesi,  $\omega_{opt}$ ; optimum rutubetdir (%).

Esneklik modülü değeri hesaplandıktan sonra yoldan beklenen proje şartlarını karşılama olasılığı olan güvenilirlik (R), trafik ve performans tahminin bileşik toplam standart sapma değeri ( $S_o$ ), proje ömrü sonuna kadar yoldan geçeceği tahmin edilen toplam standart dingül yükü tekrür sayısı ( $T_{8,2}$ ), servis kabiliyeti azalma miktarı ( $\Delta PSI$ ) ve esneklik modülüne( $M_R$ ) bağlı olarak ilgili abaklar yardımıyla üstyapı sayısı (SN) hesaplanır. Bundan başka  $T_{8,2}$ ,  $S_o$ ,  $\Delta PSI$  ve standart normal sapma ( $Z_R$ ) değerleri yardımıyla aşağıdaki Eş. 2 kullanılarak SN hesaplanabilir.

$$\log(T_{8,2}) = Z_R * S_O + 9,36 * \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 * \log M_R - 8,07 \quad (2)$$

Üstyapı sayısı hesaplandıktan sonra yol üstyapısı tabakalarında kullanılan malzemelerin izafi mukavemet katsayılarına bağlı olarak üstyapı tabakalarının kalınlıkları hesaplanmaktadır. KGM projelendirme rehberinde malzemelerin izafi mukavemet katsayıları verilmekle beraber SN'e bağlı olarak yapılabilecek üstyapı dizayn tablolarından yararlanılarak üstyapı tabakalarının kalınlıkları da seçilebilmektedir.

#### 2.4. Mekanistik-Amprik Yöntemin Uygulanması (Application of the Mechanistic-Empirical Method)

Mekanistik-Amprik yöntemle dayalı hesaplar KENPAVE kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada hesaplamalar, bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakası, bitümlü temel tabakası ve iyileştirilmiş taban zemininden oluşan 3 tabakalı bir sistem için yapılmıştır. Mermer tozu iyileştirmesine bağlı olarak taban zeminini elastisite modülündeki değişimin üstyapı sisteminin tasarım ömrü üzerindeki etkisi hesaplanmıştır. Şekil 1'de bu çalışma kapsamında KENPAVE yazılımı hesapları için tasarlanan yol enkesiti gösterilmiştir.

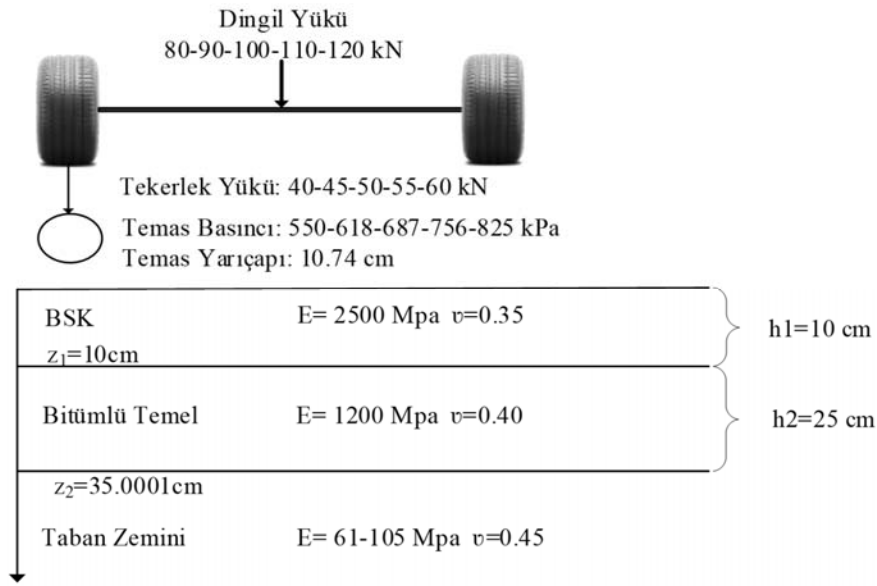
BSK tabakasının elastisite modülü 2500 MPa, poisson oranı 0,35, tabaka kalınlığı (aşınma ve binder tabakaları toplamı) 10 cm, bitümlü temel tabakasının elastisite modülü 1200 MPa, Poisson oranı 0,40, tabaka kalınlığı 25 cm, taban zeminini kalınlığı yarı sonsuz ve Poisson oranı 0,45 olarak seçilmiştir. Taban zeminini elastisite modülü değerleri için saf zemin numunelerine ve karışımlara yapılan deney sonuçlarına

göre hesaplanan 26 farklı esneklik modülü değeri kullanılmıştır. Hesaplarda 80-90-100-110 ve 120 kN olmak üzere beş farklı dingil yükü dikkate alınmıştır. Yüklerin etki ettiği temas alanındaki tekerlek yarıçapı 10,74 cm (ticari araçlar için) olarak seçilmiştir. Samad (2011) çalışmasında 10,74 cm temas yarıçapında 80 kN eşdeğer dingil yükünde tek tekerlek için temas basıncını yaklaşık 550 kPa olarak hesaplamıştır [53]. Bu çalışmada dikkate alınan dingil yükleri için (10,74 cm yarıçap da) temas basınçları sırasıyla yaklaşık 550-618-687-756 ve 825 kPa olarak hesaplanmıştır. Her yük değeri için temas alanının merkezinde ve kaplama yüzeyinden  $z_1=10$  cm ve  $z_2=35,0001$  cm derinliklerde gerilme ve şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Bu derinlik değerleri ile asfalt tabakasının altında oluşan çekme şekil değiştirmeleri ve taban zeminini üzerinde oluşan basınç şekil değiştirmelerini hesaplanabilmektedir. Elde edilen bu tepkiler Eş. 3 ve Eş. 4'de verilen transfer fonksiyonları ile yolun tasarım ömrüne çevrilmiştir [54].

$$N_f = f_1(\epsilon_t)^{-f_2}(E_1)^{-f_3} \quad (3)$$

$$N_d = f_4(\epsilon_c)^{-f_5} \quad (4)$$

Burada;  $N_f$ , yorulma çatlamasını önlemek için izin verilen yük tekrarı sayısı;  $\epsilon_t$ , asfalt tabakası altındaki çekme şekil değiştirmesi;  $N_d$ , tekerlek izi oturmasını sınırlamak için izin verilen yük tekrarı sayısı;  $\epsilon_c$ , taban zeminini üzerindeki basınç şekil değiştirmesi;  $f_1, f_2, f_3, f_4$  ve  $f_5$  ise fonksiyonlara ait katsayılardır. Tablo 3 de görüldüğü gibi bu katsayılar için birden fazla kurum farklı değerler önermişlerdir. Çalışma kapsamında tablo 3 de gösterilen 5 farklı kuruma ait model katsayıları kullanılarak hesaplar yapılmıştır.



Şekil 1. Yol modeli kesiti (Model cross-section)

Tablo 3. Farklı kurumlar tarafından önerilen transfer fonksiyonlarına ait katsayılar [54]  
(Coefficients of transfer functions proposed by different organizations)

| Kurum Adı                                     | f1       | f2    | f3    | f4       | f5    |
|-----------------------------------------------|----------|-------|-------|----------|-------|
| Asphalt Institute (AI)                        | 0,0796   | 3,291 | 0,854 | 1,37E-09 | 4,477 |
| Shell Research (SR)                           | 0,0685   | 5,671 | 2,363 | 6,15E-07 | 4     |
| US Army Corps of Engineers (USACE)            | 497,156  | 5     | 2,66  | 1,81E-15 | 6,527 |
| Belgian Road Research Center (BRRC)           | 4,92E-14 | 4,76  | 0     | 3,05E-09 | 4,35  |
| Transport and Road Research Laboratory (TRRL) | 1,66E-10 | 4,32  | 0     | 1,13E-06 | 3,75  |

### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

#### 3.1. Atterberg Limitleri Testleri (Atterberg's Limits Tests)

Şahit zemin numuneleri ile karşılaştırıldığında atık mermer tozları ile hazırlanan karışımların ölçülen plastisite indisi değerleri literatürdeki çalışmalara benzer şekilde düşüş göstermektedir. Literatürdeki çalışmalara göre malzeme daha stabil hale geldiği için plastisite indisinin düşmesi olumlu bir etkidir.[55]. Zemin-A'ya eklenen mermer toz atık oranı arttıkça plastisite indisinin %21'den %13'lere düştüğü tespit edilmiştir. Plastisite indisi değerleri, toprak dolgu çekirdek inşaatında önerilen ideal aralık olan %14-20 arası [56] yakındır. Zemin-A ya BB ve BT eklenerek oluşturulan karışımların plastisite indisleri sınır değerler arasında kalırken AB eklenerek oluşturulan karışımların alt ve üst limitleri hafif aştığı gözlenmiştir (Şekil 2).

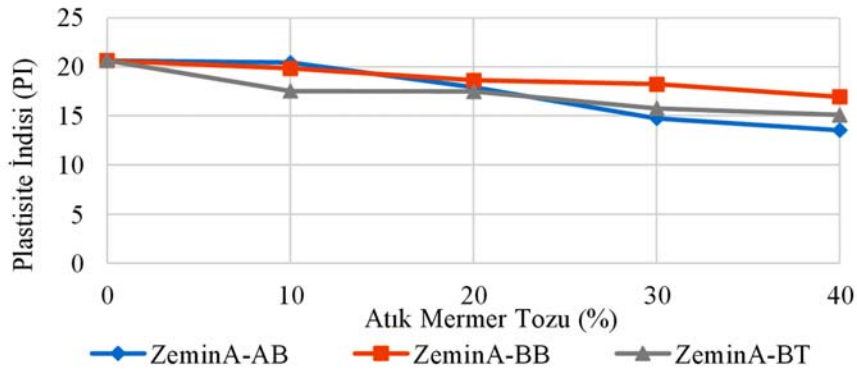
Zemin-B'ye ait saf numunede plastisite indisinin sınır değerleri aştığı tespit edilmiştir. %30 ve %40 oranlarında atık mermer tozu katkısı ile bu zeminin plastisite indisi değeri kısmen uygun değer aralığına düşürülebilmektedir. BB ilavesi Zemin-B'nin plastisite indisini sınır aralığına indiremezken, %40 oranında AB ilavesi ve %30-40 oranlarında BT ilavesi ise Zemin B'nin plastisite indisinin sınır değerler içine düşmesini sağlamıştır. Zemin A ve B'nin mermer tozu ile karıştırılması ile her birinin plastisite sonuçları, Okagbue ve Onyeobi [17] tarafından mermer tozu üzerine yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar ve Khamehchiyan vd. [57] tarafından ham petrol atıkları üzerine yaptıkları deneysel çalışmadan elde ettikleri sonuçlar ile benzerlik göstermektedir (Şekil 3).

Zemin örnekleri ve mermer atıklarının karışımları Birleşik Zemin Sınıflandırmasına (USCS) göre sınıflandırılmıştır. Bu nedenle, Atterberg limitlerinin bu tip malzemelere ilişkin sınır testleri yapılamamıştır. Ancak, Zemin-A ve B'nin her ikisi de CL sınıfıdır. Bu sınıflandırma, zeminlere % 10 ila % 40 arasında mermer tozu ilavesi yapılmasına rağmen değişmemiştir. Ancak, mermer tozu içeriğinin artması, karışımlardaki silt içeriğini arttırmıştır.

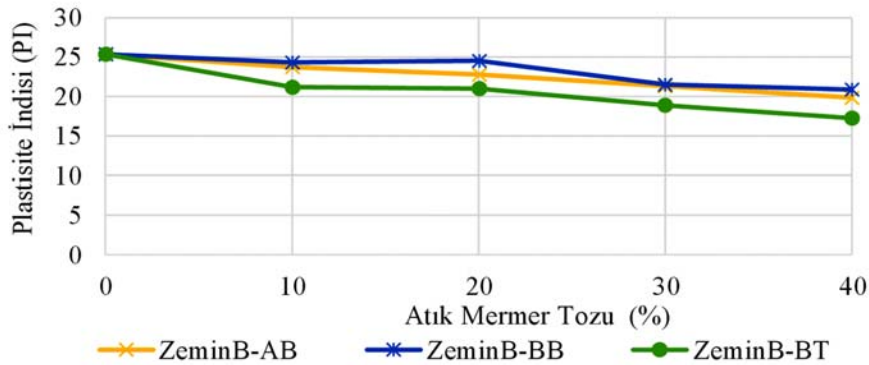
#### 3.2. Standart Proktor Sıkıştırma Testleri (Standard Proctor Compression Tests)

Standart proktor sıkıştırma testlerinden, şimdiye kadar atık stabilizasyonu için yapılan çalışmalara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Optimum su içeriği ve kuru birim ağırlık değerleri birbirine zıt sonuçlar göstermiştir. Genellikle, maksimum kuru birim ağırlık azaldığında optimum su içeriği artmıştır [43, 58]. Ayrıca, maksimum kuru birim ağırlık arttığında, optimum su içeriği azalmıştır.

Zemin-A ile mermer tozu karışımları üzerinde yapılan Proctor deneylerinde, ağırlıklı olarak %20'lik mermer tozu ilavesinde maksimum kuru birim hacim ağırlık elde edilmiştir (Şekil 4a). Maksimum kuru birim hacim ağırlık için önerilen sınır aralık olan >1,6 gr/cm<sup>3</sup> [56] değeri mermer tozu ile hazırlanan tüm karışımlarda sağlanmıştır. BT ilave edilerek hazırlanan karışımlarda maksimum kuru birim hacim ağırlık da kısmen azalma görülse de sonuçlar sınır değerlerden daha düşük değildir. En yüksek değeri ise AB ile hazırlanan karışımlar göstermiştir. Genel olarak %20'lik mermer tozu ilavesinde Zemin-A'nın optimum su muhtevası için en küçük değerlerin almıştır (Şekil 4b). Bu çalışmada kullanılan atık mermer



Şekil 2. Zemin-A ve atık mermer tozu karışımlarının plastisite indisi değişimleri (Plasticity index changes of Soil-A and waste marble powder mixtures)



Şekil 3. Zemin-B ve mermer tozu karışımlarının plastisite indisi değişimleri (Plasticity index changes of Soil-B and waste marble powder mixtures)

tozlarının katkısı ile elde edilen karışımların optimum su muhtevası %15-20 olarak önerilen sınır değer aralığında kalmıştır [56].

Zemin B ve mermer tozu karışımlarının maksimum kuru yoğunluk değerleri için yapılan testlerde, Zemin B'nin kil içerikli olması nedeniyle Zemin A ile hazırlanan karışımlara benzer sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 5a). Yine bu zemin için de %20 mermer tozu oranında maksimum kuru yoğunluk değeri elde edilmiştir. En yüksek değer AB ile hazırlanan karışımlardan elde edilirken en düşük değer BB ile hazırlanan karışımlarda elde edilmiştir. Ancak maksimum kuru yoğunluk değerleri birbirine yakındır. %40 oranında BB katkısında maksimum kuru yoğunluk değeri daha düşük olsa da sınır değerden ( $>1,6 \text{ gr/cm}^3$ ) daha küçük değildir. Zemin B ile hazırlanan karışımların optimum su muhtevası maksimum kuru yoğunluk gibi Zemin A ile hazırlanan karışımlara benzer şekilde %20'de minimum değerleri göstermiştir (Şekil 5b). Zemin B'ye BT ve BB ilave edilerek hazırlanan karışımlarda optimum su muhtevası sınır değer (%15-20) aralığında kalırken, %20 ve %30 oranlarında AB ilave edilerek hazırlanan karışımlarda optimum su muhtevası sınır değerden daha düşüktür. Ortaya çıkan bu farklılığın nedeni AB'nin sahip olduğu kristal yapısıdır.

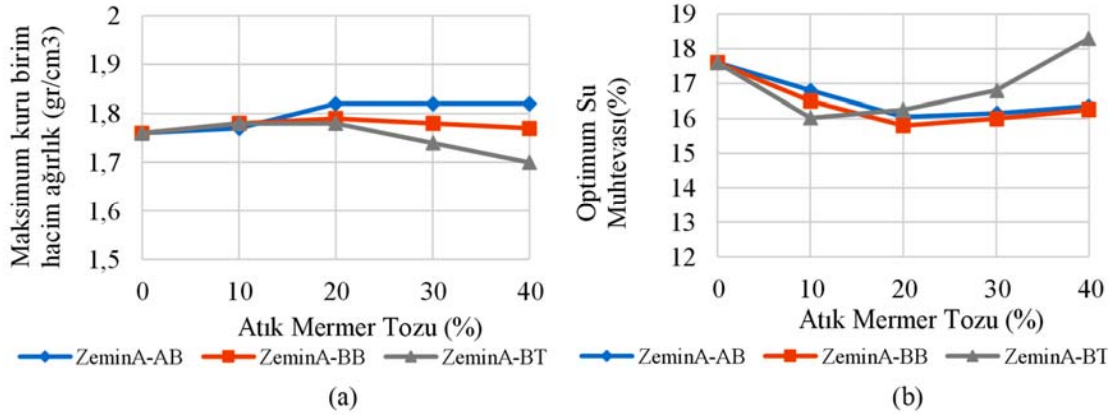
Zemin A ve B'nin AB toz atıkları ile hazırlanan karışımları için maksimum kuru yoğunluk değerleri bu zeminlerin BT ve BB toz atıkları ile hazırlanan karışımlarına göre çok büyük farklılıklar olmasa da daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu durum AB nin kristal yapıda olması, diğer toz atıklara göre daha homojen tane boyutu dağılımına

sahip olması ve içerisinde az miktarda kum tanecikleri barındırması ile açıklanabilir. Bundan başka mermer çamurlarının atık havuzlarında bekleme süreleri de malzemenin yapısının sertleşmesine neden olmaktadır. Numune alımı sırasında, mermerlerin fabrikadaki üretim durumlarına göre AB çamurları 15 gün ve BB çamurları bir gün havuzlarda beklerken, BT çamurları ise havuzlarda bekletilmeden atıldığı görülmüştür.

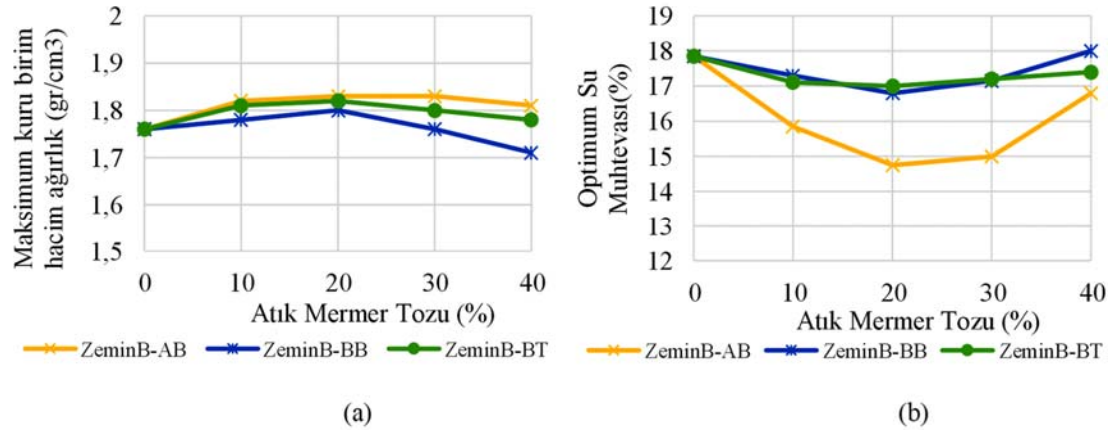
### 3.3. Kesme Kutusu Testleri (Shear Box Tests)

Hazırlanan karışımların kesme kutusu deneylerinin sonuçlarına göre CL tipi Zemin A ve Zemin B'nin kohezyon değerlerinin yaklaşık  $0,4-1,8 \text{ kg/cm}^2$  arasında, içsel sürtünme açılarının da  $17^\circ-50^\circ$  aralığında olduğu tespit edilmiştir. Çalışmalarında farklı tipte zemin numuneleri ve uçucu küller kullanan Prabakar vd. (2004) yaptıkları deneylerde bu çalışmadakine benzer sonuçlar elde etmişlerdir [59].

Üç mermer toz atığı da Zemin A'nın kohezyonunu benzer şekilde etkilemiştir. %10 ve %20 mermer tozu katkısında hafif bir artış olmakla birlikte %30 mermer tozu katkısında kohezyon çok daha fazla yükselmiş ve zirve değerlere ulaşmıştır. %40 mermer tozu katkısında ise bu zeminin hiçbir mermer tozu ilave edilmeden (%0) ölçülen kohezyon değerinden daha düşük değerler elde edilmiştir. (Şekil 6a). İçsel sürtünme açıları da Zemin A'ya üç farklı tipteki mermer tozu ilavesinde birbirine yakın değişim göstermiştir. %10 oranında mermer tozu ilavesi ile yapılan kesme kutusu deneylerinden saf zemin numunesi (%) ile yapılan kesme kutusu deneylerine yakın



Şekil 4. Zemin-A ve mermer tozu karışımlarının Proctor deneylerinin sonuçları  
(Results of Proctor test of Soil-A and waste marble dust mixtures)



Şekil 5. Zemin B ve mermer tozu karışımlarının Proctor deneylerinin sonuçları  
(Results of Proctor test of Soil-B and waste marble dust mixtures)

içsel sürtünme açısı değerleri elde edilmiştir. %20-30 ve 40 oranlarında mermer tozu ilavesi ile hazırlanan karışımlarda da yaklaşık benzer değerler elde edilmiş her üç oranda da içsel sürtünme açısının azalması fazla olmuştur (Şekil 6b).

Zemin A ve mermer toz atığı karışımlarının mukavemeti, %30 oranında mermer tozu atığı ilavesinde sınırlı bir artış gösterse genel olarak saf zemin numunesine göre azalmıştır. Dayanımdaki düşüş en az %10'luk atık mermer tozu ilavesinde meydana gelmiştir. Bu nedenle bu tip zeminlere ilave edilebilecek atık mermer tozu oranı %10'u geçmemelidir.

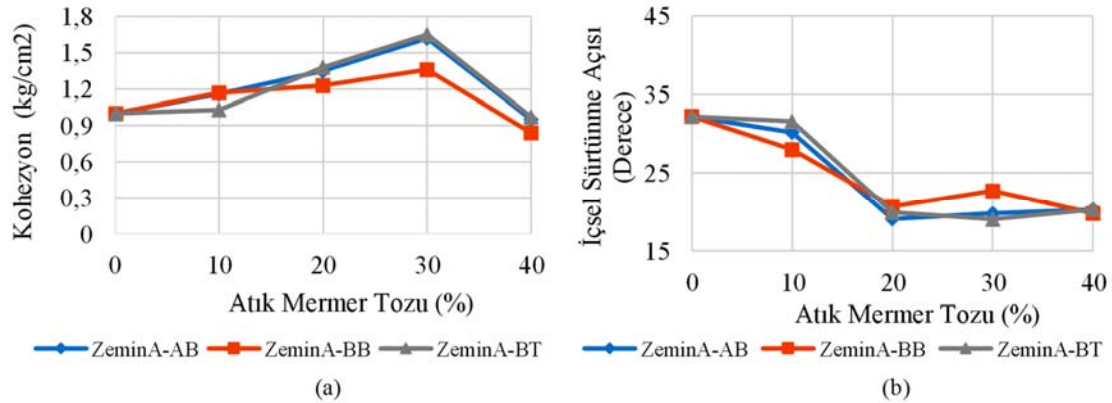
Kil içerikli Zemin B'ye %10 mermer tozu katkısında kohezyon sınırlı artarken AB ve BB'nin %20, %30 ve %40 oranlarında ilave edildiği karışımlarda kohezyon değerleri kısmen düşmüştür. BT'nin ise %10–20-30 oranlarında ilave edildiği karışımlarda kohezyon değerleri artmıştır. %30 BT ilavesinde Zemin B ile oluşturulan karışımlarda zirve değerler elde edilirken %40 BT katkısında diğer oranlara göre daha düşük kohezyon elde edilmiştir. BT toz atıklarının diğer iki mermer toz atığına göre daha yumuşak olması ve çok ince tanelerden oluşmasının bu duruma neden olduğu düşünülmektedir. AB ve BB atıkları ise kum içeriği kısmen fazla ve BT ye göre daha sert malzemelerdir. Aynı zamanda AB ve BB toz atıklarının %10 dan daha fazla ilavesi bu atıkların kum içeriği nedeniyle kil içerikli Zemin B'nin kohezyon değerinin düşmesine neden olmuştur (Şekil 7a). İçsel sürtünme açısı değerleri Zemin B için %10–30 arasında AB ve BB ilavesi ile artış gösterirken her oranda BT katkısında düşmüştür (Şekil 7b). Zemin B sınıfındaki taban zeminleri için AB ve BB atıkları kullanılarak oluşturulan karışımların içsel sürtünme açısı ve kohezyon

değerleri birlikte dikkate alındığında mukavemette artış olmuştur. Bununla birlikte BT'nin %30 oranında ilave edildiği durumda kohezyondaki yükselme mukavemeti sınırlı artırsa da BT ilavesi ile hazırlanan tüm karışımların mukavemet değeri saf toprak numunesine göre düşmüştür.

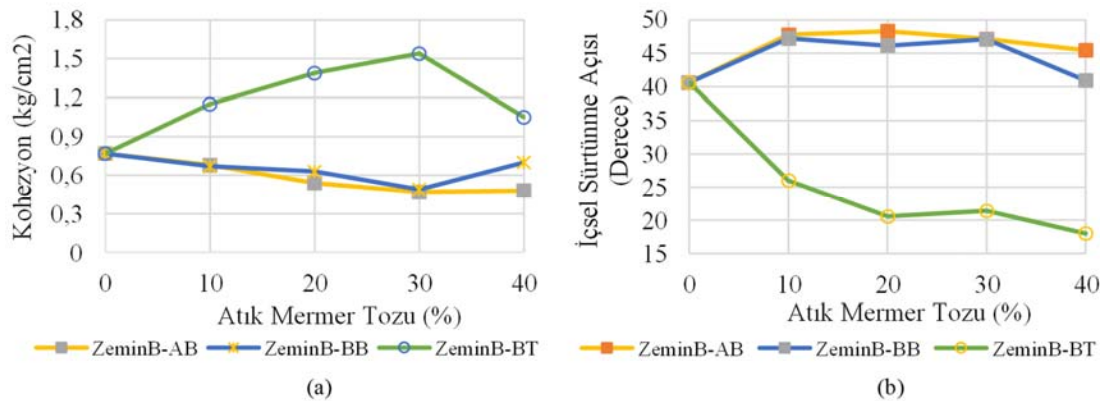
### 3.4. CBR Testleri (CBR Tests)

Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneylerinden elde edilen sonuçlar mermer toz atığı eklenen zeminlerin CBR değerlerinin arttığı görülmüştür (Şekil 7). Okagbue ve Onyeaobi'nin (1999) da yaptıkları çalışma, silt içerikli bir malzeme tipi olan mermer toz atıkları ile silt içeriği daha düşük olan malzemelerin karıştırılmasıyla, elde edilen karışımların CBR değerlerinin saf malzemeye göre daha yüksek çıktığını ve CBR değerlerinin silt oranına göre değiştiğini göstermiştir [17]. Bu çalışmada kullanılan farklı tiplerdeki zemin numunelerine BT ve BB'den %10 oranında eklenmesiyle bu numunelerin CBR değerlerinin genellikle 2-3 kat arttığı, aynı miktarda AB eklenen zemin numunelerinin CBR değerinin ise ancak 0,5 kat artabildiği tespit edildi. Bu sonuçlar, zemin numunelerinin CBR değerlerinin artışında kullanılan malzemelerin kil-silt tane boyutu oranlarının (Tablo1 ve Tablo 2) büyük bir etken olduğunu göstermiştir. Atık mermer tozunun zeminlerin mukavemet değerlerine olan katkısını belirlemek için her bir karışım için elde edilen deneysel bulgulara dayanarak boşluk oranı hesabı yapılmış ve Tablo 4'de sunulmuştur.

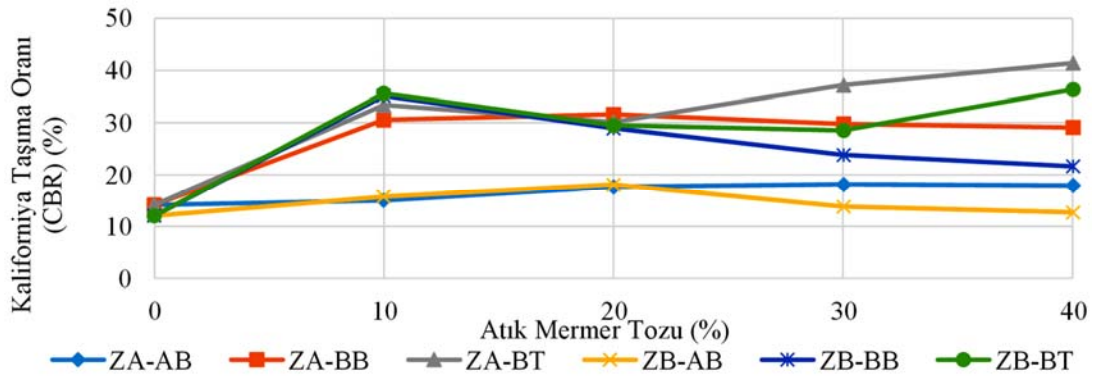
Karışımlarda mermer tozu oranı arttığında, genel olarak maksimum kuru birim hacim ağırlığın arttığı gözlenmiştir (Şekil 4 ve Şekil 5). ZeminA-AB, ZeminA-BB, ZeminB-AB, ZeminB-BB ve ZeminB-BT



Şekil 6. Zemin A ve mermer tozu karışımlarının kesme kutusu deneylerinin sonuçları  
(Results of shear box test of Soil-A and waste marble dust mixtures)



Şekil 7. Zemin B ve mermer tozu karışımlarının kesme kutusu deneylerinin sonuçları  
(Results of shear box test of Soil-B and waste marble dust mixtures)



Şekil 8. Zemin numuneleri ve atık mermer tozu karışımlarının CBR testi sonuçları  
(CBR test results of soil samples and waste marble powder mixtures)

Tablo 4. Zemin numuneleri ve atık mermer tozu karışımlarının boşluk oranları  
(Voids ratios of soil samples and waste marble powder mixtures)

| Karışım   | Atık Mermer tozu Oranı (%) | Boşluk Oranı | Karışım   | Atık Mermer tozu Oranı (%) | Boşluk Oranı |
|-----------|----------------------------|--------------|-----------|----------------------------|--------------|
| Zemin A   | 0                          | 0,804        | Zemin B   | 0                          | 0,808        |
|           | 10                         | 0,782        |           | 10                         | 0,719        |
| ZeminA-AB | 20                         | 0,722        | ZeminB-AB | 20                         | 0,693        |
|           | 30                         | 0,723        |           | 30                         | 0,697        |
|           | 40                         | 0,726        |           | 40                         | 0,742        |
|           | 10                         | 0,767        |           | 10                         | 0,779        |
| ZeminA-BB | 20                         | 0,747        | ZeminB-BB | 20                         | 0,752        |
|           | 30                         | 0,760        |           | 30                         | 0,797        |
|           | 40                         | 0,773        |           | 40                         | 0,863        |
|           | 10                         | 0,760        |           | 10                         | 0,747        |
| ZeminA-BT | 20                         | 0,763        | ZeminB-BT | 20                         | 0,736        |
|           | 30                         | 0,812        |           | 30                         | 0,758        |
|           | 40                         | 0,879        |           | 40                         | 0,781        |

karışımlarındaki mermer tozu oranı %20 ye kadar çıkarıldığında kuru birim hacim ağırlıkta artışlar gözlenmiştir. Buna göre, mermer tozu içeriğinin karışımda artması boşlukları doldurarak, daha sıkı, daha stabil ve dayanımı yüksek bir stabilize bir zemin elde edilmesine neden olmuştur. Ayrıca, optimum su içeriğinde ve boşluk oranlarında mermer tozu oranı arttığında azalmalar olduğu görülmüştür (Şekil 4, Şekil 5 ve Tablo 4). Mermer tozunun tane çapının küçük olması, karışımların optimum su muhtevası artışını tetiklemesi beklenir, ancak bu durumun gerçekleşmediği görülmüştür. Bu sonuçlara göre, mermer tozunun daha çok boşlukları doldurduğu ve sıkışma için ilave bir suya gereksinim duymadığı sonucuna ulaşılabilir. Ayrıca, artan mermer tozu içeriğine bağlı olarak belli bir orana kadar kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin arttığı görülmektedir (Şekil 6, Şekil 7 ve Tablo 4) Burada, kohezyonun artmasının zemin daneleri arasında bir köprü görevi yaparak tanecikler arasındaki bağı güçlendirdiği düşünülmektedir. Yukarıdaki sonuçların ışığında, zemine, belli oranda mermer tozu ilavesi maksimum kuru birim ağırlık, kohezyon ve içsel sürtünme açıları üzerinde olumlu etki yaratmakta ve buna bağlı olarak da CBR değerlerinde artışa neden olmaktadır.

### 3.5. Atık Mermer Tozu Katkısının Karayolu Üstyapı Kalınlığına Etkisi (The Effect of Waste Marble Powder Additive on Highway Pavement Thickness)

#### 3.5.1. CBR metoduna göre yapılan hesaplamaların sonuçları (The results of CBR method calculations)

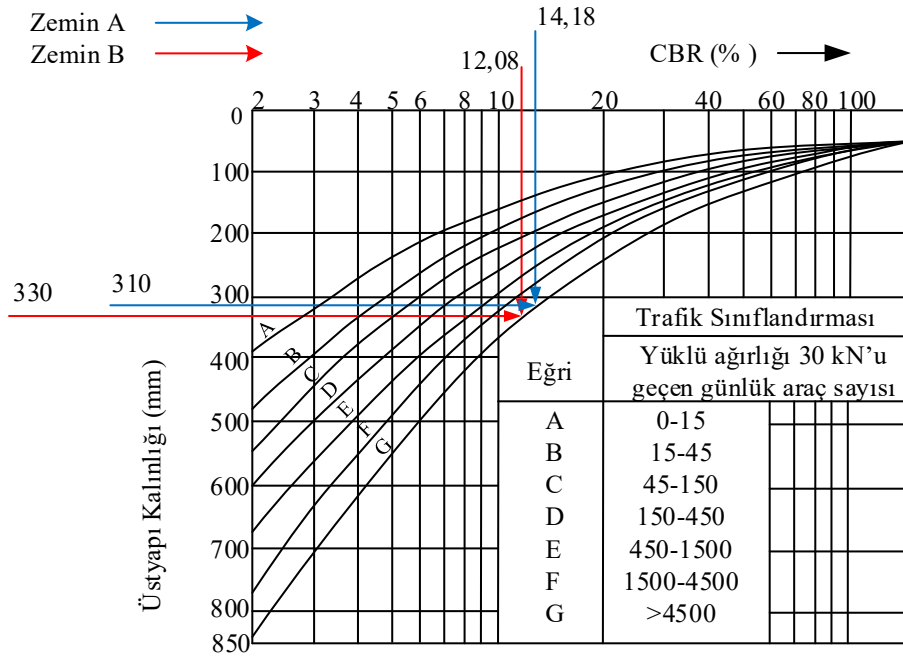
Şekil 9'de CBR abağında en yüksek trafik hacmini temsil eden "G Eğrisi" üzerinden katkısız Zemin A ve katkısız Zemin B

numunelerinin CBR değerleri için okunan toplam üstyapı kalınlıkları (Zemin A= 310mm; Zemin B=330 mm) gösterilmiştir.

Bu çalışmada oluşturulan karışımlar için CBR abağının "G Eğrisi" üzerinden okunan üstyapı kalınlıklarının değişimi Tablo 5'de gösterilmiştir. Tablo 5'de; Zemin A'ya %10 oranında AB eklemenin üstyapı kalınlığına önemli bir etkisi olmadığı ve %20-30 ve 40 oranlarında AB eklemenin ise üstyapı kalınlığını ortalama %10 oranında azalttığı görülmektedir. Aynı zemine %10-20-30-40 oranlarında BB eklemek üstyapı kalınlığını %40 oranında azaltırken, %30 ve %40 oranlarında BT eklenmesi ise üstyapı kalınlığını yarı yarıya azaltmıştır. Zemin B ile hazırlanan karışımlar için CBR abağı okumaları değerlendirildiğinde %20 oranında AB katkısının üstyapı kalınlığını %18 oranında azalttığı, diğer oranlarda AB katkısının üstyapı kalınlığına önemli bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Zemin B'ye %10 oranında BB ve BT eklenmesi ise üstyapı kalınlığını yarı oranda azaltmıştır.

#### 3.5.2. AASHTO-93 metoduna göre yapılan hesaplamaların sonuçları (The results of AASHTO-1993 method calculations)

Bu çalışmada KGM Üstyapı projelendirme rehberinde de öneri olarak verilen değerler arasından,  $D_{BSK}$  değerini 22,  $k$  değerini 17 kabul ederek ve elde edilen deney sonuçlarına dayanarak zemin numuneleri ve atık mermer tozu karışımları için esneklik modülü değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra yine üstyapı projelendirme rehberinden devlet yolları üstyapı tasarımında kullanılan %85 güvenilirlik değeri için  $Z_R=-1,037$  ve  $S_0=0,45$  olarak seçilmiş,  $T_{8,2}= 10 \cdot 10^6$  ve  $\Delta PSI=2,0$  kabul edilerek SN değerleri Eş. 2 kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir.



**Şekil 9.** Katkısız Zemin A ve B için CBR abağından üstyapı kalınlıklarının okunması  
(Reading of pavement thicknesses from the CBR chart for undoped Soil-A and B)

**Tablo 5.** Zemin numuneleri ve mermer tozu karışımları için CBR abağının “G Eğrisi” üzerinden okunan üstyapı kalınlıkları  
(Pavement thicknesses read from the “G Curve” of the CBR chart for soil samples and waste marble powder mixtures)

| Karışım   | Atık Mermer tozu Oranı (%) | Üstyapı Kalınlığı (mm) | Karışım   | Atık Mermer tozu Oranı (%) | Üstyapı Kalınlığı (mm) |
|-----------|----------------------------|------------------------|-----------|----------------------------|------------------------|
| Zemin A   | 0                          | 310                    | Zemin B   | 0                          | 330                    |
|           | 10                         | 299                    |           | 10                         | 300                    |
| ZeminA-AB | 20                         | 275                    | ZeminB-AB | 20                         | 270                    |
|           | 30                         | 268                    |           | 30                         | 310                    |
|           | 40                         | 271                    |           | 40                         | 320                    |
|           | 10                         | 180                    |           | 10                         | 175                    |
| ZeminA-BB | 20                         | 179                    | ZeminB-BB | 20                         | 190                    |
|           | 30                         | 185                    |           | 30                         | 210                    |
|           | 40                         | 190                    |           | 40                         | 220                    |
|           | 10                         | 175                    |           | 10                         | 167                    |
| ZeminA-BT | 20                         | 180                    | ZeminB-BT | 20                         | 190                    |
|           | 30                         | 165                    |           | 30                         | 195                    |
|           | 40                         | 150                    |           | 40                         | 165                    |

**Tablo 6.** Zemin numuneleri ve mermer tozu karışımları için  $M_R$  ve SN değerlerinin değişimi  
(Variation of  $M_R$  and SN values for soil samples and waste marble powder mixtures)

| Karışım   | Mermer tozu Oranı (%) | $M_R$    | SN    | Karışım   | Mermer tozu Oranı (%) | $M_R$    | SN    |
|-----------|-----------------------|----------|-------|-----------|-----------------------|----------|-------|
| ZeminA    | 0                     | 10337,27 | 10,44 | ZeminB    | 0                     | 8937,918 | 10,96 |
|           | 10                    | 10616,74 | 10,34 |           | 10                    | 10233,39 | 10,47 |
| ZeminA-AB | 20                    | 11429,8  | 10,08 | ZeminB-AB | 20                    | 10943,96 | 10,23 |
|           | 30                    | 11557,93 | 10,04 |           | 30                    | 9848,363 | 10,61 |
|           | 40                    | 11464,52 | 10,07 |           | 40                    | 9414,411 | 10,77 |
|           | 10                    | 14104,14 | 9,37  |           | 10                    | 13798,89 | 9,44  |
| ZeminA-BB | 20                    | 14290,97 | 9,33  | ZeminB-BB | 20                    | 12851,5  | 9,68  |
|           | 30                    | 13803,38 | 9,44  |           | 30                    | 12693,43 | 9,72  |
|           | 40                    | 13565,04 | 9,50  |           | 40                    | 11269,1  | 10,13 |
|           | 10                    | 14775,96 | 9,22  |           | 10                    | 14054,67 | 9,38  |
| ZeminA-BT | 20                    | 14020,58 | 9,39  | ZeminB-BT | 20                    | 13085,81 | 9,62  |
|           | 30                    | 15022,35 | 9,17  |           | 30                    | 12898,35 | 9,67  |
|           | 40                    | 15330,31 | 9,10  |           | 40                    | 14205,56 | 9,35  |

Tablo 6’da görüldüğü gibi Zemin A ve B’ye bu çalışmada belirtilen oranlarda mermer tozu katkısı yapıldığında  $M_R$  değerleri yükselmiş ve buna bağlı olarak da SN değerleri de düşmüştür. Zemin A’ya %40 oranında BT eklemek bu zeminin MR değerini yaklaşık %50 oranında artırırken böyle bir karışımdan oluşacak taban zemini üzerine inşa edilecek bir üstyapı için gereken SN sayısının da 1,34 puan düşmesini sağlamıştır. Aynı şekilde Zemin B içinde %40 oranında BT eklemek bu zeminin MR değerini yaklaşık %60 oranında artırırken böyle bir karışımdan oluşacak taban zemini üzerine inşa edilecek bir üstyapı için gereken SN sayısının da 1,61 puan düşmesini sağlamıştır. Tablo 7’de 1 puanlık SN azalması ile KGM Üstyapı projelendirme rehberinde verilen üstyapı tabaka tipleri ve bu tabakaların izafi mukavemet katsayıları göz önüne alınarak hesaplanan tabaka

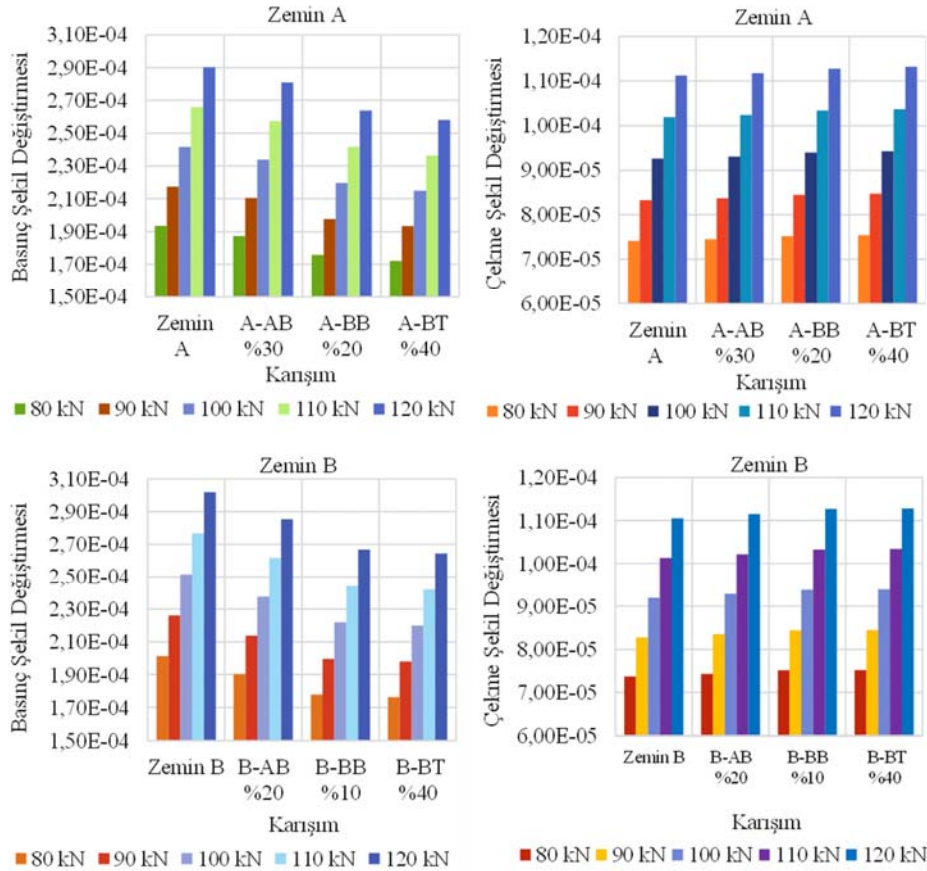
kalınlıklarında sağlanabilecek azalma (cm) ve 10 metre platform genişliğinde tasarlanan bir yol için 1 kilometrede sağlanabilecek malzeme kazançları ( $m^3$ ) gösterilmiştir. Tablo 6 ve Tablo 7’deki değerlere göre genel bir değerlendirme yapılacak olursa Zemin A ve Zemin B gibi düşük plastisiteli killi zeminlere %20 oranında AB, BB veya BT eklemenin  $M_R$  ve SN değerleri ile üstyapıda kullanılacak malzeme miktarlarına önemli katkıları olacağı söylenebilir.

### 3.5.3. KENPAVE modelinin sonuçları (Results of KENPAVE model)

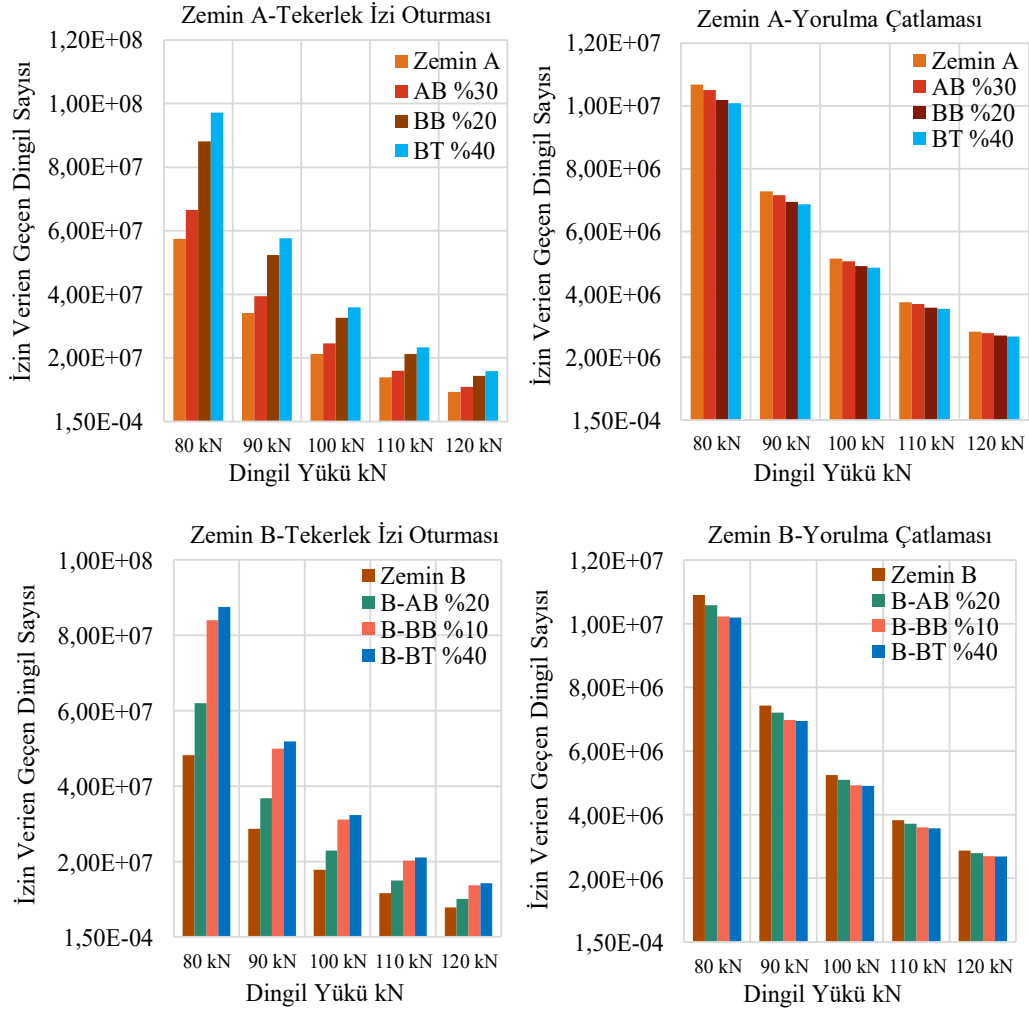
KENPAVE ile 26 farklı taban zemini esneklik modülü değeri ve 5 farklı dingil yükü göz önüne alınarak toplamda 130 farklı gerilme-şekil değiştirme hesabı yapılmıştır. Her bir mermer tozu katkısı için

**Tablo 7.** 1 puanlık SN azalması ile tabaka kalınlığında azalma ve malzeme kazançları  
(Layer thickness reduction and material gains with 1 score SN reduction.)

| Tabaka Tipi                      | İzafi Mukavemet Sayıları | Tabaka Kalınlığında Azalma (cm) | Hesaplanan Malzeme kazancı ( $m^3$ ) |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| <b>BSK TABAKALARI</b>            |                          |                                 |                                      |
| Taş mastik Asfalt                | 0,44                     | 2,3                             | 230                                  |
| Asfalt Betonu Aşınma             | 0,42                     | 2,4                             | 240                                  |
| Asfalt Betonu Binder             | 0,4                      | 2,5                             | 250                                  |
| Bitümlü Temel                    | 0,36                     | 2,8                             | 280                                  |
| <b>TEMEL TABAKASI</b>            |                          |                                 |                                      |
| Çimento Bağlayıcı Granüler Temel | 0,23                     | 4,3                             | 430                                  |
| Plent-Miks Temel                 | 0,15                     | 6,7                             | 670                                  |
| Granüler Temel                   | 0,14                     | 7,1                             | 710                                  |
| <b>ALTTEMEL TABAKASI</b>         |                          |                                 |                                      |
| Kırmtaş Alttemel                 | 0,13                     | 7,7                             | 770                                  |
| Kum-Çakıl Alttemel               | 0,11                     | 9,1                             | 910                                  |



**Şekil 10.** Karışımlar için basınç ve çekme şekil değiştirmelerinin değişimi (Variation of compressive and tensile strains for mixtures)

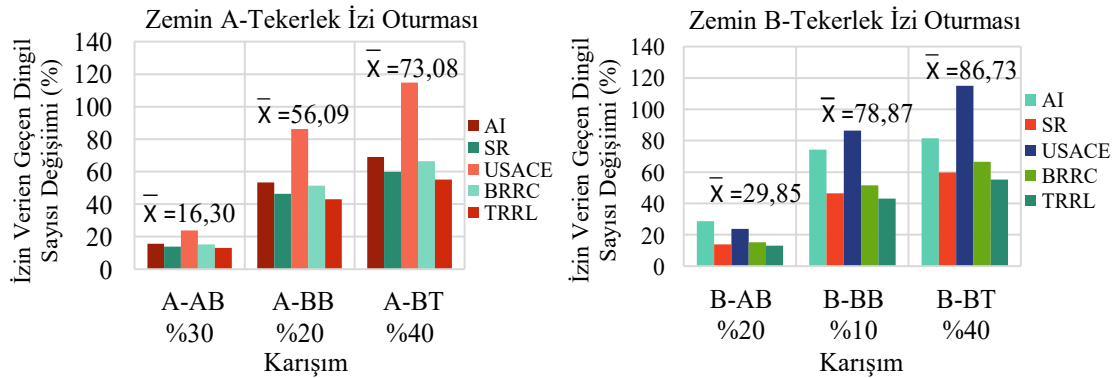


**Şekil 11.** Asphalt Institute katsayılarına göre karışımlar için izin verilen dingil yükü sayılarının değişimi.  
(Variation of the allowed number of axle loads for mixtures according to Asphalt Institute)

üstüyaşı sisteminde oluşan şekil değiştirmeler arasında en büyük değişimler Zemin A için %30 AB, %20 BB ve %40 BT katkısı oranlarında, Zemin B için de %20 AB, %10 BB ve %40 BT oranlarında hesaplanmıştır. Şekil 10 da görüldüğü gibi bu çalışmada kullanılan iki farklı zeminle oluşturulan karışımların hesaplanan esneklik modüllerinin değişimi (Tablo 6) birbirine yakın olduğu için üstüyaşı sisteminde hesaplanan şekil değiştirmelerin değişimi de benzer özellik göstermiştir. Artan dingil yükü ile doğru orantılı olarak üstüyaşı sisteminde meydana gelen basınç ve çekme şekil değiştirmelerinin her ikisi de beklenildiği gibi artmaktadır. Mermer tozu iyileştirmesine bağlı olarak taban zemini esneklik modülündeki artış asfalt tabakası altındaki çekme şekil değiştirmesini arttırırken taban zemini üzerinde oluşan basınç şekil değiştirmesini ise azaltmıştır. Hesaplanan tepki değerleri ile Tablo 3’de verilen katsayılar kullanılarak asfalt tabakasının ve taban zeminin üzerinden geçmesine izin verilen dingil yükü sayıları hesaplanmıştır. Şekil 11’de Asphalt Institute nin önerdiği katsayılar göre tekerlek izinde oturma ve yorulma çatlama için hesaplanan izin verilen dingil yükü sayılarının değişimi gösterilmiştir. Zemin A ve Zemin B için üretilen grafikler yapılan hesaplardaki değişim oranlarının birbirine yakın olması nedeniyle benzer desenler göstermektedir. Artan dingil yükü

miktarı her iki bozulma tipi için yoldan geçmesine izin verilen toplam dingil sayısını azaltmaktadır. Aynı ayrı her bir dingil yükü değeri için mermer tozu iyileştirmesi ile tekerlek izinde oturmaya karşı yoldan geçmesine izin verilen dingil sayısında artış olmuştur. Ancak yorulma çatlama mermer tozu iyileştirmesi ile izin verilen dingil sayısında azalma olmuştur. Mermer tozu iyileştirmesine bağlı olarak esneklik modülündeki artış yolun tekerlek izine karşı ömrünü arttırırken yorulma kırılmasına karşı ömrünü olumsuz etkilemiştir. Ancak burada hedeflenen tabana zemini iyileştirmesi olduğu için atık mermer tozu ile yapılan stabilizasyonun yolun ömrüne olumlu katkıları olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 12’de gösterilen grafiklerde AI, SR, BRRC, USACE ve TRRL kuruluşlarının önerdiği katsayılar ile bu çalışmada tasarlanan yol modeli için 80 kN dingil yükünde kritik tekerlek izi oturma meydana gelmeden yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayılarındaki değişim yüzdesi gösterilmiştir. Her iki grafikte □ ile gösterilen değerler 5 farklı kuruluş önerdiği katsayılarla hesaplanan yol ömrü artış yüzdesini aritmetik ortalamasını göstermektedir. Mermer tozu stabilizasyonunun sağladığı katkı ile taban zeminlerinin ömründeki ortalama artış yüzdesi; Zemin A için %30 AB katkısında %16,30,



**Şekil 12.** 80 kN dingil yükü için farklı kurumların önerdiği katsayılar ile hesaplanan kritik tekerlek izi ömrü artışı değerlerinin değişimi  
(Variation of critical rutting life increase values calculated with coefficients suggested by different organisations for 80 kN axle load)  
(AI: Asphalt Institute; SR: Shell Research; BRRR: Belgian Road Research Center; USACE: US Army Corps of Engineers; TRRL: Transport and Road Research Laboratory)

**Tablo 8.** Farklı dingil yükleri için ortalama tekerlek izi oturması ömrü artış yüzdeleri  
(Average rutting life increment percentages for different axle loads)

| Zemin A     | Zemin B  |          |          |
|-------------|----------|----------|----------|
| Dingil Yükü | A-AB %30 | A-BB %20 | A-BT %40 |
| 80 kN       | 16,30    | 56,09    | 73,08    |
| 90 kN       | 16,13    | 56,19    | 72,90    |
| 100 kN      | 16,20    | 56,14    | 72,96    |
| 110 kN      | 16,05    | 55,83    | 72,71    |
| 120 kN      | 16,11    | 56,10    | 73,10    |

%20 BB katkısında %56,09 ve %40 BT katkısında %73,08 olarak hesaplanırken Zemin B için %20 AB katkısında %29,85, %10 BB katkısında %78,87 ve %40 BT katkısında %86,73 olarak hesaplanmıştır.

Hesaplarda kullanılan dingil yükleri için hesaplanan, kritik tekerlek izi oturması meydana gelmeden yoldan geçmesine izin verilen dingil yükü sayısındaki ortalama artış yüzdeleri Tablo 8 de gösterilmiştir

Tablo 8'e göre mermer tozu stabilizasyonu ile farklı dingil yükleri altında tekerlek izi oturması ömrünün ortalama artışı Şekil 12 de ki grafiklere benzer özellik göstermektedir.

## 5. Sonuçlar (Conclusions)

Mermer toz atıklarının düşük plastisiteli killi zeminlerin stabilizasyonu amacıyla yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; düşük plastisiteli killi zeminlere mermer toz atığı eklenmesiyle, bu tip zeminlerin plastisite değerlerinin düştüğü ve maksimum kuru yoğunluk değerinin ise arttığı gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, mermer toz atıklarının düşük plastisiteli killi zeminlerin stabilizasyonunda %10-%20 aralığında kullanılabileceği görülmüştür. Zira, bu iki oran arasında kohezyon, içsel sürtünme açısı ve CBR değerlerinde artışlar gözlenmiştir.

Zemin numuneleri ve mermer toz atıkları ile yapılan karışımların mukavemet değerlerinin ise genel olarak mermer toz atığı içeriği %10 olduğunda arttığı gözlemlendi. Proctor deneylerinin sonuçlarına benzer olarak tane boyutunun mukavemet üzerinde de etkili olduğu ve ince tane boyutlu atık çamurların, ince taneli malzeme içeriği yüksek olan zeminlerde kullanılmaması gerektiği tespit edildi. CBR deneylerinin sonuçları da mermer toz atıklarının kil-çakıl ve kil ağırlıklı karayolu taban zeminlerinde %10 civarında katkı olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Zeminlerin taşıma gücüne olumlu katkıları göz önüne

alındığında ince taneli mermer toz atıklarının stabilizasyonda kullanımı daha uygundur.

Üstyapı tasarım hesaplamalarına göre de %10-%20 oranlarında özellikle BB ve BT mermer toz atığı kullanılarak yapılacak olan stabilizasyonlarda CBR yöntemine göre gereken üstyapı kalınlığının neredeyse yarı yarıya azalabileceği, AASHTO-93 metoduna göre ise 1 puanlık üstyapı sayısı düşüşü sağlanabileceği öngörülmektedir.

KENPAVE hesapları mermer tozu iyileştirmesinin düşük plastisiteli killi zeminlerin tekerlek izi oturması ömrünün %86 oranına kadar artabileceğini göstermiştir.

Bu çalışmadan elde edilen tüm sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde; atık mermer tozlarının düşük plastisiteli kil zeminlerde %10-20 arasında değişen oranlarda stabilizasyon malzemesi olarak yol altyapısında kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Portland çimentosu, kireç tozu veya kimyasal ürünler gibi zemin stabilizasyonunda kullanılan malzemeler yerine mermer toz atığı kullanmanın sürdürülebilir bir uygulama olduğu ve mermer toz atıklarının bol miktarda bulunduğu yerleşimlerde, oldukça ekonomik çözümler sunmaktadır.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Bu araştırma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir [hibe sayıları 105M-019].

## Kaynaklar (References)

- Gungat L., Putri, E.E., Makinda, J., Effects of Oil Palm Shell and Curing Time to the Load-Bearing Capacity of Clay Subgrade, Procedia Eng., 54, 690-697, 2013.
- Al-Swaidani A., Hammoud I., Ayman Meziab A., Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil, J. Rock Mech. Geotech. Eng. 8, 714-725, 2016.

3. H. Vidal, The principle of reinforced earth, Highway Research Record, 282, 1-16, 1969
4. Vural İ., Utilization of construction demolition waste in soil Improvement, Academic Platform Journal of Engineering and Science, 7 (1), 1-6, 2019.
5. Durmaz, M., Killi zeminlerin kireç ile stabilizasyonunun deneysel çalışması ve sonuçların istatistiksel değerlendirilmesi, European Journal of Science and Technology, 18, 973-980, 2020.
6. Sarsilmaz, O. M., Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması, incelenmesi, değerlendirilmesi ve anılan yöntemlerin seçilme kriterleri üzerine kapsamlı bir araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2017.
7. Avcı E., Mollamahmutoğlu M., Deveci E., Gökçe A., Engineering properties of ultrafine blast furnace slag cement stabilized low plasticity clayey soil, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (2), 985-996, 2021.
8. Onyelowe, K.C., Review on the role of solid waste materials in soft soils reengineering, Mater. Sci. Energy Technol., 2, 46-51, 2019.
9. Wu, Z., Zhang, Z., Tao, M., Stabilizing blended calcium sulfate materials for roadway base construction, Constr. Build. Mater., 24 (10), 1861-1868, 2010.
10. François, D., Jullien, A., A framework of analysis for field experiments with alternative materials in road construction, Waste Management, 29, 374-382, 2009.
11. Aruntaş H.Y., Gürü M., Dayı M., Tekin İ., Utilization of waste marble dust as an additive in cement production, Mater. Des., 31, 4039-4042, 2010.
12. Sarkar, R., Das, S.K., Mandal, P.K., Maiti, H.S., Phase and microstructure evolution during hydrothermal solidification of clay-quartz mixture with marble dust source of reactive lime, J. Eur. Ceram. Soc., 26, 297-304, 2006.
13. Akbulut, H., Gurer, C., Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements, Build. Environ., 42, 1921-1930, 2007.
14. Öztürk M., Mermer Kesiminden Kaynaklanan Çevre Kirliliği ve Önlemleri, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2018.
15. Rizzo, G., D'Agostino, F., Ercoli, L., Problems of soil and groundwater pollution in the disposal of marble slurries in NW Sicily, Environ. Geol., 55 (5), 929-935, 2008.
16. Tunç E.T., Cycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste, J. Environ. Manage., 231 (2019) 86-97, 2019.
17. Okagbue, C.O., Onyebi, T.U.S., Potential of marble dust to stabilise red tropical soils for road construction, Eng. Geol., 53, 371-380, 1999.
18. Aydın, K., Sivrikaya, O., Uysal, F., Effects of curing time and freeze-thaw cycle on strength of soils with high plasticity stabilized by waste marble powder, J Mater Cycles Waste Manag, 22 (5), 1459-1474, 2020.
19. Saygılı, A., Use of waste marble dust for stabilization of clayey soil, Materials Science (Medziagotyra), 21 (4), 601-606, 2015.
20. Gürbüz A., Marble powder to stabilise clayey soils in sub bases for road construction, Road Materials and Pavement Design, 16, (2), 481-492, 2015.
21. Yarbaşı, N., Mermer tozu ve atık lastik ile iyileştirilen düşük plastisiteli killi zeminlerin dayanım özellikleri, Doğ Afet Çev Derg, 4 (2), 162-170, 2018.
22. Zorluer, İ., Gücek, S., Şişen killerin mermer tozu katkı maddesiyle stabilizasyonu, International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology (ICIVILTECH 2019), Afyonkarahisar - Turkey, 595-602, 23-25 October 2019.
23. Eltwati, A.S., Saleh, F., Improvement of subgrade soils by using marble dust-(Libya, case study), The International Journal of Engineering and Information Technology, 6 (2), 40-43, 2020.
24. Jain, A.K., Jha, A.K., Shivanshi, Geotechnical behaviour and micro-analyses of expansive soil amended with marble dust, Soils and Foundations, 60 (4), 737-751, 2020.
25. Sivrikaya, O., Uysal, F., Yorulmaz, A., Aydın, K., The efficiency of waste marble powder in the stabilization of fine-grained soils in terms of volume changes, Arab J Sci Eng, 45, 8561-8576, 2020.
26. Yılmaz, F., Uçucu kül ve mermer tozu katkılarının zeminin stabilizasyonuna ve donma- çözülmesine etkisinin araştırılması, Academic Platform Journal of Engineering and Smart Systems, 8 (1), 56-61, 2020.
27. Abdelkader, H.A.M., Hussein, M.M.A., Ye, H., Influence of waste marble dust on the improvement of expansive clay soils, Advances in Civil Engineering, vol. 2021, Article ID 3192122, 13, 2021.
28. Elsiragy, M.N., Geotechnical behaviour of reinforced soft clay by marble dust as a waste material, Journal of Engineering Research, 5 (3), 1-7, 2021.
29. Waheed, A., Arshid, M.U., Khalid, R.A., S.S.S., Soil improvement using waste marble dust for sustainable development, Civil Engineering Journal, 7 (09), 1594-1607, 2021.
30. Yılmaz, F., Demir, E., Kireç ve mermer tozu ile stabilize edilmiş killi zeminlerin dayanım ve durabilite performansı, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9 (2), 511-520, 2021.
31. Terzi, S., Karaşahin, M., Mermer Toz Atıklarının Asfalt Betonuna Karışımında Filler Malzemesi Olarak Kullanımı, Teknik Dergi, 14 (2), 2903-2922, 2003.
32. Karaşahin, M., Terzi, S., Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete, Construction and Building Materials, 21, 616-620, 2007.
33. Chandra, S., Kumar, P., & Feyissa, B. A., Use of marble dust in road construction, Road Materials and Pavement Design, 3 (3), 317-330, 2002.
34. Dhanapandian, S., Gnanavel, B., & Ramkumar, T., Utilization of granite and marble sawing powder wastes as brick materials, Journal of Earth Environmental Science, 4 (2), 147-160, 2009.
35. Bilgin, N., Yeprem, H. A., Arslan, S., Bilgin, A., Günay, E., & Marsoglu, M., Use of waste marble powder in brick industry, Construction and Building Materials, 29, 449-457, 2012.
36. Balkis, A.P., The effects of waste marble dust and polypropylene fiber contents on mechanical properties of gypsum stabilized earthen, Construction and Building Materials, 134, 556-562, 2017.
37. Çelikten, S., Atabey, İ.L., Farklı silis ve alümin kaynaklarının atık mermer tozu esash alkali ile aktive edilmiş harçların özelliklerine etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9 (2), 396-405, 2021.
38. Özdemir, C., Kırşehir yöresi atık mermer tozu katkılı kendiliğinden yerleşen hafif betonların mühendislik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu, 2021.
39. Elabade, W.A.T., Atık mermer tozu ve piriñ kabuğu külü katkılı köpük betonların mekanik ve bazı durabilite özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu, 2021.
40. Sağlık, A., Güngör A.G., Mekanistik ampirik üstyapı tasarımı esneklik modülünün şartnamelere uyarlanması, 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, Ankara, Türkiye, 18-19 Kasım 2009.
41. Bostancıoğlu, M., Mekanistik ampirik esnek üstyapı tasarım modellerinin tabaka kalınlık ve rijitlik oranlarına bağlı olarak karşılaştırılması, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11 (1), 91-102, 2021.
42. Yıldız, A.H., Karaşahin, M., Çavuş, U.S., Taciroğlu, M., Evaluation of the marble industry waste slurries as stabilisation material in road construction, Turkey VI. Marble and Natural Stone Symposium, Afyonkarahisar, 97-106, 2008.
43. Cetin, H., Fener, M., Günaydin, M., Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as fill material, Engineering Geology, 88, 110-120, 2006.
44. ASTM D 854, Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, ASTM International, USA, 2000.
45. ASTM D 4318, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, ASTM International, USA, 2000.
46. ASTM D 422, Standard test method for particle-size analysis of soils, ASTM International, USA, 2000.
47. Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Easa, S., Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua New Guinea, Resources, Conservation and Recycling, 51, 711-731, 2007.
48. ASTM D 3080, Standard test methods for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, ASTM International, USA, 2000.
49. Akbulut, S., Arasan, S., Kalkan, E., Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers, Applied Clay Science, 38, 23-32, 2007.
50. ASTM D 1883, Standard test methods for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils, ASTM International, USA, 2000.
51. Umar, F., Ağar, E., Yol Üstyapısı, İTÜ Rektörlüğü, İstanbul, 1991.
52. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara, 2008.
53. Samad, E., Sensitivity analysis in flexible pavement performance using mechanistic empirical method (Case study: Cirebon-Losari road segment, West Java). In Journal of the Civil Engineering Forum, 20 (1), 2011.

54. Bostancıoğlu, M., Granüler tabakaların fonksiyonel derecelendirilmesi ile esnek üstyapılarda yorulma ve tekerlek izinde oturma dayanımının artırılması. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 26 (2), 557-572, 2021.
55. Mallela, J., Von Quintus, H., Kelly, P.E, Smith, L., Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design, The National Lime Association, Arlington/Virginia, 2004.
56. Yılmaz, I., Erzin, Y., Selection of Core Material for an Earth Dam in the Lower Çekerek Basin, Tokat, Turkey. *EJGE*, Bundle: F, 0472, 2004.
57. Khamsehchiyan, M., Charkhabi, A.H., Tajik, M., Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils, *Engineering Geology*, 89, 220-229, 2007.
58. Kolas, S., Kasselouri-Riopoulou, V., Karahalios, A., Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement, *Cement and Concrete Composites*, 27, 301-303, 2005.
59. Prabakar, J., Dendorkar, N., Morchhale, R.K., Influence of fly ash on strength behavior of typical soils, *Construction and Building Materials*, 18, 263–267, 2004.