

Araştırma Makalesi

Öğütülmüş Pomza Taşı ile Stabilize Edilen Kumlu Zeminin Esnek Üstyapı Tasarımına Etkisinin Araştırılması

Tacettin Geçkil¹ , Talha Sarıcı²  ve Bahadır Karabaş^{3,*} 

Gönderim: 30.01.2025

Kabul: 10.06.2025

^{1,2,3}İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye,
¹tacettin.geckil@inonu.edu.tr, ²talha.sarici@inonu.edu.tr, ³karabasbaha@gmail.com

* Sorumlu yazar

Özet: Bu çalışmada, öğütülmüş pomza taşı (PT) ile stabilize edilen kumlu yol taban zemininin, esnek üstyapı tabaka kalınlıkları ve ilk yapım maliyetleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, öncelikle zemin özelliklerinin belirlenmesine yönelik laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ardından, zemin örneklerine ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 oranlarında PT ilave edilerek hazırlanan numunelere Standart Proktor deneyi uygulanmıştır. Bu işlemin ardından, serbest basınç deneyi için numuneler hazırlanmış ve bu numuneler 28 günlük kür süreci sonrasında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek basınç dayanımı %9 oranında PT içeren karışımlarda gözlemlenmiştir. Ayrıca, katkısız kumlu zemin ile %9 PT katkılı numuneler, 28 günlük kür süresi sonunda Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı (CBR) deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları, %9 PT katkısı ile CBR değerinde 2.57 katlık bir artış sağlandığını göstermiştir. Belirlenen CBR değerleri doğrultusunda, AASHTO 1993 esnek üstyapı tasarım esaslarına göre tabaka kalınlıkları hesaplanmış ve buna bağlı olarak maliyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, %9 oranında PT ile stabilize edilen zemin kullanımının ilk yapım maliyetlerinde %4.61 oranında tasarruf sağladığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: kumlu zemin, pomza taşı, stabilizasyon, esnek üst yapı

Research Article

Investigation of the Effect of Sandy Soil Stabilized with Ground Pumice Stone on Flexible Pavement Design

Abstract: In this study, the effects of ground pumice stone (PT) on the flexible pavement layer thicknesses and initial construction costs of a sandy subgrade were investigated. For this purpose, laboratory tests were first conducted to determine the geotechnical properties of the soil. Subsequently, Standard Proctor tests were applied to specimens prepared by adding PT at rates of 3%, 6%, 9%, and 12% by weight. Following this procedure, samples for unconfined compressive strength (UCS) tests were prepared and tested after a 28-day curing period. The results indicated that the highest compressive strength was observed in the mixture containing 9% PT. In addition, both the unmodified sandy soil and the sample containing 9% PT were subjected to the California Bearing Ratio (CBR) test after 28 days of curing. The results showed that the CBR value of the 9% PT-stabilized sample increased by a factor of 2.57. Based on the

determined CBR values, pavement layer thicknesses were calculated in accordance with the AASHTO 1993 flexible pavement design method, and cost analyses were conducted accordingly. The calculations revealed that stabilizing the soil with 9% PT resulted in a 4.61% reduction in initial construction costs.

Keywords: sandy soil, pumice stone, stabilization, flexible pavement

1. Giriş

Günümüzde artan ulaşım ihtiyaçlarının güvenli ve ekonomik olarak tasarlanmış karayolu vasıtasıyla giderilmesi inşaat mühendisliği konuları arasında önemli bir yer tutmaktadır. Karayolları, farklı coğrafi ve tabiat koşullarında inşa edilmekte olup, yol güzergâhları ekonomik ve teknik analizler doğrultusunda belirlenmektedir. Tasarım sürecinde zemin durumu, trafik yükü, bölgesel ve ekonomik faktörler dikkate alınarak en düşük maliyetle en yüksek faydayı sağlayacak çözümler geliştirilebilmektedir. Ancak, taşıma gücü düşük zeminler ve bu zeminlerin iyileştirilmesi, tasarım sürecinde karşılaşılan temel zorluklardan biridir. Güvenli ve kesintisiz ulaşımı sağlamak için, yol üstyapılarının standartlara uygun şekilde tasarlanması ve zeminin teknik kriterlere uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Zemin stabilizasyonu [1-6], düşük taşıma gücüne sahip güzergâhlarda ekonomik ve güvenli karayolu projelerinin uygulanabilirliğini sağlayan önemli bir yöntemdir.

Taşıma kapasitesi yetersiz zeminlerin stabilizasyonu maksadıyla kireç [7], çimento [8], ve bitüm gibi malzemeler [9] kullanılmaktadır. Ayrıca, söz konusu katkı malzemelerin yanı sıra farklı katkı malzemeleri ve yöntemlerin [10-26] kullanımına yönelik çalışmaların sayısı gün geçtikçe arttığı görülmektedir. Yapılan bu çalışmalar vasıtasıyla karayollarının daha ekonomik ve daha güvenli tasarlanmasının sağlanacağı değerlendirilmektedir.

Rahgozar ve arkadaşları [10], kil zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla çimento ve pirinç kabuğu külü kullanarak gerçekleştirdikleri serbest basınç deneyleri sonucunda, %4 çimento ve %10 pirinç kabuğu külü eklenmesinin taşıma kapasitesini artırdığını saptamışlardır.

Reddy ve arkadaşları [11], zemin stabilizasyonunu uçucu kül, metakaolin ve bunların kombinasyonlarıyla test etmişlerdir. Deney sonuçları, %9 uçucu kül, %12 metakaolin ve %8 uçucu kül + %6 metakaolin eklenmesiyle en yüksek mukavemet değerlerinin elde edildiğini göstermiştir.

Geçkil ve arkadaşları [12,13], atık araç lastiklerinden elde edilen siyah karbon kullanarak killi kum zeminlerin stabilizasyonunu araştırmışlardır. Yapılan deneyler neticesinde %10 siyah karbon ilavesiyle 1, 7 ve 28 günlük kür süresi sonunda CBR değerlerinde sırasıyla 1.28 kat, 1.77 kat ve 2.87 kat artış gözlemlenmiştir.

Perera ve arkadaşları [14], kil zeminlere farklı oranlarda (%0, %5, %10, %15 ve %20) kırılmış cam ekleyerek bir dizi mekanik ve mikroyapısal analiz gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, %10-15 oranında kırılmış cam ilavesi, serbest basınç dayanımı, CBR ve elastisite modülü gibi mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiğini; şişme ve büzülme potansiyellerini azalttığını ve kilin su tutma kapasitesini artırdığını belirlemişlerdir [14].

Bharti ve arkadaşları [15], siyah pamuklu zeminin bakır cürufu ile stabilizasyonunu araştırmışlardır. Farklı oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) bakır cürufu ekleyerek hazırladıkları numuneler üzerinde modifiye Proktor testi, CBR, serbest basınç, likit limit ve plastik limit deneyleri uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, %20 bakır cürufu içeren karışımın optimum stabilizasyon sağladığını belirlemişlerdir.

Domphoeun ve Eisazadeh [16], zeminin dayanım özelliklerini artırmak amacıyla pirinç kabuğu külü, hindistan cevizi lifi ve kireç kullanarak stabilize etmişlerdir. Farklı oranlarda (%0, %5, %10, %15 ve %20) pirinç kabuğu külü, hindistan cevizi lifi ve kireç ekleyerek hazırladıkları numuneler üzerinde modifiye Proktor testi, serbest basınç testi, likit limit ve plastik limit deneyleri uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, %20 pirinç kabuğu külü, %1 hindistan cevizi lifi ve %8 kireç içeren karışımın optimum stabilizasyon sağladığını belirlemişlerdir.

Pomza taşının öğütülmesi vasıtasıyla elde edilen katkı malzemesinin çeşitli zemin tiplerinin stabilizasyonu maksadıyla kullanıldığı [17-20] yapılan araştırmalarda kullanımın uygun olduğu görülmüştür.

Mesfun ve arkadaşları [17], şişme özelliğine sahip killi yol taban zeminin kireç ve pomza taşı tozu kullanarak stabilizasyonun araştırılması amacıyla çeşitli deneyler yapmışlardır. CBR deneyi neticesinde %7 kireç + %3 pomza taşı tozu içeren karışımda en yüksek dayanımın elde edildiğini belirlemişlerdir.

Fithria ve arkadaşları [18], yumuşak kilin pomza tozu ve odun kömürü tozu ile stabilizasyonunu araştırmışlardır. %2 - %4 pomza tozu ve %15, %20, %25 odun kömürü tozu kullanılarak yapılan deneyler neticesinde, zemin örneklerinin fiziksel ve mekanik parametrelerinde olumlu değişikliklerin olduğunu tespit etmişlerdir. Serbest basınç dayanımlarındaki en büyük artışın %4 pomza tozu ve %25 odun kömürü tozu karışımından elde etmişlerdir.

Vekli ve Çadır [19], mermer tozunun ve pomza tozunun kil zemin üzerindeki iyileştirme etkisini araştırmak amacıyla, ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında mermer tozu ve pomza tozu kullanılarak deneyler yapmışlardır. Mermer tozu ve pomza tozu ilavesinin, sıkıştırılabilirlik ve geçirgenlik gibi zemin özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Kullanılan katkılar ile zeminde arzu edilen iyileşmenin sağlandığı, en iyi mukavemet artışının %15 pomza tozu ilaveli karışımda elde edildiğini belirlemişlerdir.

Nasiri ve arkadaşları [20], petrolle kirlenmiş ince taneli killi zeminin uzun vadeli geoteknik özelliklerini iyileştirmek amacıyla pomza tozu kullanarak çeşitli deneyler yapmışlardır. Deneylerde %4, %7, %10 petrol konsantrasyonu ile kirlenilen zemin örneği, %5, %10 ve %15 pomza tozu kullanılarak iyileştirilmeye çalışılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde, 1 yıllık kür süresine sahip örneklerde %10 pomza tozunun zeminin serbest basınç dayanımını %370'e kadar artırdığını ve çatlamaya karşı duyarlılığı azalttığını belirlemişlerdir.

Yapılan literatür incelemesi neticesinde, bu çalışmanın öğütülmüş pomza taşı ile iyileştirilen kumlu yol taban zemininin, esnek üstyapı tabaka kalınlıkları ve ilk yapım maliyetleri üzerindeki etkisinin araştırıldığı nadir çalışmalardan biri olacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca, bu çalışma ile öğütülmüş pomza taşının stabilizatör malzeme olarak kullanımının, son yıllarda alternatif ve farklı katkı malzemelerinin araştırılmasına yönelik çalışmalara önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu maksatla öncelikle zemin özellikleri, elek analizi, piknometre ve kıvam limitleri gibi deney yöntemleriyle belirlenmiştir. Daha sonra, katkı oranları ön deneyler ile tespit edilen, ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 PT katılarak hazırlanan karışım numunelerine standart proktor, serbest basınç ve CBR deneyleri uygulanmıştır. Söz konusu bu deneyler katkısız zeminler kullanılarak kontrol numuneleri kapsamında tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde esnek yol üst yapı tasarım tabaka kalınlıkları AASHTO 1993 yöntemiyle hesaplanmış ve belirlenen tabaka kalınlığı için maliyet analizleri yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kumlu Zemin

Çalışma kapsamında Malatya ilinden temin edilen kumlu zemine, ASTM C136/C136M-elek analizi deneyi [27] yapılarak zeminin dane çapı dağılımı tespit edilmiştir. Akabinde, zemin örneği ASTM D4318 - kıvam limitleri [28] deneyi uygulanmıştır. Daha sonra ASTM D854 - özgül ağırlık deneyine [29] göre özgül ağırlığın tespiti için piknometre deneyi gerçekleştirilmiştir. Son olarak zeminin maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax}) ve optimum su içeriği (ω_{opt}) değerlerini belirlemek için ASTM D698-Standart Proktor deneyi [30] uygulanmıştır.

Deneyisel çalışmalar sonucunda araştırılan zeminin kötü derecelenmiş kum (SP) ve AASHTO sınıflandırma yöntemine göre A-3 zemin sınıfına ait olduğu belirlenmiştir. SP zeminler genellikle tek boyuta yakın dane çaplarına sahiptir; büyük ölçüde farklı boyutta tanelerden oluşmazlar, A-3 zeminler ise genellikle ince daneli, temiz kumlardan oluşan zemin çeşitidir. Bu sınıftaki zeminler drenaj kapasitesi iyidir, ancak taşıma kapasitelerinden dolayı iyileştirilerek kullanılmalıdır[1]. Maksimum kuru yoğunluğunun 1.685 g/cm^3 , optimum su içeriğinin %18.5, dane yoğunluğunun 2.699 g/cm^3 , plastisite indisinin NP olduğu tespit edilmiştir. Zemin numunesi örneği Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Kumlu zemin numunesi görüntüsü

2.2. Öğütülmüş Pomza Taşı

Pomza taşı, silikat içeren bir kayadır. Çoğunlukla açık renklidir. Genellikle kirli beyaz, gri, kırmızı, kahverengi ve siyah renklerde olabilir. Bazik ve asidik karakterli olarak volkanik faaliyetler neticesinde meydana gelir. Bazaltik pomza koyu renkli, kahverengimsi siyahımsıdır. Dünyada en yaygın olarak görülen asidik pomza, kirli beyaz bir görünüme sahiptir. Pomza, çeşitli alanlarda kullanılan bir endüstriyel ham madde olup, özellikle inşaat, tekstil, tarım ve kimya sanayinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Fiziksel, kimyasal, mineralojik ve yapısal özellikleri sayesinde farklı sektörlerdeki kullanımı her geçen gün artmaktadır. Asidik özellik gösteren pomzalar daha fazla silis oranına sahiptir [31]. Bu nedenle çalışmada 1-70 mikron aralığında öğütülmüş pomza taşı kullanılmıştır. Öğütülmüş pomza taşının içeriği Tablo 1’de verilmiştir. Kumlu zemin ve öğütülmüş pomza taşı Şekil 2’de görülmektedir

Tablo 1. Öğütülmüş pomza taşının içeriği

Parametre	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	TiO ₂
Değer (%)	70.14	16.44	1.01	0.74	11.17	0.2	0.3



Şekil 2. Kumlu zemin ve öğütülmüş pomza taşı numunesinin görünüşü

2.3. Standart Proktor, Serbest Basınç ve Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı Deneyleri

Standart Proktor deneyi ASTM D698'e göre [32], zeminin maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax}) ve optimum su içeriği (ω_{opt}) belirlemek için yapılır. 105°C'de 24 saat boyunca kurutulan zemin numunesine

farklı su oranları eklenerek kalıba yerleştirilir ve tokmakla sıkıştırılır. Beş farklı su içeriğiyle yapılan denemeler sonucu elde edilen verilerle ρ_{kmax} ve ω_{opt} değerleri belirlenir.

Serbest basınç deneyi, ASTM D2166 standardına göre [33, 34], 28 günlük kür süresi sonunda katkısız zemin ve karışım numunelerinin dayanımını belirlemek için uygulanmıştır. Numuneler, 105°C'de kurutulmuş zemine su eklenerek hazırlanmış, Çapı 38mm, yüksekliği 76 mm boyutlarındaki kalıba yerleştirilip sıkıştırılmış ve kür süresi boyunca uygun koşullarda bekletilmiştir. Süre sonunda, numuneler cihaza yerleştirilerek basınç dayanımları ölçülmüştür.

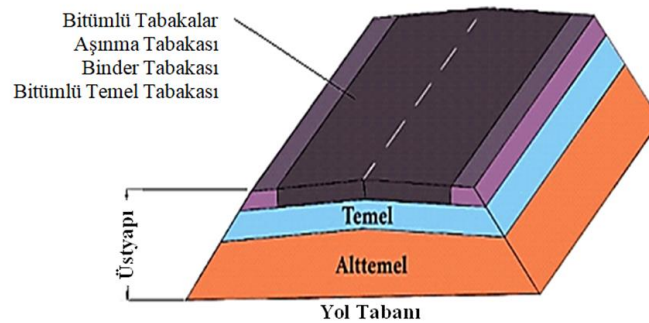
CBR deneyi, ASTM D1883-13 standardına göre [32, 35], ρ_{kmax} ve ω_{opt} değerlerine göre hazırlanmış numunelere belirli kür süresi sonrası uygulanır. 1935 mm² alanlı piston, 1.27 mm/dk hızla zemine itilerek taşıma kapasitesi belirlenir. CBR değeri, 2,5 ve 5 mm penetrasyonlardaki yüklerin, standart kırmataşa uygulanan yüklerle oranıyla hesaplanır. Numuneler üç tabakada sıkıştırılarak kalıba yerleştirilir, yoğunluğu kontrol edilir ve kür sonunda deney cihazına alınır. CBR hesaplamaları bu verilerle yapılır. Şekil 3'de CBR deneyinin hazırlanması, yükleme ve veri okuma aşamaları görülmektedir. Çalışmamız kapsamında söz konusu deneylerin uygulamasında ilgili standartlar esas alınmıştır.



Şekil 3. CBR deneyinin hazırlanması, yükleme ve veri okuma aşamaları

2.4 Esnek Üst Yapı Tasarımı

Esnek üstyapı tasarımı, asfalt beton kaplama, temel ve alt temel tabakalarından oluşmaktadır. Söz konusu tabakaların yapım aşamasında asfalt çimentosu bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Tasarım sürecinde; hizmet ömrü, tabaka kalınlıkları, trafik yoğunluğu, bölgesel faktörler, ekonomik koşullar ve zemin özellikleri gibi çeşitli unsurlar esas alınır [36]. Şekil 4'te esnek üstyapıdaki tabakaları göstermektedir.



Şekil 4. Esnek üstyapı kesit görünümü bitümlü tabakalar, temel, alt temel ve yol tabanı [3, 37]

Denklem (2.1) kullanılarak tabaka kalınlıkları hesabı AASHTO 1993 [36] esaslarına göre yapılmaktadır.

$$\log(T_{8.2}) = Z_R \times S_0 + 9.36 \times \log(SN+1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log M_R - 8.07 \quad (2.1)$$

Burada;

M_R : Taban zemini için etkili elastisite modülü (psi),

P_0 : Başlangıç hizmet kabiliyeti indeksi,

$T_{8.2}$: Proje trafiğinin eşdeğer standart tek dingil yükü tekrerrür sayısı (8.2 ton),

SN : Üstyapı sayısı (üstyapı kalınlığını için),

Z_R : Standart sapma,

ΔPSI : Toplam hizmet kabiliyeti kaybı

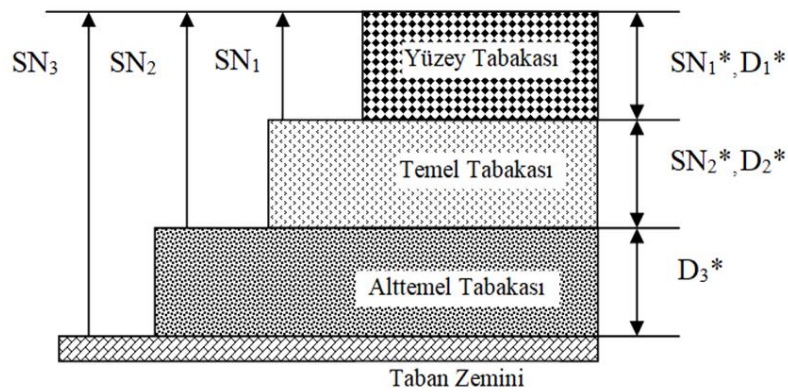
S_0 : Performans ve trafik tahmininin bileşik standart hatası,

P_t : Nihai hizmet yeteneği indeksini gösterir.

SN değeri denklem (2.1) kullanılarak belirlendikten sonra, tabaka katsayıları kullanılarak denklem (2.2) vasıtasıyla tabaka kalınlıkları hesaplanarak [36] tasarıma devam edilir

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times M_2 + a_3 \times D_3 \times M_3, \dots, a_i \times D_i \quad (2.2)$$

Burada, D_1 , D_2 , D_3 kaplama, temel ile alttemel tabaka kalınlıklarını; a_1 , a_2 , a_3 ise kaplama, temel ile alttemel tabakaları izafi mukavemet katsayılarını ifade eder. M_2 ve M_3 ise temel ve alttemel tabakalarının drenaj katsayılarını belirtir. Tabaka kalınlıklarının hesaplanmasının akabinde, SN^* değerleri ile tabaka kalınlıkları kontrolü Şekil 5'te [36] verilenlere göre hesaplanarak tespit edilir.



Şekil 5. Esnek üstyapı tasarımda hesaplanan tabaka SN 'leri

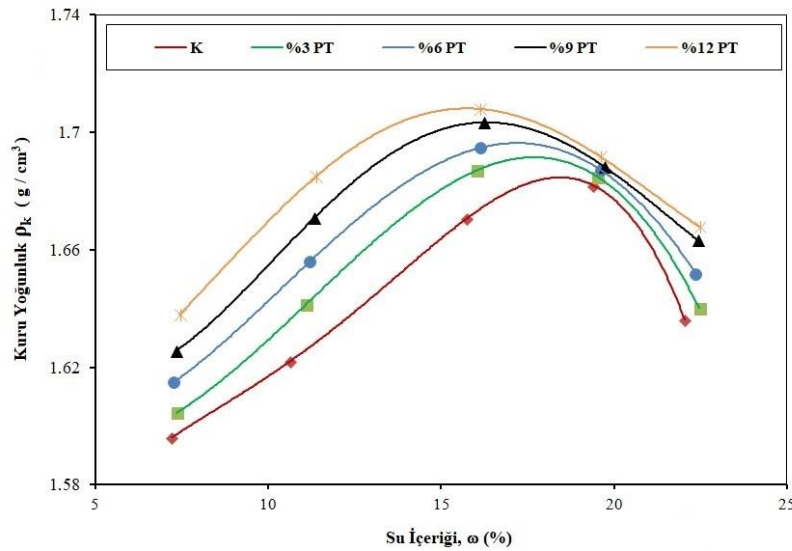
Burada; taban üzerine ihtiyaç duyulan (SN_3), alttemel üzerine ihtiyaç duyulan (SN_2), temel üzerine ihtiyaç duyulan üstyapı kalınlığı (SN_1), * : Kullanılan malzemeye göre değerleri [36] göstermektedir

3. Araştırma Bulguları

Öğütülmüş pomza taşı ile yol taban zemininin stabilizasyonunun esnek yol üst yapıya etkisinin araştırıldığı bu çalışmaya ait, deneylerin sonuçları aşağıda sunulmuştur.

3.1 Standart Proktor Deneyi Bulguları

Katkısız kumlu zemin (K) ile ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 PT katkıli numunelere standart proktor deneyi uygulanmıştır. Katkısız zemin ve PT içeren karışımlar için 5 farklı su içeriğinde hazırlanan numuneler ile deney uygulanmıştır. Deneyler neticesinde belirlenen ρ_k ve ω (%) sonuçlarına göre Şekil 6'da çizilen kompaksiyon eğrileri verilmiştir. Belirlenen ρ_{kmax} ve ω_{opt} sonuçları Tablo 2'de görülmektedir.



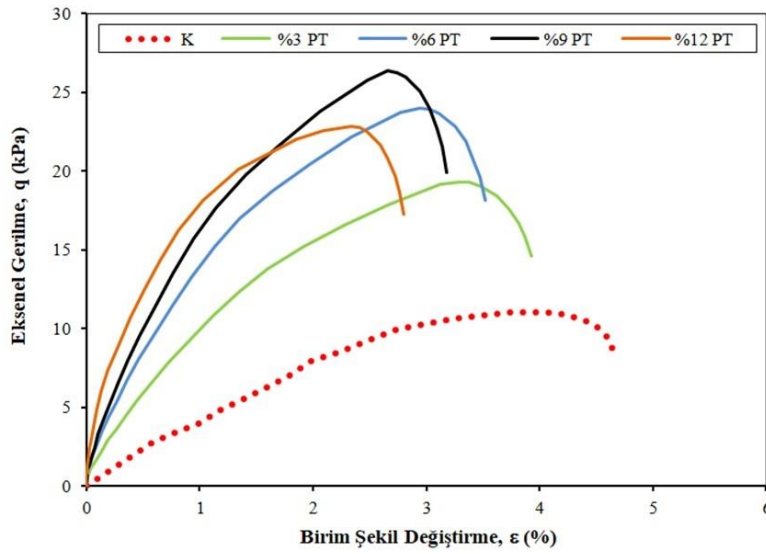
Şekil 6. Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı katkıli karışımların standart proktor deneyine ait kompaksiyon eğrileri

Tablo 2. Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı katkıli karışımların standart proktor deneyi sonuçları

Numuneler	ρ_{kmax} (g/cm ³)	ω_{opt} (%)
K	1.685	18.50
%3 PT	1.691	17.78
%6 PT	1.697	17.07
%9 PT	1.703	16.35
%12 PT	1.708	15.64

3.2 Serbest Basınç Deney Bulguları

Katkısız kumlu zemin (K) ile ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 PT katkıli serbest basınç deney numuneleri, belirlenen ρ_{kmax} ve ω_{opt} verileri esas alınarak hazırlanmıştır. Katkısız zemin ve PT içeren karışımlar için 3 farklı numune hazırlanmıştır. Numuneler oda sıcaklığında saklanmıştır. 28 günlük kür süresi ardından serbest basınç deneyi uygulanmış ve değerlerin ortalaması alınmıştır. Katkısız kumlu zemin ve PT katkıli numunelerin eksenel gerilme (q) ile birim şekil değiştirme (ϵ) sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Ayrıca Tablo 3'de yenilme anındaki birim şekil değiştirme (ϵ_u) ve serbest basınç mukavemeti (q_u) değerleri görülmektedir.



Şekil 7. Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı karışımların 28 günlük kür sonrası elde edilen q-ε grafiği

Tablo 3. Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı katkılı karışımların 28 günlük kür sonrası elde edilen q_u - ϵ_u verileri

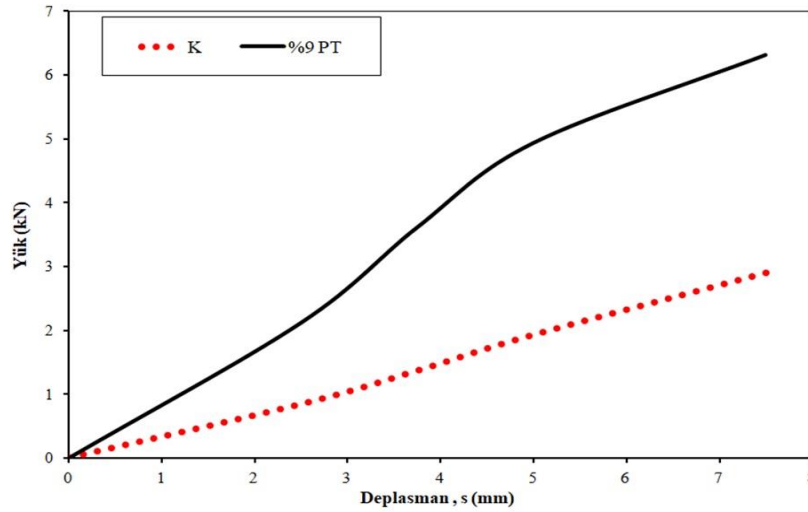
Test Numunesi	q_u (kPa)	ϵ_u (%)
K	11.03	3.98
%3 PT	19.31	3.28
%6 PT	23.97	2.94
%9 PT	26.33	2.66
%12 PT	22.80	2.34

3.3 Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı Deney Bulguları

CBR deneyi kapsamında hazırlanan numuneler, katkısız kumlu zemin ve serbest basınç deney sonuçlarından tespit edilen optimum %9 PT'li karışım oranı esas alınarak hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numunelerinde ρ_{kmax} ve ω_{opt} değerleri kullanılmıştır. Numuneler 28 günlük kür süresi boyunca oda sıcaklığında ve dış ortamdan etkilenmeyecek muhafazalı ortamda tutulmuştur. Tamamlanan kür süresinin ardından kuru CBR deneyi yapılmıştır. CBR deneyinden tespit edilen yük - deplasman grafikleri Şekil 8'de görülebilmekte CBR değerleri ise Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı katkılı karışımların 28 günlük kür sonrası CBR değerleri

Test Numunesi	2.5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
K	6.36	9.65
%9 PT	16.02	24.75



Şekil 8. Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı katkılı karışımların 28 günlük kür sonrası yük-deplasman ilişkisi

4. Araştırma Bulgularının Değerlendirilmesi ve Tasarım

Öğütülmüş pomza taşı ile yol taban zemininin stabilizasyonunun esnek yol üst yapıya etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, deneylerin sonuçlarının değerlendirilmesi ve tasarım çıktıları aşağıda sunulmuştur.

4.1 Standart Proktor Deneyi Bulgularının Değerlendirilmesi

Proktor deneyi sonuçları incelendiğinde; PT oranı arttıkça ω_{opt} değerinin azaldığı, ρ_{kmax} değerinin arttığı, bu sonuçların literatür [18, 19, 22] ile farklılık göstermediği görülmüştür. Pomza taşının gözenekli yapıya sahip olması nedeniyle, su emme kapasitesi dane boyutunun artmasıyla birlikte artmaktadır [22]. Ancak pomza taşının dane boyutu azaldıkça su emme kapasitesinin azaldığı, pomza tozunun su emme kapasitesinin katkısız kumlu zeminden daha az olduğu görülmüştür. Bu düşüncemizin literatür [25] ile paralellik gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, pomza tozunun ince dane yapısının karışımda filler etkisi göstererek ρ_{kmax} değerinin artışına neden olduğu değerlendirilmektedir.

4.2 Serbest Basınç Deney Bulgularının Değerlendirilmesi

Serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde, katkısız kumlu zeminlerin serbest basınç mukavemet değerinin, PT'li karışımların mukavemet değerinden daha az olduğu, PT'nin karışımların mukavemetini arttırdığı belirlenmiştir. En büyük mukavemet değerinin ise % 9 PT'li numunelerde tespit edilmiştir. Bu katkı oranında katkısız kumlu zemine göre serbest basınç mukavemet değerinin 2,39 kat arttığı tespit edilmiştir. PT katkısının mukavemet değerini arttırmasının literatür [18, 19, 22] ile uyumlu olduğu görülmüştür. Numunelerde birim şekil değiştirmenin, PT miktarındaki artışla birlikte azaldığı ve bunun PT'nin sertleştirici etkisinden ileri geldiği değerlendirilmektedir. Bulunan sonucun, literatür [39] ile örtüştüğü görülmüştür.

4.3 Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı Deney Bulgularının Değerlendirilmesi

CBR deney sonuçları incelendiğinde, PT'nin karışımların CBR değerini arttırdığı belirlenmiştir. CBR değerleri 2.5 mm ve 5 mm penetrasyon için sırasıyla %16.02 ve %24.75 olarak tespit edilmiştir. CBR değerinde katkısız kumlu zemine göre artış oranı 2.5mm ve 5 mm penetrasyon için sırasıyla 2.52 ve 2.57 kat olduğu belirlenmiştir. PT'li karışımların CBR değerinin katkısız numuneden daha yüksek

olduğu bu durumun literatürde [17, 22, 25,26] PT katkılı zeminlerin taşıma gücünü iyileştirdiği görüşü ile örtüştüğü belirlenmiştir.

Literatürde [17, 22, 23, 24], öğütülmüş pomza taşının yüksek oranda SiO₂ içermesi nedeniyle puzolanik bir karakter gösterdiği, ayrıca PT taneciklerin karışımların boşluklarını doldurma kapasitesine sahip olduğu, yapılan deneysel çalışmalar neticesinde belli oranın üstünde PT kullanılması dayanım artışına fayda sağlamadığı bilgisi mevcuttur. Çalışmamızda kullanılan PT'nin uygulanan deneyler neticesinde dayanımı arttırdığı, ayrıca karışımlardaki boşlukları doldurduğu, bu durumun karışımlardaki PT miktarının artması ile ρ_{kmax} değerlerinin artışı ile desteklendiği görülmüştür. Böylece, karışımların mekanik özelliklerini iyileştirmede fayda sağladığı değerlendirilmiştir. Ancak, yapılan deneyler neticesinde, tespit edilen optimum PT oranından daha fazla PT ilave edilmesi, reaksiyona girmeden kalan PT'nin ve karışımdaki ince dane içeriğinin artmasına neden olmuş, bu yüzden karışımların dayanımını daha fazla artıramadığı düşünülmüştür.

4.4 Esnek Üst Yapısı Tasarımı Yapılması

Esnek üstyapı tasarımı AASHTO 1993'te belirtilen esaslara uygun olarak, 28 günlük kür ardından belirlenen en yüksek CBR değerleri kullanılarak yapılmıştır. Hesaplamalarda, baz alınan CBR değerleri katkısız kumlu zemin için %9.65 ve %9 PT ilaveli karışım için %24.75'tir. Hesaplamalarda öncelikle yol taban zemininin esneklik modülü (M_R) hesaplanmıştır. M_R hesaplamalarında, AASHTO tarafından yayımlanan mekanik-ampirik teknik revizyonları içeren kaplama tasarım kılavuzu 3. baskısında MEPDG-3 2024 yılında [40] bulunan, M_R (psi)=2555(CBR)^{0.64} korelasyonu kullanılmıştır.

Katkısız zemin için M_R değeri 10902 psi (75483127 Pa) ve %9 PT'li karışım için M_R değeri 19920 psi (137376052 Pa) hesaplanmıştır. Tablo 4'teki veriler kullanılarak yol tabanı üzerine gereken SN₃ katkısız kumlu zemin için 22.50 inç (57.15 cm) ve %9 PT ilaveli zeminler için 18.03 inç (45.80 cm) hesaplanmıştır.

Tablo 5'te sunulan ve esnek kaplama hesabında kullanılan parametreler KGM (2008)'den [41] esas alınarak belirlenmiştir. Burada baz alınan otoyol 4 (2 x 2) şeritli, 20 yıl proje analiz süresinin olduğu, günlük trafiğin ilk yıl için kamyon 3760 adet, treyler 2116 adet, minibüs 5720 adet, otobüs 4672 adet, otomobil 6480 adet olduğu göz önüne alınarak, 200000000 olarak eşdeğer standart dingil yükü tekerrür sayısı esas alınmıştır. Söz konusu veriler 2023 Devlet Yolları Trafik Hacim Haritası verilerinden, Kayseri-Kırşehir karayolu trafik hacmine yakın değerler esas alınarak düzenlenmiştir.

Tablo 5. Esnek üstyapı tasarım parametreleri

Parametre	Tasarım Verileri
T _{8,2} , Eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı	200000000
P ₀ , Yolun ilk servis yeteneği	4.2
S ₀ , Toplam standart sapma	0.45
P _t , Yolun son servis yeteneği,	2.5
ΔPSI, Servis yeteneği indeksi,	1.7
Z _R , Güvenilirliğin standart normal sapması	-3.090

4.4.1 Tabaka Kalınlıklarının Hesaplanması

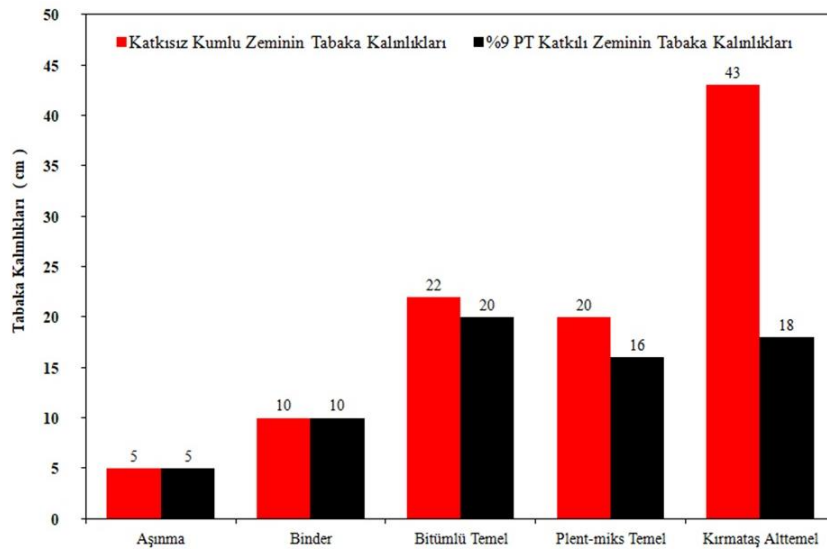
Katkısız kumlu zemin ve %9 PT katkılı zeminler için SN₃ değerleri kullanılarak ile 28 günlük kür uygulanarak elde edilen M_R değerleri ile esnek üstyapı tabaka kalınlıkları hesaplanmıştır. Tablo 6 ve 7'de seçilen tabaka kalınlıkları sırasıyla sunulmuştur. Ayrıca Şekil 9'da tabaka kalınlıkları verilmiştir.

Tablo 6. Katkısız kumlu zemin için hesaplanan tabaka kalınlıkları ve detayları

Tabaka İsmi	Di (cm)	ai	SN*= ai x Di	Açıklama
Aşınma	5	0.42	2.1	SN* > SN (20.61>20.50)
Binder	10	0.4	4.0	
Bitümlü Temel	22	0.36	7.92	Esnek Üstyapı tabaka kalınlıkları uygun seçilmiştir.
Plent-miks Temel	20	0.15	3.0	
Kırmataş Alttemel	43	0.13	5.59	

Tablo 7. %9 PT katkılı zemin için hesaplanan tabaka kalınlıkları ve detayları

Tabaka İsmi	Di (cm)	ai	SN*= ai x Di	Açıklama
Aşınma	5	0.42	2.1	SN* > SN (18.04 >18.03)
Binder	10	0.4	4.0	
Bitümlü Temel	20	0.36	7.20	Esnek Üstyapı tabaka kalınlıkları uygun seçilmiştir.
Plent-miks Temel	16	0.15	2.40	
Kırmataş Alttemel	18	0.13	2.34	

**Şekil 9.** Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı katkılı zemin için seçilen tabaka kalınlıklarının karşılaştırılması

Tabaka kalınlıklarının kontrolü, kırmataş alt temeli için CBR=50 ve plentmix kırmataş temeli için CBR=120 esas alınarak yapılmıştır. M_R değerleri sırasıyla $M_R=31241$ ve $M_R=54710$ psi olarak hesaplanmıştır. Tabakalar üzerinde gerekli SN değerleri, plentmix kırmataş temeli $SN_1 = 13.11$ cm, kırmataş alt temeli ise $SN_2 = 15.62$ cm olarak hesaplanmıştır. Yapılan kontrol neticesinde katkısız kumlu zeminde, plentmiks temeli için $14.02 > 13.11$ ve kırmataş alt temeli için $17.02 > 15.62$ olduğu, %9 PT zeminde, plentmiks temeli için $13.30 > 13.11$ ve kırmataş alt temeli için $15.70 > 15.62$ olduğu görül-

mehtedir. Kontrol neticesinde esnek tabaka kalınlıklarının yeterli olduğu belirlenmiştir. %9 PT ile stabilize edilen zemin sayesinde, toplam tabaka kalınlığında %31 oranında azalma meydana geldiği hesaplanmıştır.

4.5 Esnek Üstyapı Tasarımının Ekonomik Analizi

Öğütölmüş pomza taşı ile stabilize zeminin esnek üstyapı maliyetine etkisinin incelenmesinde, ilk yapım maliyetleri ekonomik analizi Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) 2024 yılı poz no'ları [42] kullanılarak yapılmıştır. Katkısız kumlu zemin ve %9 PT katkılı zeminlerin esnek yol üstyapı kalınlıklarının m² cinsinden birim maliyetleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 8 ve Tablo 9'da sunulmuştur. Ayrıca, % 9 PT ile yol tabanının 15 cm kalınlığında stabilize edilmesindeki analizde; malzemenin taşınması, traktör riperi ile zeminin kabartılması, traktör buldozeri ile stabilizatör malzeme dağıtılması, greyder ile serme ve karıştırma, arazöz ile sulama, titreşimli silindirle ve lastik tekerlekli silindir ile sıkıştırma yapılması esas alınmıştır. PT'nin ton bazında şantiye mahalline teslim fiyatı göz önüne alınmıştır. Tablo 10'da stabilizasyonun m² birim maliyetleri verilmiştir. Ayrıca, katkısız kumlu zemin ile %9 PT ilave edilerek stabilize edilen zeminler için Şekil 10'da tabaka maliyetleri karşılaştırma grafiği görölmektedir.

Tablo 8. Katkısız kumlu zemin için tabaka kalınlıkları maliyetleri

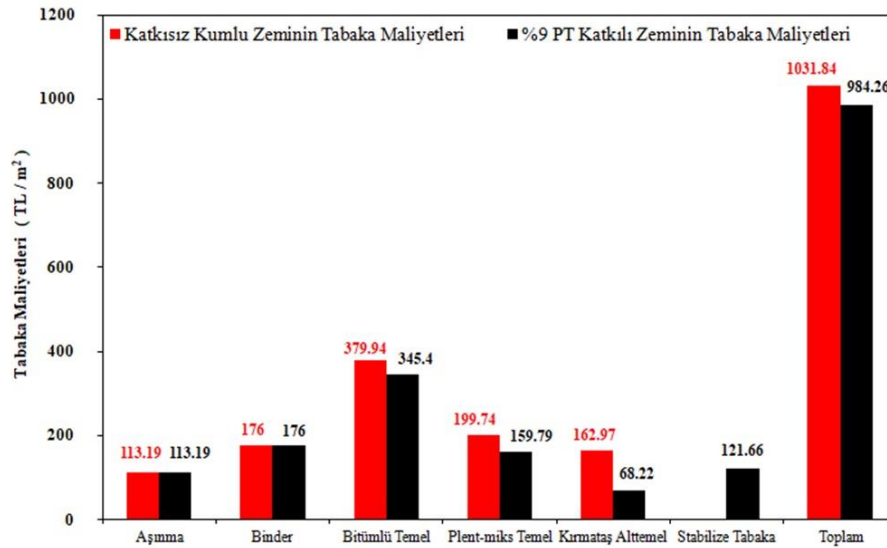
Poz no	Açıklama	Birim	Birim Fiyat (TL)	Maliyet (TL) m ²
KGM/6405	5 cm aşınma tabakası yapımı	m ²	113.19	113.19
KGM/6320	Binder tabakası yapımı (10 cm)	ton	733.11	176.00
KGM/6220	Bitümlü sıcak temel tabakası yapımı (22 cm)	ton	719.63	379.94
KGM/6100/3	Plentmix temel yapılması	ton	416.13	199.74
KGM/6000	Kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması	m ³	378.99	162.97
			Toplam:	1031.84

Tablo 9. %9 pomza taşı katkılı zemin için tabaka kalınlıkları maliyetleri

Poz no	Açıklama	Birim	Birim Fiyat (TL)	Maliyet (TL) m ²
KGM/6405	5 cm aşınma tabakası yapımı	m ²	113.19	113.19
KGM/6320	Binder tabakası yapımı (10 cm)	ton	733.11	176.00
KGM/6220	Bitümlü sıcak temel tabakası yapımı (20 cm)	ton	719.63	345.40
KGM/6100/3	Plentmix temel yapılması	ton	416.13	159.79
KGM/6000	Kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması	m ³	378.99	68.22
			Toplam:	862.60

Tablo 10. %9 pomza taşı katkılı zemin için stabilizasyon birim maliyetleri

Poz no	Açıklama	Birim	Birim Fiyat (TL)	Maliyet (TL) m ²
KGM 03.507	Traktör ripperin bir saatlik ücreti	saat	2083.73	0.31
KGM 03.511	Traktör Buldozerin 1 saatlik ücreti	saat	1946.93	1.31
KGM/15.140	Makina ile serme ve karıştırma	m3	13.95	2.09
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	ton	104.79	1.57
KGM/15.052/3	Titreşimli silindirle sıkıştırma yapılması	saat	1221.53	1.83
KGM/15.058/1	Lastik tekerlekli silindir ile sıkıştırma yapılması	saat	891.94	1.34
Piyasa	%9 PT Temini Nakliye Dahil	kg	5.39	119.19
Toplam:				121.66



Şekil 10. Katkısız kumlu zemin ve %9 pomza taşı katkılı zemin için seçilen tabaka kalınlıklarının maliyetleri karşılaştırılması

Katkısız kumlu zemin ve %9 PT ilaveli zemin için yol üstyapılarının maliyetleri sırasıyla 1031.84 TL/m² ve 862.60 TL/m² olarak belirlenmiştir. Ayrıca, PT ilaveli stabilize zeminin maliyeti 121.66 TL/m² olarak hesaplanmıştır. Söz konusu maliyetler göz önüne alındığında, ilk yapım maliyetinde %4.61 oranında bir azalma görülmüştür. Yapılan hesaplamalarda, 20 metre genişliğindeki ve 1000 metre uzunluğundaki, %9 PT ile iyileştirilmiş bir yol tabanı sahip esnek üstyapı tasarımının 951.600 TL maliyet azaltılarak tasarruf sağlanacağı hesaplanmıştır.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, kumlu yol tabanının öğütülmüş pomza taşı ile stabilizasyonunun esnek yol üst yapısı kalınlığı ile ilk yapım maliyeti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları aşağıda sunulmuştur.

1. Standart proktor deneyi sonuçlarında; PT oranı arttıkça ω_{opt} değerinin azaldığı, ρ_{kmax} değerinin arttığı belirlenmiştir. PT'nin su emme kapasitesinin zemin numunesinden daha az olmasının ω_{opt} değerinin azalmasında etkili olduğu bu sonuçların literatür [18, 19, 22, 25] uyumlu olduğu, PT'nin ince dane yapısının karışımda filler etkisi göstererek ρ_{kmax} değerinin artışına neden olduğu değerlendirilmiştir.

2. Serbest basınç deneyleri neticesinde, PT ile stabilize edilen zeminlerde 28 günlük kür sonunda en büyük mukavemet değerinin ağırlıkça %9 PT'li numunede belirlenirken, katkısız kumlu zemine göre mukavemet değerinin 2.39 kat arttığı, bu sonucun literatür [18, 19, 22] ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu artışın, PT'nin karışımların kohezyon kuvveti ve kayma direnci üzerindeki olumlu etkisinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

3. Serbest basınç deneyi numunelerinde PT miktarının artmasıyla numunelerin sertliğinin arttığı bu nedenle kırılma anındaki birim şekil değiştirmenin azaldığı, bulunan sonucun, literatür [39] ile örtüştüğü görülmüştür.

4. CBR deney sonuçlarında ise %9 PT katkılı zeminlerin 28 günlük kür süresi sonundaki CBR değerleri, katkısız kumlu zemin numunelerine göre sırasıyla 2.52 ve 2.57 kat arttığı belirlenmiştir. Bu artış PT katkılı zeminlerin taşıma gücünü iyileştirdiğini ve bu durumun literatürde [17, 22, 25, 26] ile uyumlu olduğu görülmüştür.

5. Serbest basınç ve CBR deney sonuçlarından, PT'nin puzolanik yapısının ve PT tanelerinin karışımların boşluklarını doldurma kapasitesinin etkili olduğu değerlendirilerek, mekanik özellikleri iyileştirdiği görülmektedir.

6. Yol üst yapısı tasarım sonuçlarında ise, %9 PT'li stabilize zeminler için tasarlanan üstyapı kalınlığında azalma olduğu, bu durumun PT'nin taşıma gücüne olumlu etkisinden meydana geldiği değerlendirilmiştir.

7. Maliyet analizi sonuçlarında ise, %9 PT katkılı stabilize zeminlerin üstyapı maliyetlerinde, katkısız kumlu zemine kıyasla %4.61 oranında tasarruf sağlandığı belirlenmiştir. Bu hesaplamalar göz önüne alındığında, 20 metre genişliğindeki ve 1000 metre uzunluğundaki bölünmüş bir yolda, %9 PT ile yol taban zemininin stabilizasyonu ile üst yapı maliyetinde 951.600 TL tasarruf sağlanacağı hesaplanmıştır.

8. Sonuç olarak, yol taban zeminlerinin alternatif katkı malzemeleri ile stabilizasyonu kapsamında PT kullanılmasının zeminin taşıma kapasitesini arttıracığı, esnek üst yapı tabaka kalınlığını ve maliyetini düşüreceği belirlenmiştir. Ayrıca, PT'nin doğal bir malzeme olması ve stabilizasyon vasıtasıyla esnek üstyapı yapımında kullanılan malzeme miktarını azaltması ile, yapım aşamasında meydana gelen CO₂ salınımının azaltılabileceği, çevrenin korunmasına katkı sağlanacağı düşünülmektedir. Yol inşasına yönelik stabilizasyon çalışmalarında PT'nin kullanımının artmasıyla, karayolu projeleri için maliyetlerin daha da azaltılabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca, çalışmamızda sürdürülebilir malzeme kullanımı ile maliyet avantajının birlikte değerlendirildiği göz önüne alınarak, çalışmamızın yeşil altyapı uygulamalarına yönelik araştırmalar ve çevresel etki analizleri ile de desteklenerek geliştirilmesi arzu edilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü'nün İÜ-BAP FDK-2023-3325 numaralı projesi tarafından desteklenmiştir. BAP Koordinasyon Birimi'ne desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazarlar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

Kaynaklar

[1] Tunç, A. (2002). *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*. Nobel Yayınevi, Ankara.

- [2] Tunç, A. (2007). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Nobel Yayınevi, Ankara.
- [3] Kök, B. V. (2019). *Karayolu Mühendisliği ve Tasarımı*. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
- [4] Sarıcı, T., Ok, B., Akbulut, N., & Cenk, A. H. (2024). An experimental study on the usability of reclaimed asphalt pavements or waste bricks in the stone columns. In Türker, U., Eren, Ö., & Uygur, E. (Eds.), *Sustainable Civil Engineering at the Beginning of Third Millennium, ACE 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*, 481, Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1781-1_14.
- [5] Geçkil, T., Sarıcı, T., & Çetkin, Ö. N. (2023). Killi kum zeminlerin dayanımı üzerinde yüksek fırın cürufunun etkileri. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2), 1159-1174.
- [6] Ok, B., Demir, A., Sarıcı, T., & Ovalı, M. (2021). Geosentetiklerle güçlendirilmiş karayolu temellerinin plaka yükleme deneyleri ile değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(6), 718-728.
- [7] Hatmoko, D. D., Rifa'i, A., & Ismanti, S. (2024). Effect of using lime and fly ash as a cement substitute for soil stability. *Kurvatek Journal Energy Management and Sustainable Environment*, 9(1), 45-54.
- [8] Chakma, N., Islam, M. S., & Paul, S. (2024). Effectiveness of areca fiber and cement on the engineering characteristics of compressed stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 427, 136290.
- [9] Andavan, S., & Maneesh Kumar, B. (2020). Case study on soil stabilization by using bitumen emulsions – A review. *Materials Today: Proceedings*, 22(3), 1200-1202.
- [10] Rahgozar, M. A., Saberian, M., & Li, J. (2017). Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study. *Transportation Geotechnics*, 14, 52-60.
- [11] Reddy, D. S., Kowshik, K., Kishor, M. J., Durga, R. V., & Kumar, V. P. (2018). Enhancement of soil properties by using fly ash and metakaolin. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 8(2S), December.
- [12] Geçkil, T., Sarıcı, T., & Karabaş, B. (2021). Siyah karbon ile stabilize edilen taban zeminin yol esnek üst yapı maliyetine etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 23, 222-235.
- [13] Geçkil, T., Sarıcı, T., & Karabaş, B. (2021). Siyah karbon stabilizasyonlu zeminin rijit kaplama kalınlığı ve maliyetine etkileri. *ECJSE*, 8(3), 1372-1384. <https://doi.org/10.31202/ecjse.894046>
- [14] Perera, S. T. A. M., Saberian, M., Zhu, J., Roychand, R., & Li, J. (2022). Effect of crushed glass on the mechanical and microstructural behavior of highly expansive clay subgrade. *Case Studies in Construction Materials*, 17.
- [15] Bharti, G., Hurukadli, P., & Shukla, B. K. (2023). Environmental impact analysis and utilization of copper slag for stabilizing black cotton soil. *Materials Today: Proceedings*, 3.
- [16] Dompheun, R., & Eisazadeh, A. (2024). Flexural and shear strength properties of laterite soil stabilized with rice husk ash, coir fiber, and lime. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00364-5>.

- [17] Mesfun, R. T., Quezon, E. T., & Geremew, A. (2019). Experimental study of stabilized expansive soil using pumice mixed with lime for subgrade road construction. *International Journal of Research - Granthaalayah*, 7(7), 118-124.
- [18] Fithria, R., & Kusumastuti, D. P. (2022). The effect of wood charcoal powder and pumice powder on the parameters of shear strength of clay soil. *Indonesian Geotechnical Journal*, 1(2), 50-55.
- [19] Vekli, M., & Cadir, C. C. (2022). Usage of waste marble powder and pumice powder to improve the engineering properties of soft clay. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 6481–6490.
- [20] Nasiri, H., Khayat, N., & Nazarpour, A. (2024). Assessing one-year effects of 10% pumice powder on strength and microstructure of contaminated clay. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03892.
- [21] Altuntaş, Ö. F., & Bilgen, G. (2022). Katkılı zeminlerde taşıma gücünün istatistiksel yöntemlerle tahmini. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 8(1), 13-23. <https://doi.org/10.29132/ijpas.993022>.
- [22] Saltan, M., Çimen, Ö., & Keskin, S. N. (2015). Stabilization of clayey subgrade with waste pumice for road infrastructure. *Science and Engineering of Composite Materials*, 22(5), 583–590.
- [23] Karataş, M., Benli, A., & Ergin, A. (2017). Influence of ground pumice powder on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, 150, 467-479.
- [24] Mboya, H. A., King'onde, C. K., Njau, K. N., & Mrema, A. L. (2017). Measurement of pozzolanic activity index of scoria, pumice, and rice husk ash as potential supplementary cementitious materials for Portland cement. *Advances in Civil Engineering*, 2017, 6952645.
- [25] Fındık, S., & Saltan, M. (2008). Stabilization of subbase layer materials with waste pumice in flexible pavement. *Building and Environment*, 43(4), 415-421.
- [26] Ertem, F. S., Kavlak, Y., & Saltan, M. (2011). Utilization of pumice waste for clayey subgrade of pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(12).
- [27] ASTM C136/C136M. (2019). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [28] ASTM D4318. (2017). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [29] ASTM D854. (2006). *Standard test method for specific gravity of soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [30] ASTM D698. (2014). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [31] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2025). Dünyada ve Türkiye’de Pomza. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/pomza.pdf> (Erişim Tarihi: 15.01.2025).
- [32] Yılmaz, İ., Yıldırım, M., & Keskin, İ. (2017). *Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri ve Çözümlü Problemler*. Seçkin Kitabevi, Ankara.

- [33] ASTM 2166-06. (2006) Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [34] Orhan, M. (2013). *Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri*. Gazi Kitabevi, Ankara.
- [35] ASTM D1883-21. (2021). Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [36] AASHTO. (1993). Interim guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [37] Geçkil, T., Sarıcı, T., & Karabaş, B. (2025) Cam tozu kullanılarak iyileştirilen zeminin üzerine tasarlanan esnek üst yapının tabaka kalınlığı ve maliyetinin araştırılması. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, 5(1), 81-99.
- [38] Zeyad, A. M., Tayeh, B. A., & Yusuf, M. O. (2019). Strength and transport characteristics of volcanic pumice powder-based high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 216, 314–324.
- [39] Uzuner, B. A. (2016). *Temel Mühendisliğine Giriş*. Derya Kitabevi, Trabzon.
- [40] AASHTO. (2024). Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide (MEPDG-3). 3rd Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [41] Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi (2008) T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- [42] Karayolları Genel Müdürlüğü Birim Fiyatları (2024). <http://www.kgm.gov.tr> (Erişim Tarihi: 16.12.2024).