



METAKAOLİN KULLANILARAK KUM BİR ZEMİNE YAPILAN ZEMİN ISLAHININ RİJİT KAPLAMA KALINLIĞINA VE MALİYETİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Tacettin GEÇKİL¹, Talha SARICI¹, Bahadır KARABAŞ^{1*}

¹İnönü University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 44280, Malatya, Türkiye

Özet: Bu çalışmada, metakaolin kullanılarak stabilize edilen yol taban zemininin, üzerine tasarlanan rijit bir yolun tabaka kalınlığına ve yapım maliyetine etkileri incelenmiştir. İlk olarak, zemin sınıflandırma deneyleri ile zemin sınıfı tespit edilmiş ve zemin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla bazı laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Daha sonra, zemine ağırlıkça %3, %6, %9, %12 ve %15 metakaolin ilave edilerek hazırlanan zemin numunelerine standart proktor deneyi uygulanmıştır. Ardından, 28 gün boyunca kür süresine tabi tutulan ve farklı oranlarda metakaolin kullanılarak hazırlanan numunelere serbest basınç deneyi yapılmıştır. Deneyler sonucunda, en yüksek dayanım %12 oranında metakaolin içeren karışım numunelerinde elde edilmiştir. Daha sonra, katkısız ve %12 oranında metakaolin katkılı numunelere 28 gün kür süresinin ardından, uygulanan Kaliforniya taşıma gücü oranı deneyi neticesinde, dayanımın %227,56 arttığı tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalardan sonra, Amerikan Devlet Karayolları ve Ulaştırma Birliği (AASHTO) tarafından önerilen rijit yol üstyapı tasarım esaslarına göre üstyapı tabaka kalınlığı ve maliyeti araştırılmıştır. Hesaplamalar neticesinde, %12 oranında metakaolin ile iyileştirilen yol taban zemininin, rijit üstyapı tabaka kalınlığını %29,17 oranında ve maliyeti %2,68 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kötü derecelenmiş kum, Zemin ıslahı, Metakaolin, Ulaştırma geotekniği


Investigation of the Effects of Soil Improvement in Sandy Soil Using Metakaolin on Rigid Pavement Thickness and Cost


Abstract: In this study, the effects of subgrade soil improved by the usage of metakaolin on the layer thickness and construction cost of a rigid road designed on it were investigated. First, soil classification tests were conducted to determine the soil class, and several laboratory tests were performed to identify soil properties. Then, standard proctor tests were applied to soil samples prepared by adding 3%, 6%, 9%, 12%, and 15% metakaolin by weight. Subsequently, unconfined compressive strength tests were conducted on the samples prepared with different proportions of metakaolin after a curing period of 28 days. As a result of the tests, the highest strength was obtained in samples containing 12% metakaolin. Then, after 28 days of curing, the California bearing ratio test was applied to the samples prepared without additives and with 12% metakaolin, resulting in a 227.56% increase in strength value. After the experimental studies, pavement layer thickness and cost were investigated according to the rigid pavement design guidelines recommended by the American Association of State Highways and Transportation (AASHTO). As a result of the calculations, it was determined that the subgrade improved with 12% metakaolin reduced the rigid pavement layer thickness by 29.17% and the cost by 2.68%.


Keywords: Poorly graded sand, Soil stabilization, Metakaolin, Transportation geotechnics

*Sorumlu yazar (Corresponding author): İnönü University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 44280, Malatya, Türkiye

E mail: karabasbaha@gmail.com (B. KARABAŞ)

Tacettin GEÇKİL  <https://orcid.org/0000-0001-8070-6836>

Talha SARICI  <https://orcid.org/0000-0001-8488-5851>

Bahadır KARABAŞ  <https://orcid.org/0000-0003-0416-9121>

Gönderi: 03 Haziran 2024

Kabul: 07 Ağustos 2024

Yayınlanma: 15 Eylül 2024

Received: June 03, 2024

Accepted: August 07, 2024

Published: September 15, 2024

Cite as: Geçkil T, Sarıcı, Karabaş B. 2024. Investigation of the effects of soil improvement in sandy soil using metakaolin on rigid pavement thickness and cost. 7(5): 882-893.

1. Giriş

Ulaşım ihtiyacının karşılanmasında yaygın olarak kullanılan karasal ulaşım yapılarının dizayn ve yapım safhasında göz önüne alınan kriterlerin başında zemin durumu, trafik, bölgesel ve ekonomik faktörler yer almaktadır. Bölgesel ve ekonomik gerekliliklerin karşılanması amacıyla belirlenen karayolları güzergahlarında yapılan zemin etütleri neticesinde tespit edilen zemin özellikleri, karayolu tasarımlarının emniyet ve ekonomik kısıtlar göz önüne alınarak hayata geçirilmesinde büyük önem arz etmektedir. Özellikle

taşıma gücü zayıf zeminlere sahip güzergahlarda yapılması planlanan stabilizasyon faaliyetleri, tasarımların ekonomik ve güvenli şekilde uygulanmasının önemli bir parçasıdır (Uzuner, 2016; Tunç, 2002). Günümüzde stabilizasyon uygulamalarında kireç, çimento ve bitüm gibi malzemelerin (Tunç, 2007) yanında, alternatif malzemeler ile zeminlerin taşıma gücünün artırılmasına yönelik çalışmalar vasıtasıyla (Demir ve Sarıcı, 2017; Sarıcı, 2014; Ok ve ark., 2021; Sarıcı ve ark., 2022) tasarımların daha güvenli, ekonomik ve çevreye saygılı bir şekilde inşa edilmesine katkıda



sağlayacağı düşünülmektedir. Kumar ve Sharma (2004) tarafından, uçucu külün farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20) karıştırılmasıyla elde edilen numunelerin plastisite, kompaksiyon ve dayanım özellikleri araştırılmıştır. Kompaksiyon testlerine göre, uçucu kül oranı arttıkça plastik limit ve maksimum kuru yoğunluk değerleri yükselirken, optimum su içeriği ve likit limit değerleri düşüş göstermiştir. Uçucu kül oranının artmasıyla, karışımların serbest basınç dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Jauberthie ve ark. (2010), nehir siltlerinin çimento ve kireç ile stabilizasyonunu araştırmışlardır. Hem kireç hem de çimento ile yapılan iyileştirmeler sonucunda Kaliforniya taşıma oranı (KTO) ve serbest basınç dayanımı değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Öksüz ve Yıldız (2006), kumlu zemine %5 oranında sabit çimento ve %0, %5, %10, %15, %20 oranlarında değişen miktarlarda uçucu kül ekleyerek deneysel çalışmalar yapmışlardır. Uçucu külün doğal zemin numunesine eklenmesiyle, serbest basınç dayanımı değerlerinde %100 ile %500 arasında artış tespit etmişlerdir. Geçkil ve ark. (2021a), killi kum bir zemini atık araç lastiklerinden üretilen siyah karbon (SK) ile stabilizasyonu yönelik araştırmalar yapmışlardır. Deneyler neticesinde %10 oranında SK kullanılmasıyla, 1, 7 ve 28 gün kür sürelerinden sonra KTO değerlerinde kür sırasına göre 1,28 kat, 1,77 kat ve 2,87 kat artış gözlemlenmiştir. Kulanthaivel ve ark. (2023), killi zeminin stabilizasyonuna yönelik kireç ve atık yumurta kabuğu tozu ile araştırma yapmışlardır. %9 kireç ve %12 atık yumurta kabuğu tozu karışımı kombinasyonu ile en yüksek mukavemet değerini elde etmişlerdir. Sarıcı (2019), yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül kullanarak inşaat yıkıntısı atıklarını granül dolgu olarak kullanılabilirliğini araştırdığı çalışmada, %20 YFC ilavesinin en yüksek dayanım değerini sağladığını tespit etmiştir. Bu katkı oranında, serbest basınç mukavemeti ve KTO değerlerine göre, 7 gün kür sonunda 14,72 kat, 28 gün kür sonunda ise 25 kat maksimum artış görmüştür. Çınar (2024) 07 Şubat 2023'de meydana gelen Kahramanmaraş depremi akabinde meydana gelen gaz beton (GB) atıklarının, killi kumlu zemini iyileştirilmesine yönelik %5, %10, %15, %20 oranlarında ve %10 sabit Afşin Elbistan yüksek fırın cürufu (AEC) oranı ile karışımlar hazırlamıştır. Araştırması neticesinde, %10 AEC ve %15 GB atığı kullanılmasıyla en iyi güçlendirilmeyi sağladığını belirtmiştir.

Kaolin kilinin saflaştırılmasıyla elde edilen, amorf bir yapıya sahip ve beyaz renkli metakaolinin, stabilizasyon malzemesi olarak çeşitli zemin tiplerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalarda (Ayyappan ve ark., 2017; Reddy ve ark., 2018; Abdulkareem ve Abbas, 2021; Wassie ve Demir, 2024) kullanıldığı ve başarılı olduğu görülmektedir. Bu çalışmalardan Ayyappan ve ark. (2017) killi bir zeminde farklı oranlarda metakaolin ile yapılan çalışmalarda kohezyon ve mukavemet parametrelerinin iyileştirilmesinde etkili olduğunu belirlemişlerdir. Reddy ve ark. (2018), siyah pamuklu zeminin (black cotton soil) stabilizasyonunu uçucu kül,

metakaolin ve bunların karışımları ile test etmişlerdir. Deney sonuçlarında, %9 oranında uçucu kül, %12 oranında metakaolin ve %8 oranında uçucu kül + %6 oranında metakaolin eklenerek en yüksek mukavemet değerlerinin elde edildiğini göstermişlerdir. Abdulkareem ve Abbas (2021) laterit zemini iyileştirmek amacıyla metakaolin kullanım potansiyelini araştırmışlardır. Yapılan serbest basınç ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) neticesinde, metakaolin içeriğinin artmasıyla zeminin mühendislik özelliklerinde genel bir iyileşme meydana geldiği, en iyileşmenin % 30 metakaolin içeren karışımdan elde edildiğini tespit etmişlerdir. Wassie ve Demir (2024), yüksek plastisiteli inorganik silt üzerinde çimento ve metakaolin ile yapılan stabilizasyon deneylerinde %8 çimento ve %3 metakaolin ilavesinde en iyi serbest basınç değerlerine ulaşıldığını, ayrıca kesme mukavemeti parametrelerinde önemli bir artış meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

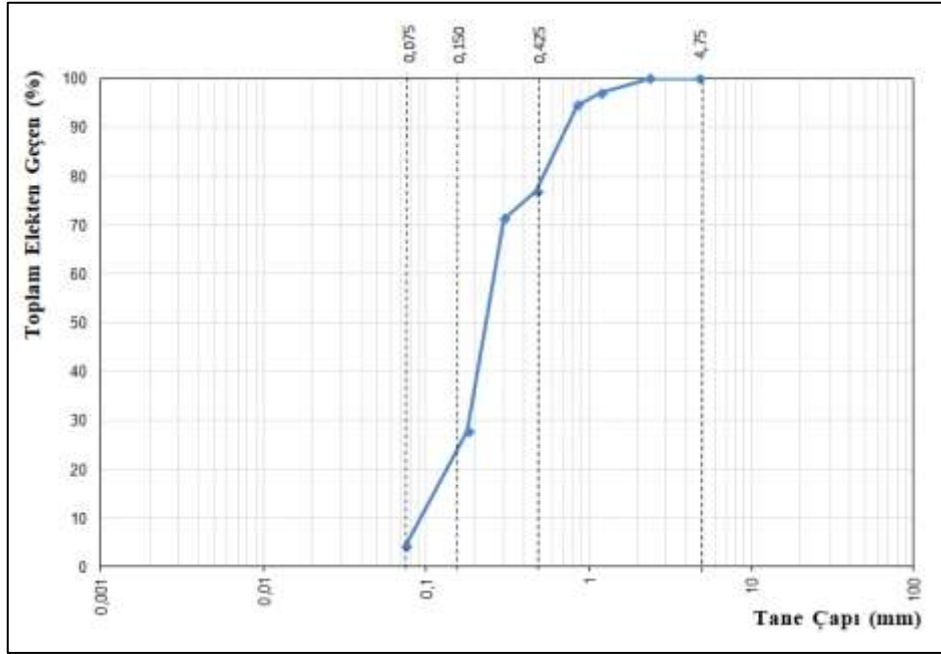
Bu araştırma kapsamında yapılan literatür incelemesi neticesinde; kum bir yol taban zemininin metakaolin ile stabilize edilmesinin rijit üst yapı tasarımına etkilerine yönelik herhangi bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Bu amaçla kum zemin metakaolin ile stabilizasyon edildikten sonra tabaka kalınlıkları hesaplanarak ve maliyet analizi yapılarak incelenmiştir. Bunun için öncelikle zeminin fiziksel özellikleri elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri ve piknometre gibi deney yöntemleriyle belirlenmiştir. Ardından, kum zemine ağırlıkça %3, %6, %9, %12 ve %15 metakaolin katılarak stabilize karışımlar hazırlanmıştır. Katkısız ve katkılı zemin örneklerine standart proktor deneyi, serbest basınç deneyi ve KTO deneyleri uygulanmıştır. Rijit yol üst yapı kalınlığı tasarımı AASHTO (1993) yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve tasarım tabaka maliyetleri hesaplanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Zemin Örneği

Çalışma kapsamında, Malatya Yazihan İlçesi Eğribük Mahallesinden zemin örneği temin edilmiştir. Zemin örneğinin özelliklerini tespit için ASTM D422-63 ve ASTM C136/C136M standartlarına göre elek analizi ile hidrometre deneyi yapılmış ve zeminin dane çapı dağılımı tespit edilmiştir. Zeminin dane çapı dağılım eğrisi Şekil 1'de verilmiştir.

Akabinde, ASTM D4318'e göre zemin örneğinin kıvam limitleri belirlenmiştir. Daha sonra, ASTM D824 standardına göre özgül ağırlığın tespiti için piknometre deneyi gerçekleştirilmiştir. Ardından, zeminin maksimum kuru yoğunluğu (ρ_{kmax}) ve optimum su içeriği (ω_{opt}) ASTM D698 esaslarında standart proktor deneyi ile tespit edilmiştir. Uygulanan deneyler sonucunda kullanılan zeminin "kötü derecelenmiş kum" (SP) ve AASHTO sınıflandırma yöntemine göre "A-3" zemin sınıfına ait olduğu tespit edilmiştir. Tablo 1'de deneyler ile belirlenen zemin özellikleri ve Şekil 2'de zemin numunesinin fotoğrafı sunulmuştur.



Şekil 1. Dane çapı dağılımı eğrisi.

Tablo 1. Zemin numunesinin belirlenen özellikleri

Değişken Adı	Simge	Birim	Değeri	Standartlar
Maksimum kuru yoğunluğu	ρ_{kmax}	g/cm ³	1,685	ASTM D698
Tane yoğunluğu	ρ_s	g/cm ³	2,669	ASTM D824
Likit limit	ω_L	%	-	ASTM D4318
Plastik limit	ω_p	%	-	ASTM D4318
Plastisite İndisi	PI	%	NP	ASTM D4318
Optimum su içeriği	ω_{opt}	%	18,5	ASTM D698
Sınıflandırma (Birleştirilmiş Zemin Sınıfı)	-	-	SP	ASTM D2487



Şekil 2. Zemin numunesi.

2.2 Metakaolin

Metakaolinin genel kimyasal bileşimi $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ şeklindedir ve kaolin kilinin saflaştırılmasıyla elde edilmektedir. Ayrıca amorf bir yapıya sahiptir ve beyaz renklidir. Üretim sürecinde, kil mineralleri yaklaşık 100-200°C sıcaklıkta içeriğinde bulunan suyu kaybeder.

Kaolin kilinin suyunu kaybettiği dehidrolizasyon sıcaklığı ise 500°C ve 800°C arasındadır. Dehidrolizasyon ardından oluşan sıcaklıkta, kaolinit yapısını korur ve meydana gelen bu ürüne metakaolin denir. Metakaolinin temel bileşenleri SiO_2 ve Al_2O_3 'tür. Bunun yanı sıra, Fe_2O_3 , Na_2O ve K_2O gibi elementler az miktarda bulunur. Metakaolinin katkı malzemesi olarak kullanılması, özellikle SiO_2 ve Al_2O_3 içeriğine dayanmaktadır. Metakaolinin genellikle amorf veya az kristalli SiO_2 gibi bileşikler daha çok ticari amaçlar için kullanılan ürünlerde yer almaktadır (Nebioğulları, 2010; Karahan, 2011). Deneysel çalışmalarda kullanılan metakaolin'in kimyasal özellikleri Tablo 2'de ve numune örneği ise Şekil 3'te gösterilmiştir.

Tablo 2. Metakaolinin kimyasal özellikleri

Kimyasal Formülü	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Renk	Beyaz
Al_2O_3	% 43,11
SiO_2	% 56,68
K_2O	% 0,30
CaO	% 0,30
SO_3	% 0,0006
Fe_2O_3	% 1,38
MgO	% 0,30
Na_2O	% 0,62
Kızdırma Kaybı (KK)	% 1,40



Şekil 3. Metakaolin numunesi görüntüsü.

2.3. Standart Proktor ve Serbest Basınç Deneyleri

Standart proktor deneyi, su ile mekanik gereçler kullanılmasıyla havanın atılarak zemin numunesinin ρ_{kmax} ve ω_{opt} belirlenmesine dayanır. Söz konusu deney

ASTM D698 standardına uygun olarak gerçekleştirilir. Kullanılan kalıp boyutları yaklaşık 105 mm çapında ve 115,5 mm yüksekliğindedir. İstenen su oranlarıyla yoğrulan örnekler kalıba yerleştirilir ve 2,5 kg ağırlığındaki tokmak ile vurularak (25 defa) sıkıştırılma işlemi gerçekleştirilir. 3 aşamada serilme süreci yapılır, son katmandan sonra üstü düzeltilir ve kütlesi belirlenir. Bu aşamalar, değişik oranlarda su içeriklerinde 5 kez tekrarlanır ve her birinde su içeriği ile kuru yoğunluğu hesaplanır. Belirlenen veriler doğrultusunda kompaksiyon eğrisi oluşturulur ve ρ_{kmax} ile ω_{opt} belirlenir (Yılmaz ve ark., 2017).

Serbest basınç deneyi, hazırlanan numunelere belirli kür sürelerinin ardından dayanımlarının belirlenmesi amacıyla ASTM D2166 standardına uygun olarak gerçekleştirilir. Uygulama esnasında, zemin numunesi etüvde 24 saat boyunca 105°C'de kurutulur. Kullanılacak kalıbın boyutları (çap 38 mm ve boy 76 mm) deney başlamadan önce ölçülerek kontrol edilir. Önceden hesaplanan miktarlarda su ilave edilerek hazırlanan örnekler, kalıba 4 aşamada serilir. Her tabakadan sonra çekiçle 10 defa vurularak sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra numune kalıptan çıkarılır. Belirlenen kür süresince oda sıcaklığında bekletilir ve beklenen kür süresi sonrası örnekler cihaza yerleştirilir. Birim boy kısalması %0,5 ve %2 arasında (dakikada) olmalıdır. Deney süresi 10 dakikayı geçmemelidir. Deney sonrasında şekil değişimleri ve deformasyonlar gözlemlenerek numunelerin dayanım değerleri belirlenir (Orhan, 2013).

Bu çalışmada, serbest basınç deneyi, zemin ve karışım numunelerine 28 günlük kür süresinin ardından ASTM D2166 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri ρ_{kmax} ve ω_{opt} değerlerinde olacak şekilde hazırlanmıştır. Şekil 4'te serbest basınç deneyinin uygulama aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 4. Serbest Basınç Deneyine ait Uygulama Aşamaları

2.4 Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı Deneyi

Kaliforniya taşıma gücü oranı (KTO) deneyi, ρ_{kmax} ile ω_{opt} değerlerine göre hazırlanan numunelere, planlanan kür süresinin ardından, 1,27 mm/dk hızla yaklaşık 1935 mm²

alanlı pistonun zemine itilmesi ile dayanımının belirlenmesine dayanır. ASTM D1883-13 göre uygulanmaktadır. KTO değeri, zeminin belirli penetrasyon (2,5 mm ile 5 mm) değerlerinde tatbik

edilen yükün standart kırma taş örneğine, aynı derinlikte batması için tatbik edilen yüke orantılanmasıyla hesaplanır. Deneyin uygulanmasında, kullanılacak kalıbın boyutları ölçülür ve kaydedilir. Akabinde, zemin örneği 24 saat süre ile 105°C'de bırakılır. ρ_{kmax} ile ω_{opt} değerinde numune hazırlanır. Karışım KTO kalıbına 3 safhada ve her tabakada tokmakla 56 defa vurularak sıkıştırılır.

Sıkıştırma işlemi tamamlandıncaya numune bulunan kalıp tartılır. Numuneler belirlenen kür süresinden sonra deney cihazına yerleştirilir. Deney neticesinde KTO değerleri penetrasyonun 2,5 ile 5 mm değerleri için belirlenir (Yılmaz ve ark., 2017). Şekil 5'te KTO deney aşamaları görülmektedir.

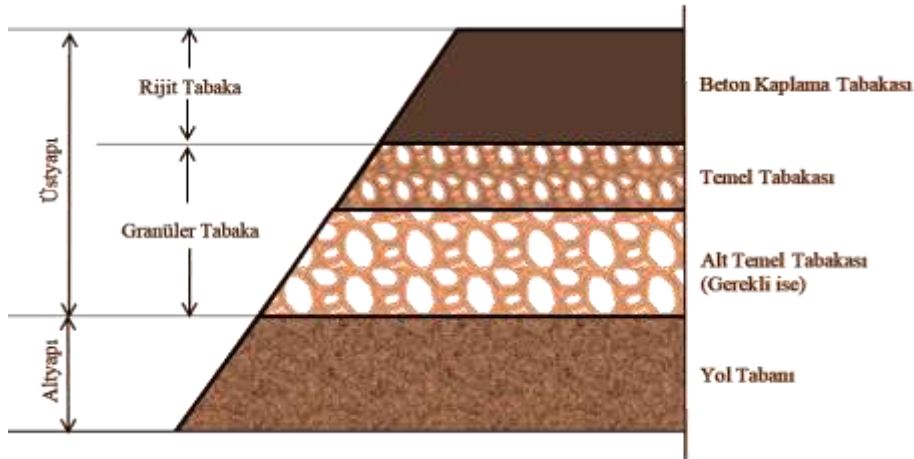


Şekil 5. Kaliforniya taşıma oranı deneyi uygulama aşamaları

2.5 Rijit Üst Yapı Tasarımı

Rijit üst yapı tasarımı, yol taban zeminini üzerine çimento esaslı dizayn edilen beton bir plaka olarak yapılandırılır. Tasarım aşamasında, dizayn ömrü, tabaka kalınlıkları, trafik yoğunluğu, yöresel faktörler, ekonomik ve zemin koşulları gibi çeşitli unsurlar dikkate alınır. Analiz süresi

boyunca kaplama üzerinden geçen yoğun trafik yüklerinin neden olabileceği büyük deformasyonlara karşı dayanıklı olacak beton ve tabaka kalınlıklarının belirlenmesi önem taşımaktadır (AASHTO, 1993; KGM, 2019). Şekil 6, rijit üstyapıdaki tabakaları göstermektedir.



Şekil 6. Rijit Üstyapı Kesit Görünümü (Kök, 2019; Geçkil ve ark., 2021b)

AASHTO (1993) tasarım rehberine göre eşitlik 1 yardımı ile rijit üstyapı tabaka kalınlıkları hesaplanmaktadır (AASHTO, 1993).

$$\log_{10}(T_{8,2}) = Z_R \cdot S_0 + 7,35 \cdot \log_{10}(d + 1) - 0,06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{1 + \frac{1,624 \cdot 10^7}{(d + 1)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 \cdot P_t) \cdot \log_{10} \left[\frac{S' \cdot c \cdot Cd(d^{0,75} - 1,132)}{215,63 \cdot J[d^{0,75} \frac{18,42}{(Ec/k)^{0,25}}]} \right] \quad 1$$

Burada;

$T_{8,2}$: Proje trafiğinin eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı (8,2ton),

Z_R : Standart sapma,

S_0 : Performans ve trafik öngörüsünün bileşik standart hatası,

d : Beton kaplama kalınlığı rijit üstyapı (inç),

ΔPSI : Toplam hizmet kabiliyeti kaybı,

J : Yük transfer katsayısı,

P_0 : Başlangıç hizmet kabiliyeti indeksi,

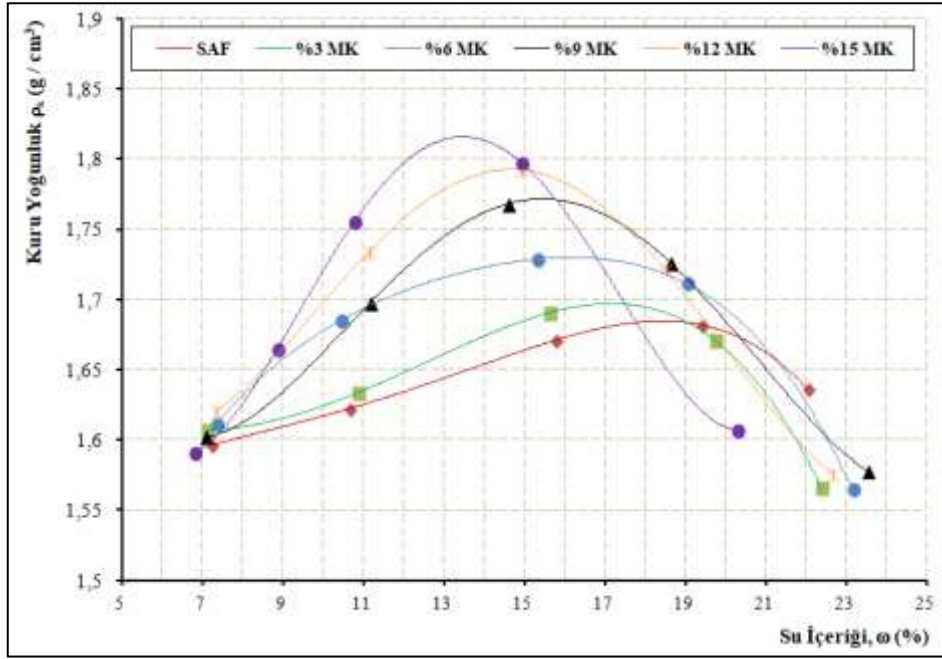
C: Drenaj katsayısı,
 P: Nihai hizmet yeteneği indeksini gösterir,
 S_c: Betonun kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) (psi),
 k: Yatak katsayısı (pci),
 E_c: Betonun elastisite modülü (psi) değerini göstermektedir.
 Bu çalışmada, MK ile yapılan stabilizasyonun rijit üstyapı üzerindeki etkilerini belirlemek maksadıyla tasarım optimum karışım oranı dikkate alınarak yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Yol taban zemininin metakaolin ile stabilizasyonunun rijit yol üst yapı etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, uygulanan deneyler ve rijit üst yapı tasarımı sonuçları aşağıdaki başlıklarda sunulmuştur.

3.1. Standart Proktor Deneyi Bulguları

Katkısız zemin (SAF) ile ağırlıkça %3, %6, %9, %12 ve %15 metakaolin (MK) katkılı örneklere standart proktor deneyi uygulanmıştır. Deney neticesinde belirlenen ω (%) ve ρ_k (g/cm³) sonuçlarına göre Şekil 7'de çizilen kompaksiyon eğrileri verilmiştir. Belirlenen ω_{opt} ile ρ_{kmax} sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 7. Standart proktor deneyine ait kompaksiyon eğrileri.

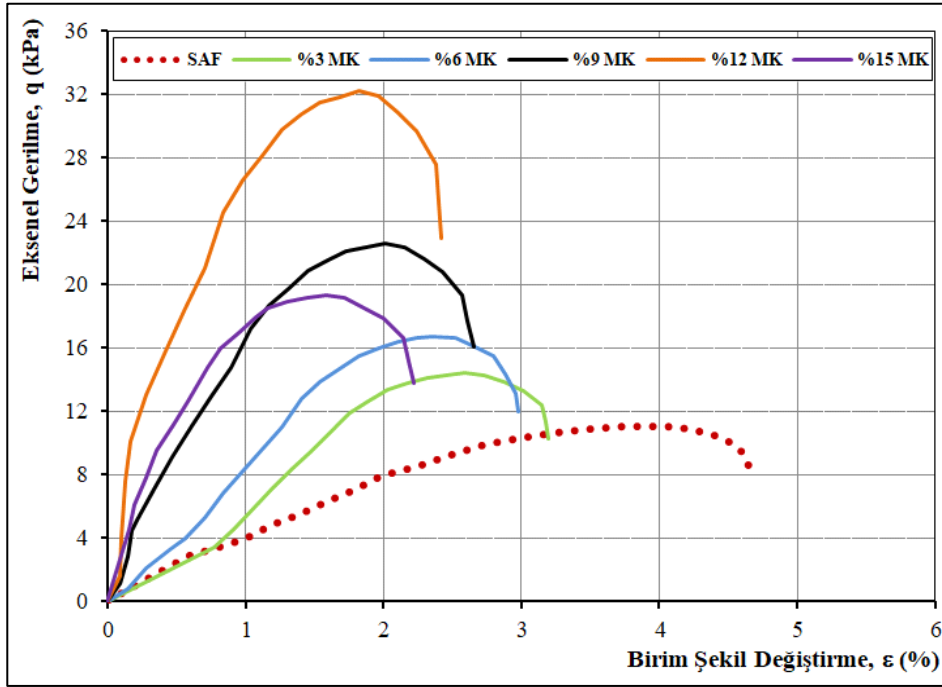
Tablo 3. katkısız zemin ve metakaolin katkılı zeminin standart proktor deneyi sonuçları

Test Numunesi	ρ_{kmax} (g/cm ³)	ω_{opt} (%)
SAF	1,685	18,50
%3 MK	1,697	17,20
%6 MK	1,730	16,30
%9MK	1,772	15,50
%12MK	1,792	14,60
%15MK	1,813	13,70

Proktor deneyi sonuçlarında, hazırlanan karışımlarda MK oranının artmasıyla ω_{opt} değerinin azaldığı, ρ_{kmax} değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu bulguların, literatür (Ghida, 2022) ile uyumlu olduğu görülmüştür. MK'nın zemin numunesinden daha ince dane yapısına sahip olması nedeniyle filler (dolgu) etkisi gösterdiği bu durumun ρ_{kmax} değerini arttığı düşünülmektedir. Ayrıca uygulanan deneylerde MK oranı artıkça, ω_{opt} azalmasının, literatürde (Chakkor, 2021) MK'nın daha az suya ihtiyaç duyan amorf bir morfolojiye sahip olduğu görüşüyle uyumlu olduğu görülmektedir.

3.2. Serbest Basınç Deney Bulguları

Katkısız zemin (SAF) ile ağırlıkça %3, %6, %9, %12 ve %15 MK'lı örnekler, belirlenen ω_{opt} ile ρ_{kmax} verileri dikkate alınarak hazırlanmıştır. Örnekler, oda sıcaklığındaki 28 günlük kür süresi sonrası serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Deneylerin 10 dakikayı aşmadığı gözlemlenmiştir. Katkısız zemin ve MK katkılı numunelerin aksel gerilme (q) ile birim şekil değiştirme (ϵ) sonuçları grafiklerle Şekil 8'de, serbest basınç mukavemeti (q_u) ve serbest basınç mukavemetinin olduğu andaki birim şekil değiştirme (ϵ_u) değerleri Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 8. 28 günlük kür sonrası katkısız ve metakaolin katkılı numunelerin q-ε grafiği.

Tablo 4. 28 günlük kür sonrası katkısız ve metakaolin katkılı q_u - ϵ_u verileri

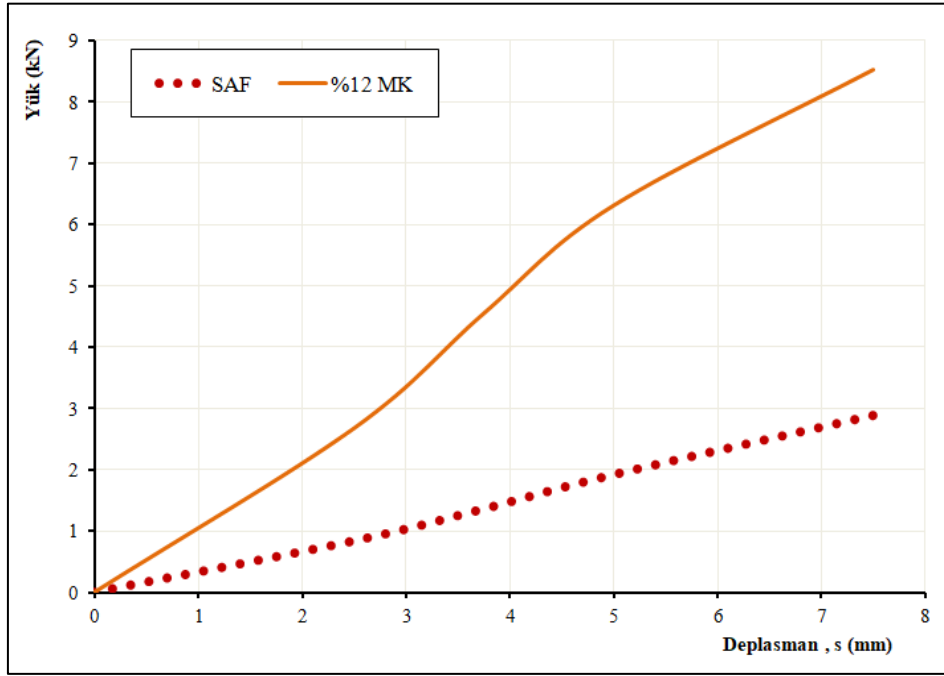
Test Numunesi	q_u (kPa)	ϵ_u (%)
SAF	11,03	3,98
%3 MK	14,40	2,59
%6 MK	16,67	2,35
%9 MK	22,57	2,01
%12 MK	32,17	1,82
%15 MK	19,33	1,58

Serbest basınç deneyi sonuçlarında, MK'lı numunelerin katkısız zeminin serbest basınç dayanımından daha fazla olduğu görülmüştür. MK katkısının zeminin dayanımını artırdığı ve bu sonuçların literatürle (Reddy ve ark., 2018; Abdulkareem ve Abbas, 2021; Ayyappan ve ark., 2017) uyumlu olduğu tespit edilmiştir. MK ilavesi yapılan tüm numunelerin serbest basınç dayanımlarının katkısız zemine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında metakaolin ilavesiyle hazırlanan karışımlarda, mukavemet değerinde en iyi artış %12 MK oranında görülmüş ve katkısız zemine göre 2,92 kat artış olduğu hesaplanmıştır. Literatürde (Siddique ve Kalus, 2009; Badogiannis ve ark., 2004; Khatib ve Hibber, 2005), kalsine edilme sürecinde metakaolindeki alüminyum ve silisin kristal yapılarının bozulduğu, amorf yapılı ve yüksek puzolanik özelliklere sahip bir ürün ortaya çıktığı, ayrıca metakaolinin ince yapısının, boşlukları doldurarak filler etkisi ile mekanik özellikleri iyileştirdiği belirtilmektedir. Çalışmamızda hazırlanan karışımlarda metakaolinin puzolanik özellik gösterdiği ve filler etkisiyle mekanik özellikleri artırdığı düşünülmektedir. Ancak, metakaolin miktarının artışının

belirli bir oranın üzerine çıkmasının yararlı olmadığı ve fazla katkı malzemesinin reaksiyona giremediği, bu nedenle karışımların dayanımını yeterince artıramadığı düşünülmektedir. MK miktarının artışıyla birlikte birim şekil değiştirmenin azaldığı ve bu durumun MK'nın numunelerin sertliğini artırmasıyla (rijitleştirme etkisi) ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Elde edilen sonuçlar, literatürde (Uzuner, 2014) belirtilen yumuşak zeminlerin sert zeminlere kıyasla daha fazla deformasyona uğradığı görüşüyle örtüşmektedir.

3.3. Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı Deneysel Bulguları

KTO deneyi yapılmasına yönelik serbest basınç deney sonuçlarından elde edilen ağırlıkça %12 MK sonucu esas alınarak, katkısız zemin (SAF) ve %12 MK ilaveli karışım numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler ω_{opt} ve ρ_{kmax} esas alınarak hazırlanmıştır. Numunelere 28 günlük kür süresinin ardından KTO deneyi uygulanmıştır. KTO deneyleri sonucunda 28 günlük kür süresi sonunda tespit edilen yük-deplasman grafiği Şekil 9'da ve KTO değerleri ise Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 9. 28 günlük kür ardından katkısız ve metakaolin katkılı numunelerin yük-deplasman ilişkisi.

Tablo 5. 28 günlük kür ardından katkısız ve metakaolin katkılı numunelerinin test sonuçları

Test Numunesi	2,5 mm için KTO Değeri, (%)	5 mm için KTO Değeri, (%)
SAF	6,36	9,65
%12 MK	20,20	31,61

KTO deneyi sonuçları incelendiğinde, 28 günlük kür süresinin ardından KTO deneyine uygulanan numunelerde, 2,5 ile 5 mm deplasman için elde edilen KTO değerleri katkısız zemin için sırasıyla %6,36 ve %9,65; %12 MK ilaveli zemin için ise %20,20 ve %31,61 olarak bulunmuştur. KTO değerinin, MK katkılı örneklerde 2,5 ile 5 mm penetrasyon için katkısız zemin numunelerine göre sırasıyla %217,61 ve %227,56 oranında arttığı belirlenmiştir. MK'lı karışımların KTO değerinin katkısız numuneden daha yüksek olduğu bu durumun literatürde (Onyelowe ve ark., 2023; Umar ve ark., 2022; Attah ve ark., 2009) MK katkılı zeminlerin taşıma gücünü iyileştirdiği görüşü ile örtüştüğü belirlenmiştir.

3.4. Rijit Üst Yapısı Tasarımı Yapılması

AASHTO 1993'te belirtilen kurallara uygun olarak, rijit üst yapı tasarımı esaslarına göre, 28 günlük kür süresinin ardından elde edilen katkısız zemin ve %12 MK ilaveli zemin KTO değerleri kullanılarak dizayn yapılmıştır. Dizaynda, derzli donatısız rijit yol kaplama kalınlığı incelenmiştir. Bu etüt yapılırken yolun;

- Proje analiz süresinin 30 yıl olduğu,
- 2 x 2 = 4 şeritli devlet yolu,
- Trafiğin ilk sene için günlük kamyon 1355 adet treyler, 498 adet, otobüs 1298 adet, otomobil 10500 adet, minibüs 960 adet olduğu varsayılarak, 8,2 ton

eşdeğer standart tek dingil yükü tekrar sayısı 130.000.000 olarak değerlendirilmiştir.

- Güvenilirlik oranı R=% 99,9 olarak alınmıştır.
- Hesaplanan rijit üstyapı tabaka kalınlığı, temel veya alt temelin var olduğu esas hesaplanmıştır.

Rijit üst yapı tasarımı için en yüksek KTO değerleri baz alınarak katkısız zemin için %9,65 ve %12 MK ilaveli karışım için %31,61 kullanılmıştır. Hesaplamalarda Tablo 6'daki parametreler kullanılmıştır.

Tablo 6. Rijit üstyapı hesabında kullanılan parametreler

Parametreler	Seçilen Değer
Proje trafiğinin eşdeğer standart tek dingil yükü tekrerrür sayısı, $T_{8,2}$	130.000.000
Portland çimentolu betonun kopma modülü (psi)	660
Drenaj katsayısı, Cd	1
Betonun elastisite modülü, E_c (C 35/45)	4.786.244
Yolun ilk servis kabiliyeti, P_0	4,5
Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası, S_0	0,35
Yolun son servis kabiliyeti, Pt	2,5
Servis kabiliyeti indeksi, ΔPSI	2
Yük transfer katsayısı, J	2,7
Güvenilirliğin standart normal sapması, Z_R (Devlet yolu R=%99,9)	-3,090

Hesaplamalarda ilk adım olarak, yol taban zemininin yatak katsayısı (k) ve esneklik modülü (M_R) belirlenmiştir. M_R hesaplanmasına yönelik, 2024 yılı Ocak ayında AASHTO tarafından yayımlanan mekanik-ampirik teknik revizyonları içeren kaplama tasarım kılavuzu 3. baskısında (MEPDG-3) yer alan, zemine ait M_R (psi) = $2555 (KTO)^{0.64}$ korelasyonu (AASHTO, 2024) ve $k = M_R / 19,4$ korelasyonu (AASHTO, 1993) mevcuttur. M_R ve k değerlerinin belirlenmesinde söz konusu korelasyon kullanılmıştır.

Katkısız zemin için M_R ve k değeri 10.902 psi (75183127 Pa) ve 561,94 hesaplanmıştır. %12 MK'lı karışım için M_R ve k değeri 23.296 psi (160661042 Pa) ve 1200,82 hesaplanmıştır. Bu veriler ve Tablo 6'daki değerler kullanılarak denklem (1) yardımı ile C 35/45 beton sınıfı için katkısız zeminin plak kalınlığı (d) 18,76 inç uygulama

esas alınarak 48 cm, %12 MK katkılı zemin için ise 13,38 inç uygulama esas alınarak 34 cm seçilmiştir. Bu sonuçlara göre, %12 MK içeren karışımlar için tabaka kalınlığının katkısız zemine göre 14 cm azalarak yaklaşık %29,17 oranında azaldığı belirlenmiştir.

3.5. Rijit Üstyapının Ekonomik Analizi

MK ile stabilize edilmiş yol tabanının karayolu rijit üstyapı maliyetine etkisi, Karayolları Genel Müdürlüğü şartlarına göre değerlendirilmiştir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın 2024 yılı birim fiyat cetvellerine (ÇSB, 2024) göre, C 35/45 basınç sınıfındaki betonun birim alan (m^2) maliyeti hesaplanmıştır. Analiz ve maliyet hesaplamalarına göre, katkısız zemin için rijit yol üstyapısının birim maliyeti 1364,28 TL/ m^2 , %12 MK katkılı zemin için ise 966,55 TL/ m^2 olarak belirlenmiş ve bu bilgiler Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Katkısız ve %12 MK katkılı zeminler için tabaka birim maliyetleri

Poz no	Tanım	Birim	Birim Fiyat (TL)	m^2 /cm Maliyeti (TL)	Hesaplanan Tab.Kal. (cm)	m^2 Maliyeti (TL)
15.150.1007 (Katkısız)	Beton Santralinde Üretilen veya Satın Alınan ve Beton Pompasıyla Basılan, C 35/45 Basınç Dayanım Sınıfında	m^3	2842,8	28,43	48	1364,28
15.150.1007 (%12 MK)	Beton Dökülmesi (Beton Nakli Dâhil)	m^3	2842,8	28,43	34	966,55

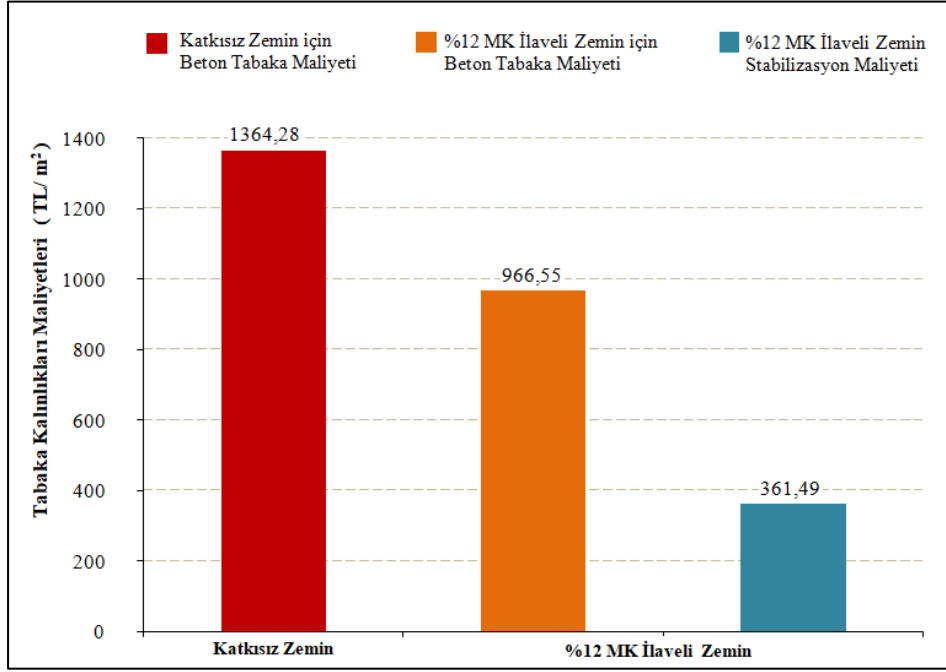
Ayrıca, %12 MK ile yol tabanının 20 cm kalınlığında stabilize edilmesindeki analizde; malzemenin taşınması, traktör riperi ile zeminin kabartılması, traktör buldozeri ile stabilizatör malzeme dağıtılması, greyder ile serme ve karıştırma, arazöz ile sulama, titreşimli silindirle ve lastik tekerlekli silindir ile sıkıştırma yapılması esas alınarak 361,49 TL/ m^2 alınmıştır. MK'nın ton bazında şantiye mahalline teslim fiyatı göz önüne alınmıştır. Tablo 8'de stabilizasyonun m^2 birim maliyetleri verilmiştir. Ayrıca, katkısız zemin ile %12 MK katılarak iyileştirilen zeminler göz önüne alınarak Şekil 10'da %12MK ilave edilmiş ve edilmemiş durumda beton tabaka ve zemin stabilizasyon

maliyetleri görülmektedir.

Hesaplanan tabaka maliyetleri değerlendirildiğinde, yapım maliyetinde %2,68 oranında bir azalma görülmüştür. Yapılan hesaplamalarda, 20 metre genişliğindeki ve 1000 metre uzunluğundaki bir yolda, %12 MK ile iyileştirilmiş bir yol tabanı ile 730.040,00 TL maliyet azaltılarak tasarruf sağlanacaktır. Bu kapsamda, karayolu ağının uzunluğu dikkate alındığında, zemin stabilizasyonu sayesinde rijit kaplama yapılması durumunda önemli kazanç sağlanacağı değerlendirilmektedir.

Tablo 8. %12 MK katkılı zemin için stabilizasyon birim maliyetleri

Poz no	Tanım	Birim	Maliyet (TL)			
			Birim Fiyat (TL)	m^2 /cm	m^2	
KGM 03.507	Traktör riperin bir saatlik ücreti	saat	2083,73	0,0208	0,42	
KGM 03.511	Traktör Buldozerin 1 saatlik ücreti	saat	1946,93	0,0876	1,75	
KGM/15.140	Makina ile serme ve karıştırma (Greyder ile)	m^3	13,95	0,1395	2,79	
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	ton	104,79	0,1048	2,10	
KGM/15.052/3	Titreşimli silindirle sıkıştırma yapılması	saat	1221,53	0,1222	2,44	
KGM/15.058/1	Lastik tekerlekli silindir ile sıkıştırma yapılması	saat	891,94	0,0892	1,78	
Piyasa	%12 MK Temini Nakliye Dahil	kg	9,12	17,5104	350,21	
					Toplam: 361,49	



Şekil 10. %12MK ilave edilmiş ve edilmemiş durumda beton tabaka ve zemin stabilizasyon maliyetleri.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu araştırmada, kötü derecelenmiş kum bir yol tabanın metakaolin ile iyileştirilmesinin rijit yol üst yapısı kalınlığı ile maliyeti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

Standart proktor deneyi sonuçlarında; MK oranının artmasıyla ω_{opt} değerinin azaldığı, ρ_{kmax} değerinin ise arttığı, bu durumun MK'nın filler (dolgu) etkisi gösterdiği ve zemin numunesinden daha az su emme kapasitesine sahip olmasının etkili olduğu düşünülmektedir.

MK miktarının artmasıyla numunelerin sertliğini arttırdığı bu nedenle birim şekil değiştirme azaldığı değerlendirilmiştir.

Serbest basınç deneyi neticelerinde, MK ile iyileştirilen zeminlerde 28 günlük kür sonunda en büyük mukavemet değerinin ağırlıkça %12 MK'lı numunede belirlenmiştir. Katkısız zemine göre mukavemet değerinin 2,92 kat arttığı belirlenmiştir.

KTO deney sonuçlarında ise %12 MK katkılı zeminlerin 28 günlük kür süresi sonundaki 2,5 ile 5 mm penetrasyon için KTO değerleri, katkısız zemin numunelerine göre sırasıyla %217,61 ve %227,56 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu artışın MK katkılı zeminlerin taşıma gücünü iyileştirdiğini göstermektedir.

KTO ve serbest basınç deney sonuçlarından, metakaolinin puzolanik özellik gösterdiği ve filler etkisi meydana getirerek mekanik özellikleri iyileştirdiği değerlendirilmektedir.

Yol üst yapısı tasarım sonuçlarında ise, %12 MK içeren stabilize zeminler için tasarlanan rijit üstyapı kalınlığında %29,17 oranında azalma olduğu, bu durumun MK'nın taşıma gücüne olumlu etkisinden kaynaklandığını göstermektedir.

Maliyet analizi sonuçlarında ise, %12 MK katkılı stabilize zeminlerin üstyapı maliyetlerinin, katkısız zemine kıyasla

%2,68 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu hesaplamalar ışığında, 20 metre genişliğindeki ve 1000 metre uzunluğundaki bölünmüş bir yolda, %12 MK ile yol taban zemininin stabilizasyonu durumunda rijit üstyapı maliyetinde 730.040,00 TL maliyet azaltılarak tasarruf sağlanabilecektir.

Sonuç olarak, metakaolinin yol taban zemininin iyileştirilmesinde kullanılmasının, zeminin taşıma kapasitesini artırılmasını sağlayacağı, rijit üst yapı tabaka kalınlığını ve maliyetini düşüreceği belirlenmiştir. Böylelikle rijit üst yapı yapımında kullanılan malzeme miktarının azaltılması ile, özellikle beton imalatında kullanılan çimento ve agreganın üretimi, taşınması ve uygulanmasında meydana gelen CO₂ salımı başta olmak üzere çevreye verilen zararın azaltılacağı ve böylelikle çevrenin korunmasına katkı sağlanacağı düşünülmektedir. Ayrıca, MK'nın proje bazında temin miktarının artmasıyla ve karayolu projelerinin uzunlukları da dikkate alınarak, MK'nın daha ekonomik olarak tedarik edilerek projelerin maliyetinin daha da azaltılabileceği değerlendirilmektedir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazar(lar)ın katkı yüzdesi aşağıda verilmiştir. Tüm yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	T.G.	T.S.	B.K.
K	34	33	33
T	34	33	33
Y	34	33	33
VTI	34	33	33
VAY	34	33	33
KT	34	33	33
YZ	34	33	33
KI	34	33	33
GR	34	33	33
PY	34	33	33
FA	34	33	33

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu çalışmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Destek ve Teşekkür Beyanı

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.

Kaynaklar

- AASHTO. 1993. Guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA, pp: N1.
- AASHTO. 2024. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, 3rd Edition (MEPDG-3), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA, pp: 128.
- Abdulkareem SA, Abbas JM. 2021. Effect of adding metakaolin based geopolymer to improve soft clay under different conditions. *Earth Environ Sci*, 856: 012011-8.
- Attah IC, Jonah CA, Etim RK, Ogarekpe NM. 2019. Modelling and predicting CBR values of lateritic soil treated with metakaolin for road material. *ARPN J Engin Applied Sci*, 14(20): 3609-3618.
- Ayyappan A, Palanikumar S, Kumar D, Vinoth M. 2017. Influence of geopolymers in the stabilization of clay soil. *Inter J Emerging Technol Engin Res*, 5: 108-120.
- Badogiannis E, Papadakis VG, Chaniotakis E, Tsivilis S. 2004. Exploitation of poor Greek kaolins: strength development of

- metakaolin concrete and evaluation by means of k-value. *Cement Concrete Res*, 34: 1035-1041.
- Chakkor O. 2021. Kırmızı çamur ve metakaolin tabanlı geopolymer harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, pp: 138.
- Çınar M. 2024. Kahramanmaraş depremi sonrası oluşan gaz beton atıkları ile stabilize edilmiş killi kum zeminin geoteknik özelliklerinin araştırılması. *DUJE*, 15: 269-275.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Birim Fiyatları. 2024. URL: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/1--2024-birim-fiyatlar-20240123142524.pdf>. (erişim tarihi: 24 Mayıs 2024).
- Demir A, Sarıcı T. 2017. Bearing capacity of footing supported by geogrid encased stone columns on soft soil. *Geomechan Engin*, 12(3): 417-439.
- Geçkil T, Sarıcı T, Karabaş B. 2021a. Siyah karbon ile stabilize edilen taban zeminin yol esnek üst yapı maliyetine etkisi. *Avrupa Bilim Teknol Derg*, (23): 222-235.
- Geçkil T, Sarıcı T, Karabaş B. 2021b. Siyah Karbon Stabilizasyonlu Zeminin Rijit Kaplama Kalınlığı ve Maliyetine Etkileri. *El-Cezerî J Sci Engin*, 8(3): 1372-1384.
- Ghida A. 2022. Effects of incorporation of cement and metakaolin on the mechanical properties of poorly graded sand. *Arabian J Geosci*, 15(24): 1777.
- Jaubertie R, Rendell F, Rangeard D, Molez L. 2010. Stabilisation of estuarine silt with lime and/or cement. *Applied Clay Sci*, 50: 395-400.
- Karahan O. 2011. Metakaolin ve silis dumanı içeren harçların aşınma direncinin karşılaştırılması. Bilimsel Araştırma Projesi, Kesin Sonuç Raporu, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi, Kayseri, Türkiye, ss: 68.
- KGM. 2019. Karayolları beton yol üstyapılar projelendirme rehberi. T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, ss: 53.
- Khatib JM, Hibbert JJ. 2005. Selected Engin properties of concrete incorporating slag and metakaolin. *Construct Build Mater*, 19: 460-472.
- Kök BV. 2019. Karayolu Mühendisliği ve Tasarımı, Nobel Akademik Yayıncılık Ankara, ss:192.
- Kumar BRP ve Sharma RS. 2004. Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. *J Geotec Geoenviron Engin*, 130(7): 764-767.
- Kulanthaivel P, Harikaran M, Gokulakannan S, Vinodhkumar A. 2023. Eco-friendly soil stabilization: a combined approach using lime and waste eggshell powder. *Global NEST J*, 25(7): 120-130.
- Nebiğulları MA. 2010. Metakaolin, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkısının beton hidratasyon sıcaklığına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, Türkiye, ss: 130.
- Ok B, Demir A, Sarıcı T, Ovalı M. 2021. Geosentetiklerle güçlendirilmiş karayolu temellerinin plaka yükleme deneyleri ile değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniv Müh Bilim Derg*, 27(6): 718-728.
- Onyelowe KC, Ebid AM, Kontoni DN, Onukwugha ER. 2023. Effect of metakaolin and ashcrete blend on the mechanical properties of lateritic soil for sustainable subgrade and subbase construction. *Multiscale Multidiscip Modeling, Experi Design*, 7(2): 1197-1208.
- Orhan M. 2013. Zemin mekaniği laboratuvar deneyleri. Gazi Kitabevi, Ankara, Türkiye, ss: 156.
- Öksüz K, Yıldız AA. 2006. Uçucu külün zemin stabilizasyonunda kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, ss: 146.

- Reddy DS, Kowshik K, Kishor MJ, Durga RV, Kumar VP. 2018. Enhancement of soil properties by using fly ash and metakaolin, *Inter J Innov Technol Explor Engin (IJITEE)*, 8(2): 1-6.
- Sarıcı T. 2019. Puzolan ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atıklarının granüler dolgu olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi. FBE, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye, ss: 335.
- Sarıcı T. 2014. Geosentetik ile güçlendirilmiş taş kolonların taşıma kapasitesinin analizi. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye, ss: 134.
- Sarıcı T, Ok B, Mert A, Çömez Ş. 2022. The resilient modulus of hybrid construction and demolition wastes reinforced by a geogrid, *Acta Geotech Sloven*, 19(2022/2): 2-14.
- Siddique R, Kalus J. 2009. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review, *Applied Clay Science*, 43, 392-400.
- Tunç A. 2002. Yol mühendisliğinde geoteknik ve uygulamaları. Nobel Yayınevi, Ankara, Türkiye, ss: 912.
- Tunç A. 2007. Yol malzemeleri ve uygulamaları. Nobel Yayınevi, Ankara, Türkiye, ss: 840.
- Umar SY, Yero SA, Muhammed A, Abdulkarim II. 2022. Effect of metakaolin on strength properties of lateritic soil intended for use as road construction material. *Path Sci: Inter Electron Sci J*, 8: 2.
- Uzuner BA. 2016. Temel mühendisliğine giriş. Derya Kitabevi, Trabzon, Türkiye, ss: 409.
- Uzuner BA. 2014. Temel zemin mekaniği. Derya Kitabevi, Trabzon, Türkiye, ss: 734.
- Wassie TA, Demir G. 2024. Mechanical strength and microstructure of soft soil stabilized with cement, lime, and metakaolin-based geopolymer stabilizers. *Adv Civil Engin*, 2024: 6613742.
- Yılmaz I, Yıldırım M, Keskin İ. 2017. Zemin mekaniği laboratuvar deneyleri ve çözümlü problemler. Seçkin Kitabevi, Ankara, Türkiye, ss: 288.