

Yol Taban Zemininde Metakaolin Kullanımının Esnek Üst Yapı Tasarımına Etkisi

Tacettin GEÇKİL¹, Talha SARICI^{2*}, Bahadır KARABAŞ³

Öz

Bu çalışmada, kaolin kilinden elde edilen metakaolin kullanılarak stabilize edilen yol tabanının üzerine tasarlanan esnek bir üstyapıda, bu ıslahın etkileri, tabaka kalınlığı ve yapım maliyeti açısından incelenmiştir. Araştırmanın ilk aşamasında, zemin örneklerinin özellikleri deneysel çalışmalar ile belirlenmiştir. Ardından, zemin örneklerine ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 oranlarında metakaolin ilave edilerek hazırlanan numunelere proktor deneyleri uygulanmıştır. Bu işlemleri takiben, hazırlanan serbest basınç deneyi numuneleri, 28 gün kür sonrasında test edilmiştir. Deneyler sonucunda, en yüksek basınç dayanımının %6 metakaolin içeren karışımlarda elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca, katkısız ve %6 metakaolin katkılı numuneler, 28 gün kür sonrası Kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR) deneyine tabi tutulmuş ve %6 metakaolin içeren numunelerin CBR değerinin %95,44 oranında arttığı tespit edilmiştir. Elde edilen bu CBR değerleri kullanılarak, Amerikan Devlet Karayolları ve Ulaştırma Birliği (AASHTO) 1993 esnek yol üstyapı tasarım esaslarına göre üstyapı tabaka kalınlıkları ve maliyetleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, %6 metakaolin ile stabilize edilen yol tabanı sayesinde üstyapı tabaka kalınlıklarının %35,29 oranında, maliyetlerin ise %5,59 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düşük plastisiteli kil, Metakaolin, Stabilizasyon, CBR Esnek üst yapı.

The Effect of Metakaolin Usage in Subgrade on Flexible Pavement Design

Abstract

In this study, the effects of a road subgrade stabilized with metakaolin obtained from kaolin clay on the flexible pavement layers designed above it were examined in terms of layer thickness and construction costs. In the first stage of the research, tests were conducted to determine the properties of the soil samples. Subsequently, proctor compaction tests were performed on samples prepared by adding metakaolin to the soil at weight ratios of 3%, 6%, 9%, and 12%. Following these tests, unconfined compression test samples were prepared and tested after a 28-day curing period. The results showed that the highest compressive strength was achieved in mixtures containing 6% metakaolin. Additionally, unmodified and 6% metakaolin-modified samples were subjected to California bearing ratio (CBR) tests after a 28-day curing period. It was found that the CBR value of samples containing 6% metakaolin increased by 95.44%. Using these CBR values, the thickness and costs of pavement layers were calculated based on the 1993 flexible pavement design principles of the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). The calculations revealed that stabilizing the subgrade with 6% metakaolin reduced the pavement layer thicknesses by 35.29% and construction costs by 5.59%.

Keywords: Low plasticity clay, Metakaolin, stabilization, CBR, Flexible pavement.

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

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Toplumların varoluşundan günümüze artan barınma ve ulaşım ihtiyaçlarının karşılanması problemi, inşaat mühendisliği konularının başında yer almaktadır. Bu ihtiyaçların karşılanmasında dizayn edilen yapılar arasında bulunan karayolları, çeşitli tabiat koşullarında ve farklı coğrafyalarda yapılması gerekebilmektedir. Çalışmalar, tasarım için incelenen zeminlerin yol tasarımı için gerekli özelliklere sahip olmayabileceğini göstermektedir. Ekonomik ve güvenli olarak tasarlanmış bir karayolu ancak, yol tabanındaki zeminin proje şartlarını karşılayacak şekilde iyileştirilmesi ile mümkün olabileceğini göstermektedir. Stabilizasyon çalışmalarında kireç, çimento ve bitüm gibi malzemeler kullanılırken (Uzuner, 2016; Tunç, 2002) son yıllarda çeşitli farklı katkı malzemelerinin araştırılmasına ağırlık verildiği görülmektedir. Özellikle, düşük taşıma kapasitesine sahip zeminlerin mühendislik özelliklerinin geliştirilmesi (Tunç, 2002), çeşitli katkı maddeleri kullanılarak zemin stabilizasyonunun araştırılması, yapıların daha güvenli ve ekonomik bir şekilde inşa edilmesine katkıda bulunabileceği düşünülmektedir. Bilgen ve ark. (2012), kil zeminin stabilizasyonuna yönelik kireç ile yüksek fırın cürufu kullanarak yaptıkları çalışmada, zeminin %3,3 cüruf kullanımıyla serbest basınç dayanımının 3,4 oranında ve %5 kireç kullanımıyla ise 9,7 oranında arttığı ifade edilmiştir. 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 ulaştığını, ayrıca kesme mukavemeti parametrelerinde önemli bir artış meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Shabana ve ark. (2014), siltli kum zeminin Hindistan cevizi kabuğu ile iyileştirilmesine dair çalışmada, %16 oranında kırılmış Hindistan cevizi kabuğu ilavesinin maksimum 1 cm² yüzey alanına sahip olduğunu ve taşıma kapasitesinin artırdığı tespit edilmiştir. Yadav ve ark. (2017), pirinç kabuğu külü ve şeker kamışı külü ile kil bir zemini iyileştirmeye yönelik çalışmada, zemine %7,5 pirinç kabuğu külü ilavesinin taşıma kapasitesini artırdığı ancak aynı etkinin şeker kamışı ve inek gübresi külünde oluşmadığı belirtilmiştir. Araştırmada, zemin stabilizasyonunda pirinç kabuğu külünün kullanımı önerilmiştir. Geçkil ve ark. (2021a ve 2021b), atık araç lastiklerinden elde edilen siyah karbonun, yol tabanı olarak değerlendirilen zeminin stabilizasyonunda kullanılmasına yönelik yaptıkları çalışmada, CBR deneyleri sonucunda %10 siyah karbon katkısının, 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin ardından CBR değerini sırasıyla 1,28 kat, 1,77 kat ve 2,87 kat artırdığı belirlenmiştir. Rahgozar ve ark. (2017), kil bir zeminin iyileştirilmesi için çimento ve pirinç kabuğu külü kullanılarak yaptıkları serbest basınç deneyleri sonucunda, %4 oranında çimento ve %10 oranında pirinç kabuğu külü ilavesi ile taşıma kapasitesinin arttığını belirlemişlerdir. Sarıcı (2019), inşaat yıkıntısı atıklarına yüksek fırın cürufu ile uçucu kül ekleyerek granül dolgu olarak kullanılabilme potansiyelini araştıran çalışmada, yapılan serbest basınç ve CBR deneylerinde, %20 oranında

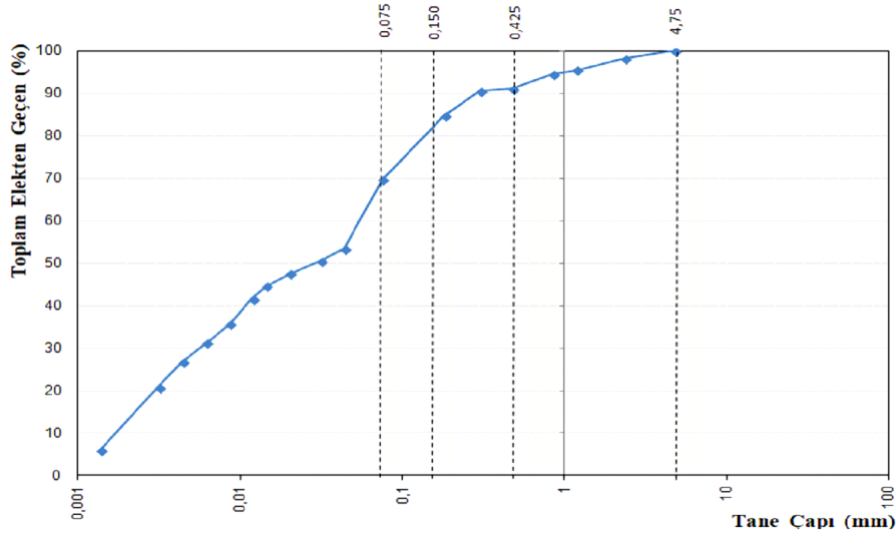
yüksek fırın cürufu katkısının en yüksek dayanım değerini sağladığını tespit etmiştir. Serbest basınç mukavemetinin ve CBR değerinin 7 gün sonunda 14,72 kat ve 11,78 kat, 28 gün sonunda 23,2 ve 25 kat arttığı belirlenmiştir. Bharti ve ark. (2023), siyah pamuklu zeminin bakır cürufu ile stabilizasyonu yönelik yaptıkları çalışmada, bakır cürufu içeriği dört farklı oranda (%5,0, %10,0, %15,0 ve %20) karıştırılarak numuneler hazırlamış, karışımlar üzerinde modifiye proktor testi, CBR, serbest basınç, likit limit, plastik limit deneyler uygulamıştır. Yapılan deneyler neticesinde optimum karışımın %20 bakır cürufu oranında olduğunu belirlemişlerdir. Çelik ve ark. (2024), yüksek plastisiteli zeminin, çay fabrikası atıklarının piroliziyle elde edilen biyo-kömürün uçucu kül ile karıştırılmasıyla yapılan stabilizasyon neticesinde serbest basınç dayanımında %51-163 arasında artış olduğu, en iyi sonuca 14,5 gün kür süresi, %11,5 katkı miktarı ve %23,6 su içeriğindeki karışımlarda görüldüğünü tespit etmişlerdir.

Bu araştırmada, killi bir yol tabanının metakaolin ile stabilize edilmesinin esnek üst yapı tasarımına etkileri, 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, ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 metakaolin katılarak stabilize karışımlar hazırlanmıştır. Katkisız ve katkılı zemin örneklerine standart proktor deneyi, serbest basınç deneyi ve CBR deneyleri uygulanmıştır. Esnek yol üst yapı kalınlığı tasarımı AASHTO 1993 yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve tasarım tabaka maliyetleri hesaplanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Zemin Örneği

Çalışma kapsamında, İnönü Üniversitesi Kampusunun Güney bölümünde killi zemin örneği temin edilmiştir. Zemin örneğinin özelliklerini belirlemek için ASTM C136/C136M ve ASTM D422-63'e göre elek analizi ile hidrometre deneyi yapılmış ve zeminin dane çapı dağılımı tespit edilmiştir. Zeminin dane çapı dağılım grafiği Şekil 1'de verilmiştir. Ardından, zemin örneğinin kıvam limitleri ASTM D4318'e göre belirlenmiştir. Özgül ağırlığın tespiti için ASTM D824 standardına göre piknometre deneyi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, zeminin maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax}) ve optimum su içeriği (ω_{opt}) değerleri standart proktor deneyi ile ASTM D698 esaslarına göre belirlenmiştir.



Şekil 1. Dane Çapı Dağılımı Eğrisi

İncelenen zeminin düşük plastisiteli kil (CL) ve AASHTO sınıflandırma yöntemine göre “A-6” zemin sınıfına ait olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, söz konusu killi zemin örneği literatürde (O’Neil ve Poormoayed, 1980) önerilen tablo kullanılarak, likit limit ve plastisite indeksi esas alınarak şişme potansiyelinin “düşük” olduğu tespit edilmiştir. Tablo 1’de deneyler ile belirlenen zemin özellikleri ve Şekil 2’de zemin numunesi örneğinin fotoğrafı sunulmuştur.

Tablo 1. Zemin Numunesinin Belirlenen Özellikleri

| Değişken Adı | Simge | Değeri | Birim | Standart |
|------------------------|----------------|--------|----------|------------|
| Plastisite İndisi | PI | 11,88 | % | ASTM D4318 |
| Likit limit | ω_L | 30,58 | % | ASTM D4318 |
| Plastik limit | ω_p | 18,70 | % | ASTM D4318 |
| Optimum su içeriği | ω_{opt} | 18,1 | % | ASTM D698 |
| Maksimum kuru yoğunluk | ρ_{kmax} | 1,752 | g/cm^3 | ASTM D698 |
| Dane yoğunluğu | ρ_s | 2,720 | g/cm^3 | ASTM D824 |
| Sınıflandırma | - | CL | - | ASTM D2487 |



Şekil 2. Zemin Numunesi

2.2. Metakaolin

Kaolin kilinin saflaştırılmasıyla elde edilen bir malzeme olan metakaolinin genel kimyasal bileşimi $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ şeklindedir. Bu malzeme amorf bir yapıya sahiptir ve beyaz renklidir. Metakaolin üretim sürecinde, kil mineralleri yaklaşık $100-200^\circ C$ sıcaklıkta içerdiği suyu kaybeder. Kaolin kilinin suyunu kaybettiği dehidrolizasyon sıcaklığı ise $500^\circ C$ ve $800^\circ C$ arasındadır. Dehidrolizasyon ardından oluşan sıcaklıkta, kaolinit yapısını korur ve bu ürüne metakaolin denir. Genel olarak, metakaolinin temel bileşenleri SiO_2 ve Al_2O_3 'tür. Bunun yanı sıra, az miktarda Fe_2O_3 , Na_2O ve K_2O gibi elementler de metakaolin içinde bulunur. Metakaolinin katkı malzemesi olarak kullanılması, özellikle SiO_2 ve Al_2O_3 içeriğine dayanmaktadır. Ticari amaçlar için kullanılan metakaolin, genellikle amorf veya az kristalli SiO_2 gibi bileşikler daha çok içermektedir (Nebioğulları, 2010; Karahan, 2011). Ayrıca, metakaolinin şişme potansiyelinin azaltılmasında etkili olduğu, metakaolin ile hazırlanan stabilize karışımların şişme potansiyelinin azaldığı literatürde (Noor ve Abbas, 2023) belirtilmiştir. Metakaolinin 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 |
| SiO_2 | % 56,68 |
| Al_2O_3 | % 43,11 |
| Fe_2O_3 | % 1,38 |
| CaO | % 0,30 |
| SO_3 | % 0,0006 |
| K_2O | % 0,30 |
| 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, zemin numunesinin ρ_{kmax} ve ω_{opt} değerlerinin belirlenmesi için, su ile mekanik gereçler kullanılmasıyla havanın atılmasına dayanır. Söz konusu deney ASTM D698 standardına uygun olarak gerçekleştirilir. Deneye ait kalıp boyutları 105 mm çapında 115,5 mm yüksekliğindedir. Deneyde 105°C'de 24 saat kurutulan örnek kullanılmalıdır. İstenen su oranlarıyla yoğrulan örnekler kalıba yerleştirilir. 2,5 kg ağırlığındaki tokmak ile vurularak (25 defa) sıkıştırılma işlemi gerçekleştirilir. Serilme süreci 3 aşamada yapılır, son katmandan sonra üstü düzeltilir ve ağırlığı belirlenir. Bu süreç, değişik oranlarda su içeriklerinde 5 kez tekrarlanır ve her birinde su içeriği ile kuru yoğunluk hesaplanır. Belirlenen veriler doğrultusunda kompaksiyon eğrisi oluşturulur ve ρ_{kmax} ile ω_{opt} belirlenir (Yılmaz ve ark., 2017).

Serbest basınç deneyi, ASTM D2166 standardına uygun olarak hazırlanan numunelere belirli kür sürelerinin ardından dayanımlarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilir. Uygulama sırasında, 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 tokmakla 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 kışalması %0,5 ve %2 arasında (dakikada) olmalıdır. Deney sonrasında nihai dayanım ve deformasyonlar belirlenerek numunelerin serbest basınç mukavemeti değerleri belirlenir (Orhan, 2013).

Bu çalışmada, serbest basınç deneyi, zemin ve karışım numunelerine ASTM D2166 standardına uygun olarak, 28 günlük kür süresinin ardından gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te serbest basınç deneyinin uygulama aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 4. Serbest Basınç Deneyine ait Uygulama Aşamaları

2.4. Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı (CBR) Deneyi

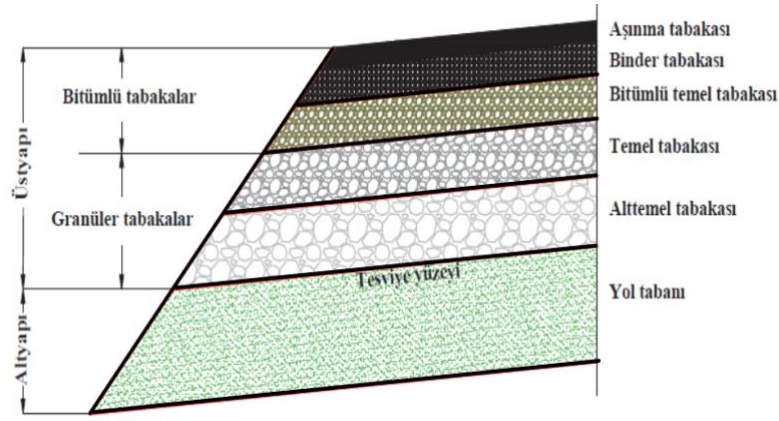
CBR deneyi, önceden tespit edilen ρ_{kmax} ile ω_{opt} verilerine göre hazırlanan numunelere, belirlenen kür süresinin ardından, 1,27 mm/dk hızla 1935 mm² alanlı pistonun zemine itilmesi ile taşıma kapasitesinin belirlenmesine dayanır. ASTM D1883-13 göre gerçekleştirilir. CBR değeri, zeminin belirli 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. Ardından, zemin örneği 24 saat süre ile 105°C'de bırakılır. ρ_{kmax} ile ω_{opt} değerinde numune hazırlanır. Karışım CBR kalıbına tabaka tabaka yerleştirilir ve sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi tamamlanınca numune bulunan kalıp tartılır. Numuneler belirlenen kür süresinden sonra deney cihazına yerleştirilir. Deney neticesinde CBR değerleri penetrasyonun 2,5 ile 5 mm değerleri için belirlenir (Yılmaz ve ark., 2017). Şekil 5'te CBR deney aşamaları görülmektedir.



Şekil 5. CBR Basınç Deneyi Uygulama Aşamaları

2.5. Esnek Üst Yapı Tasarımı (AASHTO Yöntemi)

Esnek üst yapı tasarımı, asfalt çimentosu bağlayıcı kullanıma esasına göre yapılmaktadır. Asfalt betonu kaplama, temel ve alttemel tabakalarından oluşan bir yapıya sahiptir. Tasarım aşamasında, tasarım ömrü, tabaka kalınlıkları, trafik yoğunluğu, yöresel faktörler, ekonomik ve zemin koşulları gibi çeşitli unsurlar dikkate alınır (AASHTO, 1993). Şekil 6, esnek üstyapıdaki tabakaları göstermektedir.



Şekil 6. Esnek Üstyapı Kesit Görünümü (Kök, 2019)

Tabaka kalınlıkları hesabı Denklem (1) kullanılarak AASHTO 1993 esaslarına göre yapılmaktadır (AASHTO, 1993).

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

Burada;

$T_{8.2}$: Proje trafiğinin eşdeğer standart tek dingil yükü tekerrür sayısı (8,2ton),

SN: Üstyapı sayısı (üstyapı kalınlığını için),

Z_R : Standart sapma,

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

P_0 : Başlangıç hizmet kabiliyeti indeksi,

S_0 : Performans ve trafik tahmininin bileşik standart hatası,

ΔPSI : Toplam hizmet kabiliyeti kaybı

P_t : Nihai hizmet yeteneği indeksini gösterir.

Denklem (1) kullanılarak SN değeri belirlendikten sonra, tabaka katsayıları Tablo 3'ten alınarak tabaka kalınlıkları Denklem (2) ile hesaplanır (AASHTO, 1993).

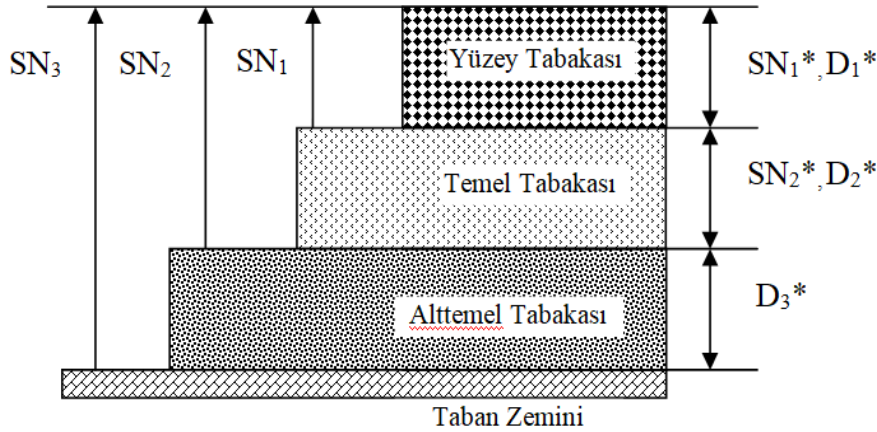
$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times M_2 + a_3 \times D_3 \times M_3 \dots \dots \dots a_i \times D_i \quad (2)$$

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. Tablo 3'te tabaka katsayıları sunulmuştur.

Tablo 3. Tasarım Katsayıları (KGM, 2008)

| Tabaka Adı | CBR (%) | İzafi Mukavemet Katsayısı (a) |
|--------------------|------------|-------------------------------|
| Kaplama Tabakası | - | 0,42 |
| Aşınma | - | 0,40 |
| Binder | - | 0,36 |
| Bitümlü Temel | - | 0,15 |
| Temel Tabakası | ≥ 120 | 0,14 |
| Plentmiks Temel | ≥ 100 | 0,13 |
| Granüler Temel | ≥ 50 | 0,11 |
| Alttemel Tabakası | ≥ 30 | |
| Kırmataş Alttemel | | |
| Kum-Çakıl Alttemel | | |

Tabaka kalınlıklarının hesaplanmasının ardından, tabaka kalınlıkları kontrolü için SN* değerleri Şekil 7’de verilenler göre hesaplanarak tespit edilir.

**Şekil 7.** Esnek Üstyapı Tasarımında SN'ler (AASHTO, 1993)

Burada; temel üzerine ihtiyaç duyulan üstyapı kalınlığı (SN₁), alttemel üzerine ihtiyaç duyulan (SN₂), taban üzerine ihtiyaç duyulan (SN₃), * : Tercih edilen malzemeye göre değerleri göstermektedir (AASHTO, 1993).

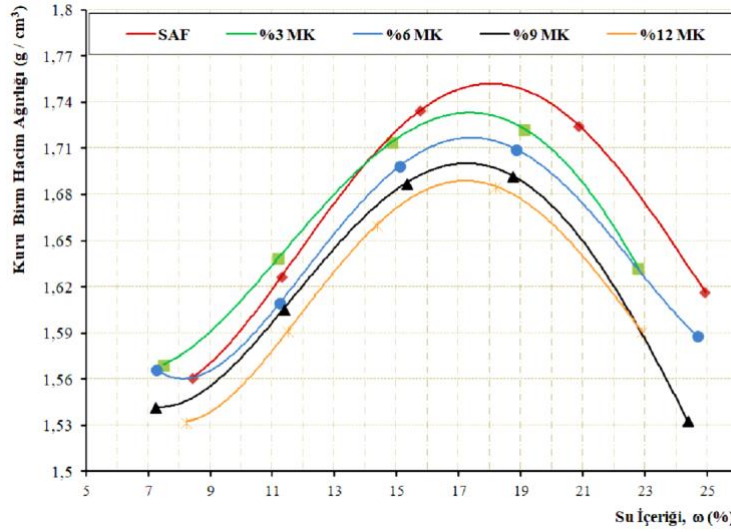
3. Araştırma Bulguları ve Değerlendirme

Yol taban zemininin metakaolin ile stabilizasyonunun esnek yol üst yapı etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, uygulanan deneyler ve tasarım sonuçları bölümler halinde sunulmuştur.

3.1. Standart Proktor Deneyi Bulguları

Katkısız zemin (SAF) ile ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 metakaolin (MK) katkıli örneklerle

standart proktor deneyi uygulanmıştır. Deney neticesinde belirlenen ω (%) ve ρ_k sonuçlarına göre Şekil 8’de çizilen kompaksiyon eğrileri verilmiştir. Belirlenen ω_{opt} ile ρ_{kmax} sonuçları Tablo 4’te verilmiştir.



Şekil 8. Standart Proktor Deneyine ait Kompaksiyon Eğrileri

Tablo 4. Katkısız zemin ve Metakaolin Katkılı Zeminin Standart Proktor Deneyi Sonuçları

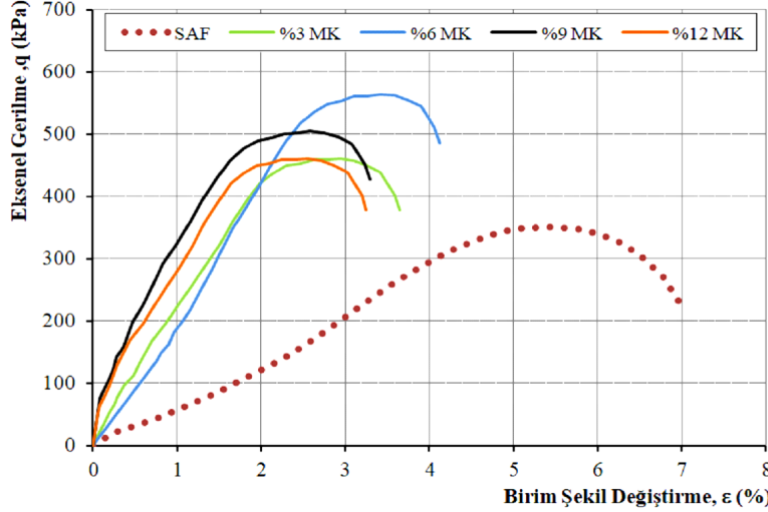
| Test Numunesi | ρ_{kmax} (g/cm³) | ω_{opt} (%) |
|---------------|-----------------------|--------------------|
| SAF | 1,752 | 18,10 |
| %3 MK | 1,733 | 17,38 |
| %6 MK | 1,717 | 17,29 |
| %9 MK | 1,705 | 17,24 |
| %12 MK | 1,685 | 17,09 |

Proktor deneyi sonuçlarında hazırlanan karışımlarda MK oranının artmasıyla ω_{opt} ve ρ_{kmax} değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu bulguların, literatürde (Abdulkareem ve Abbas, 2021; İsmail. 2021) belirtilen çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durumun MK'nın zemin numunesinden daha az su emme kapasitesine sahip olması nedeniyle meydana geldiği bu sebeple ω_{opt} ve ρ_{kmax} değerlerinin azaldığı öngörülmüştür. Ayrıca, yapılan deneylerde MK'nın oranının artmasıyla ω_{opt} 'un azalması, literatürde (Chakkor, 2021) belirtilen metakaolinin daha az suya ihtiyaç duyan amorf bir yapıya sahip olduğu görüşüyle uyumlu olduğu görülmektedir.

3.2. Serbest Basınç Deney Bulguları

Katkısız zemin (SAF) ile ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 MK katkıli örnekler, belirlenen ω_{opt} ile ρ_{kmax} verileri dikkate alınarak hazırlanmıştır. Örneklere, 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 9'da sunulurken Tablo 5'te serbest basınç mukavemeti (q_u) ve kırılma anındaki birim şekil değiştirme (ϵ_u) değerleri verilmiştir.



Şekil 9. 28 Günlük Kür Sonrası Katkısız ve Metakaolin Katkılı Numunelerin q - ϵ Grafiği

Tablo 5. 28 Günlük Kür Sonrası Katkısız ve Metakaolin Katkılı q_u - ϵ_u Verileri

| Test Numunesi | q_u (kPa) | ϵ_u (%) |
|---------------|-------------|------------------|
| SAF | 350,63 | 5,37 |
| % 3 MK | 460,67 | 2,94 |
| % 6 MK | 563,64 | 2,75 |
| % 9 MK | 504,00 | 2,58 |
| % 12 MK | 458,65 | 2,39 |

Serbest basınç deneyi sonuçlarında, katkısız zeminin serbest basınç dayanımının MK'lı numunelerden daha az olduğu görülmüştür. MK katkısının zeminin dayanımını artırdığı ve bu sonuçların literatürle (Abdulkareem ve Abbas, 2021; Ayyapan ve ark., 2017; Reddy ve ark., 2018) uyumlu olduğu tespit edilmiştir. MK ilavesi yapılan tüm numunelerin serbest basınç dayanımlarının katkısız zemine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. %3, %6, %9 ve %12 oranlarında metakaolin ilavesiyle hazırlanan karışımlarda, mukavemet değerinde en iyi artış %6 MK oranında görülmüş ve bu artışın 1,61 kat olduğu hesaplanmıştır.

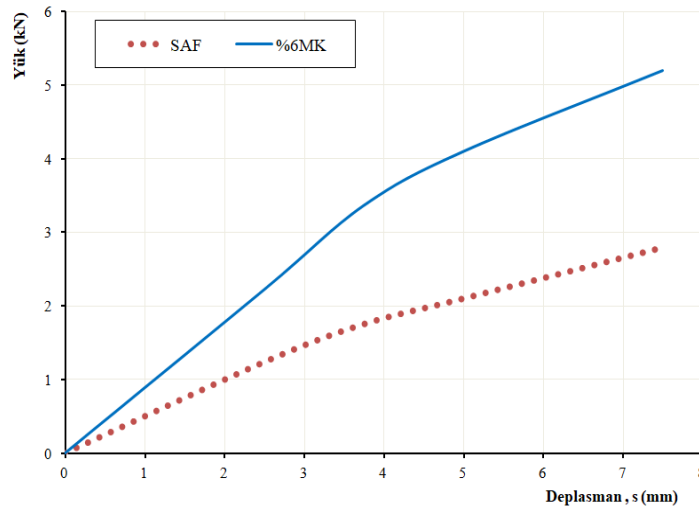
Literatürde (Siddique ve Kalus, 2009; Badogiannis ve ark., 2004; Khatib ve Hibber, 2005), metakaolinin, üretiminde kalsine edilmesi sırasında içeriğinde bulunan alüminyum ve silisin kristal yapılarında bozulma meydana gelerek, amorf yapılı ve yüksek puzolanik özelliğe sahip bir ürün meydana geldiği ve malzemenin inceliği sayesinde boşlukları doldurarak filler etkisiyle mekanik

özellikleri iyileştirildiği bilgisi yer almaktadır. Benzer şekilde çalışmamızda hazırlanan karışımlarda metakaolinin puzolanik özellik gösterdiği ve ilaveten filler etkisi meydana getirerek mekanik özellikleri iyileştirdiği düşünülmüştür. Ancak, metakaolin miktarının belli bir oranın üstünde artmasının fayda sağlamadığı, daha fazla katkı malzemesinin reaksiyona giremediği ve bu durumun karışımların dayanımlarını üzerinde olumsuz etkilediği değerlendirilmiştir.

Ayrıca, birim şekil değiştirmenin MK miktarının artmasıyla azaldığı ve bu durumun MK'nın numunelerin sertliğini arttırmasıyla meydana geldiği düşünülmektedir. Elde edilen sonuçların, literatürde (Uzuner, 2014) belirtilen yumuşak zeminlerin sert zeminlerden kırılma anındaki birim şekil değiştirmesinin daha fazla olmaması görüşüyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

3.3. Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı Deney Bulguları

CBR deneyleri için, serbest basınç deney sonuçlarından elde edilen ağırlıkça %6 MK sonucu esas alınarak, katkısız zemin (SAF) ve %6 MK ilaveli karışım numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler ω_{opt} ve ρ_{kmaks} esas alınarak hazırlanmıştır. Numuneler, belirlenen 28 günlük kür süresi boyunca oda sıcaklığında ve dış ortamdan etkilenmeyecek muhafazalı bir ortamda tutulmuştur. Tamamlanan kür süresinin ardından kuru CBR deneyleri uygulanmıştır. CBR deneyleri sonucunda, Şekil 10'da yük-deplasman grafiği ve Tablo 6'da ise CBR değerleri verilmiştir.



Şekil 10. 28 Günlük Kür Ardından Katkısız ve Metakaolin Katkılı Numunelerin Yük-Deplasman İlişkisi

Tablo 6: 28 Günlük Kür Ardından Katkısız ve Metakaolin Katkılı Numunelerinin Test Sonuçları

| Test Numunesi | 2,5 mm için CBR Değeri, (%) | 5 mm için CBR Değeri, (%) |
|---------------|-----------------------------|---------------------------|
| SAF | 9,34 | 10,52 |
| %6 MK | 16,81 | 20,56 |

CBR deneyi sonuçlarında, 28 günlük kür süresinin ardından CBR deneyi uygulanan numunelerde, 2,5 ile 5 mm deplasman için elde edilen CBR değerleri katkısız zemin için sırasıyla %9,34 ve %10,52; %6 MK ilaveli zemin için ise %16,81 ve %20,56 olarak bulunmuştur. CBR değerinin, MK katkılı örneklerde 2,5 ile 5 mm penetrasyon için katkısız zemin numunelerine göre sırasıyla %79,98 ve %95,44 oranında arttığı belirlenmiştir. MK'lı karışımların CBR değerinin katkısız numuneden daha yüksek olduğu bu durumun literatürde (Umar ve ark., 2022; Attah ve ark., 2009; Onyelowe ve ark., 2023) MK katkılı zeminlerin taşıma gücünü iyileştirdiği görüşü ile örtüştüğü belirlenmiştir.

3.4. Esnek Üst Yapısı Tasarımı Yapılması

AASHTO 1993'de belirtilen kurallara uygun olarak, üstyapı tasarımı için 28 günlük kür ardından belirlenen en yüksek CBR değerleri kullanılmıştır. Hesaplamalarda, CBR değerleri baz alınarak katkısız zemin için %10,52 ve %6 MK ilaveli karışım için %20,56 kullanılmıştır. Hesaplamalarda ilk adım olarak, yol taban zemininin 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 (CBR)^{0,64} korelasyonu mevcuttur (AASHTO, 2024). M_R değerlerin belirlenmesinde söz konusu korelasyon kullanılmıştır.

Katkısız zemin için M_R değeri 11.521 psi (79453490 Pa) ve %6 MK'lı karışım için M_R değeri 17.690 psi (121999400 Pa) hesaplanmıştır. Tablo 7'deki veriler kullanılarak Bağıntı 1 ile taban üzerine gereken SN_3 katkısız zemin için 8,05 inç (20,45 cm) ve %6 MK ilaveli zeminler için 6,09 inç (15,47 cm) hesaplanmıştır.

Esnek kaplama hesabında kullanılan parametreler Tablo 7'de sunulmuştur. Parametreler KGM (2008)'den esas alınarak seçilmiştir. Burada model alınan otoyol 4 (2 x 2) şeritli, 30 yıl proje analiz süresinin olduğu, günlük trafiğin ilk yıl için kamyon 835 adet, treyler 360 adet, minibüs 710 adet, otobüs 950 adet, otomobil 9500 adet olduğu, 90.000.000 olarak eşdeğer standart tek dingil yükü tekrar sayısı belirlenmiştir. Söz konusu veriler 2023 Devlet Yolları Trafik Hacim Haritası verilerinden, Malatya–Kayseri karayolu trafik hacmine yakın değerler esas alınarak düzenlenmiştir.

Tablo 7: Tasarım Parametreleri

| Parametre | Tasarım Verileri |
|--|------------------|
| $T_{8,2}$, Eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı | 90.000.000 |
| 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 | -3,750 |

3.4.1. Tabaka Kalınlıklarının Hesaplanması

SN_3 değerleri kullanılarak Bağıntı 1 ile 28 günlük kür uygulanan katkısız zemin ve %6 MK katkılı zeminler için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları hesaplanmıştır. Tablo 8 ve 9'da seçilen tabaka kalınlıkları sırasıyla sunulmuştur. Ayrıca Şekil 11'de tabaka kalınlıkları verilmiştir.

Tablo 8. Katkısız Zemin için Belirlenen Tabaka Kalınlık Detayları

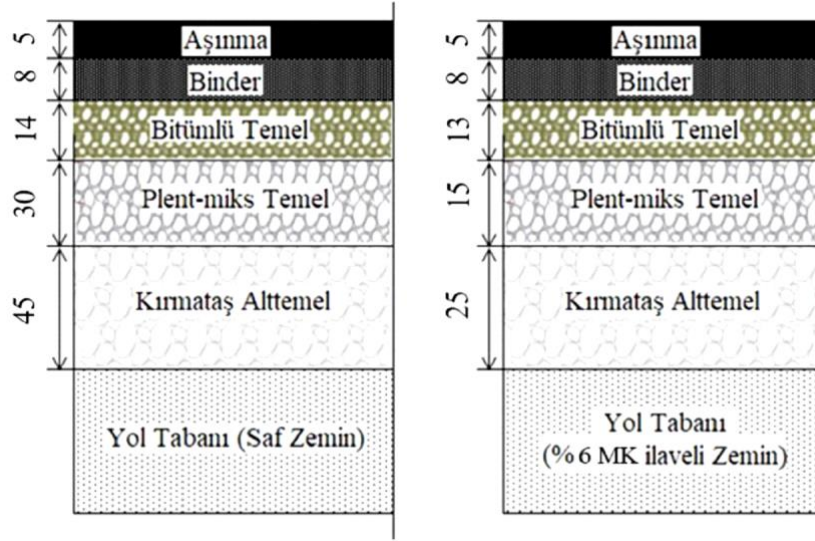
| Tabaka İsmi | D_i (cm) | a_i | $SN^* = a_i \times D_i$ | Açıklama |
|-------------------|------------|-------|-------------------------|---------------------------------------|
| Aşınma | 5 | 0,42 | 2,1 | $SN^* > SN$ (20,69 > 20,45) |
| Binder | 8 | 0,4 | 3,2 | |
| Bitümlü Temel | 14 | 0,36 | 5,04 | Seçilen tabaka kalınlıkları uygundur. |
| Plent-miks Temel | 30 | 0,15 | 4,50 | |
| Kırmataş Alttemel | 45 | 0,13 | 5,85 | |

SN bağıntı (1) ile hesaplanan, SN^* kullanılan gerçek değerler ile bulunan değerdir.

Tablo 9. %6 MK Katkılı Zemin için Belirlenen Tabaka Kalınlık Detayları

| Tabaka İsmi | D_i (cm) | a_i | $SN^* = a_i \times D_i$ | Açıklama |
|-------------------|------------|-------|-------------------------|---------------------------------------|
| Aşınma | 5 | 0,42 | 2,1 | $SN^* > SN$ (15,48 > 15,47) |
| Binder | 8 | 0,4 | 3,2 | |
| Bitümlü Temel | 13 | 0,36 | 4,68 | Seçilen tabaka kalınlıkları uygundur. |
| Plent-miks Temel | 15 | 0,15 | 2,25 | |
| Kırmataş Alttemel | 25 | 0,13 | 3,25 | |

SN bağıntı (1) ile hesaplanan, SN^* kullanılan gerçek değerler ile bulunan değerdir.



Şekil 11. Katkısız Zemin ve % 6 MK Katkılı Zemin için Seçilen Tabaka Kalınlıkları

Tablo 3'ten tabaka kalınlıklarının kontrolü amacıyla plentmix kırmataş temeli için $CBR=120$, kırmataş alt temeli için $CBR=50$ olarak kabul edilerek sırasıyla $M_R=54.710$ psi ve $MR=31.241$ hesaplanmıştır. Tabakalar üzerinde gerekli SN değerleri Bağıntı 1 kullanılarak plentmix kırmataş temeli $SN_1 = 3,91$ inç (9,93 cm), kırmataş alt temeli ise $SN_2 = 4,68$ inç (11,89 cm) olarak hesaplanmıştır. Bağıntı 2'de, kullanılarak yapılan kontrolde, katkısız zeminlerde, kırmataş temeli için $10,34 > 9,93$ ve kırmataş alt temeli için $14,84 > 11,89$ olduğu, %6 MK içeren zeminlerde kırmataş temeli için $9,98 > 9,93$ ve kırmataş alt temeli için $12,23 > 11,89$ olduğu görülmüştür, bu da esnek tabaka kalınlıklarının yeterli olduğunu göstermektedir. Üstyapı tabaka kalınlıkları Katkısız zemin için 102 cm ve %6 MK katkılı zeminler için 66 cm belirlenmiştir. %6 MK'lı zeminler için üstyapı kalınlığında katkısız zemine kıyasla %35,29 oranında azaldığı belirlenmiştir.

3.5. Esnek Üstyapı Tasarımının Ekonomik Analizi

Yol taban zeminini metakaolin ile iyileştirmenin karayolu esnek üstyapı maliyetine etkisinin incelenmesinde, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) verileri (poz no'ları) kullanılmıştır. Katkısız zemin ve %6 MK katkılı zeminlerin esnek yol üstyapı kalınlıklarının m^2 cinsinden birim maliyetleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 10 ve Tablo 11'de sunulmuştur. Ayrıca, % 6 MK ile yol tabanın 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 alınmıştır. MK'nın ton bazında şantiye mahalline teslim fiyatı göz önüne alınmıştır. Tablo 12'de stabilizasyonun m^2 birim maliyetleri verilmiştir. Ayrıca, katkısız zemin ile %6 MK katılarak

iyileştirilen zeminler göz önüne alınarak Şekil 12’de tabaka kalınlıkları ve maliyetleri karşılaştırma grafiği sunulmuştur.

Tablo 10. Katkisız Zemin için Tabaka Kalınlıkların Birim Maliyetleri

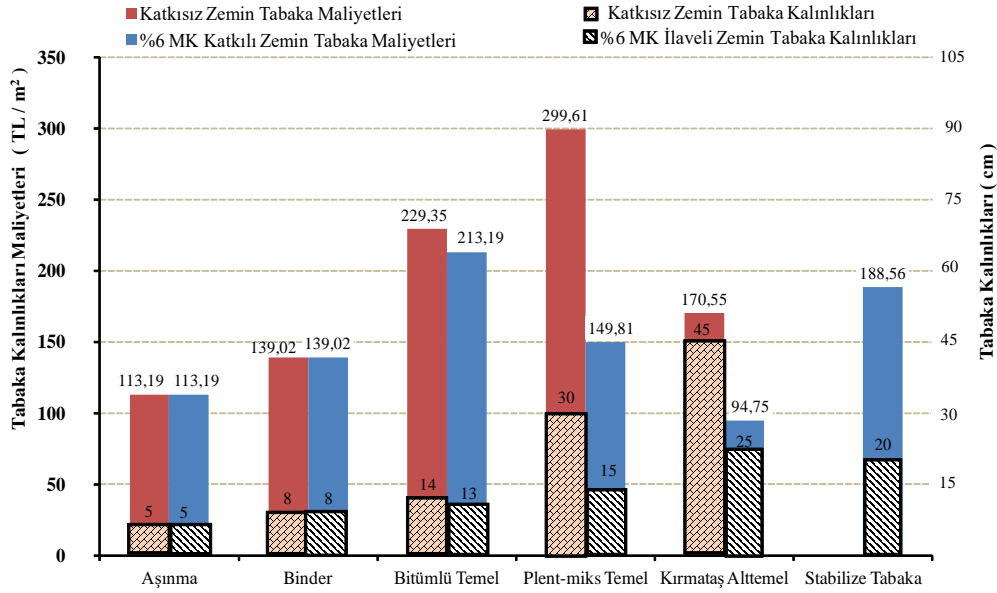
| Poz no | Açıklama | Birim | Birim Fiyat (TL) | Maliyet (TL) m ² /cm | Maliyet (TL) m ² |
|--------------|---|----------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| KGM/6405/S-M | 5 cm aşınma tabakası yapımı | m ² | 113,19 | 22,64 | 113,19 |
| KGM/6308 | 8 cm binder tabakası yapımı | m ² | 139,02 | 17,38 | 139,02 |
| KGM/6214 | 14 cm bitümlü sıcak temel tabakası yapımı | m ² | 229,35 | 16,38 | 229,35 |
| KGM/6100/3 | Plentmix temel yapılması | ton | 416,13 | 9,99 | 299,61 |
| KGM/6000 | Kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması | m ³ | 378,99 | 3,79 | 170,55 |
| | | | | | Toplam: 951,72 |

Tablo 11. %6 MK Katkılı Zemin için Tabaka Kalınlıkların Birim Maliyetleri

| Poz no | Açıklama | Birim | Birim Fiyat (TL) | Maliyet (TL) m ² /cm | Maliyet (TL) m ² |
|--------------|---|----------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| KGM/6405/S-M | 5 cm aşınma tabakası yapımı | m ² | 113,19 | 22,64 | 113,19 |
| KGM/6308 | 8 cm binder tabakası yapımı | m ² | 139,02 | 17,38 | 139,02 |
| KGM/6213 | 13 cm bitümlü sıcak temel tabakası yapımı | m ² | 213,19 | 17,77 | 213,19 |
| KGM/6100/3 | Plentmix temel yapılması | ton | 416,13 | 9,99 | 149,81 |
| KGM/6000 | Kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması | m ³ | 378,99 | 3,79 | 94,75 |
| | | | | | Toplam: 709,95 |

Tablo 12. %6 MK Katkılı Zemin için Stabilizasyon Birim Maliyetleri

| Poz no | Açıklama | Birim | Birim Fiyat (TL) | Maliyet (TL) m ² /cm | Maliyet (TL) m ² |
|--------------|---|----------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| KGM 03.507 | Traktör ripperin 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 kullanılarak) | 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 | %6 MK Temini Nakliye Dahil | kg | 9,12 | 8,8637 | 177,27 |
| | | | | | Toplam: 188,56 |



Şekil 12. Saf ve %6 MK İlaveli Zemin için Tabaka Kalınlıkları ve Maliyetleri

Katkısız zemin ve %6 MK ilaveli zemin için yol üstyapılarının maliyetleri sırasıyla 951,72 TL/m² ve 709,95 TL/m² olarak belirlenmiştir. Ayrıca, MK ilaveli stabilize zeminin maliyeti 188,56 TL/m² olarak hesaplanmıştır. Tabaka kalınlıklarının maliyetleri göz önüne alındığında, yapım maliyetinde %5,59 oranında bir azalma görülmüştür. Yapılan hesaplamalarda, 20 metre genişliğindeki ve 1000 metre uzunluğundaki bir yolda, %6 MK ile iyileştirilmiş bir yol tabanı ile 1.064.274,34 TL maliyet azaltılarak tasarruf sağlanacaktır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, kil içeren bir yol tabanının metakaolin ile iyileştirilmesinin esnek yol üst yapısı kalınlığı ile maliyeti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

1. Standart proktor deneyi sonuçlarında, MK oranının artmasıyla ω_{opt} ve ρ_{kmaks} değerlerinin azaldığı, bu duruma MK'nın zemin numunesinden daha az su emme kapasitesine sahip olmasının neden olduğu tespit edilmiştir.

2. MK miktarının artmasıyla numunelerin sertliğini arttırdığı bu nedenle kırılma anındaki birim şekil değiştirme oranının azaldığı değerlendirilmiştir.

3. Serbest basınç deneyi neticelerinde, MK ile iyileştirilen zeminlerde 28 günlük kür sonunda en büyük mukavemet değerinin ağırlıkça %6 MK'lı numunede belirlenmiştir. Katkısız zemine göre mukavemet değerinin 1,61 kat arttığı belirlenmiştir. Bu artış, MK'nın zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

4. CBR deney sonuçlarında ise %6 MK katkılı zeminlerin 28 günlük kür süresi sonundaki CBR değerleri, katkısız zemin numunelerine göre sırasıyla %79,98 ve %95,44 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu artışın MK katkılı zeminlerin taşıma gücünü iyileştirdiğini göstermektedir.

5. Serbest basınç ve CBR deney sonuçlarından, metakaolinin puzolanik özellik gösterdiği ve filler etkisi meydana getirerek mekanik özellikleri iyileştirdiği görülmektedir.

6. Yol üst yapısı tasarım sonuçlarında ise, %6 MK içeren stabilize zeminler için tasarlanan üstyapı kalınlığında %35,29 oranında azalma olduğu görülmüştür. Bu durum MK'nın taşıma gücüne olumlu etki yaptığını işaret etmektedir.

7. Maliyet analizi sonuçlarında ise, %6 MK katkılı stabilize zeminlerin üstyapı maliyetlerinin, katkısız zemine kıyasla %5,59 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu hesaplamalar ışığında, 20 metre genişliğindeki ve 1000 metre uzunluğundaki bölünmüş bir yolda, %6 MK ile yol taban zemininin iyileştirilmesi durumunda üst yapı maliyetinde 1.064.274,34 TL maliyet azaltılarak tasarruf sağlanacaktır.

8. Esnek üstyapı tasarımında kullanılan M_R değerleri AASHTO korelasyonu esas alınarak hesaplanmıştır. Esnek üstyapı tasarımlarında Karayolları Genel Müdürlüğü ve AASHTO M_R bağıntısı kullanılmasının, sonuçların karşılaştırmalı olarak araştırılmasının ve bunun yol üstyapılarına etkilerinin açığa çıkarılmasının literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

9. Yol taban zemininin iyileştirilmesinde metakaolinin kullanılmasının, zeminin taşıma kapasitesini arttıracığı, esnek üst yapı tabaka kalınlığını ve maliyetini düşüreceği belirlenmiştir. Böylelikle, esnek üst yapı yapımında kullanılan malzeme miktarının azaltılması ile, bu malzemelerin üretimi, taşınması ve uygulanmasında meydana gelen CO₂ salınımı başta olmak üzere çevreye verilen zararın azaltılacağı ve çevrenin korunmasına katkı sağlanacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca, karayolu projelerinin uzunlukları dikkate alındığında, MK'nın temin miktarının artmasıyla daha ekonomik olarak tedarik edileceği ve projelerin maliyetinin daha da azaltılabileceği öngörülmektedir.

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.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- AASHTO (1993). *Interim guide for design of pavement structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO (2024). *Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG-3)* (3rd ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abdulkareem, S. A. and Abbas, J. M. (2021). Effect of adding metakaolin-based geopolymer to improve soft clay under different conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 856(1), 012011.
- Attah, I. C., Jonah, C. A., Etim, R. K. and Ogarekpe, N. M. (2019). Modelling and predicting CBR values of lateritic soil treated with metakaolin for road material. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(20), October.
- Ayyappan, A., Palanikumar, S., Kumar, D. and Vinoth, M. (2017). Influence of geopolymers in the stabilization of clay soil. *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research*, 5(3), 108-120.
- Badogiannis, E., Papadakis, V. G., Chaniotakis, E. and Tsvivilis, S. (2004). Exploitation of poor Greek kaolins: strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k-value, *Cement & Concrete Research*, Vol. 34, pp.1035-1041.
- Bharti, G. Hurukadli, P., Shukla, B. K. (2023). Environmental impact analysis and utilization of copper slag for stabilising black cotton soil. *Materials Today: Proceedings* 2023,3.
- Bilgen, G., Kavak, A. and Çapar, Ö. F. (2012). Düşük plastisiteli bir kilde katkı olarak çelikhane cürufunun kullanılması ve kireç ile etkileşiminin araştırılması. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2(2), 30-38.
- Chakkor, O. (2021). *Kırmızı çamur ve metakaolin tabanlı geopolimer harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi*. Doktora tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Çelik, M., Kuvat, A., Abut, Y. and Ceyhan E., M. (2024). Biyokömür ile aktive edilmiş küllerin zemin stabilizasyonuna yönelik kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 4(2), 354-371.
- Dabakuyo, I., Mutuku, R. N. and Onchiri, R. O. (2021). Effect of sugarcane molasses on the physical properties of metakaolin based geopolymer stabilized laterite soil. *Int. J. Civ. Eng.*, 8, 1-12.
- Geçkil, T., Sarıcı, T. and Karabaş, B. (2021a). Siyah karbon ile stabilize edilen taban zeminin yol esnek üst yapı maliyetine etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), 222-235.
- Geçkil, T., Sarıcı, T. and Karabaş, B. (2021b). Siyah karbon stabilizasyonlu zeminin rijit kaplama kalınlığı ve maliyetine etkileri. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering (ECJSE)*, 8(3), 1372-1384.
- Karahan, O. (2011). *Metakaolin ve silis dumanı içeren harçların aşınma direncinin karşılaştırılması* (Bilimsel araştırma projesi, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi).
- Karayolları Genel Müdürlüğü (2008). *Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi*. T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Khatib, J. M. and Hibbert, J. J. (2005). Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin, *Construction and Building Materials*, 19, 460-472.
- Kök, B. V. (2019). *Karayolu Mühendisliği ve Tasarımı*, Nobel Akademik Yayıncılık Ankara.

- Nebioğulları, M. A. (2010). *Metakaolin, Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül Katkısının Beton Hidratasyon Sıcaklığına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Noor, T. A. and Abbas, J. M. (2023). Effect of Metakaolin on the Swelling and Shrinkage Behaviour of a highly Expansive Soil, *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 10.24237/djes.2023.16205
- Orhan, M. (2013). *Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri*, Gazi Kitabevi Ankara.
- O'Neil, M. W. and Poormoayed, N. (1980). Methodology for foundations on expansive, clays, *Journal of Geotechnical Engineering, Division, American Society of Civil Engineers*, Vol. 106, No. GT12, p. 1345-1367.
- Onyelowe, K. C., Ebid, A. M., Kontoni, D.N. and Onukwugha, E. R. (2023). Effect Of Metakaolin And Ashcrete Blend On The Mechanical Properties Of Lateritic Soil For Sustainable Subgrade And Subbase Construction, *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 8 November.
- Rahgozar, M. A., Saberian, M. and Li, J. (2017). Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: an experimental study. *Transportation Geotechnics*, 14, 52-60.
- Reddy, D. S., Kowshik, K., Kishor, M. J., Durga, R. V. and Kumar, V. P. (2018). Enhancement of Soil Properties by using Fly Ash and Metakaolin, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)* ISSN: 2278-3075, Volume-8 Issue-2S December.
- Sarıcı, T. (2019). *Puzolan ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atıklarının granüler dolgu olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi*, İnönü Üniversitesi, FBE, Doktora Tezi.
- Shabana, S., Anshi, C., Shamseera, P., Shyamili, T. M., Sruthi, V. and Suhaira, P. (2014). Study on CBR values of soil with crushed coconut shells. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 5(3), 55-58.
- Siddique, R. and 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.
- Tunç, A. (2007). *Yol malzemeleri ve uygulamaları*. Nobel Yayınevi.
- Uzuner, B. A. (2014). *Temel zemin mekaniği*. Derya Kitabevi.
- Uzuner, B. A. (2016). *Temel mühendisliğine giriş*. Derya Kitabevi.
- Umar, S. Y., Yero, S. A, Muhammed, A. and Abdulkarim, I. I. (2022). Effect of Metakaolin on Strength Properties of Lateritic Soil Intended for Use as Road Construction Material. *Path of Science: International Electronic Scientific Journal*, 8(2).
- Wassie, T. A. and Demir, G. (2024). Mechanical Strength and Microstructure of Soft Soil Stabilized with Cement, Lime, and Metakaolin-Based Geopolymer Stabilizers. *Advances in Civil Engineering*, Article ID 6613742, 11 pages.
- Yadav, A. K., Kumar, G., Roop, K. and Suman, S. K. (2017). Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(3), 254-261.
- Yılmaz, I., Yıldran, M. and Keskin, İ. (2017). *Zemin mekaniği laboratuvar deneyleri ve çözümlü problemler*, Seçkin Kitabevi.