

Metakaolin ile Stabilize Edilen Yol Taban Zeminlerinin Donma-Çözülme Direncinin Araştırılması

Tacettin GEÇKİL¹, Talha SARICI², Bahadır KARABAŞ^{3*}

^{1,2,3}İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya, Türkiye

¹<https://orcid.org/0000-0001-8070-6836>

²<https://orcid.org/0000-0001-8488-5851>

³<https://orcid.org/0000-0003-0416-9121>

*Sorumlu yazar: karabasbaha@gmail.com

Araştırma Makalesi

ÖZ

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 11.09.2024

Kabul tarihi: 11.02.2025

Online Yayınlanma: 16.06.2025

Anahtar Kelimeler:

Kil

Kum

Stabilizasyon

Donma-çözülme

Metakaolin

Ulaştırma geotekniği

Farklı iklim koşullarında inşa edilen yapıların, tabiat şartlarına dirençli tasarlanması mühendislik açısından önemli bir gerekliliktir. Özellikle karayollarının yol taban zeminlerinin dayanımının artırılması amacıyla kullanılan stabilizatör malzemelerin, iklimsel nedenlerle meydana gelen donma ve çözölmeye karşı direnç artırıcı olması önemli bir tercih nedenidir. Bu çalışmada, yol tabanı olarak değerlendirilen killi ve kumlu iki farklı zeminin metakaolin (MK) ile stabilize edilmesi ve bu stabilizasyonların donma-çözölme direncinin yapılan deneylerle araştırılmasına odaklanılmıştır. Çalışma kapsamında, killi ve kumlu zeminlerle hazırlanan katkısız ve farklı oranlarda MK ilave edilmiş numunelere, standart Proktor deneyi ve 7 gün kür sonrası serbest basınç deneyi uygulanmıştır. MK ilavesinin numunelerin dayanımını arttırdığı ve en yüksek dayanımların killi zemin için %6 MK, kumlu zemin için ise %12 MK içeren karışımlarda sağlandığı belirlenmiştir. Ardından, MK ile yapılan stabilizasyonun donma-çözölme direncinin belirlenmesi amacıyla, katkısız ve optimum MK oranları içeren numuneler hazırlanmıştır. 7 günlük kür süresini tamamlayan bu numunelere 3, 6 ve 12 döngü uygulanmıştır. Her bir döngüde numuneler, 24 saat boyunca -23 °C'de dondurulmuş, ardından 23 ± 2 °C'de 23 saat çözölmeye bırakılmıştır. Daha sonra kıyaslamada 7 gün kür süresi sonrası elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri (0 döngü) kullanılmıştır. Yapılan deneyler ve kıyaslamalar neticesinde %12 MK ve %6 MK'lı numunelerde serbest basınç dayanımının artış oranı sırasıyla 2,58 ve 1,57 kat olarak belirlenmiştir. Donma-çözölme deneyi neticesinde, en büyük serbest basınç dayanım kaybının ve ağırlık kaybının 12 döngü sonrası tespit edilmiştir. Serbest basınç dayanım kaybının ve ağırlık kaybının; kumlu zeminde sırasıyla %88,80 ve %2,05 belirlenmişken, %12 MK'lı numunede sırasıyla %69,40 ve %1,23'e gerilediği belirlenmiştir. Killi zeminde ise sırasıyla %78 ve %1,47 belirlenmişken, %6 MK'lı numunede sırasıyla %67 ve %0,98'e gerilediği belirlenmiştir. Sonuç olarak, her iki zeminin MK ilavesi ile serbest basınç dayanımının ve donma-çözölme direncinin arttığı, metakaolinin etkin bir stabilizasyon malzemesi olabileceği ve özellikle donma-çözölmeye maruz farklı iklim koşullarında tercih edilmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Investigation of the Freeze-Thaw Resistance of Road Subgrade Soils Stabilized Using Metakaolin

Research Article

ABSTRACT

Article History:

Received: 11.09.2024

Accepted: 11.02.2025

Published online: 16.06.2025

Keywords:

Clayey soil

Sandy soil

Stabilization

Freeze-thaw

Metakaolin

Transportation geotechnics

Designing structures planned for different climatic conditions to be resistant to natural conditions is one of the important engineering requirements. For highways, the selection of stabilizer materials that are resistant to climatic freeze-thaw cycles is an important consideration in enhancing the strength of road subgrades. In this study, the stabilization of two different soils, considered as road subgrades, with metakaolin (MK) and the freeze-thaw resistance of these stabilized soils were investigated. Samples without additives and with different proportions of MK were prepared using clayey and sandy soils. A standard Proctor test was applied to these samples. Subsequently, unconfined compression tests were conducted on the prepared samples (both with and without additives) after a 7-day curing period. It was observed that the strength increased in the prepared mixtures, and the highest strengths were obtained in mixtures containing 6% MK for clayey soils and 12% MK for sandy soils. Then, based on the samples without additives and those with the optimum MK ratios, soil samples were prepared for the freeze-thaw test application. The samples that completed the 7-day curing period were subjected to 3, 6, and 12 freeze-thaw cycles. Each cycle consisted of freezing the samples for 24 hours at -23°C in a freeze-thaw cabinet, followed by thawing for 23 hours at $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$. The unconfined compressive strength values obtained after the 7-day curing period (0 cycles) were used for comparison. As a result of the experiments and comparisons, the unconfined compressive strength (UCS) increase ratios for the samples containing 12% MK and 6% MK were determined to be 2.58 and 1.57 times, respectively. The freeze-thaw test revealed that the greatest losses in UCS and weight occurred after 12 cycles. For sandy soil, UCS and weight losses were found to be 88.80% and 2.05%, respectively, whereas these values decreased to 69.40% and 1.23% for the 12% MK-stabilized sample. Similarly, for clayey soil, UCS and weight losses were determined to be 78% and 1.47%, respectively, while these values dropped to 67% and 0.98% for the 6% MK-stabilized sample. In conclusion, the addition of MK enhanced both the UCS and freeze-thaw resistance of the soils. Based on the experimental results, metakaolin is considered an effective stabilization material and is particularly suitable for use in regions subjected to freeze-thaw conditions in different climatic settings.

To Cite: Geçkil T., Sarıcı T., Karabaş B. Metakaolin ile Stabilize Edilen Yol Taban Zeminlerinin Donma-Çözülme Direncinin Araştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(3): 1278-1300.

1. Giriş

Dünya üzerinde tasarlanan mühendislik yapıları, farklı özellikler gösteren iklim koşulları altında, niteliklerini koruyarak hizmet verebilecek özellikte, tabiat şartlarına dirençli olarak projelendirilmektedir. Benzer şekilde karayollarının tasarlandığı mahallerde ise topoğrafya, iklim, hidrolik şartlar ve zemin özellikleri, tasarımın güvenli ve ekonomik olarak hayata geçirilmesi için önemli kriterler arasındadır. Ülkemizde iklim koşulları 320 adet meteorolojik istasyon tarafından istatistiksel olarak takip edilmektedir. Özellikle hava sıcaklığının don olayına neden olacak kadar düşük olduğu bölgelerde, zemin cinsine bağlı olarak zemin taneleri arasında merceksi şekilde donan su, yol tabanında kabarmaya neden olur. Buzların erimeye başladığı zamanlarda ise taban zeminini boşluklu ve yumuşak bir yapıya dönüştürerek, bir dış yük olmadan büzülme, zemin taşıma gücünün azalmasına ve yol yapısının bozulmasına neden olmaktadır. Bu durum, yolun servis kabiliyetini azaltarak tasarlanan proje ömrünün (üstyapı proje süresi) erken dolmasına ve bakım-onarım ihtiyacına sebep olmaktadır. Don etkisine karşı üstyapı taban zeminlerini korumaya yönelik yöntemler arasında; yer altı sularının drenajı ile yer altı su seviyesinin tesviye yüzeyinden 150 cm aşağıda tutulması, dona hassas olmayan

zemin ile taban zeminin deęiřtirilmesi ve taban zeminin imento, kireç vb. katkı malzemelerle stabilize edilmesi yer almaktadır. Zemin stabilizasyonu hem dūřuk tařıma gūcūne sahip zeminlerin iyileřtirilmesi hem de zeminlerin donma çözölme direncinin arttırılmasına yōnelik bir çözüm olarak karřımıza çıkmaktadır. Dięer taraftan tařıma gūcū zayıf zeminlere sahip yol tabanlarında stabilizasyon gerektiren durumlarda, seçilen stabilizatōr malzemelerinin hem tařıma gūcūnū attırması hem de donma ve özölmeye karřı dirençli olması elzem olarak arzu edilen bir durumdur (Tunç, 2002; Karayolları Esnek Ŭstyapıları Projelendirme Rehberi, 2008; Uzuner, 2016).

Gūnümüzde stabilizasyon uygulamalarında çeşitli katkı malzemelerinin kullanımı ve űstyapı kaplama tūrlerine etkilerinin araştırılmasının (Sarıcı, 2014; Demir ve Sarıcı, 2017; Geçkil ve ark., 2021a; Geçkil ve ark., 2021b; Ok ve ark., 2021; Sarıcı ve ark., 2022) yanı sıra donma çözölme direnci de araştırılmaktadır. Soğancı ve Yıldız (2011), iki farklı killi zemine kireç karıştırılarak serbest basınç, donma-çözölme ve permeabilite deneyleri uygulamışlardır. Her iki zemin cinsinde optimum karışım oranının %6 olarak tespit etmişler, serbest basınç dayanımının yūksək plastisiteli killi zeminde 15 kat, dūřuk plastisiteli killi zeminde 3 kat arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, donma- çözölme dōngülerinin artması ile puzolanik aktivitenin azaldığını ve permeabilitenin arttığını belirtmişlerdir. Yarbaşı (2016), kil bir zemini değişik boyutlarda (1,18 mm; 2 mm; 3,15 mm) atık lastik ile iyileştirmeye çalışmıştır. En iyi mukavemet artışının %0,5 oranında atık lastik (1,18 mm ebatında) ilaveli karışımda %35,3 olduğunu, ancak donma-çözölme deneyinde 12 dōngū sonrası mukavemetin azaldığını tespit etmiştir. Orakoęlu ve Liu (2017), killi zemini cam ve bazalt lifi ile takviye ederek dayanımlarını ve donma-çözölme dōngūleri sonrası dayanımlarını araştırmışlardır. Yapılan deneyler neticesinde donma-çözölme dōngülerinin sayısı arttıça hem donatısız hem de lif takviyeli numunelerin dayanımının azaldığı, lifsiz numunelerde dayanımın daha fazla azaldığını belirlemişlerdir. Ding ve ark. (2018), kil bir zemini imento ve polipropilen lif ile stabilizasyonun donma-çözölme dōngūleri sonrası mekanik ۆzelliklere etkisini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda, artan imento ve lif içeriği ile serbest basınç dayanımının arttığını ve 5 donma-çözölme dōngūsünden sonra direncinin daha da arttığını belirlemişlerdir. Saygılı ve Dayan (2019), kil bir zeminin silis dumanı, kireç ve polipropilen lif katkısının dayanıma ve donma-çözölme davranışına etkisini araştırmışlardır. Yapılan deneyler neticesine 28 gūn kūre tabi tutulan numunelerde en iyi dayanımın ve 2, 5, 8 dōngū sonraki donma-çözölme direncinin %0,25 polipropilen lif+%5 kireç+%10 silis dumanı içeren karışımdan elde edildiğini belirlemişlerdir. Yılmaz (2020), dūřuk plastisiteli killi bir zeminin uçucu kūl ve mermer tozu atıklarını zemin stabilizasyonu ve donma-çözölme direncine yōnelik bir dizi çalışma yapmıştır. %25 uçucu kūl ve %10 mermer tozu karışımında en iyi dayanım artışının sağlandığı ve donma-çözölme direncinin arttığını tespit etmiştir. Yarbaşı (2020), killi zemine %0,5; %1, %1,5 ve %2 keçi kılı lifleri ilave ederek mekanik ۆzelliklerinin iyileştirilmesini ve donma çözölme direncinin arttırılması amaçlamıştır. En iyi artışın 28 gūnlük kūr sonunda %1,5 keçi kılı lifinden elde edildiği, bu katkı sayesinde donma-çözölme ۆncesi ve sonrası direncini arttırdığı belirlenmiştir. Bağrıak ve ark. (2021), enjekte edildiği zemin içerisinde CaCO₃ űreterek iyileşme sağlayan Bacillus Sp.'nin, yūksək plastisiteli kil (CH) ve kumlu kil (SC) gibi iki farklı zemin tūründe

donma çözülme döngüleri altında mukavemet davranışları araştırmışlardır. Sonuçlara göre, *Bacillus Sp.*'nin CH ve SC türü zeminlerde, mukavemet ve şişme basıncı parametrelerinin iyileştirilmesinde olumlu yönde katkısı olduğunu tespit etmişlerdir. Ok ve Bağrıaçık (2022), killi bir zemini biyopolimer grubunda olan guar gum (GG) (%1, %2 ve %3) kullanarak stabilize edilmesinin mekanik özellikler ve donma çözülme üzerindeki direncini araştırmışlardır. GG'nin, kil zemin üzerinde donma-çözülme direnci, şişme basıncına etkisi ve serbest basınç mukavemetine olumlu etkisinin olduğu ve alternatif bir malzeme olarak kullanılabileceğini öngörmüşlerdir. Bozyiğit ve ark. (2023), kaolin kilinin ksantan guam (KG), guar guam (GG) ve anyonik poliakrilamid (PAM) ile stabilizasyonun, mukavemet özelliklerine ve donma-çözülme direncini etkisini araştırmışlardır. Araştırmalar neticesinde 4, 14 ve 28 günlük kür neticesinde, KG, GG ve PAM'lı karışımlarda saf kile göre sırayla en iyi artış oranlarını 6, 8 ve 3,5 kat olarak belirlemişlerdir. Ayrıca, söz konusu polimerlerin donma-çözülme direncini arttırdığını, en iyi direncin anyonik polimerde olduğunu tespit etmişlerdir. Karainli ve Saygılı (2024), kohezyonlu kil numuneleri geotekstil takviyesi sağlayarak donma-çözülme direncini araştırmışlardır. Laboratuvar çalışmaları sonucunda, geotekstil donatılı numunelerin donatısız kontrol numunelere göre daha yüksek donma-çözünme dayanımına sahip olduğu, dokuz donma çözünme döngüsünden sonra, serbest basınç dayanımındaki kaybın, kontrol numunelerine kıyasla %25'ten %14'e indiğini tespit etmişlerdir. Nan ve ark. (2024) iklimsel nedenlerle donma çözülme döngülerine sürekli maruz kalan Kuzeybatı Çin'deki tuzlu killi zeminin kireçle yapılan stabilizasyonun donma-çözülme direncini araştırmışlardır. Yapılan çalışma neticesinde bulunan sonuçlar stabilize edilmiş tuzlu toprağın gözenek boyutu dağılımı, donma-çözülme döngüleri ile ilişkilendirilerek, dayanım kaybıyla gözenek boyutu dağılımı ile ilişkisini ortaya koymuşlardır. Balkış ve İlman (2024), killi zeminin mermer tozu ile stabilizasyonunun serbest basınç dayanımı ve donma-çözülme direnci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan deneyler neticesinde %5-%20 oranlarında kullanılan mermer tozunun donma-çözülme döngüleri sonrasında tane kaybını ve serbest basınç dayanımını azalttığını belirlemişlerdir.

Kaolin kilinin saflaştırılmasıyla elde edilen metakaolinin, stabilizasyon ve donma-çözülme direncinin incelenmesine yönelik çalışmalarda kullanıldığı ve zemin dayanımını ve donma-çözülme direncini artırdığı görülmüştür (Aygörmez ve ark., 2020; Kumar ve ark., 2020; Liang ve ark., 2021; Li ve ark., 2023; Wang ve ark., 2023; Xukun ve ark., 2024). Kumar ve ark. (2020), Hindistanın Nilgiris bölgesinden alınan kil içeriği yüksek zemin üzerinde, metakaolin ve lif katkıları ile yapılan stabilizasyonun donma çözülme direncini araştırmışlardır. Yapılan donma-çözülme döngüleri ile karışımların mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Çalışmalar neticesinde, eklenen katkı maddelerinin döngülerden sonra zeminin donma-çözülme reaksiyonuna karşı direncini artırdığı belirlenmiştir. Aygörmez ve ark. (2020) %20'ye kadar silis dumanı ve kolemanit atığı ikame edilerek üretilen metakaolin esaslı geopolimer numunelerini 56 ve 300 çevrim donma-çözülme etkisine tabi tutmuşlardır. Numunelerin dayanımda 56 döngüden sonra bir artış görüldüğünü, 300 döngüden sonra ise azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Deneyler neticesinde metakaolinli karışımların donma çözülme direncini arttırdığını belirlemişlerdir. Liang ve ark. (2021), pirinç kabuğu külü (RHA) ve silika dumanı (SF) ilaveli

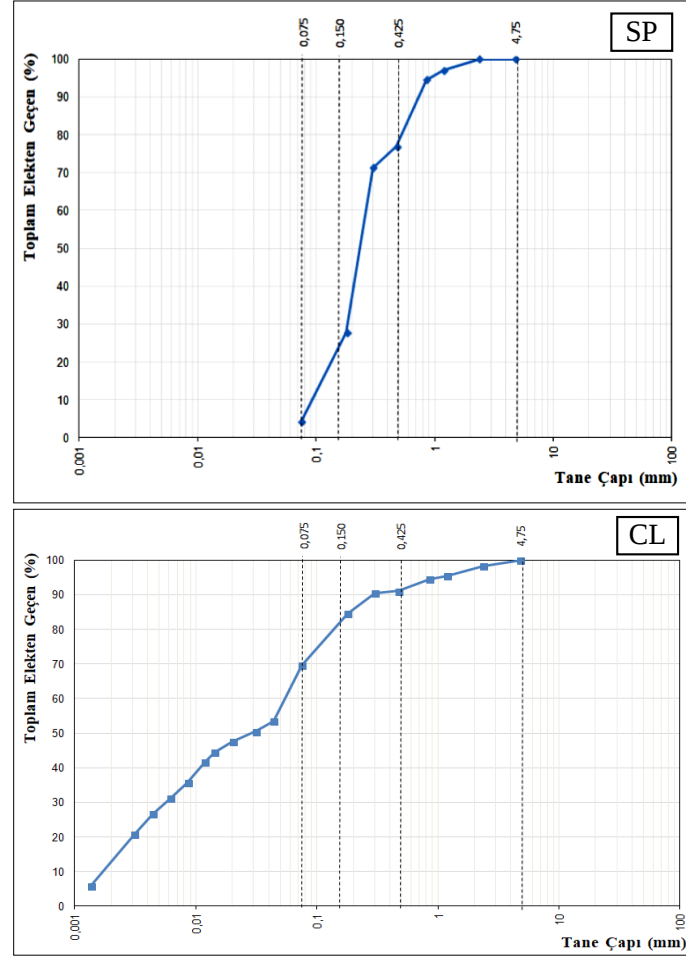
metakaolinli geopolimer karışımların, mekanik özelliklerini ve donma çözülme direncini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında hazırlanan karışımlara, RHA ve SF'nin dahil edilmesiyle potansiyel doldurma etkisiyle gözenek yapılarının azaldığını tespit etmişlerdir. Bu durumun hem RHA hem de SF kullanılarak hazırlanan metakaolinli karışımların mekanik özelliklerini ve donma-çözülme direncini arttırdığını belirlemişlerdir. Li ve ark. (2023), siltli kum bir zemini kireç-metakaolin ve doğal kireç kullanarak, mukavemet ve donma çözülme direncinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapmışlardır. Yapılan 0, 5, 10, 15 donma çözülme döngüleri sonrasında %8 kireç ve %4 metakaolin içeren karışımların, %10 doğal kireç içeren karışımlara göre daha iyi sonuçlar verdiği ve metakaolin ilavesinin donma çözülme direncini arttırdığını belirlemişlerdir. Wang ve ark. (2023), bakırla kirletilmiş killi bir zeminin kalsiyum karbür (KK) kalıntısı, metakaolin (MK) ve kükürt giderme alçısından (DG) oluşan yeni bir bağlayıcı malzeme ile stabilizasyonuna ve donma çözülme direncine yönelik bir dizi deneyler yapmışlardır. Yapılan 2, 4, 6, 8, 10 ve 12 donma çözülme döngüsü neticesinde içinde MK bulunan stabilizatörün miktarı arttıkça donma çözülme direncinin arttığını belirlemişlerdir. Bu araştırma kapsamında yapılan literatür incelemesi neticesinde; kumlu ve killi yol tabanı olarak değerlendirilen iki farklı zeminin metakaolin (MK) ile stabilizasyonu ve yapılan stabilizasyonların donma-çözülme direncinin karşılaştırılmasına odaklanan bu çalışmanın literatürdeki nadir çalışmalardan biri olabileceği değerlendirilmiştir. Bu amaçla killi ve kumlu zeminlerle hazırlanan, katkısız ve farklı oranlardaki MK ilaveli numunelere standart proktor deneyi uygulanmıştır. Ardından hazırlanan katkısız ve katkılı serbest basınç deneyi örneklerine 7 gün kür sonrası serbest basınç deneyi yapılmıştır. Akabinde, katkısız ve belirlenen optimum MK oranları esas alınarak donma-çözülme deneyinin uygulamasında kullanılacak zemin numuneleri hazırlanmıştır. 7 günlük kür süresini tamamlayan örneklerle 3, 6, 12 döngü uygulanmıştır. Uygulanan 1 döngü, hazırlanan numunelerin 24 saat – 23 °C'de donma-çözülme kabiniinde dondurulması, daha sonra 23 saat boyunca 23 ± 2 °C'de çözülme şeklinde tatbik edilmiştir. Donma-çözülme direncini kıyaslamak için 7 gün kür süresi sonrası elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri (0 döngü) kullanılmıştır. Daha sonra dayanım ve ağırlık kayıpları belirlenerek değerlendirmeler yapılmıştır.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Zemin Numuneleri

Çalışma kapsamında kullanılan zemin örnekleri Malatya ilinde Yazıhan İlçesi Eğribük Mahallesi (kumlu zemin Z1) ve İnönü Üniversitesi kampüsünden (killi zemin Z2) temin edilmiştir. Zemin özelliklerini tespit için ASTM D422-63 (2007) ve ASTM C136/C136M (2019)'a göre elek analizi ile hidrometre deneyi yapılmıştır. Akabinde, ASTM D4318 (2017)'e göre zemin örneğinin kıvam limitleri belirlenmiş ve ASTM D854 (2006) standardına göre özgül ağırlığın tespiti için piknometre deneyi gerçekleştirilmiştir. Ardından, zeminin maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax}) ve optimum su içeriği (ω_{opt}) ASTM D698 (2014) esaslarında Standart proktor deneyi ile tespit edilmiştir. Uygulanan deneyler sonucunda araştırılan zeminlerinin kötü derecelenmiş kum (SP) ve düşük plastisiteli kil (CL) olduğu

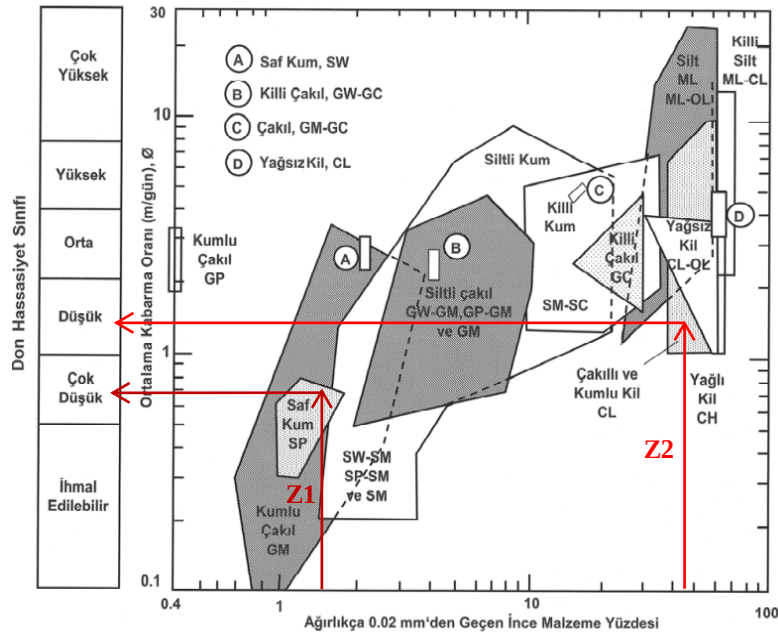
tespit edilmiştir. Zeminlerinin dane çapı dağılım eğrisi Şekil 1'de verilmiştir. Tablo 1'de deneyler ile belirlenen zemin özellikleri görülmektedir. Ayrıca, zemin örneklerinin don hassasiyet sınıfı Şekil 2 kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Zeminlerinin dane çapı dağılım eğrileri

Tablo 1. Zeminlerin özellikleri

Değişkenin Adı	Simge	Birim	Kum Zemin İçin Değerler	Kil Zemin İçin Değerler	Standartlar
Maksimum kuru yoğunluk	ρ_{kmax}	g/cm ³	1,685	1,752	ASTM D698
Tane yoğunluğu	ρ_s	g/cm ³	2,669	2,720	ASTM D854
Likit limit	ω_L	%	-	30,58	ASTM D4318
Plastik limit	ω_p	%	-	18,70	ASTM D4318
Plastisite İndisi	PI	%	NP	11,88	ASTM D4318
Optimum su içeriği	ω_{opt}	%	18,5	18,10	ASTM D698
Don Hassasiyet Sınıfı	-		Çok Düşük	Düşük	AASHTO
Sınıflandırma (Birleştirilmiş Zemin Sınıfı)	-	-	SP	CL	ASTM D2487
Numune Adı	-	-	Z1	Z2	-



Şekil 2. Zemin don hassasiyet duyarlılığı ve don kabarma grafiği (AASHTO, 1993)

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). Çalışma kapsamında kullanılan metakaolinin kimyasal yapısı %56,68 SiO_2 , %43,11 Al_2O_3 , %1,38 Fe_2O_3 , %0,30 CaO , %0,30 MgO , %0,0006 SO_3 , %0,30 K_2O , %0,62 Na_2O , %0,62 Kızdırma Kaybı (KK) olarak özetlenebilir. Metakaolin'in numune örneği ise Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Metakaolin numunesi görüntüsü

2.3. Standart Proktor Deneyi

Standart proktor deneyi, su ile mekanik gereçler kullanılmasıyla havanın atılarak zemin numunesinin maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriğinin belirlenmesine dayanır. Söz konusu deney ASTM

D698 (2014) standardına uygun olarak gerçekleştirilir. Kullanılan 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. 3 aşamada serilme süreci yapılır, son katmandan sonra üstü düzeltilir ve ağırlığı belirlenir. Bu aşamalar, değişik oranlarda su içeriklerinde 5 kez tekrarlanır ve her birinde su içeriği ile kuru birim hacim ağırlığı hesaplanır. Belirlenen veriler doğrultusunda doygunluk eğrisi oluşturulur ve maksimum kuru yoğunluk ile optimum su içeriği belirlenir (Yılmaz ve ark., 2017).

2.4. Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyi, hazırlanan numunelere belirli kür sürelerinin ardından dayanımlarının belirlenmesi amacıyla ASTM D2166-06 (2006) 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. Numuneler, belirlenen kür süresince oda sıcaklığında bekletilir ve 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 ve ark., 2013).

2.5. Donma- Çözülme Deneyi

Donma-çözülme deneyi; zemin daneleri boşluklarında bulunan suyun ortam sıcaklığının donma noktasının altına düşmesi sonucu donması, sıcaklığın sıfır derecenin üstüne ulaştığı zaman buzun suya dönüşmesi sonucu meydana gelen donma-çözülme döngüsünün tekrar tekrar meydana gelmesi durumunun, zemin üzerindeki etkisinin incelemesi amacıyla yapılmaktadır. Söz konusu deney ASTM D560/D560M-16 (2016) standardında belirtilen hususlar dikkate alınarak yapılmaktadır. Deneyin uygulamasında kullanılacak zemin numuneleri serbest basınç deneyindeki numune hazırlama esasları göz önüne alınarak hazırlanır. 7 günlük kür süresini tamamlayan örnekler, 24 saat boyunca – 23 °C'de donma-çözülme kabinde dondurulmuş, daha sonra 23 saat boyunca 23 ± 2 °C'de çözülmeye maruz bırakılmaktadır. (Bu süreç 1 donma-çözülme döngüsüdür). Belirlenen döngü sayısını tamamlayan numunelerin donma-çözülme sonrası dayanımlarının tespit edilmesiyle deney tamamlanır (Karayolları Genel Müdürlüğü [KGM], 2013; ASTM D560/D560M-16, 2016).

2.6. Numunelerin Hazırlanması ve Uygulamalar

Bu çalışmamızda, öncelikle katkısız ve katkılı zemin numunelerinin maksimum kuru yoğunluk ile optimum su içeriğinin belirlenmesi maksadıyla standart proktor deneyi yapılmıştır. Standart proktor deneyinde katkılı zemin numuneleri, Z1 zeminine ağırlıkça %3, %6, %9, %12, %15 MK ve Z2 zeminine

ağırlıkça %3, %6, %9, %12 MK ilave edilerek hazırlanmıştır. Ardından, standart proktor deneyinde tespit edilen maksimum kuru yoğunluk ile optimum su içerikleri kullanılarak, katkısız ve MK katkılı serbest basınç deneyi numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler dış ortamdan muhafazalı olarak 7 gün kür süresi ardından, serbest basınç deneyi uygulanarak, MK'nın Z1 ve Z2 zemini üzerindeki stabilizasyon etkisi belirlenmiştir. Akabinde tespit edilen en büyük mukavemet değerleri elde edilen optimum MK oranları (Z1 için %6 MK ve Z2 için %12 MK) göz önüne alınarak donma çözülme deney numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler serbest basınç deney numuneleri ile aynı esaslarda hazırlanarak dış ortamdan muhafazalı olarak 7 gün kür süresi ardından, 3, 6, 12 döngü uygulanmıştır.

Bu döngü sayıları belirlenirken Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan şartnamedeki minimum 5 donma-çözülme döngüsü (KGM, 2013) ve ASTM D560/D560M-16 (2016) standardındaki 12 donma-çözülme döngüsü gerekliliği göz önüne alınarak belirlenmiştir. Döngü kıyaslamalarında 7 gün kür süresi sonrası elde edilen serbest basınç mukavemeti (0 döngü) kullanılmıştır. Döngülerin sonunda ağırlık kaybı ve mukavemet (serbest basınç dayanımları) kayıpları incelenmiştir. Donma çözülme deneyine ait uygulama aşamaları Şekil 4'te gösterilmiştir.



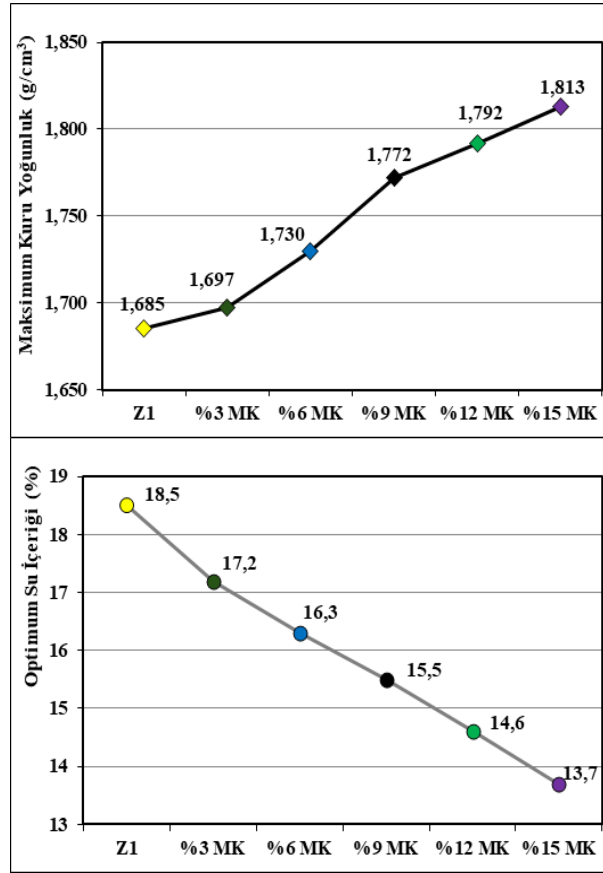
Şekil 4. Donma çözülme deneyine ait uygulama aşamaları

3. Araştırma Bulguları ve Değerlendirme

Yol tabanı olarak değerlendirilen iki farklı zeminin MK ile stabilizasyonu ve yapılan stabilizasyonların donma-çözülme direncinin araştırıldığı bu çalışmada, uygulanan deneyler ve sonuçları bölümler halinde sunulmuştur.

3.1. Standart Proktor Deneyi Bulguları

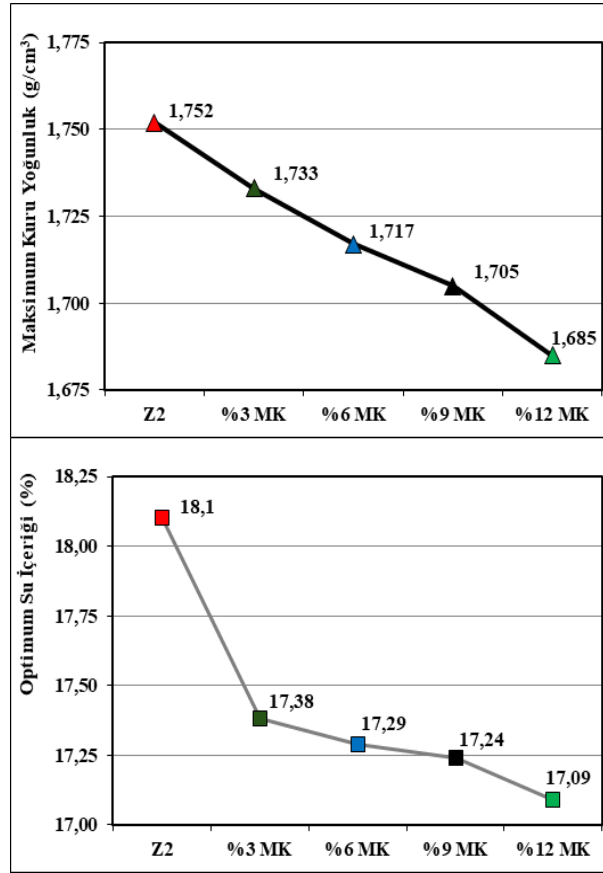
Z1 zemini ile ağırlıkça %3, %6, %9, %12 ve %15 MK'lı örneklerle standart proktor deneyi uygulanmıştır. Deney neticesinde belirlenen maksimum kuru yoğunluk ile optimum su içeriğinin sonuçları grafiği Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Z1 zemini ile ağırlıkça %3, %6, %9, %12, %15 MK'lı örneklere ait standart proktor deneyi sonuçları

Z1 zemini ile hazırlanan karışımlarda MK oranının artmasıyla optimum su içeriğinin değerinin azaldığı, maksimum kuru yoğunluk değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Sonuçların, literatür (Alhakim ve ark., 2022) ile örtüştüğü görülmüştür. Ayrıca MK oranı arttıkça, optimum su içeriğinin azalmasının, MK'nın daha az suya ihtiyaç duyan amorf bir morfolojiye sahip olduğu görüşüyle (Chakkor, 2021) uyumlu olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, MK ve Z1 zemini ile hazırlanan karışımda boşluk oranının (tane yoğunluğu ve kuru yoğunluk esas alınarak hesaplanması neticesinde) %58,4'den %49 gerilediği, MK'nın Z1 zemininde filler etkisi gösterdiği değerlendirilmektedir.

Z2 zemini ile ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 MK'lı örneklere standart proktor deneyi uygulanmıştır. Deney neticesinde belirlenen maksimum kuru yoğunluk ile optimum su içeriğinin sonuçları grafiği Şekil 6'da verilmiştir.

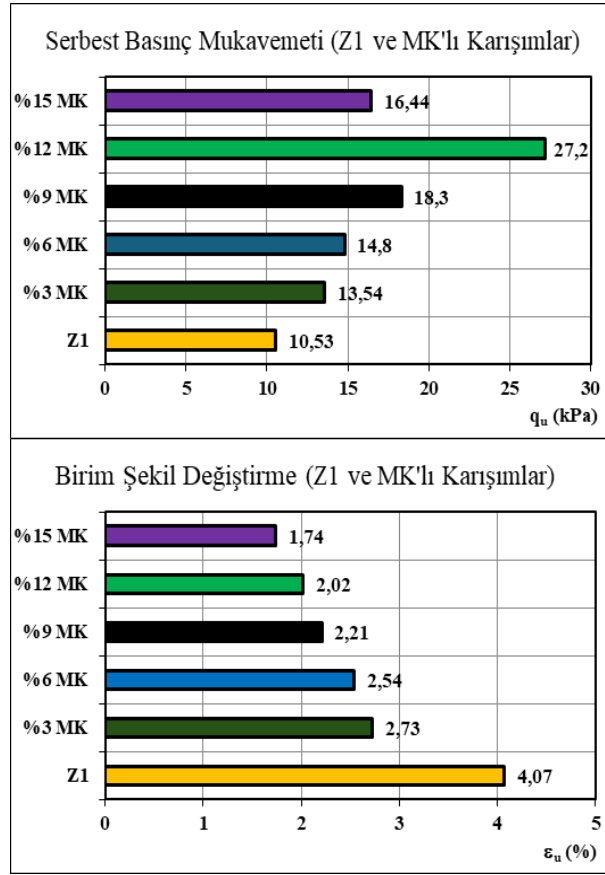


Şekil 6. Z2 zemini ile ağırlıkça %3, %6, %9, %12MK'lı örneklere ait standart proktor deneyi sonuçları

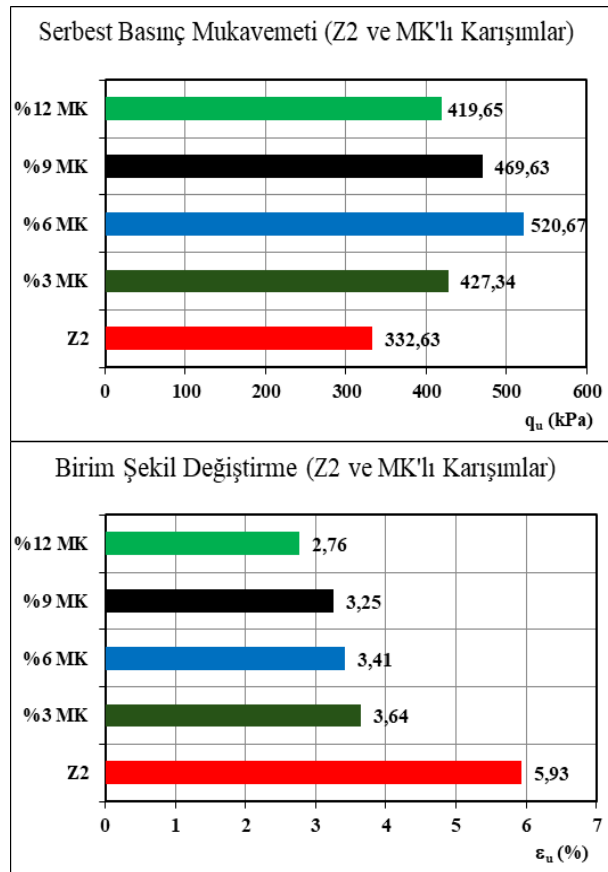
Z2 zemini ile hazırlanan karışımlarda MK oranının artmasıyla maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriğinin değerinin azaldığı belirlenmiştir. Sonuçların, literatür (Abdulkareem ve Abbas, 2021; Dabakuyo ve ark., 2021) ile örtüştüğü görülmüştür. Ayrıca MK oranı arttıkça, optimum su içeriğinin azalmasının, MK'nın daha az suya ihtiyaç duyan amorf bir morfolojiye sahip olduğu görüşüyle (Chakkor, 2021) uyumlu olduğu değerlendirilmektedir.

3.2. Serbest Basınç Deneyi Bulguları

Z1 zemini ile ağırlıkça %3, %6, %9, %12, %15 MK'lı ve Z2 zemini ile ağırlıkça %3, %6, %9, %12 MK'lı serbest basınç örnekleri, standart proktor deneyi ile belirlenen maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği değerleri ile hazırlanmıştır. Oda sıcaklığındaki 7 günlük kür süresi ardından serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Deneylerin 10 dakikayı aşmadığı gözlemlenmiştir. Katkısız zeminler ve MK katkılı numunelerin serbest basınç mukavemeti (q_u) ve birim şekil değiştirme (ϵ_u) sonuç grafikleri Şekil 7 ve 8'de verilmiştir.



Şekil 7. Z1 zemini ile ağırlıkça %3, %6, %9, %12 ve %15MK'lı örneklerle ait serbest basınç deneyi sonuçları



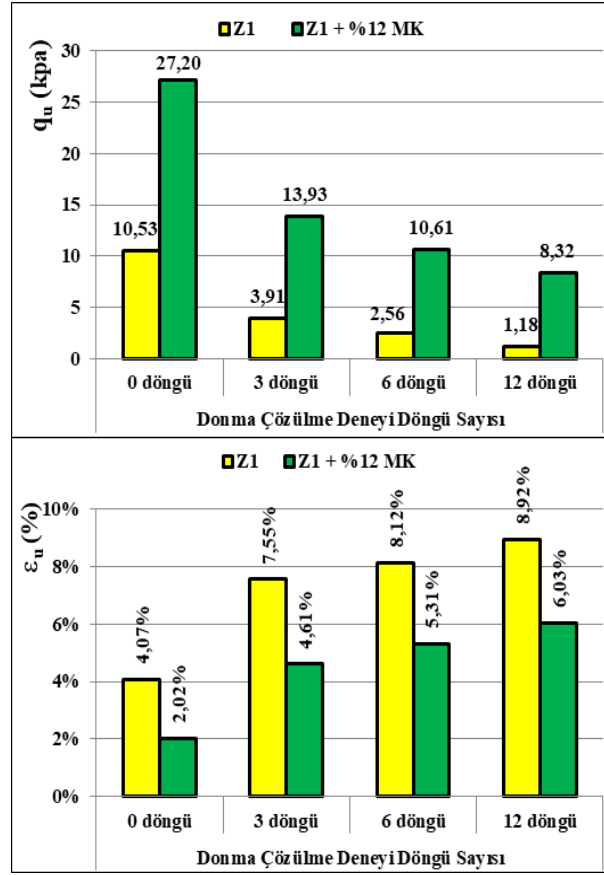
Şekil 8. Z2 zemini ile ağırlıkça %3, %6, %9, %12MK'lı örneklerle ait serbest basınç deneyi sonuçları

Serbest basınç deneyi sonuçlarında, Z1 zeminine göre ağırlıkça %3, %6, %9, %12, %15 MK'lı tüm numunelerde 7 gün sonunda serbest basınç dayanımının arttığı ve artış oranlarının katkı sırasıyla 1,29; 1,41; 1,74; 2,58; 1,56 kat olduğu belirlenmiştir. Z1 için optimum MK oranı %12 olarak belirlenmiştir. Z2 zeminine göre ağırlıkça %3, %6, %9, %12 MK'lı tüm numunelerde 7 gün sonunda serbest basınç dayanımının arttığı ve artış oranlarının katkı sırasıyla 1,28; 1,57; 1,41; 1,26 kat olduğu belirlenmiştir. Z2 için optimum MK oranı %6 olarak belirlenmiştir. Belirlenen optimum MK oranlarının farklı olması, zemin çeşitleri ve dane çapı dağılımındaki farklılıkla ilgili olduğu değerlendirilmiştir. MK katkısının zeminin dayanımını artırdığı ve bu sonuçların literatürle (Ayyappan ve ark., 2017; Reddy ve ark., 2018; Abdulkareem ve Abbas, 2021) uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 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 mekanik özellikleri iyileştirdiği literatürde (Badogiannis ve ark., 2004; Khatib ve Hibbert, 2005; Siddique ve Kalus, 2009) belirtilmektedir. Literatürde belirtilen metakaolinin puzolanik özellik göstermesi ve ince yapısı ile boşlukları doldurarak mekanik özellikleri arttırması hususu, metakaolinli karışımların maksimum kuru yoğunlukların ve serbest basınç mukamevet değerlerinin artışı ile uyumluluk göstermektedir. Ayrıca, her iki zeminde de metakaolin miktarının belirli bir oranın üzerine çıkartılmasının karışımların dayanımının arttırmada faydalı olmadığı, çünkü daha fazla katkı malzemesinin reaksiyona giremediği ve bu nedenle karışımların dayanımında artış sağlanamadığı belirlenmiştir. Bu durum optimum karışım oranının üstündeki numunelerde yapılan serbest basınç deneyinde elde edilen serbest basınç değerlerinin azalması ile paralellik gösterdiği belirlenmiştir. Bunun yanında her iki zeminde de MK miktarının artışıyla birlikte birim şekil değiştirmenin azaldığı ve bu durumun MK'nın numunelerin sertliğini arttırmasıyla bağlantılı olduğu, birim şekil değiştirmenin sonuçlarının, literatürde (Uzuner, 2014) sunulan sert zeminlerin yumuşak zeminlere kıyasla daha az deformasyona uğradığı görüşüyle uyumlu olduğu görülmüştür.

3.3. Donma Çözülme Deneyi Bulguları

Z1 ve Z2 zemini kullanılan MK katkılı karışımların donma-çözülme deneyleri için serbest basınç deneyinden elde edilen optimum MK sonuçları göz önüne alınarak deneylerin planlaması yapılmıştır. Proktor deneyi ile belirlenen maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği değerleri esas alınarak deney numuneleri hazırlanmıştır. 7 günlük kür süresini tamamlayan örneklerle 3, 6, 12 döngü uygulanmıştır. Döngülerin sonunda mukavemet (serbest basınç dayanımları) kayıpları, ağırlık kaybı ve numunelere ait yenilme anındaki birim şekil değiştirme değerleri incelenmiştir. Kıyaslamalarda 7 gün kür süresi sonrası elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri (0 döngü) kullanılmıştır. Z1 zemini ve optimum %12 MK katkılı karışımların kıyaslanan ve döngülerden elde edilen serbest basınç mukavemeti ve birim şekil değiştirme değerleri Şekil 9 ve Tablo 2'de, serbest basınç mukavemet kaybı ve ağırlık kaybı Şekil 10 ve Tablo 3'te verilmiştir. Z2 zemini ve optimum %6 MK katkılı karışımların kıyaslanan ve döngülerden elde edilen serbest basınç mukavemeti ve birim şekil değiştirme değerleri

Şekil 11 ve Tablo 4’te, serbest basınç mukavemet kaybı ve ağırlık kaybı Şekil 12 ve Tablo 5’te verilmiştir.

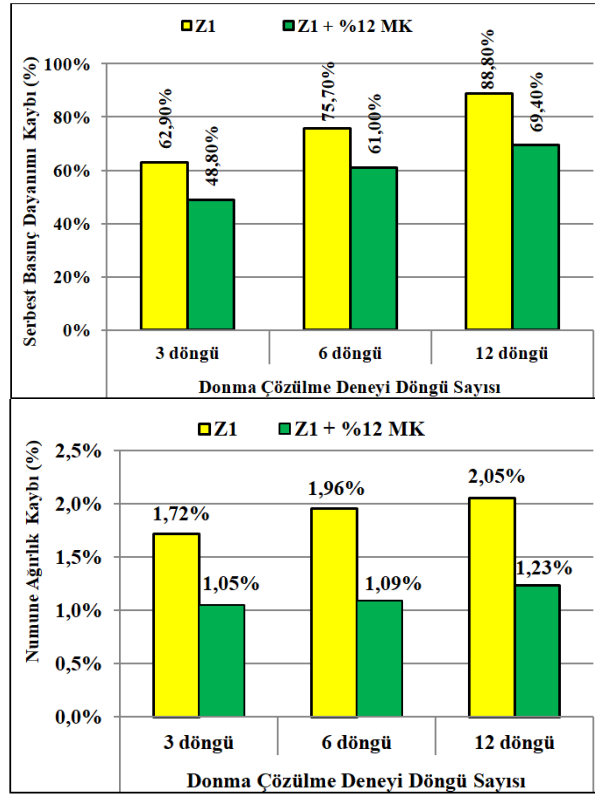


Şekil 9. Z1 zemini ile %12 MK’lı örneklere ait donma çözülme deneyi sonrası mukavemet değişikliği birim şekil değiştirme değerleri grafikleri

Tablo 2. Z1 Zemini ile %12 MK’lı örneklere ait donma çözülme deneyi sonrası mukavemet ve birim şekil değiştirme değerleri karşılaştırma tablosu

TEST NUMUNESİ	Donma Çözülme Deneyi Döngü Sayıları Sonrasına ait Değerler							
	Eksenel Gerilme q _u UCS (kpa)				Birim Şekil Değ.ε _u (%)			
	0 döngü	3 döngü	6 döngü	12 döngü	0 döngü	3 döngü	6 döngü	12 döngü
Z1	10,53	3,91	2,56	1,18	4,07	7,55	8,12	8,92
Z1 + %12 MK	27,20	13,93	10,61	8,32	2,02	4,61	5,31	6,03

Z1 Zemini ile %12 MK’lı örneklere ait 3, 6 ve 12 döngü sonrası donma-çözülme deneyleri sonuçlarına ait Şekil 9 ve Tablo 2 incelendiğinde; katkısız Z1 ile hazırlanan numunelerde mukavemet değeri; 3, 6 ve 12 döngü sonrası sırasıyla 3,91; 2,56; 1,18 kPa olarak, MK ile hazırlanan numunelerde mukavemet değeri; 3, 6 ve 12 döngü sonrası sırasıyla 13,93; 10,61; 8,32 kPa olarak tespit edilmiştir. Yenilme anındaki birim şekil değiştirmeler ise; katkısız Z1 ile hazırlanan numunelerde 3, 6 ve 12 döngü sonrası %7,55; %8,12; %8,92 olarak, MK ile hazırlanan numunelerde 3, 6 ve 12 döngü sonrası %4,61; %5,31; %6,03 olarak belirlenmiştir.

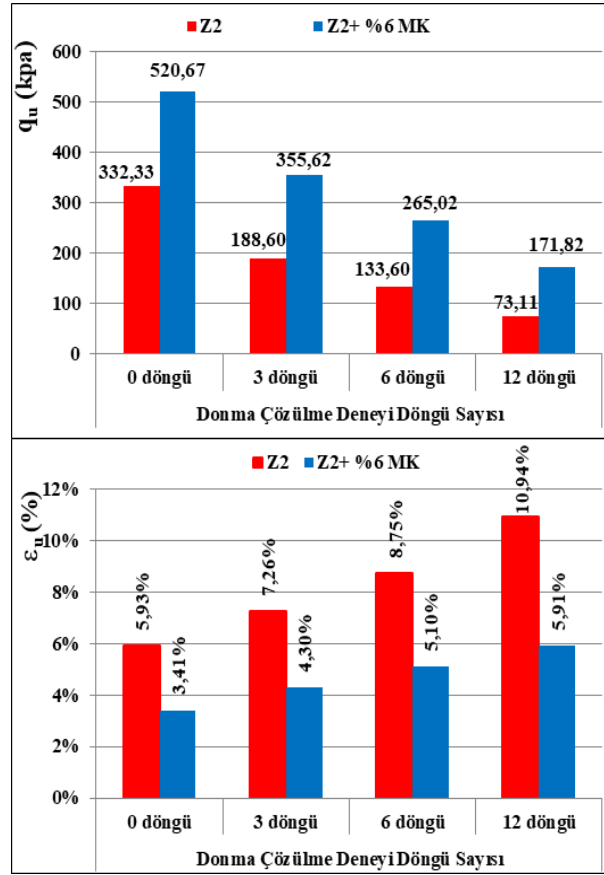


Şekil 10. Z1 zemini ile %12 MK'lı örneklere ait donma çözülme deneyi sonrası mukavemet kaybı ve ağırlık kaybı % değerleri grafikleri

Tablo 3. Z1 Zemini ile %12 MK'lı örneklere ait donma çözülme deneyi sonrası mukavemet kaybı ve ağırlık kaybı % değerleri karşılaştırma tablosu

TEST NUMUNESİ	Donma Çözülme Deneyi Döngü Sayıları Sonrasına ait Değerler					
	Serbest Basınç Dayanımı Kaybı (%)			Numune Ağırlık Kaybı (%)		
	3 döngü	6 döngü	12 döngü	3 döngü	6 döngü	12 döngü
Z1	62,90	75,70	88,80	1,72	1,96	2,05
Z1 + %12 MK	48,80	61,00	69,40	1,05	1,09	1,23

Katkısız Z1 ile hazırlanan numunelerde 0 döngü değerine göre mukavemet kaybı 3, 6 ve 12 döngü sonrası sırasıyla %62,90; %75,70; %88,80; numune ağırlık kaybının ise döngü sırasına göre %1,72; %1,16; %2,05 olarak belirlenmiştir. MK ile hazırlanan numunelerde 0 döngü değerine göre mukavemet kaybı 3, 6 ve 12 döngü sonrası sırasıyla %48,80; %61,00; %69,40 numune ağırlık kaybının ise döngü sırasına göre %1,05; %1,09; %1,23 olarak belirlenmiştir. Söz konusu sonuçlar incelendiğinde 3, 6 ve 12 döngü sonrası; katkısız Z1 ve MK'lı karışımlarda dayanım ve ağırlık kaybının meydana geldiği, ancak MK'lı karışımlardaki kayıpların daha az olduğu MK'nın karışımların donma çözülme direncini artırdığı, sonucun literatür (Li ve ark., 2023; Wang ve ark., 2023) ile örtüştüğü görülmüştür. Ayrıca yenilme anındaki birim şekil değiştirme değerlerinin arttığı, meydana gelen değişikliklerin numunelerin mukavemet kaybindan kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

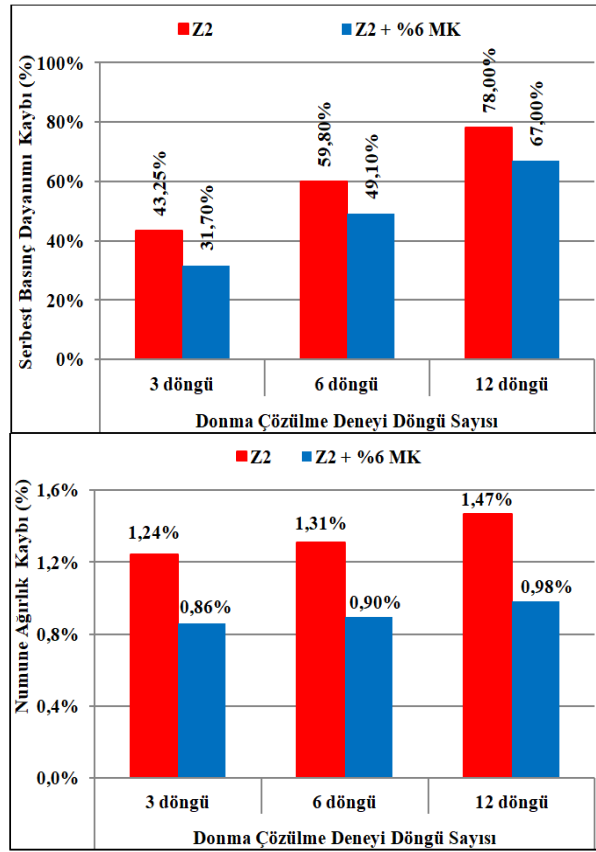


Şekil 11. Z2 zemini ile %6 MK'lı örneklerle ait donma çözülme deneyi sonrası mukavemet değişikliği birim şekil değiştirme değerleri grafikleri

Tablo 4. Z2 Zemini ile %6 MK'lı örneklerle ait donma çözülme deneyi sonrası mukavemet ve birim şekil değiştirme değerleri karşılaştırma tablosu

TEST NUMUNESİ	Donma Çözülme Deneyi Döngü Sayıları Sonrasında ait Değerler							
	Eksenel Gerilme q_u UCS (kPa)				Birm Şekil Değ. ϵ_u (%)			
	0 döngü	3 döngü	6 döngü	12 döngü	0 döngü	3 döngü	6 döngü	12 döngü
Z2	332,33	188,60	133,60	73,11	5,93	7,26	8,75	10,94
Z2 + %6 MK	520,67	355,62	265,02	171,82	3,41	4,30	5,10	5,91

Z2 Zemini ile %6 MK'lı örneklerle ait 3, 6 ve 12 döngü sonrası donma-çözülme deneyleri sonuçlarına ait Şekil 11 ve Tablo 4 incelendiğinde; katkısız Z2 ile hazırlanan numunelerde mukavemet değeri; 3, 6 ve 12 döngü sonrası sırasıyla 188,60; 133,60; 73,11 kPa olarak, MK ile hazırlanan numunelerde mukavemet değeri; 3, 6 ve 12 döngü sonrası sırasıyla 355,62; 265,02; 171,82 kPa olarak tespit edilmiştir. Yenilme anındaki birim şekil değiştirmeler ise; katkısız Z2 ile hazırlanan numunelerde 3, 6 ve 12 döngü sonrası %7,26; %8,75; %10,94 olarak, MK ile hazırlanan numunelerde 3, 6 ve 12 döngü sonrası %4,30; % 5,10; %5,91 olarak belirlenmiştir.



Şekil 12. Z2 zemini ile %6 MK'lı örneklerle ait donma çözülme deneyi sonrası mukavemet kaybı ve ağırlık kaybı % değerleri grafikleri

Tablo 5. Z2 Zemini ile %6 MK'lı örneklerle ait donma çözülme deneyi sonrası mukavemet kaybı ve ağırlık kaybı % değerleri karşılaştırma tablosu

TEST NUMUNESİ	Donma Çözülme Deneyi Döngü Sayıları Sonrasında ait Değerler					
	Serbest Basınç Dayanımı Kaybı (%)			Numune Ağırlık Kaybı (%)		
	3 döngü	6 döngü	12 döngü	3 döngü	6 döngü	12 döngü
Z2	43,25	59,80	78,00	1,24	1,31	1,47
Z2 + %6 MK	31,70	49,10	67,00	0,86	0,90	0,98

Katkısız Z2 ile hazırlanan numunelerde 0 döngü değerine göre mukavemet kaybı 3, 6 ve 12 döngü sonrası sırasıyla %43,25; %59,80; %78,00; numune ağırlık kaybının ise döngü sırasına göre %1,24; %1,31; %1,47 olarak belirlenmiştir. MK ile hazırlanan numunelerde 0 döngü değerine göre mukavemet kaybı 3, 6 ve 12 döngü sonrası sırasıyla %31,70; %49,10; %67,00 numune ağırlık kaybının ise döngü sırasına göre %0,86; %0,90; %0,98 olarak belirlenmiştir. Söz konusu sonuçlar incelendiğinde 3, 6 ve 12 döngü sonrası; katkısız Z2 ve MK'lı karışımlarda dayanım ve ağırlık kaybının meydana geldiği, ancak MK'lı karışımlardaki kayıpların daha az olduğu MK'nın karışımların donma çözülme direncini artırdığı, sonucun literatür (Li ve ark., 2023; Wang ve ark., 2023) ile örtüştüğü görülmüştür. Ayrıca yenilme anındaki birim şekil değiştirme değerlerinin arttığı, meydana gelen değişikliklerin numunelerin mukavemet kaybindan kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Söz konusu Z1 ve Z2 zeminlerinin MK katkıları ile mukavemet artış oranları incelendiğinde, Z1 ve MK ile hazırlanan numunelerde 0 döngüde 2,58 kat iken; 3, 6, 12 döngü sonrası bu artışın 3,56; 4,14; 7,06

kat olduğu görülmüştür. Z2 ve MK ile hazırlanan numunelerde 0 döngüde 1,57 kat iken; 3, 6, 12 döngü sonrası bu artışın 1,89; 1,98; 2,35 kat olduğu belirlenmiştir. MK ile yapılan stabilizasyonun ve donma çözülme direncinin Z1 zemininde daha etkili olmasının, hazırlanan stabilizasyon karışımlarında Z1 zeminin Z2 zeminine göre daha kompakt bir yapı oluşturduğu, bu durumun Z1 zemini ile hazırlanan karışımlardaki MK miktarının artmasıyla maksimum kuru yoğunluklarının artışı ile uyum gösterdiği değerlendirilmiştir. Ayrıca, AASHTO (1993) rehberine göre Z1 zeminin donma hassasiyetinin “çok düşük” olması, bunun dane çapına ve dağılımına bağlı olduğu, bu durumun stabilizasyonda avantaj olarak yansıdığı düşünülmektedir. Ayrıca, MK katkısı ile hazırlanan numunelerin ağırlık kaybının, Z1 ve Z2 zeminlerinin ağırlık kaybından daha az olduğu, bunun zemin stabilizasyonu sayesinde artan dayanım vasıtasıyla numune bütünlüğünün daha iyi sağlanması ile meydana geldiği değerlendirilmiştir. İlaveten MK katkısı ile her iki zemin çeşidi ile hazırlanan karışımlarda optimum su içeriğinin azaldığı, bu durumun MK’nın daha az suya ihtiyaç duyan amorf bir morfolojiye sahip olmasından kaynaklandığı böylece, zemin karışımlarının donma sırasında suyun genleşme ve çözülme esnasında karışımın bozulma etkisini azalttığı değerlendirilmektedir. Ayrıca, MK’nın kimyasal yapısındaki SiO_2 ve Al_2O_3 ’ün donma çözülme direncini arttırmada (Li ve ark., 2023; Wang ve ark., 2023) etkili olduğu kıymetlendirilmiştir.

Ancak bu çalışmamızda, literatürde (AASHTO, 1993) Z1 zeminine "çok düşük" ve Z2 zeminine "düşük" donma hassasiyeti atfedilmesine ve oransal olarak Z1 zemininde dayanım kayıplarının fazla olmasına rağmen, Z1 zemininin MK katkılı stabilizasyonda ve donma-çözülme direnci deneylerinde daha iyi performans göstermesi, deneysel laboratuvar çalışmalarının önemini ve zeminlerin laboratuvar koşullarındaki davranışlarının araştırılarak değerlendirilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada kumlu ve killi yol tabanı olarak değerlendirilen iki farklı zemin türünün metakaolin ile stabilizasyonu ve yapılan stabilizasyonların donma-çözülme direncinin üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları aşağıda sunulmuştur.

1. Z1 zemini ile hazırlanan karışımlardaki standart proktor deneyi sonuçlarında, MK oranının artmasıyla, maksimum kuru yoğunluk değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durumunun MK’nın filler etkisi göstererek, karışımın boşluk oranın %58,4’ten %49 gerilemesi ile ilgili olabileceği değerlendirilmiştir. Z2 zemini ile hazırlanan karışımlardaki standart proktor deneyi sonuçlarında ise, MK oranının artmasıyla, maksimum kuru yoğunluk değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.
2. Z1 ve Z2 zeminleri ile hazırlanan karışımlardaki standart proktor deneyi sonuçlarında, optimum su içeriğinin azalmasının, MK’nın daha az suya ihtiyaç duyan amorf bir morfolojiye sahip olması görüşüyle uyumlu olduğu değerlendirilmiştir.
3. Z1 ve Z2 zemini ile hazırlanan karışımlardaki serbest basınç deneyi sonuçlarında ise, 7 günlük kür sonunda en büyük mukavemet değerinin ağırlıkça sırasıyla %12 MK ve %6 MK’lı numunelerde görülmüştür. Z1 ve Z2 zeminine göre dayanım artış oranı sırasıyla 2,58 ve 1,57 kat olarak belirlenmiştir.

4. Serbest basınç deneyinde belirlenen optimum MK oranlarının farklı olmasının, zemin çeşitleri ve dane çapı dağılımı ile ilgili olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca, her iki zemin ile hazırlanan karışımlarda, MK miktarının artması ile birim şekil değiştirmenin, numunelerin sertliğine bağlı olarak azaldığı görülmüştür.

5. Z1 zemini ile %12 MK katkılı hazırlanan karışımlardaki donma çözülme deneyi sonuçlarında, %12 MK ile hazırlanan numunelerde 0 döngü değerine göre; mukavemet kaybı 3, 6 ve 12 döngü sonrası sırasıyla %48,80; %61,00; %69,40 olarak belirlenmiştir. Numune ağırlık kaybı ise döngü sırasına göre %1,05; %1,09; %1,23 olarak belirlenmiştir. %12 MK'lı karışımlardaki kayıpların, Z1 zeminindeki 3, 6 ve 12 döngü sonrası tespit edilen mukavemet ve ağırlık kaybında daha az olduğu görülmüştür.

6. Z2 zemini ile %6 MK katkılı hazırlanan karışımlardaki donma çözülme deneyi sonuçlarında ise, %6MK ile hazırlanan numunelerde 0 döngü değerine göre mukavemet kaybı 3, 6 ve 12 döngü sonrası sırasıyla %31,70; %49,10; %67,00 olarak belirlenmiştir. Numune ağırlık kaybının ise döngü sırasına göre %0,86; %0,90; %0,98 olarak belirlenmiştir. %6 MK'lı karışımlardaki kayıpların Z2 zeminindeki 3, 6 ve 12 döngü sonrası tespit edilen mukavemet ve ağırlık kaybında daha az olduğu görülmüştür.

7. Z1 ve Z2 zemini ile hazırlanan MK'lı karışımlardaki puzolanik aktivitenin ve donma çözülme direncinin artmasında, MK'nın bileşiminde bulunan daha kompakt bir yapı meydana gelmesini sağlayan SiO_2 ve Al_2O_3 'ün etkili olduğu değerlendirilmiştir.

8. Z1 ve Z2 zemini ile hazırlanan karışımlardaki deney sonuçlarında, MK ile yapılan stabilizasyonun ve donma çözülme direncinin Z1 zemininde daha etkili olmasının, hazırlanan stabilizasyon karışımlarında Z1 zeminin Z2 zeminine göre daha kompakt bir yapı oluşturduğu, bu durumun Z1 zemini ile hazırlanan karışımlardaki MK miktarının artmasıyla maksimum kuru yoğunluklarının artışı ile uyum gösterdiği değerlendirilmiştir.

9. AASHTO (1993) rehberine göre Z1 zemininde donma hassasiyetinin "çok düşük" ve Z2 zemininde "düşük" olmasına rağmen, Z1 zemininde dayanım kayıplarının oransal olarak daha fazla olduğu, ancak Z1 zemininde MK ile yapılan stabilizasyon ve donma-çözülme direnci deneylerinde elde edilen sonuçların, zeminlerin laboratuvar şartlarındaki davranışlarının araştırılarak değerlendirilmesinin önemini vurguladığı değerlendirilmiştir.

10. Metakaolin katkısının stabilizasyon etkisinin sonra yapılacak çalışmalarda, Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi ve belirli trafik yükleri esas alınarak hazırlanmış bir yol kesitinde; karayolu üstyapı tabanı, tesviye düzlemi, yeraltı su seviyesi, donma indeksi gibi hususlar dikkate alınarak, donma-çözülme davranışının deneysel yöntemler kullanılarak araştırılmasının literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak, kumlu ve killi yol tabanı olarak değerlendirilen zeminlerde MK kullanılarak yapılan stabilizasyonun, karışımların dayanımı ve donma çözülme direncini arttırdığı belirlenmiştir. MK'nın yol tabanı stabilizasyonunda kullanılmasının, yol tabanının dayanımını artıracak ve bakım onarım maliyetlerini azaltacak değerlendirilmiştir. Ayrıca, yapılan iyileştirmenin milli ekonomiye sağladığı faydanın yanı sıra, bakım, onarım ve yenileme çalışmalarında kullanılan malzemelerin taşınması ve

uygulanması sırasında meydana gelen CO₂ salımı başta olmak üzere çevreye verilen zararın azaltılabileceği düşünülmüştür.

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

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

- AASHTO. Interim guide for design of pavement structures. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials; 1993.
- Abdulkareem SA., Abbas JM. Effect of adding metakaolin based geopolymer to improve soft clay under different conditions. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2021; 856: 012011.
- Alhakim G., Baalbaki O., Jaber L. Effects of incorporation of cement and metakaolin on the mechanical properties of poorly graded sand. Arabian Journal of Geosciences 2022; 15: 1777.
- ASTM C136/C136M. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, West Conshohocken, PA: ASTM International; 2019.
- ASTM D422-63. Standard test method for particle-size analysis of soils, West Conshohocken, PA: ASTM International; 2007.
- ASTM D4318. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, West Conshohocken, PA: ASTM International; 2017.
- ASTM D560 / D560M-16. Standard test methods for freezing and thawing compacted soil-cement mixtures, West Conshohocken, PA: ASTM International; 2016.
- ASTM D698. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, West Conshohocken, PA: ASTM International; 2014.
- ASTM D854. Standard test method for specific gravity of soils, West Conshohocken, PA: ASTM International; 2006.
- ASTM 2166-06. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, West Conshohocken, PA: ASTM International; 2006.

- Aygörmez Y., Canpolat O., Al-Mashhadani MM., Uysal M. Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites. *Construction and Building Materials* 2020; 235.
- Ayyappan A., Palanikumar S., Kumar D., Vinoth M. Influence of geopolymers in the stabilization of clay soil. *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research* 2017; 5: 108-120.
- Badogiannis E., Papadakis VG., Chaniotakis E., Tsivilis S. Exploitation of poor Greek kaolins: Strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k-value. *Cement & Concrete Research*, 2004; 34: 1035-1041.
- Bağrıaçık B., Uslu FM., Yiğittekin ES., Dinçer S. Bacillus sp. ile iyileştirilmiş zeminlerin donma çözülme etkisindeki davranışı. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2021; 10(2): 704-711
- Balkış AP., İlman B. Mermer tozu ile stabilize edilmiş killerin mekanik özellikleri. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 19. Ulusal Konferansı Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2024.*
- Bozyigit I., Zingil HO., Altun S. Performance of eco-friendly polymers for soil stabilization and their resistance to freeze–thaw action. *Construction and Building Materials*, 2023; 379: 131133.
- Chakkor O. Kırmızı çamur ve metakaolin tabanlı geopolimer harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi. *İstanbul Aydın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Doktora Tezi, İstanbul, 2021.*
- Dabakuyo I., Mutuku RN., Onchiri R. Effect of sugarcane molasses on the physical properties of metakaolin based geopolymer stabilized laterite soil. *SSRG International Journal of Civil Engineering* 2021; 8(12): 1-12.
- Demir A., Sarıcı T. Bearing capacity of footing supported by geogrid encased stone columns on soft soil. *Geomechanics and Engineering* 2017; 12(3): 417–439.
- Ding M., Zhang F., Ling X., Lin B. Effects of freeze-thaw cycles on mechanical properties of polypropylene Fiber and cement stabilized clay. *Cold Regions Science and Technology* 2018; 154: 155-165.
- Geçkil T., Sarıcı T., Karabaş B. Siyah karbon ile stabilize edilen taban zeminin yol esnek üst yapı maliyetine etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2021a; 23: 222-235.
- Geçkil T., Sarıcı T., Karabaş B. Siyah karbon stabilizasyonlu zeminin rijit kaplama kalınlığı ve maliyetine etkileri. *ECJSE* 2021b; 8(3): 1372–1384.
- Karahan O. Metakaolin ve silis dumanı içeren harçların aşınma direncinin karşılaştırılması, bilimsel araştırma projesi. *Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi, Kayseri, 2011.*
- Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi. Ankara: T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü; 2008.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. Karayolu teknik şartnamesi (yol altyapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üst yapı ve çeşitli işler). Ankara: KGM; 2013.

- Karainli F., Saygılı A. Geotekstil ile iyileştirilmiş kohezyonlu zeminlerin donma çözünme performansı. 3. Genç Geoteknik Mühendisliği Sempozyumu Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2024.
- Khatib JM., Hibbert JJ. Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin”, Construction and Building Materials 2005; 19: 460-472.
- Kumar KR., Gobinath R., Shyamala G. Freez thaw resistance of stabilized and fiber-reinforced soil vulnerable to landslides. Materials Today: Proceedings 2020; 27(1): 664-670.
- Liang G., Zhu H., Li H., Liu T., Guo H. Comparative study on the effects of rice husk ash and silica fume on the freezing resistance of metakaolin-based geopolymer, Construction and Building Materials 2021; 293.
- Li X., Zhang H., Wu D., Guo, YR., Ren K., Tan Y. Strength deterioration characteristics of lime-metakaolin improved earthen site soil under freeze-thaw cycles. Rock and Soil Mechanics 2023; 44(6): Article 2.
- Nan J., Chang D., Liu J., Chen H., Lee J., Kim S. Investigation on the microstructural characteristics of lime-stabilized soil after freeze–thaw cycles, Transportation Geotechnics 2024; 44.
- Nebiogulları MA. Metakaolin, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkısının beton hidrasyon sıcaklığına etkisi. Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Niğde, 2010.
- Ok B., Bağrıaçık B. Guar gum ile iyileştirilmiş kil zeminlerin donma çözülme etkisinde mukavemet ve şişme basınçlarının araştırılması. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 2022; 37(3): 589-600.
- Ok B., Demir A., Sarıcı T., Ovalı M. Geosentetiklerle güçlendirilmiş karayolu temellerinin plaka yükleme deneyleri ile değerlendirilmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2021; 27(6): 718-728.
- Orakoglu ME., Liu J. Effect of freeze-thaw cycles on triaxial strength properties of fiber-reinforced clayey soil. KSCE Journal of Civil Engineering 2017; 21(6): 2128-2140.
- Orhan M., Özer M., Işık N. Zemin mekaniği laboratuvar deneyleri. Ankara: Gazi Kitabevi; 2013.
- Reddy DS., Kowshik K., Kishor MJ., Durga RV., Kumar VP. Enhancement of soil properties by using fly ash and metakaolin. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) 2018; 8(2).
- Sarıcı T. Geosentetik ile güçlendirilmiş taş kolonların taşıma kapasitesinin analizi. İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Malatya, 2014
- Sarıcı T., Ok B., Mert A., Çömez Ş. The resilient modulus of hybrid construction and demolition wastes reinforced by a geogrid. Acta Geotechnica Slovenica 2022; 2.
- Saygılı A., Dayan M. Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers. Cold Regions Science and Technology 2019.
- Siddique R, Kalus J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. Applied Clay Science 2009; 43: 392-400.

- Soğancı AS., Yıldız M. Tekrarlı donma ve çözülmenin kireç ile stabilize edilmiş kil zeminlerin mukavemet ve permeabilitesine etkisi. Selçuk-Teknik Dergisi 2011; 10(3): 259-270.
- Tunç A. Yol mühendisliğinde geoteknik ve uygulamaları. Ankara: Nobel Yayınevi, 2002.
- Uzuner BA. Temel mühendisliğine giriş. Trabzon: Derya Kitabevi; 2016.
- Uzuner BA. Temel zemin mekaniği. Trabzon: Derya Kitabevi; 2014.
- Wang Q., Ge D., Cai G., Li M., Wu L., Xu H. Mechanical and microscopic properties of copper-contaminated soil solidified with calcium carbide residue, metakaolin, and desulfurization gypsum under freeze-thaw cycles. KSCE J Civ Eng 2023; 27: 455–468.
- Xukun M., Pengfei W., Ping J., Haoqing X., Na L., Sijia Q., Wei W., Guo Xiong M. Frost resistance and micro mechanism of metakaolin and polypropylene fiber modified coastal cement soil. SSRN 2024; 33.
- Yarbaşı N. Atık lastik parçaları ile güçlendirilmiş killi zeminlerin donma-çözülme davranışı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2016; 22(6): 559-562.
- Yarbaşı N. Doğal bir materyal olarak keçi kılı lifleriyle modifiye edilen kohezyonlu zeminlerin donma-çözülme direnci. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2020; 7(13): 157-166.
- Yılmaz F. Uçucu kül ve mermer tozu katkılarının zeminin stabilizasyonuna ve donma-çözülmesine etkisinin araştırılması. APJES 2020; 8(1): 56–61.
- Yılmaz I., Yıldırım M., Keskin İ. Zemin mekaniği laboratuvar deneyleri ve çözümlü problemler. Ankara: Seçkin Kitabevi; 2017.