4. Ulusal
Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu

14 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

GGM4

CMC İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR ÇALIŞMA

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-PLASTICITY CLAY TREATED WITH CMC

Mehmet Fatih AKMAR[1], Yeşim Sema ÜNSEVER[2]

ÖZET

Yüksek plastisiteli kil zeminler, su muhtevasındaki değişimlere karşı duyarlı yapıları ve buna bağlı hacim değiştirme eğilimleri nedeniyle dolgu, üstyapı ve temel mühendisliği uygulamalarında dikkatle değerlendirilmesi gereken zeminlerdir. Bu tür zeminlerde dayanım ve şekil değiştirme özellikleri; plastisite, başlangıç su muhtevası, kuru yoğunluk ve numune hazırlama koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişebilmektedir. Bu çalışmada, farklı oranlarda karboksimetil selüloz (CMC) ilavesinin yüksek plastisiteli doğal bir kilin Standart Proktor parametreleri ve serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kuru zemin kütlesine göre %0,25, %0,50, %1,00 ve %2,00 CMC içeren karışımların öncelikle optimum su muhtevaları ve maksimum kuru yoğunlukları belirlenmiştir. Daha sonra, serbest basınç dayanımı için numuneler her karışımın optimum su muhtevasında hazırlanmış ve 1, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. CMC oranının %0'dan %2,00'ye yükselmesiyle optimum su muhtevası %24,7'den %34,2'ye artarken maksimum kuru yoğunluk 1,551 g/cm³'ten 1,358 g/cm³'e düşmüştür. En yüksek dayanımlar, 7 günlük %0,25 ve %0,50 CMC numunelerinde sırasıyla 181 ve 178 kPa olarak ölçülmüştür. Sonuçlar, serbest basınç dayanımının katkı oranı ve kür süresiyle düzenli biçimde artmadığını ve incelenen koşullarda düşük CMC oranlarının öne çıktığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: yüksek plastisiteli kil, karboksimetil selüloz, biyopolimer, Standart Proktor deneyi, serbest basınç dayanımı

ABSTRACT

High-plasticity clay soils require careful consideration in embankment, pavement, and foundation engineering applications because of their sensitivity to changes in water content and the associated tendency to undergo volume changes. The strength and deformation characteristics of these soils may vary considerably depending on plasticity, initial water content, dry density, and specimen preparation conditions. This study investigated the effects of carboxymethyl cellulose (CMC) on the Standard Proctor parameters and unconfined compressive strength of a natural high-plasticity clay. First of all, optimum water contents and maximum dry densities of mixtures containing 0.25%, 0.50%, 1.00%, and 2.00% CMC by dry soil mass were obtained. After that, soil specimens prepared at their respective optimum water contents and they tested after curing time of 1, 7, and 28 days. As the CMC content increased from 0% to 2.00%, optimum water content rose from 24.7% to 34.2%, while maximum dry density decreased from 1.551 to 1.358 g/cm³. The highest strengths, 181 and 178 kPa, were measured after 7 days for the 0.25% and 0.50% CMC mixtures, respectively. Unconfined compressive strength did not increase monotonically with CMC content or curing time; lower CMC contents performed better under the investigated conditions.

Keywords: high-plasticity clay, carboxymethyl cellulose, biopolymer, Standard Proctor test, unconfined compressive strength

[1] Yüksek lisans öğrencisi, Bursa Uludağ Üniversitesi, 502326045@ogr.uludag.edu.tr
[2] Doç. Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi, unsever@uludag.edu.tr (Sorumlu yazar)

1. GİRİŞ

Yüksek plastisiteli kil zeminlerin dayanım, şekil değiştirme ve hacim değiştirme davranışlarının iyileştirilmesi amacıyla çeşitli stabilizasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Kullanılacak katkının etkinliği; zemin özellikleri, su muhtevası, kompaksiyon ve numune hazırlama koşullarıyla birlikte değerlendirilmelidir.

Çimento ve kireç, zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan geleneksel katkılardır (Firoozi vd., 2017). Bununla birlikte, bu malzemelerin üretimiyle ilişkili enerji tüketimi ve sera gazı salımları, biyopolimerler gibi çevresel etkisi daha düşük alternatiflere yönelik araştırmaları artırmıştır (Chang vd., 2016; Sujatha ve Kannan, 2022). Chang vd. (2016), biyopolimerlerin dayanım ve hidrolik iletkenlik gibi mühendislik özelliklerini geliştirme potansiyeline sahip olduğunu; saha uygulaması, güvenilirlik ve dayanıklılık açısından ise ek araştırmalara ihtiyaç bulunduğunu vurgulamıştır. Biyopolimerle iyileştirilmiş zeminlerin davranışı; polimer türü ve oranı, zemin özellikleri, başlangıç su muhtevası, karıştırma ve numune hazırlama yöntemi ile kür koşullarına bağlı olarak değişebildiğinden, farklı çalışmalardaki sonuçların doğrudan karşılaştırılması sınırlı kalmaktadır (Abd vd., 2021; Ma ve Ma, 2019; Ojuri vd., 2022; Sujatha ve Kannan, 2022).

Karboksimetil selüloz (CMC), selüloz türevi ve suyla etkileşimi yüksek bir polimerdir. CMC-kil etkileşimi zeminin kıvam, kompaksiyon, dayanım ve hidrolik özelliklerini etkileyebilmektedir. Fan vd. (2020), CMC ile işlenmiş bentonitte indeks özellikleri ile hidrolik iletkenliğin katkı oranına ve temas sıvısına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Sujatha ve Kannan (2022) ise NaCMC katkılı ince daneli bir zeminde maksimum kuru yoğunluğun azaldığını, dayanım ve deformasyon davranışının katkı oranı ile kür süresinden etkilendiğini bildirmiştir. Bu sonuçlar, CMC katkısının etkisinin zemin türü ve deney koşullarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Literatürde CMC katkılı ince daneli zeminlerin kompaksiyon ve dayanım davranışı, farklı zemin türleri, katkı oranları ve kür koşulları altında incelenmiştir. Abd vd. (2021), yumuşak killi zeminde CMC oranının artmasıyla optimum su muhtevasının yükseldiğini ve serbest basınç dayanımının kür süresine bağlı olarak değiştiğini bildirmiştir. Ma ve Ma (2019), silt ağırlıklı doğal bir zeminde CMC katkısı ile optimum su muhtevasının arttığını, maksimum kuru yoğunluğun azaldığını ve mekanik özelliklerin katkı oranına bağlı olarak farklılaştığını belirlemiştir. Sujatha ve Kannan (2022), %0,25 ile %1,00 NaCMC içeren organik siltte düşük katkı oranlarının kür süresine bağlı dayanım artışı sağlayabildiğini; Ojuri vd. (2022) ise bölgesel ince daneli bir zeminde CMC katkısının maksimum kuru yoğunluğu azalttığını ve incelenen oranlar arasında %1 CMC içeriğinin en yüksek dayanımı verdiğini raporlamıştır. Correia vd. (2023) tarafından maden atığı zemininde yürütülen çalışmada da CMC ilavesinin serbest basınç dayanımını artırabildiği görülmüştür.

CMC'nin başka biyopolimerlerle birlikte kullanıldığı çalışmalar, polimer bileşimi ile sıkıştırma ve kür koşullarının mekanik davranış üzerindeki rolünü göstermektedir. Zinchenko vd. (2022), CMC-kitosan sisteminde polimer oranı ve su muhtevasının basınç dayanımını etkilediğini; Wang vd. (2024) ise aynı polimer sisteminde kompaksiyonun ve kür koşullarının dayanım gelişiminde belirleyici olduğunu bildirmiştir. Bu çalışmalar sayısal karşılaştırma amacıyla değil, polimer-zemin davranışının deney koşullarına bağlılığını açıklamak amacıyla değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, Bursa ili Nilüfer ilçesinden temin edilen yüksek plastisiteli doğal bir kile kuru zemin kütlesine göre %0,25, %0,50, %1,00 ve %2,00 oranlarında CMC ilave edilmiştir. Çalışmanın amacı, farklı CMC oranlarında Standart Proktor parametrelerini belirlemek ve CMC'nin zeminin serbest basınç dayanımı ve gerilme–birim deformasyon davranışı üzerindeki etkisini 1, 7 ve 28 günlük kür süreleri için karşılaştırmaktır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Doğal zemin ve CMC katkısı

Çalışmada kullanılan doğal zemin, Bursa ili, Nilüfer ilçesi, Beşevler Mahallesi, 327 ada 1 parseldeki sahadan örselenmiş olarak temin edilmiş ve laboratuvarda kurutularak deneylere hazırlanmıştır. Katkı malzemesi olarak toz formda karboksimetil selüloz (CMC) kullanılmıştır. CMC oranları, literatürde ince daneli zeminler için incelenen katkı düzeyleri dikkate alınarak ve düşük oranlardaki değişimin daha ayrıntılı değerlendirilebilmesi amacıyla kuru zemin kütlesinin %0,25, %0,50, %1,00 ve %2,00'si olarak seçilmiştir (Ma ve Ma, 2019; Sujatha ve Kannan, 2022; Ojuri vd., 2022).

Belirlenen miktardaki CMC, kuru zemine kademeli olarak ilave edilmiş ve karışım 5 dakika kadar elle karıştırılmıştır. Ardından hedef su muhtevasına karşılık gelen su, piset yardımıyla kademeli olarak karışımın farklı bölgelerine dağıtılarak eklenmiş; homojen kıvam elde edilinceye kadar elle karıştırmaya devam edilmiştir. Su ilavesi tamamlandıktan sonra karışımlar ek bir dinlendirme süresine tabi tutulmadan sıkıştırılmıştır.

2.2. İndeks ve sınıflandırma deneyleri

Doğal zeminin dane özgül ağırlığı, ASTM D854 (2023) esas alınarak su piknometresi yöntemiyle iki tekrarlı olarak belirlenmiştir. Tane boyutu dağılımı, elek analizi (ASTM D6913, 2025) ile hidrometre deneyi (ASTM D7928, 2021) sonuçlarının birlikte değerlendirilmesiyle elde edilmiştir. Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ASTM D4318 (2017) esas alınarak belirlenmiş; likit limit için çok noktalı Casagrande yöntemi, plastik limit için elle yuvarlama yöntemi kullanılmıştır. Zemin sınıfı, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (ASTM D2487, 2025) uyarınca ince dane oranı ve plastisite kartındaki konum birlikte değerlendirilerek belirlenmiştir.

2.3. Standart Proktor deneyi

Doğal zemin ve dört CMC karışımının su muhtevası–kuru yoğunluk ilişkileri, ASTM D698 (2021) esas alınarak gerçekleştirilen Standart Proktor deneyleriyle belirlenmiştir. Deneylerde iç hacmi 944 cm³ olan Proktor kalıbı kullanılmıştır. Her karışım için farklı su muhtevalarında sıkıştırma yapılmış; kalıp içindeki sıkıştırılmış zemin kütlesinden yaş yoğunluk, deney sonunda belirlenen su muhtevasından ise kuru yoğunluk hesaplanmıştır. Yatay eksende su muhtevası, düşey eksende kuru yoğunluk gösterilerek oluşturulan kompaksiyon eğrilerinin tepe noktalarından optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum kuru yoğunluk ($\rho_{d,max}$) belirlenmiştir. Serbest basınç numuneleri, her bir CMC karışımı için belirlenen optimum su muhtevası esas alınarak hazırlanmıştır.

2.4. Serbest basınç dayanımı deneyi

Serbest basınç numuneleri yaklaşık 38 mm çapında ve 76 mm yüksekliğinde hazırlanmıştır. CMC-kil-su karışımı silindirik kalıplara tabakalar hâlinde yerleştirilmiş ve tokmaklanarak sıkıştırılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler, kür süresince su kaybını sınırlandırmak amacıyla yüzeyleri tamamen kaplanacak biçimde ayrı ayrı streç filmle sarılmıştır. Numuneler aynı laboratuvar ortamında, doğrudan güneş ışığı almayan kapalı desikatörde 1, 7 ve 28 gün süreyle bekletilmiştir. Kür süresince streç film açılmamış, numunelerin dış ortamla teması sınırlandırılmış ve numunelere herhangi bir ıslatma veya ilave su uygulaması yapılmamıştır. İlgili kür süresinin sonunda numune desikatörden çıkarılmış, streç film deneyden hemen önce dikkatlice çıkarılmış ve serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir.

Deneyler, ASTM D2166 (2024) esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Eksenel yükleme, 1,4 mm/dak sabit yer değiştirme hızıyla uygulanmıştır. Numunenin basınç altında kısalmasına bağlı kesit alanı değişimi dikkate alınmış ve her ölçüm adımındaki eksenel gerilme, düzeltilmiş kesit alanı kullanılarak hesaplanmıştır. Serbest basınç dayanımı (q_u), gerilme–birim deformasyon eğrisinde ulaşılan en büyük eksenel gerilme olarak alınmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

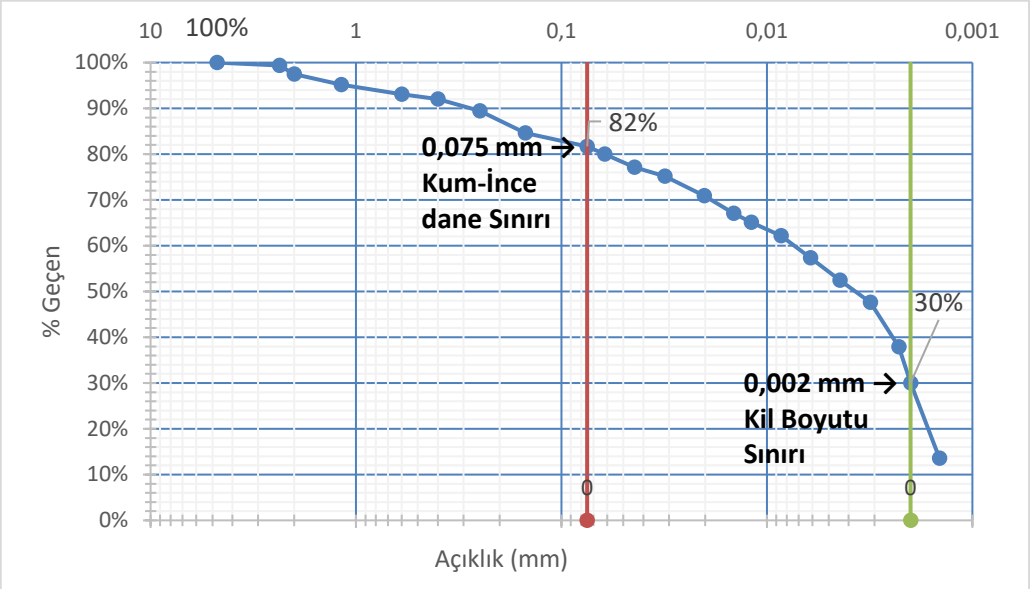
3.1. Doğal zeminin özellikleri ve sınıflandırılması

Yapılan deneyler sonucunda belirlenen doğal zemine ait temel indeks ve sınıflandırma özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Doğal zemine ait dane boyut dağılım eğrisi Şekil 1'de verilmiştir. Tane boyutu dağılım eğrisine göre 0,075 mm'den geçen ince dane oranı yaklaşık %82, 0,002 mm'den küçük dane oranı ise yaklaşık %30'dur. İnce dane oranı ile LL=%64,00 ve PI=%38,20 değerleri birlikte değerlendirildiğinde zemin, ASTM D2487 (2025) uyarınca yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır.

Tablo 1. Doğal zeminin temel indeks ve sınıflandırma özellikleri

Özellik	Değer	Birim / açıklama
Dane özgül ağırlığı, G_s	2,61	-
0,075 mm'den geçen	82	%
0,002 mm'den küçük	30	%
Likit limit, LL	64,00	%
Plastik limit, PL	25,80	%
Plastisite indisi, PI	38,20	%
USCS sınıfı	CH	Yüksek plastisiteli kil



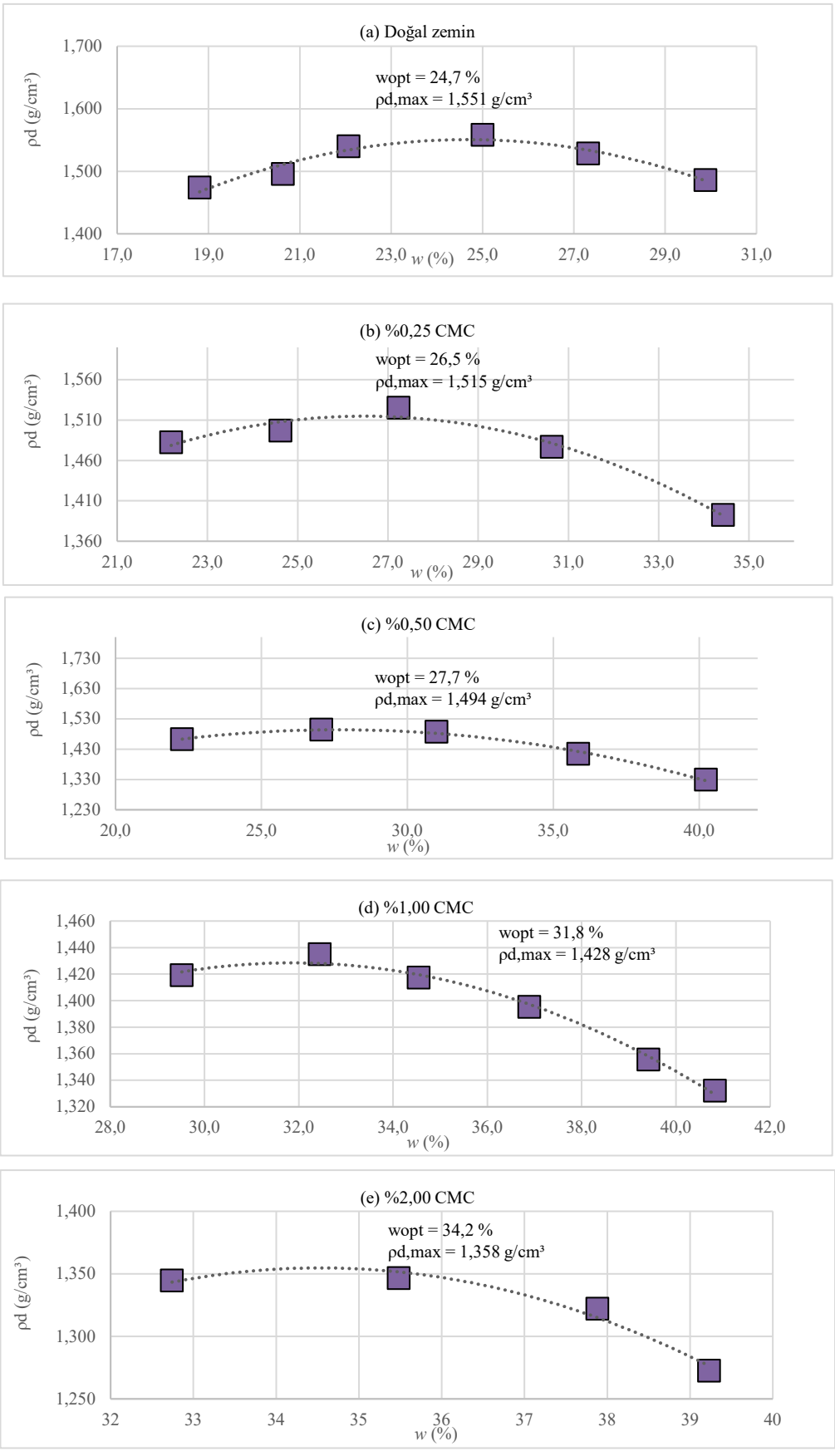
Şekil 1. Doğal zemine ait tane boyutu dağılım eğrisi

3.2. CMC oranının Standart Proktor parametrelerine etkisi

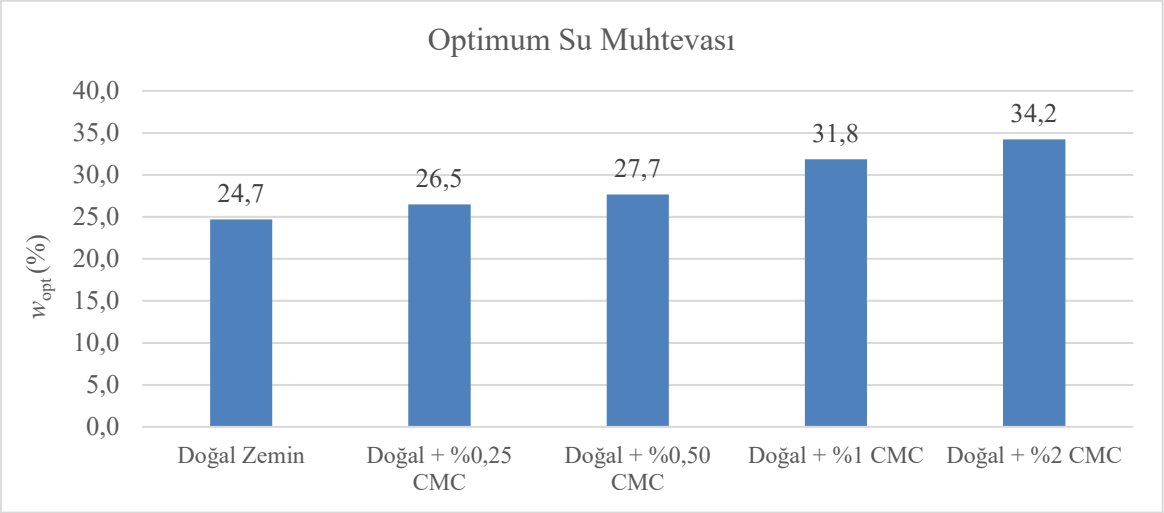
Doğal zemin ve CMC katkılı karışımlara ait Standart Proktor eğrileri Şekil 2'de; CMC oranına bağlı optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluk değişimleri ise sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir.

Şekil 2–4 birlikte değerlendirildiğinde, CMC oranı arttıkça kompaksiyon eğrilerinin daha yüksek su muhtevalarına ve daha düşük kuru yoğunluklara doğru ötelendiği görülmektedir. Bu değişim %1,00 ve %2,00 CMC oranlarında daha belirgin hâle gelmiştir.

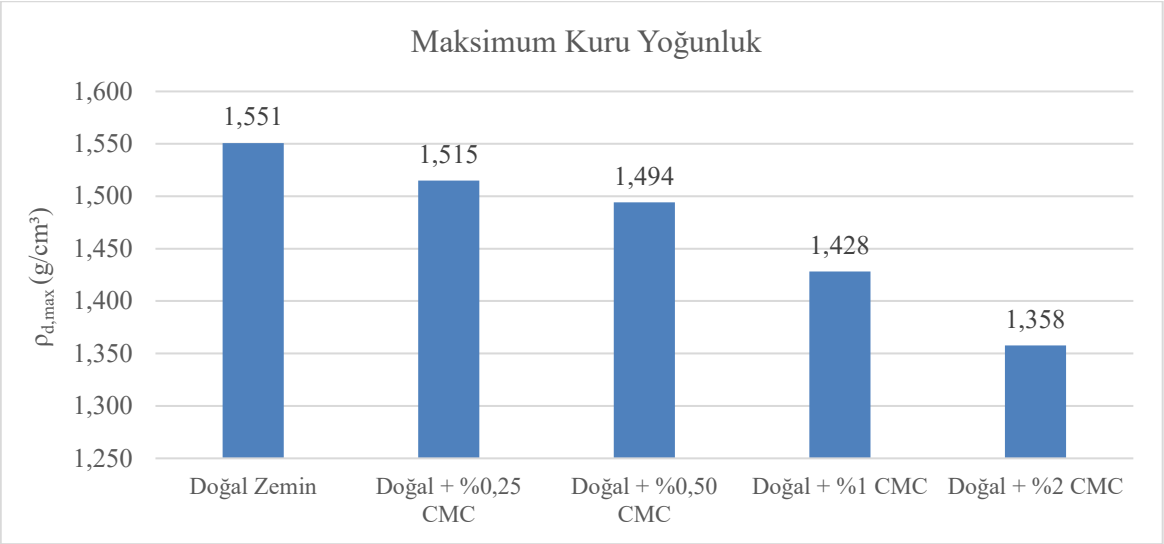
Optimum su muhtevasının artması ve maksimum kuru yoğunluğun azalması, CMC katkılı ince daneli zeminlerde Abd vd. (2021), Ma ve Ma (2019), Sujatha ve Kannan (2022) ile Ojuri vd. (2022) tarafından bildirilen genel eğilimlerle uyumludur. Bununla birlikte, değişimlerin büyüklüğü zemin türü, katkı oranı, su ilavesi ve karıştırma yöntemi ile sıkıştırma öncesindeki hazırlama koşullarına bağlı olarak farklılaşabilmektedir.



Şekil 2. Doğal ve CMC katkılı zeminlerin Standart Proktor eğrileri: (a) doğal zemin, (b) %0,25 CMC, (c) %0,50 CMC, (d) %1,00 CMC ve (e) %2,00 CMC



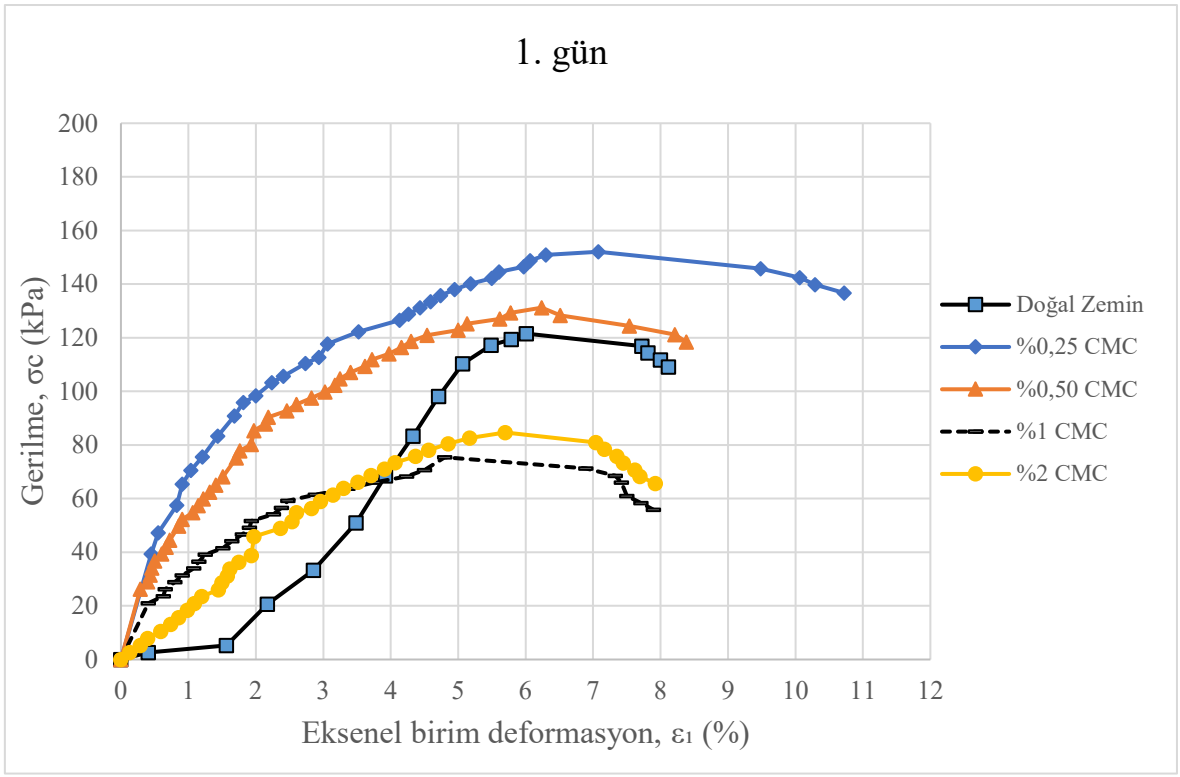
Şekil 3. CMC oranına bağlı optimum su muhtevası değişimi



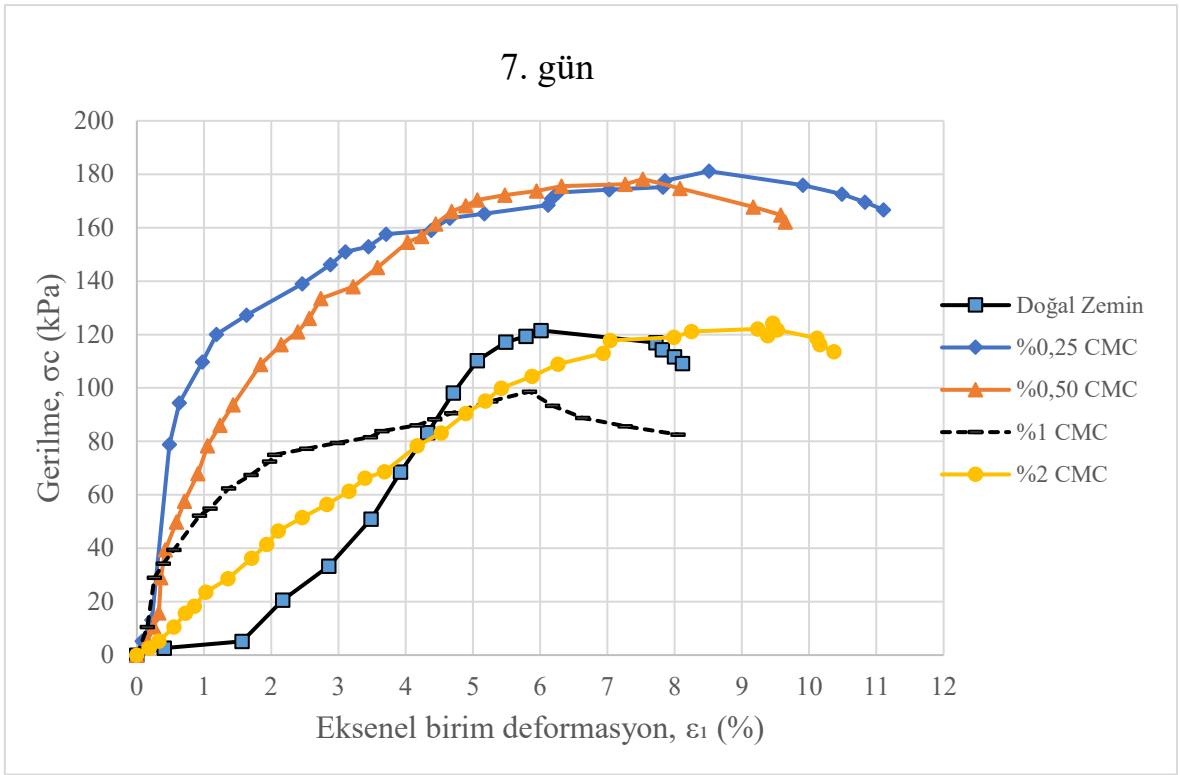
Şekil 4. CMC oranına bağlı maksimum kuru yoğunluk değişimi

3.3. CMC oranı ve kür süresinin serbest basınç dayanımına etkisi

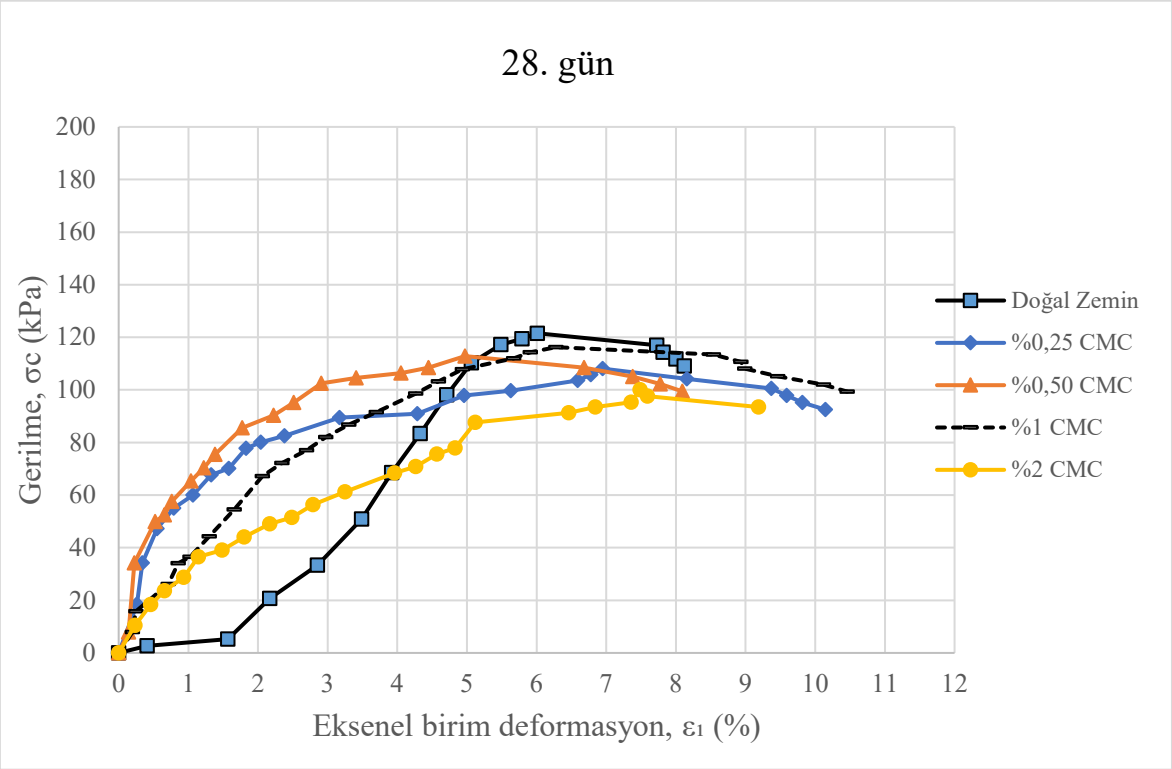
%0,25, %0,50, %1,00 ve %2,00 oranlarında CMC katkılı zeminler 1, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarının UCS gerilme–birim deformasyon eğrileri sırasıyla Şekil 5(a)–(c)'de verilmiştir. Doğal zeminin referans serbest basınç dayanımı 122 kPa'dır.


1. gün
Gerilme, σc (kPa)
Eksenel birim deformasyon, ε1 (%)
Doğal Zemin
%0,25 CMC
%0,50 CMC
%1 CMC
%2 CMC

(a)


7. gün
Gerilme, σc (kPa)
Eksenel birim deformasyon, ε1 (%)
Doğal Zemin
%0,25 CMC
%0,50 CMC
%1 CMC
%2 CMC

(b)



(c)

Şekil 5. CMC katkılı zeminlerin (a) 1 gün ve (b) 7 günlük (c) 28 günlük kür süreleri sonundaki UCS gerilme–birim deformasyon eğrileri

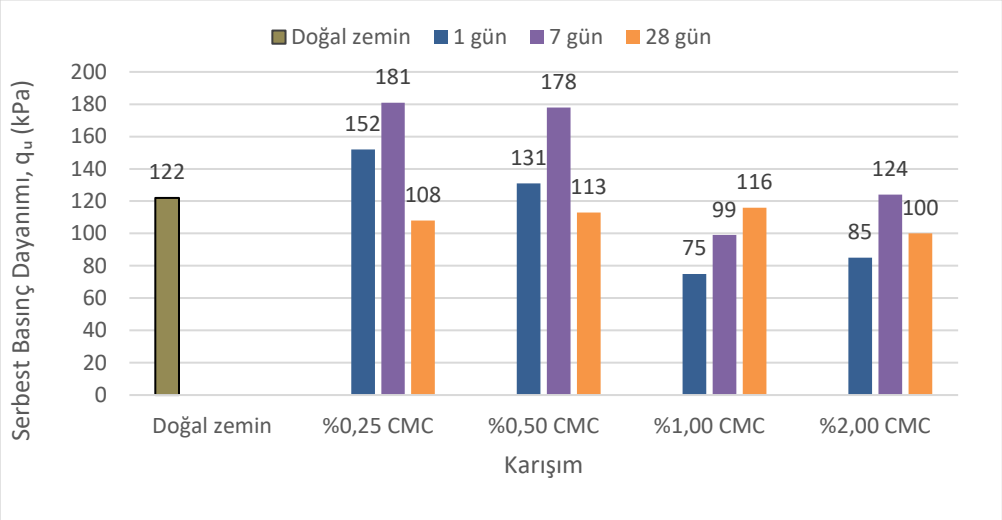
1. gün sonunda deneye tabi tutulan %0,25 ve %0,50 CMC numunelerinde tepe dayanımları sırasıyla 152 ve 131 kPa olarak belirlenmiş ve her iki değer de 122 kPa'lık doğal zemin referansının üzerinde kalmıştır. %0,25 CMC numunesi, tepe noktasından sonra dayanımını daha geniş bir deformasyon aralığında korumuştur. Buna karşılık %1,00 ve %2,00 CMC numunelerinin tepe dayanımları sırasıyla 75 ve 85 kPa olarak ölçülmüş ve doğal zemin referansının altında kalmıştır.

7. gün sonunda %0,25 ve %0,50 CMC numuneleri sırasıyla 181 ve 178 kPa ile en yüksek dayanımları vermiştir. Her iki numunede de tepe bölgesi geniş bir deformasyon aralığına yayılmış ve tepe sonrası dayanım kaybı ani olmamıştır. %1,00 CMC numunesi 99 kPa'dan sonra gerilme kaybı gösterirken, %2,00 CMC numunesi daha yüksek deformasyon düzeyinde 124 kPa'a ulaşmış ve doğal zemin referansına yakın bir davranış sergilemiştir.

28. gün sonunda CMC katkılı numunelerin tepe dayanımları 100–116 kPa aralığında toplanmış ve numuneler arasındaki fark azalmıştır. %1,00 CMC numunesinin yüksek gerilme düzeyini daha geniş bir deformasyon aralığında koruduğu, %0,50 CMC numunesinin ise tepe gerilmesine daha düşük deformasyonda ulaştığı görülmektedir. Üç grafik birlikte değerlendirildiğinde, CMC oranının yalnız tepe dayanımını değil, tepe gerilmesine ulaşılan deformasyon düzeyini ve tepe sonrası davranışı da etkilediği anlaşılmaktadır.

Kür süresine ve CMC oranına bağlı serbest basınç dayanımlarının karşılaştırması Şekil 6'da sunulmuştur. 1. gün sonunda %0,25 ve %0,50 CMC numunelerinin dayanımları doğal

zemine göre sırasıyla yaklaşık %24,6 ve %7,4 artmış, %1,00 ve %2,00 CMC numuneleri ise doğal zemin referansının altında kalmıştır. 7. gün sonunda en yüksek değerler %0,25 CMC'de 181 kPa ve %0,50 CMC'de 178 kPa olarak elde edilmiştir. 28. gün sonunda CMC katkılı numunelerin tamamı 122 kPa'lık doğal zemin referansının altında kalmıştır. %1,00 CMC numunesinde dayanım 1. günden 28. güne düzenli biçimde artarken, diğer CMC oranlarında en yüksek değer 7. günde elde edilmiş ve 28. günde düşüş görülmüştür.



Şekil 6. Doğal ve CMC katkılı zeminlerin kür süresine bağlı serbest basınç dayanımları

Sonuçlar, katkı oranındaki ve kür süresindeki artışın serbest basınç dayanımında tek yönlü bir artış oluşturmadığını göstermektedir. Ojuri vd. (2022), incelenen oranlar arasında %1 CMC içeriğinin en yüksek dayanımı verdiğini; Sujatha ve Kannan (2022) ise düşük NaCMC oranlarında dayanım gelişiminin kür süresine bağlı olduğunu bildirmiştir. CMC-kitosan sistemlerini inceleyen Zinchenko vd. (2022) ve Wang vd. (2024) tarafından sunulan bulgular da su muhtevası, kuru yoğunluk, polimer bileşimi, sıkıştırma ve kür koşullarının mekanik davranış üzerindeki önemini ortaya koymaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Nilüfer/Bursa bölgesinden temin edilen yüksek plastisiteli kil zemin üzerinde CMC oranlarının ve kür sürelerinin serbest basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. CMC oranındaki artış optimum su muhtevasını düzenli biçimde yükseltmiş ve maksimum kuru yoğunluğu azaltmıştır. Optimum su muhtevasına göre hazırlanan karışımlar arasında en yüksek serbest basınç dayanımları 7. gün sonunda %0,25 ve %0,50 CMC numunelerinde elde edilmiştir. Buna karşılık katkı oranının ve kür süresinin artması dayanımda doğrusal veya tek yönlü bir gelişme sağlamamış; 28. gün sonunda CMC katkılı numunelerin dayanımları doğal zemin referansını aşmamıştır. Bu çalışma koşullarında düşük CMC oranları öne çıkmış, daha yüksek oranlar tutarlı bir ilave dayanım artışı oluşturmamıştır.

Dayanımın katkı oranı ve kür süresiyle doğrusal biçimde artmaması ise, CMC etkisinin belirli katkı aralıklarında öne çıkabildiğini ve kür süresine bağlı olarak değişebildiğini bildiren Ojuri vd. (2022) ile Sujatha ve Kannan (2022) bulgularıyla benzerlik göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar; kullanılan yüksek plastisiteli kil, seçilen CMC oranları, dinlendirme yapılmadan uygulanan sıkıştırma yöntemi ve streç filmle sarılı numunelerin kapalı desikatörde bekletildiği kür koşullarıyla sınırlıdır. Numune hazırlama ve kür koşulları ayrı değişkenler olarak incelenmediğinden, bu koşulların dayanım gelişimine etkisi ayrıştırılamamıştır. Gelecek çalışmalarda sıkıştırma öncesi nem dengeleme süresi ve farklı kür ortamlarının karşılaştırılması önerilmektedir. Çalışmanın devamında, dolgu uygulamalarında yükleme altında gelişebilecek oturma davranışının değerlendirilmesi amacıyla, doğal ve CMC katkılı karışımların tek boyutlu sıkışabilirlik özellikleri konsolidasyon deneyleri ile karşılaştırmalı olarak incelenecektir.

KAYNAKLAR

Abd, T.A., Fattah, M.Y. ve Aswad, M.F. (2021), "Improvement of Soft Clayey Soil by Bio-polymer", Engineering and Technology Journal, 39(8), 1301–1306, doi:10.30684/etj.v39i8.2053.

ASTM International (2017), ASTM D4318-17e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, West Conshohocken, PA.

ASTM International (2021), ASTM D698-12(2021), Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, West Conshohocken, PA.

ASTM International (2021), ASTM D7928-21e1, Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis, West Conshohocken, PA.

ASTM International (2023), ASTM D854-23, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method, West Conshohocken, PA.

ASTM International (2024), ASTM D2166/D2166M-24, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, West Conshohocken, PA.

ASTM International (2025), ASTM D2487-17(2025), Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), West Conshohocken, PA.

ASTM International (2025), ASTM D6913/D6913M-17(2025), Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, West Conshohocken, PA.

Chang, I., Im, J. ve Cho, G.-C. (2016), "Introduction of Microbial Biopolymers in Soil Treatment for Future Environmentally-Friendly and Sustainable Geotechnical Engineering", Sustainability, 8(3), 251, doi:10.3390/su8030251.

Correia, A.A.S., Caldeira, J.B., Branco, R. ve Morais, P.V. (2023), "Enhancing the Strength of Mine Residue Soil by Bioremediation Combined with Biopolymers", Applied Sciences, 13(18), 10550, doi:10.3390/app131810550.

Fan, R.-D., Reddy, K.R., Yang, Y.-L. ve Du, Y.-J. (2020), "Index Properties, Hydraulic Conductivity and Contaminant-Compatibility of CMC-Treated Sodium Activated Calcium Bentonite", International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(6), 1863, doi:10.3390/ijerph17061863.

Firoozi, A.A., Olgun, C.G., Firoozi, A.A. ve Baghini, M.S. (2017), "Fundamentals of Soil Stabilization", International Journal of Geo-Engineering, 8, 26, doi:10.1186/s40703-017-0064-9.

Ma, H. ve Ma, Q. (2019), "Experimental Studies on the Mechanical Properties of Loess Stabilized with Sodium Carboxymethyl Cellulose", Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 9375685, doi:10.1155/2019/9375685.

Ojuri, O.O., Ramdas, V., Aderibigbe, E.A., Williams, C.G., Ramchuran, S. ve Al-Nageim, H. (2022), "Improving Strength and Hydraulic Characteristics of Regional Clayey Soils Using Biopolymers", Case Studies in Construction Materials, 17, e01319, doi:10.1016/j.cscm.2022.e01319.

Sujatha, E.R. ve Kannan, G. (2022), "An Investigation on the Potential of Cellulose for Soil Stabilization", Sustainability, 14(23), 16277, doi:10.3390/su142316277.

Wang, Y., Sakai, T., Shibata, N., Zinchenko, A. ve Nakano, M. (2024), "Soil Improvement by Biomass Polyions and Compaction: Reinforcement, Biodegradation Resistance, and Retention of Heavy Metal Ions", Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(1), 111676, doi:10.1016/j.jece.2023.111676.

Zinchenko, A., Sakai, T., Morikawa, K. ve Nakano, M. (2022), "Efficient Stabilization of Soil, Sand, and Clay by a Polymer Network of Biomass-Derived Chitosan and Carboxymethyl Cellulose", Journal of Environmental Chemical Engineering, 10(1), 107084, doi:10.1016/j.jece.2021.107084.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
G_s	Dane özgül ağırlığı	PI	Plastisite indisi
LL	Likit limit	PL	Plastik limit
w_{opt}	Optimum su muhtevası	$\rho_{d,max}$	Maksimum kuru yoğunluk
q_u	Serbest basınç dayanımı	σ_c	Eksenel gerilme
ε_1	Eksenel birim deformasyon	UCS	Serbest basınç dayanımı