4. Ulusal
Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu

14 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

GGM4

KARBOKSİMETİL SELÜLOZ BİYOPOLİMERİNİN KÖTÜ DERECELENMİŞ KUMUN KAYMA MUKAVEMETİ ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

EFFECT OF CARBOXYMETHYL BIOPOLYMER ON THE SHEAR STRENGTH CHARACTERISTICS OF POORLY GRADED SAND

Enes ŞAHİN[1], Yeşim Sema ÜNSEVER[2]

ÖZET

Kohezyonsuz kumlu zeminlerde görülen sıvılaşma ve düşük kayma mukavemeti, özellikle deprem riski yüksek bölgelerde geoteknik mühendisliği açısından önemli sorunlar oluşturmaktadır. Son yıllarda biyopolimerlerin kullanıldığı çevre dostu zemin iyileştirme teknikleri, geleneksel kimyasal stabilizasyon yöntemlerine sürdürülebilir alternatifler olarak giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu çalışmada, selüloz bazlı bir biyopolimer olan Karboksimetil Selüloz' ün (CMC), İznik Gölü bölgesinden elde edilen kötü derecelenmiş kumun kayma mukavemeti özellikleri üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen doğrudan kesme deneyleri, iki farklı rölatif sıkılıkta (%30 ve %80) hazırlanmış ve kuru ağırlıkça %0, %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranlarında CMC ile karıştırılarak elde edilen karışımlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. %80 sıkılıktaki numunelerde, içsel sürtünme açısı %1 CMC oranında 32,84°'den 42°'ye yükselerek maksimum değerine ulaşmıştır, kohezyon ise 80,14 kPa ile %2 CMC oranında en yüksek değerine ulaşmıştır. Benzer şekilde, %30 sıkılıktaki numunelerde yine %1,00 CMC oranında sürtünme açısı 28°'den 38°'ye çıkarak en yüksek değer elde edilmiş, kohezyon değeri ise %2,00 CMC oranı için maksimum 69,35 kPa olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, orta seviyedeki CMC içeriklerinin sürtünme direncini artırdığını, daha yüksek biyopolimer oranlarının ise kum taneleri arasında belirgin kohezyonel bağlar oluşturduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, CMC bazlı biyopolimerlerin kohezyonsuz kumların kayma mukavemeti özelliklerini iyileştirmede etkili ve sürdürülebilir bir zemin stabilizasyon yöntemlerinden biri olabileceğini ortaya koymaktadır.
Anahtar Kelimeler: Karboksimetil selüloz, Kötü derecelenmiş kum, Rölatif sıkılık, Direkt kesme deneyi, Kayma mukavemeti

ABSTRACT

Liquefaction and low shear strength in cohesionless sandy soils represent significant challenges in geotechnical engineering, particularly in earthquake-prone regions. In recent years, environmentally friendly soil improvement techniques using biopolymers have attracted increasing attention as sustainable alternatives to conventional chemical stabilization methods. In this study, the effect of a cellulose-based biopolymer, Carboxymethyl Cellulose (CMC), on the shear strength characteristics of poorly graded sand obtained from the İznik Lake region was experimentally investigated.

A series of direct shear tests were conducted on sand specimens prepared at two different relative densities (30% and 80%) and treated with CMC contents of 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, and 2% by dry weight. For the specimens prepared at 80% relative density, the internal friction angle increased from 32.84° to 42.00°, reaching its maximum value at a CMC content of 1.00%, while the cohesion reached its highest value of 80.14

[1] Yüksek lisans öğrencisi, Bursa Uludağ Üniversitesi, 502426013@ogr.uludag.edu.tr
[2] Doç. Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi, unsever@uludag.edu.tr (Sorumlu yazar)

kPa at a CMC content of 2.00%. Similarly, for the specimens prepared at 30% relative density, the internal friction angle increased from 28.00° to 38.00°, attaining its maximum value at a CMC content of 1.00%, whereas the maximum cohesion value of 69.35 kPa was obtained at a CMC content of 2.00%.
Keywords: Carboxymethyl cellulose, Poorly graded sand, Relative density, Direct shear test, Shear strength

1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinde ince kum zeminler, düşük kohezyonları ve yük altında deformasyona yatkın yapıları nedeniyle mühendislik uygulamalarında iyileştirilmesi gereken problemli zeminler arasında yer almaktadır. Bu nedenle, ince kum zeminlerin mühendislik özelliklerini geliştirmeye yönelik güvenilir, ekonomik ve çevre dostu iyileştirme yöntemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Satyam ve Reddy (2024) çalışmasında sürdürülebilir geoteknik uygulamalarının geliştirilmesinde çevre dostu iyileştirme yöntemlerinin önemini vurgulamıştır.

Geleneksel zemin iyileştirme uygulamalarında çimento ve kireç gibi bağlayıcı malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. MacLaren ve White (2003), bu malzemelerin geoteknik uygulamalarda etkin şekilde kullanılmasına rağmen üretim süreçlerinde yüksek enerji tüketimi ve karbon emisyonu oluşturduğunu belirtmiştir. Bu nedenle son yıllarda çevresel etkileri daha düşük olan alternatif malzemelere yönelim artmıştır. Chang ve ark. (2016), biyopolimerlerin yenilenebilir kaynaklardan elde edilmeleri, biyolojik olarak parçalanabilmeleri ve çevre dostu özellikleri sayesinde geoteknik mühendisliğinde önemli bir alternatif oluşturduğunu ifade etmiştir. Benzer şekilde Satyam ve Reddy (2024), biyopolimer esaslı iyileştirme yöntemlerinin sürdürülebilir geoteknik mühendisliğinin önemli araştırma alanlarından biri hâline geldiğini bildirmiştir.

Selüloz esaslı biyopolimerlerden biri olan karboksimetil selüloz (CMC), yüksek su tutma kapasitesi ve zemin taneleri arasında bağ oluşturabilme özelliği sayesinde son yıllarda zemin iyileştirme çalışmalarında yaygın olarak araştırılmaktadır. Abd ve ark. (2022), CMC katkısının zeminlerin mühendislik özelliklerini geliştirerek dayanımı artırdığını bildirmiştir. Mugula ve ark. (2024) ise biyopolimerlerin zemin taneleri arasında biyolojik bağlanmayı artırarak mekanik davranışı iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca Owji ve ark. (2021), CMC katkısının kumlu zeminlerde erozyon direncini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Sujatha ve Kannan (2022), selüloz katkısının zemin mukavemetini artırarak mühendislik performansını geliştirdiğini rapor etmiş; Ning ve ark. (2019**)** ise sodyum karboksimetil selüloz uygulamasının kumlu zeminlerde su hareketini düzenleyerek daha homojen bir zemin yapısı oluşturduğunu bildirmiştir.

Bu çalışma kapsamında, karboksimetil selüloz (CMC) katkısının ince kum zeminlerin sıkışma ve kayma davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla farklı CMC katkı oranlarına sahip numuneler üzerinde Standart Proktor deneyleri ASTM International (2021) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş, ardından farklı rölatif sıkılıklarda hazırlanan numuneler üzerinde direkt kesme deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda CMC katkısının maksimum kuru birim hacim ağırlığı, optimum su muhtevası, içsel sürtünme açısı ve görünür kohezyon üzerindeki etkileri değerlendirilerek ince kum zeminlerin iyileştirilmesindeki potansiyelinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Doğal Zemin ve CMC

Bu çalışmada kullanılan doğal zemin, Bursa ili İznik ilçesi sınırlarında bulunan İznik Gölü kıyısından temin edilmiştir. Deneylerde katkı malzemesi olarak, biyolojik olarak parçalanabilen ve çevre dostu bir biyopolimer olan karboksimetil selüloz (Carboxymethyl Cellulose, CMC) kullanılmıştır. Deney programında CMC katkı oranları, kuru zemin ağırlığının %0, %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0'si olacak şekilde belirlenmiştir. Bu katkı oranları, karboksimetil selülozun kumlu zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırıldığı önceki çalışmalarda kullanılan aralıklar dikkate alınarak seçilmiştir (Abd ve ark. (2022); Wang ve ark. (2024); Zinchenko ve ark. (2022); Ma ve Ma (2019)).

Deneylerde kullanılan doğal zeminin fiziksel ve indeks özellikleri ASTM standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda elek analizi, özgül ağırlık, maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlık deneyleri gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlara göre zemin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre sınıflandırılmıştır (ASTM International, 2017a; ASTM International, 2017b; ASTM International, 2016a; ASTM International, 2016b).

Numune hazırlama aşamasında öncelikle etüvde kurutulan zemin ile hesaplanan miktardaki CMC homojen bir karışım elde edilinceye kadar kuru olarak elle 5 dakika kadar karıştırılmıştır. Daha sonra, hedef su muhtevasına ulaşıncaya kadar su kontrollü ve kademeli olarak ilave edilmiş, her su ilavesinin ardından karışım dikkatlice karıştırılarak CMC'nin zemin taneleri içerisinde homojen şekilde dağılması sağlanmıştır. Bu yöntem, biyopolimer katkılı zemin numunelerinin hazırlanmasına ilişkin literatürde önerilen numune hazırlama prosedürü ile uyumludur (Chang ve ark. (2016); Ma ve Ma (2019); Zinchenko ve ark. (2022).

2.2. Standart Proktor deneyi

Doğal zemin ile farklı karboksimetil selüloz (CMC) katkı oranlarına sahip karışımların sıkışma özellikleri, ASTM D698 standardına uygun olarak gerçekleştirilen Standart Proktor deneyi ile belirlenmiştir (ASTM International, 2021). Deneylerde standart Proktor kalıbı kullanılmış ve her karışım için farklı su muhtevalarında numuneler hazırlanarak standart sıkıştırma enerjisi uygulanmıştır. Her sıkıştırma işlemi sonrasında numunelerin yaş birim hacim ağırlıkları belirlenmiş, deney sonunda ölçülen su muhtevası değerleri kullanılarak kuru birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak su muhtevası–kuru birim hacim ağırlığı ilişkisini gösteren Proktor eğrileri oluşturulmuş ve her karışım için maksimum kuru birim hacim ağırlığı ile buna karşılık gelen optimum su muhtevası belirlenmiştir. Belirlenen optimum su muhtevası değerleri, direkt kesme deneylerinde kullanılacak numunelerin hazırlanmasında esas alınmıştır.

2.3. Direkt Kesme deneyi

Direkt kesme deneyi, kum zeminlerin kayma davranışının ve dayanım parametrelerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan deney yöntemlerinden biridir (Chakraborty ve

Salgado, 2010). Karboksimetil selüloz (CMC) katkısının ince kum zeminlerin kayma dayanımı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla direkt kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Direkt kesme deneylerinde kullanılan numunelerin hazırlanmasında CMC ve kum öncelikle etüvde kurutularak kuru hale getirilmiştir. Kurutulan CMC ve kum homojen şekilde karıştırılarak kuru karışım hazırlanmış, ardından belirlenen optimum su muhtevasına karşılık gelen miktarda su ilave edilmiştir. Su ilavesinden sonra karışım homojen hale gelinceye kadar karıştırılmış ve herhangi bir kürleme veya bekletme süresi uygulanmadan direkt kesme deneyine tabi tutulmuştur. Direkt kesme deneyleri, ASTM D3080//D3080M standardı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 60 mm × 60 mm boyutlarında numune kalıpları kullanılmıştır. Numunelere sırasıyla 54,5 kPa, 109 kPa ve 218 kPa normal gerilmeler uygulanmıştır. Tüm deneylerde kesme hızı 0,5 mm/dak olarak sabit tutulmuştur. Numuneler Standart Proktor deneylerinden elde edilen optimum su muhtevası esas alınarak hazırlanmıştır (ASTM International, 2024). Numuneler, zeminin gevşek ve sıkı yerleşim koşullarını temsil edecek şekilde yaklaşık olarak %30 ve %80 rölatif sıkılıklarda hazırlanmıştır. %0, %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranlarında CMC katkı oranlarına sahip numuneler üzerinde uygulanan direkt kesme deneyleri sonucunda içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) değerleri belirlenmiş, CMC katkısının farklı rölatif sıkılıklardaki ince kum zeminlerin kayma dayanımı üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

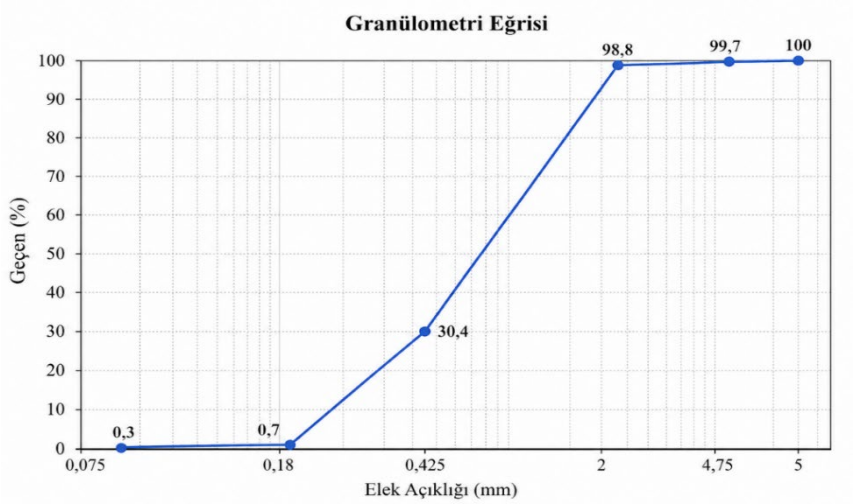
3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1. Doğal zeminin özellikleri ve sınıflandırılması

Doğal zemine ait temel indeks ve sınıflandırma özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Zeminin tane boyut dağılım eğrisi ise Şekil 1' de gösterilmiştir. Bu veriler ışığında, USCS sistemine göre zemin kötü derecelenmiş kum (SP) olarak sınıflandırılmıştır.

Tablo 1. Doğal zeminin temel indeks ve sınıflandırma özellikleri

Özellik	Değer	Birim / açıklama
Dane özgül ağırlığı, G_s	2,65	-
2,000 mm'den geçen	98,8	%
e_{max}	1,06	-
e_{min}	0,72	-
0,075 mm'den geçen	0,3	%
C_U	2,62	-
C_C	0,47	-
USCS sınıfı	SP	Kötü Derecelendirilmiş Kum



Şekil 1. Doğal zemine ait tane boyutu dağılım eğrisi

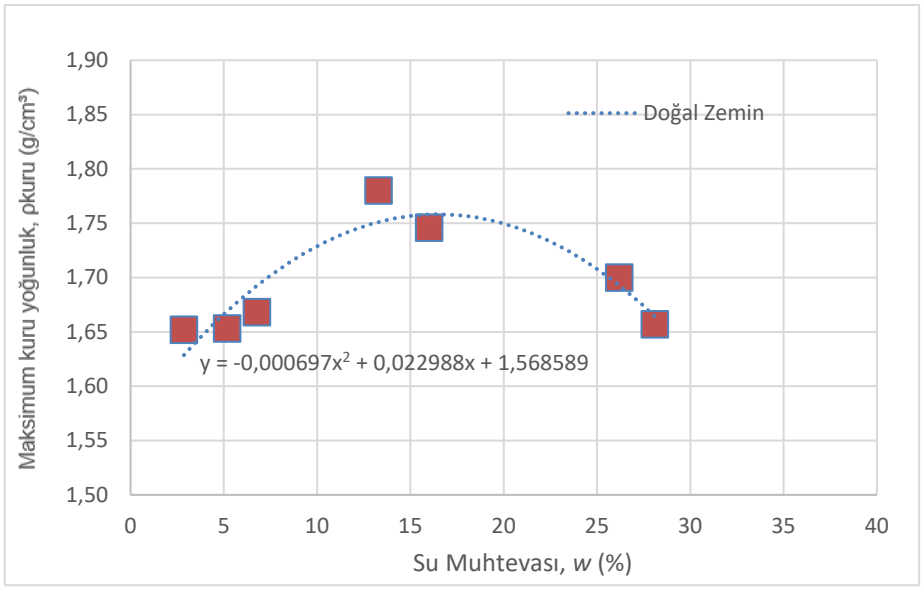
3.2. CMC oranının Standart Proktor parametrelerine etkisi

Doğal zemin ve farklı oranlardaki CMC'ler için standart Proktor deneylerinden elde edilen Proktor eğrileri Şekil 2' de verilmiştir. Şekil 3'de ise optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluğundaki değişim gösterilmiştir.

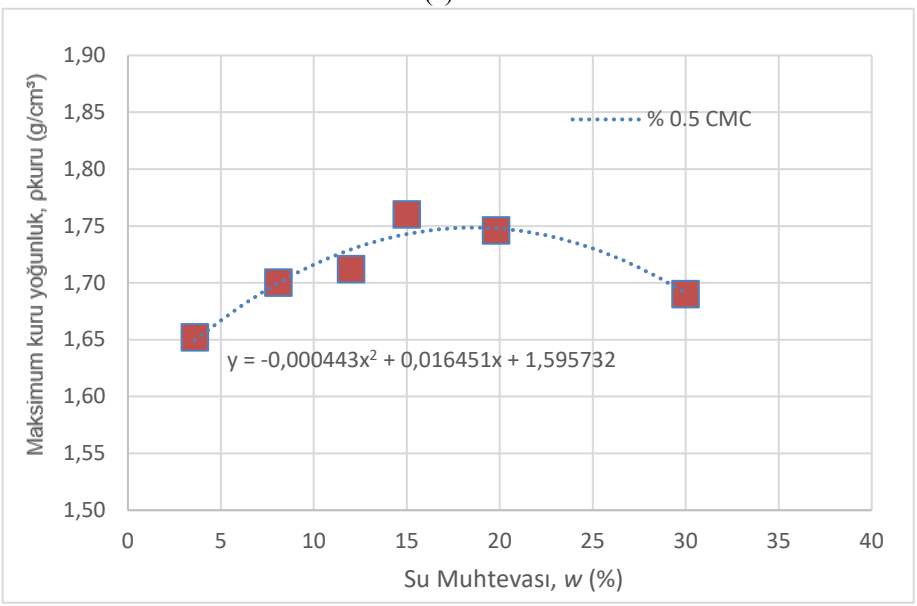
Doğal zeminde %16,5 olan optimum su muhtevası, CMC ilavesi ile artmıştır. En yüksek değerine (%23,9) %2 CMC ilavesiyle ulaşmıştır. Doğal zemine kıyasla %2 CMC katkısında optimum su muhtevasında yaklaşık %45'lik bir artış meydana gelmiştir. Bu durum, CMC'nin yüksek hidrofilik yapısından kaynaklanmaktadır. CMC molekülleri suyu absorbe ederek zemin taneleri etrafında hidratasyon tabakaları oluşturmakta ve optimum sıkışma seviyesine ulaşılabilmesi için daha fazla su gerektirmektedir.

Maksimum kuru birim hacim ağırlığın CMC oranı arttıkça düzenli olarak azaldığı görülmektedir (Şekil 3). Doğal zeminde 1,758 g/cm³ olan γd,max değeri, ilave edilen CMC oranı arttıkça düşmüş ve en düşük değerine %2 CMC'de 1,703 g/cm³ olarak ulaşmıştır. Doğal zemine göre %2 CMC katkısında yaklaşık %3,1 oranında bir azalma meydana gelmiştir.

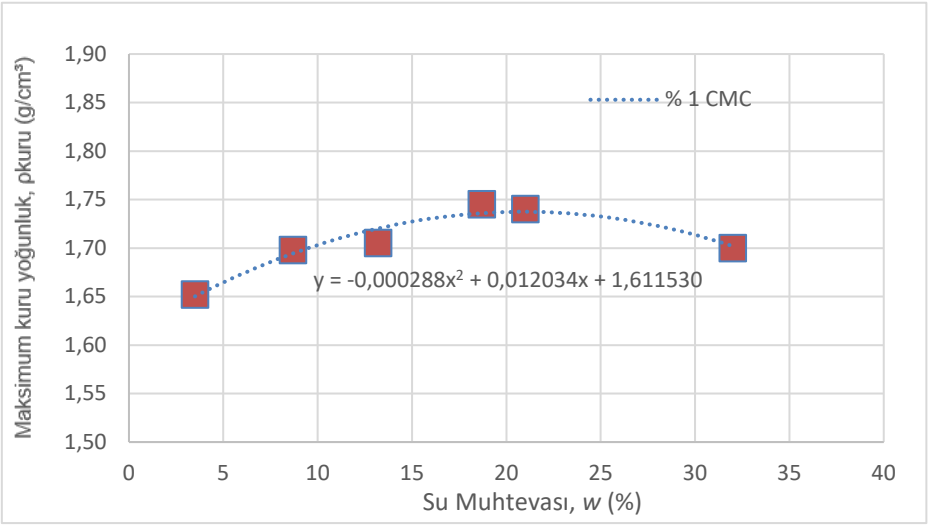
Literatürde yer alan mekanizmaya göre, karboksimetil selülozun (CMC) suyla temas etmesiyle başlayan hidrojel oluşumu, polimer zincirlerinin kum tanelerini çevreleyerek tanecikler arasında mikro yapılı polimer köprüleri kurmasını sağlamaktadır; bu süreçte zemin boşluklarının kısmen jel ile dolması maksimum kuru yoğunlukta hafif bir düşüşe ve optimum su muhtevasında (OMC) bir artışa yol açsa da, matris içinde yaratılan bağlayıcı etki zeminin genel dayanımında belirgin bir artışı beraberinde getirmekte olup bu mekanizma Chang ve ark. (2016), Ma ve Ma (2019), Zinchenko ve ark. (2022) ile Wang ve ark. (2024) çalışmalarındaki bulgularla tam bir uyum sergilemektedir.


Maksimum kuru yoğunluk, ρkuru (g/cm³)
1,90
1,85
1,80
1,75
1,70
1,65
1,60
1,55
1,50
0
5
10
15
20
25
30
35
40
Su Muhtevası, w (%)
Doğal Zemin
y = -0,000697x² + 0,022988x + 1,568589

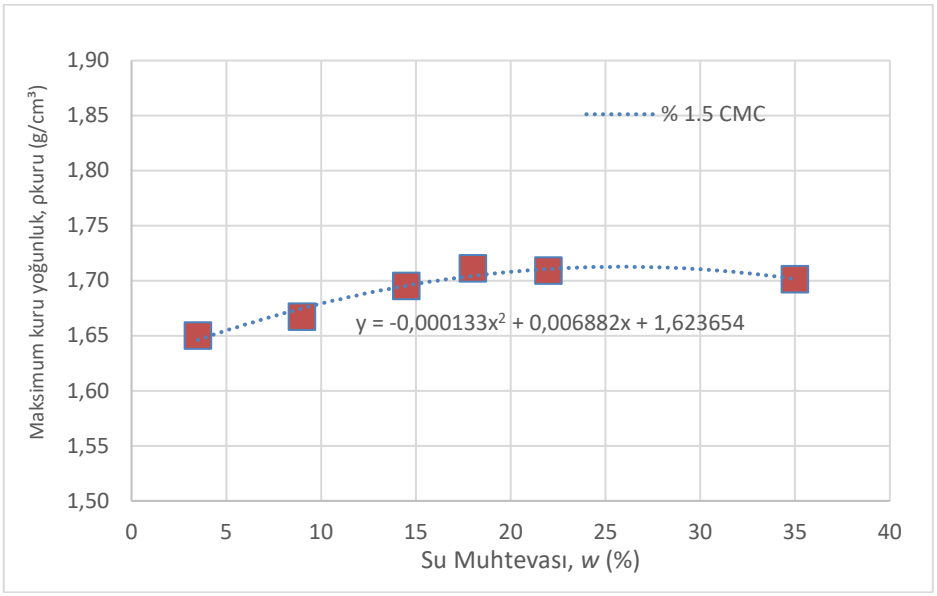
(a)


Maksimum kuru yoğunluk, ρkuru (g/cm³)
1,90
1,85
1,80
1,75
1,70
1,65
1,60
1,55
1,50
0
5
10
15
20
25
30
35
40
Su Muhtevası, w (%)
% 0.5 CMC
y = -0,000443x² + 0,016451x + 1,595732

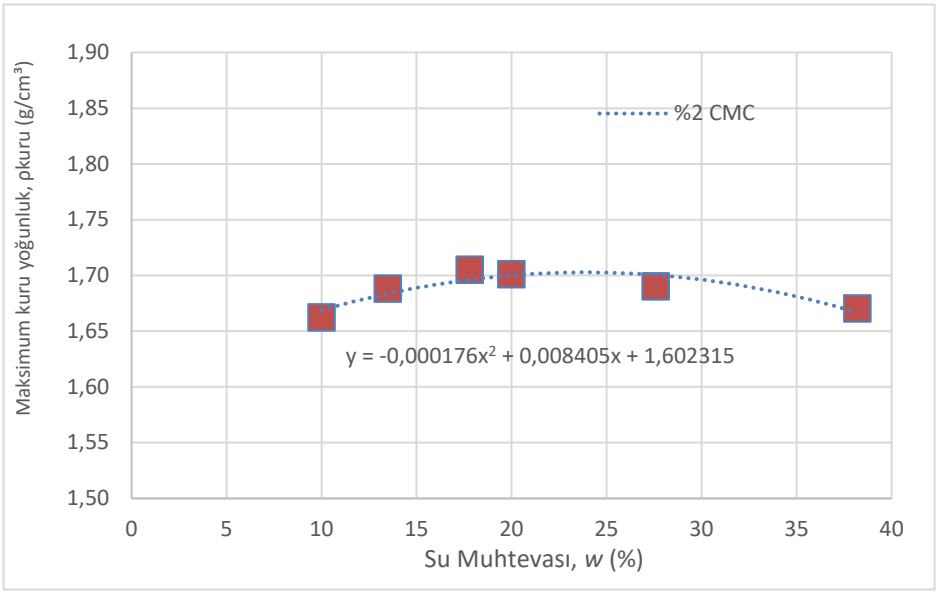
(b)


Maksimum kuru yoğunluk, ρkuru (g/cm³)
1,90
1,85
1,80
1,75
1,70
1,65
1,60
1,55
1,50
0
5
10
15
20
25
30
35
40
Su Muhtevası, w (%)
% 1 CMC
y = -0,000288x² + 0,012034x + 1,611530

(c)

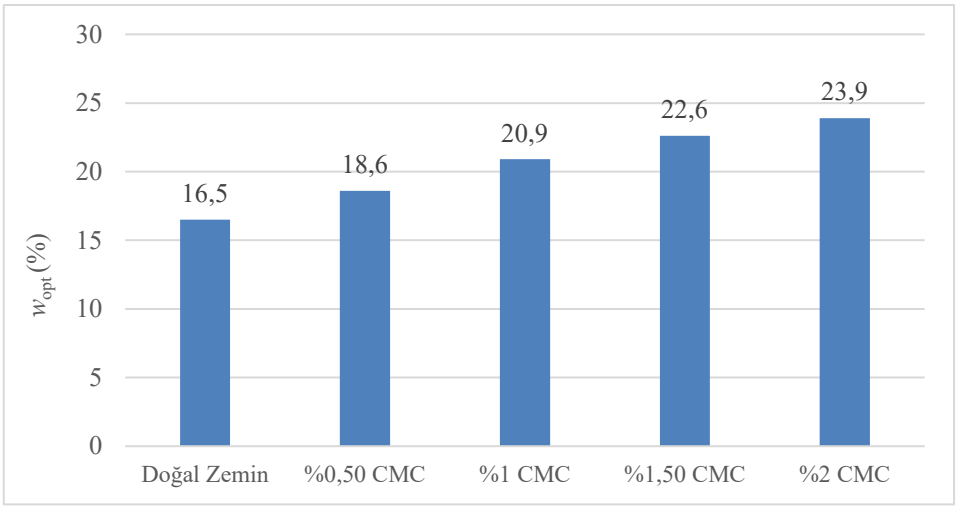


(d)

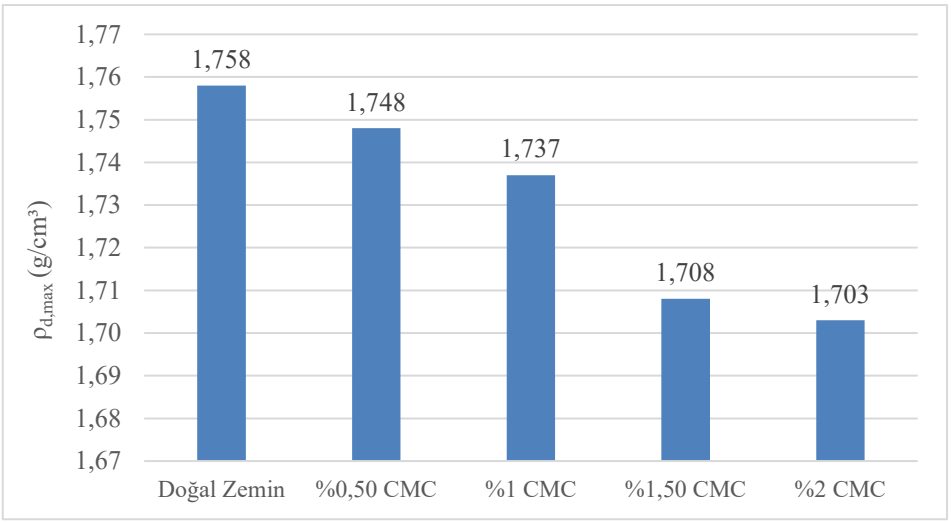


(e)

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



(a)



(b)

Şekil 3. CMC katkı oranına bağlı olarak (a) optimum su muhtevası (w_{opt}) (b) maksimum kuru yoğunluk ($\rho_{d,max}$) değişimi.

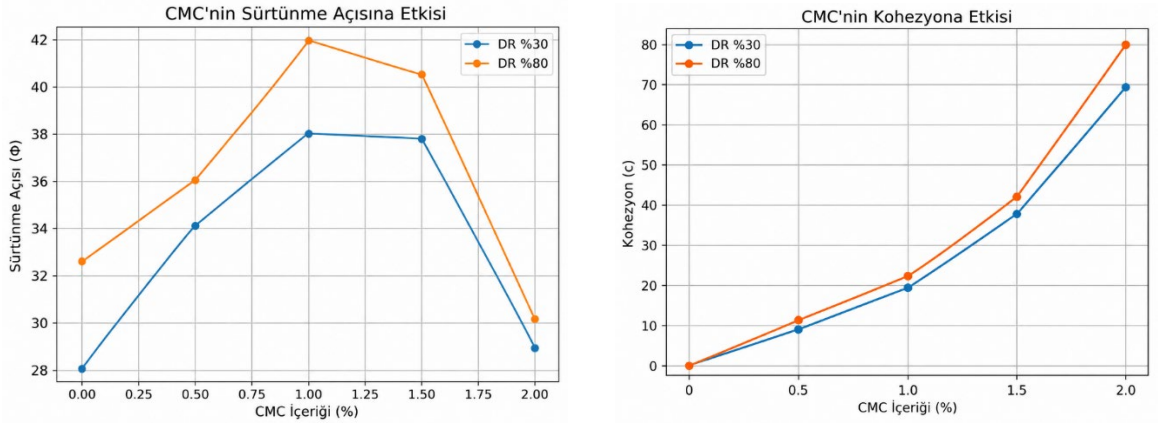
3.3. CMC oranının kayma dayanımı parametrelerine etkisi

CMC katkısının farklı rölatif sıkılık koşullarındaki kum zeminlerin kayma dayanımı parametreleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen direkt kesme deneylerinden elde edilen içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) değerleri iki rölatif sıkılık (%30 ve %80) tüm CMC oranları için Şekil 4' te sunulmuştur.

CMC ilavesi kum numunelerinin kesme dayanımı parametrelerini önemli ölçüde değiştirmiştir. CMC içeriğinin %0'dan %1'e kadar artırılmasıyla içsel sürtünme açısı, %30 sıkılıktaki numunelerde yaklaşık 28°'den 38°'ye, %80 sıkılıktaki numunelerde ise yaklaşık 33°'den 42°'ye yükselmiş ve bu seviyelerde maksimum değerlere ulaşmıştır. Daha yüksek CMC oranlarında ise sürtünme açısında azalma meydana gelmiştir. Bu durum biyopolimerlerin düşük ve orta oranlarda tane temaslarını güçlendirerek sürtünme direncini

artırması, yüksek oranlarda ise tane yüzeylerinde sürekli polimer film oluşturarak partiküller arası sürtünmeyi azaltmasıyla açıklanabilir.

Kohezyon değerleri ise tüm CMC oranlarında sürekli artmış ve %2 CMC içeriğinde %80 sıkılıktaki numunelerde yaklaşık 80 kPa seviyesine ulaşmıştır. Bu sonuçların, CMC'nin zemin taneleri arasında polimer köprüleri ve üç boyutlu ağ yapıları oluşturarak bağlayıcı etki göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4'te görüldüğü üzere tüm CMC içeriklerinde %80 sıkılıktaki numuneler, %30 sıkılıktaki numunelere kıyasla daha yüksek içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri göstermiştir. Rölatif sıkılığın artmasıyla boşluk oranının azalması ve tane kenetlenmesinin artması sonucunda kayma sırasında daha yüksek dilatasyon davranışı meydana gelmekte, bu durum pik sürtünme açısının yükselmesine neden olmaktadır. Ayrıca sıkı yerleşmiş taneler arasında CMC tarafından oluşturulan polimer köprülerinin daha etkin çalışması nedeniyle görünür kohezyon değerleri de artmaktadır. Literatürde yoğun kumların daha yüksek dilatasyon ve daha yüksek pik sürtünme açısı sergilediği belirtilmiş olup, biyopolimer katkılı zeminlerde kompaksiyonun polimer ağ yapısının etkinliğini artırdığı rapor edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Chakraborty ve Salgado (2010), Chang ve ark. (2016), Zinchenko ve ark. (2022), Sujatha, E.R. ve Kannan,G (2022) ve Wang ve ark. (2024) tarafından bildirilen bulgularla uyumludur.



(a) (b)

Şekil 4. CMC içeriğinin %30 ve %80 sıkılıktaki kum numunelerinin (a) içsel sürtünme açısı (ϕ) (b) kohezyon üzerindeki etkisi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, gevşek ve sıkı durumu temsilen %30 ve %80 sıkılıkta hazırlanan kötü derecelenmiş kum (SP) numunelerinde karboksimetil selüloz (CMC) biyopolimerinin sıkışma ve kayma dayanımı özellikleri üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Standart Proktor deneyleri sonucunda CMC ilavesiyle optimum su muhtevasının arttığı, buna karşılık maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, CMC'nin yüksek su tutma kapasitesi ve zemin boşluklarında oluşturduğu hidrojel yapısından kaynaklanmaktadır.

Direkt kesme deneyleri ise CMC katkısının kum zeminlerin kayma mukavemetini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. İçsel sürtünme açısı %1 CMC katkı oranına kadar artış göstermiş, daha yüksek katkı oranlarında ise biyopolimerin tane yüzeylerini kaplaması nedeniyle kısmen azalma eğilimi sergilemiştir. Buna karşılık görünür kohezyon, CMC oranındaki artışla birlikte sürekli yükselmiş ve en yüksek değerler %2 CMC katkısında elde edilmiştir. Ayrıca tüm katkı oranlarında %80 sıkılıktaki numunelerde %30 sıkılıktaki numunelere göre daha yüksek kayma dayanımı parametreleri elde edilmiştir. Bunun rölatif sıkılığın artmasıyla gelişen tane kenetlenmesi ve biyopolimer ağ yapısının daha etkin çalışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Sonuç olarak, CMC biyopolimerinin kötü derecelenmiş kumların mühendislik özelliklerini iyileştirmede etkili, çevre dostu ve sürdürülebilir bir zemin iyileştirme malzemesi olabileceği düşünülmektedir. Elde edilen bulgular, özellikle deprem etkisi altındaki kumlu zeminlerin iyileştirilmesi ve biyopolimer esaslı zemin stabilizasyon uygulamalarının geliştirilmesi açısından önemli bir potansiyel ortaya koymaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, FGA-2025-2446 proje kodlu ve "Kohezyonsuz Zeminlerin Karboksimetil Selüloz Biyopolimeri ile İyileştirilmesi ve Sıvılaşma Potansiyelinin Gözlemlenmesi" başlıklı bu çalışmaya verdikleri desteklerden dolayı Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederler. Ayrıca deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi sırasında sağladıkları teknik destek ve laboratuvar olanakları için Protest Lab ve Rota Lab'a teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Abd, T. A., Fattah, M. Y., & Aswad, M. F. (2022). Strengthening of soft soil using carboxymethyl cellulose biopolymer. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 961(1), Article 012030. https://doi.org/10.1088/1755-1315/961/1/012030

ASTM International. (2012). ASTM D698-12e2: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (Reapproved 2012). ASTM International. https://doi.org/10.1520/D0698-12E02

ASTM International. (2016a). ASTM D4253-16: Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D4253-16

ASTM International. (2016b). ASTM D4254-16: Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D4254-16

ASTM International. (2017a). ASTM D4318-17e1: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D4318-17E01

ASTM International. (2017b). ASTM D6913/D6913M-17: Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D6913_D6913M-17

ASTM International. (2024), ASTM D3080/D3080M-24: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, ASTM International, https://doi.org/10.1520/D3080_D3080M-24.

ASTM International. (2021), ASTM D698-21: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, ASTM International, https://doi.org/10.1520/D0698-21.

Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. (2016). Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally friendly and sustainable geotechnical engineering. Sustainability, 8(3), Article 251. https://doi.org/10.3390/su8030251

MacLaren, D. C., & White, R. D. (2003). Cement: Its chemistry and properties. Journal of Materials in Civil Engineering, 15(4), 283–293. https://doi.org/10.1021/ed080p623

Mugula, J., Nakayenga, J., GuhaRay, A., & Hata, T. (2024). Use of lignocellulose-degrading enzyme bio-cemented soils in the construction industry. Environmental Geotechnics, 1–44. Advance online publication. https://doi.org/10.1680/jenge.24.00080

Ning, S., Jumai, H., Wang, Q., Zhou, B., Su, L., Shan, Y. ve Zhang, J. (2019). Comparison of the effects of polyacrylamide and sodium carboxymethylcellulose application on soil water infiltration in sandy loam soils. Advances in Polymer Technology, 2019, Article 6869454. https://doi.org/10.1155/2019/6869454

Owji, R., Habibagahi, G., Nikooee, E., & Afzali, S. F. (2021). Wind erosion control using carboxymethyl cellulose: From sand bombardment performance to microfabric analysis. Aeolian Research, 50, Article 100696. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100696

Satyam, N., & Reddy, K. R. (2024). State-of-the-art review on geotechnical engineering towards sustainability. Indian Geotechnical Journal, 54(3), 721–724. https://doi.org/10.1007/s40098-024-00972-z

Sujatha, E. R., & Kannan, G. (2022). An investigation on the potential of cellulose for soil stabilization. Sustainability, 14(23), Article 16277. https://doi.org/10.3390/su142316277

Chakraborty, T. ve Salgado, R. (2010), "Dilatancy and shear strength of sand at low confining pressures", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136(3), 527–532, https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000237.

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, https://doi.org/10.1155/2019/9375685.

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, https://doi.org/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, https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107084.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
G_s	Dane özgül ağırlığı	ϕ	İçsel sürtünme açısı
C_u	Üniformluk katsayısı	c	Kohezyon
C_c	Eğrilik katsayısı	D_r	Rölatif sıkılık
e_{max}	Maksimum boşluk oranı	w	Su muhtevası
e_{min}	Minimum boşluk oranı	w_{opt}	Optimum su muhtevası
ASTM	American Society for Testing and Materials	$\rho_{d,max}$	Maksimum kuru yoğunluk
SP	Kötü derecelenmiş kum	USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi