Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

GUAR GUM KATKILI YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLİN SU TUTMA DAVRANIŞI VE ŞİŞME POTANSİYELİ

WATER RETENTION BEHAVIOR AND SWELLING POTENTIAL OF HIGH-PLASTICITY CLAY TREATED WITH GUAR GUM

Recep AKAN[1], Mehmet Fatih YAZICI[2], Soner UZUNDURUKAN[3]

ÖZET

Geleneksel zemin stabilizasyonunda kullanılan katkıların çevresel etkileri, biyopolimerlerin alternatif stabilizasyon malzemeleri olarak kullanımına yönelik ilgiyi artırmıştır. Bununla birlikte, guar gum (GG) ile stabilize edilmiş zeminlere ilişkin çalışmalar çoğunlukla mekanik özelliklere odaklanmış, emme ve hacimsel davranış üzerindeki etkiler sınırlı düzeyde araştırılmıştır. Bu çalışmada, GG dozajı ve kürlemenin yüksek plastisiteli bir kilin emme ve şişme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, %0.5, %1, %2, %4 ve %8 GG içeren numunelerin toplam emme-su muhtevası ilişkileri WP4C cihazı kullanılarak kürsüz ve 28 gün kontrollü kürlenmiş koşullarda belirlenmiştir. Ayrıca, %8 GG içeren numuneler üzerinde serbest şişme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, GG dozajının artmasıyla emmenin yükseldiğini ve bu etkinin özellikle zemin-su karakteristik eğrisinin (SWCC) geçiş bölgesinde belirginleştiğini, rezidüel bölgede ise eğrilerin birbirine yaklaştığını göstermiştir. Kürleme, emme değerlerinde yalnızca hafif bir azalmaya neden olmuştur. Katkısız zeminde %11.44 olan nihai serbest şişme, %8 GG içeren numunede kürsüz durumda %44.85'e yükselmiş, 28 günlük kürleme sonrasında ise %4.43'e düşmüştür. Ayrıca, GG ilavesi ve kürleme belirgin şişme gelişimini geciktirmiştir. Bulgular, GG stabilizasyonunun değerlendirilmesinde mekanik performansın yanı sıra emme, hacimsel davranış ve kürleme koşullarının birlikte dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.
Anahtar Kelimeler: *WP4C, biyopolimer, guar gum, zemin-su karakteristik eğrisi, zemin emmesi, serbest şişme*

ABSTRACT

The environmental impacts associated with conventional soil stabilizers have increased interest in biopolymers as alternative stabilization materials. However, studies on guar gum (GG)-stabilized soils have predominantly focused on mechanical properties, while their effects on suction and volumetric behavior have received limited attention. This study investigates the effects of GG dosage and curing on the suction and swelling behavior of high-plasticity clay. Total suction-water content relationships of specimens containing 0.5%, 1%, 2%, 4%, and 8% GG were determined using a WP4C dewpoint potentiometer under uncured and 28-day controlled curing. Free-swell tests were conducted on specimens containing 8% GG. The results showed that suction increased with GG dosage, with this effect being pronounced in the transition zone of the soil-water characteristic curve (SWCC), whereas the curves converged in the residual zone. Curing caused only a slight reduction in suction. The final free swell was 11.44% for the untreated soil, whereas for the specimen containing 8% GG, it was 44.85% in the uncured state and decreased to 4.43% after 28 days of curing. Furthermore, GG addition and curing delayed the development of pronounced swelling. The findings demonstrate that suction, volumetric behavior, and curing conditions should be considered alongside mechanical performance when evaluating GG-based soil stabilization.
Keywords: *WP4C, biopolymer, guar gum, soil-water characteristic curve, soil suction, free swell*

[1] Dr. Öğretim Üyesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, recepakan@sdu.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Dr. Öğretim Üyesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, mehmetyazici@sdu.edu.tr
[3] Doç. Dr., Süleyman Demirel Üniversitesi, soneruzundurukan@sdu.edu.tr

1. GİRİŞ

Zemin emmesi, doygun olmayan zeminlerin hidrolik, mekanik ve hacimsel davranışlarını kontrol eden temel gerilme durumu değişkenlerinden biridir. Toplam emme, genel olarak matrik ve ozmotik emme bileşenlerinin toplamı olarak ifade edilmekte; matrik emme ise kapiler ve adsorptif kuvvetler nedeniyle suyun zemin matrisi içerisinde tutulmasıyla ilişkilendirilmektedir (Yong and Warkentin, 1975; Bulut and Wray, 2005). Zemin emmesi; su içeriği, boşluk boyutu dağılımı, yoğunluk, mineralojik bileşim ve zemin yapısı gibi birçok faktörden etkilenmektedir (Marinho, 2005; Zhai et al., 2019). Bu etkiler, zemin-su etkileşimlerinin ve su içeriğine bağlı hacim değişimlerinin daha belirgin olduğu yüksek plastisiteli killer açısından özellikle önemlidir.Zemin emmesinin belirlenmesinde farklı doğrudan ve dolaylı yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan WP4C soğutulmuş ayna çiy noktası potansiyometresi, numune ile çevresindeki hava arasında oluşan bağıl nem dengesinden yararlanarak toplam emmeyi belirlemekte ve özellikle yüksek emme değerlerinin hızlı bir şekilde ölçülmesine olanak sağlamaktadır (Bulut and Leong, 2008; Ebrahimi-Birang and Fredlund, 2016). Yüksek plastisiteli kil zeminler, düşük mukavemetlerinin yanı sıra su içeriğindeki değişimlere karşı hassasiyetleri ve yüksek şişme-büzülme potansiyelleri nedeniyle önemli geoteknik problemlere yol açabilmektedir. Geleneksel olarak bu tür zeminlerin iyileştirilmesinde çimento ve kireç gibi katkılar kullanılmasına rağmen, son yıllarda çevresel kaygılar nedeniyle biyopolimerler alternatif zemin stabilizasyon malzemeleri olarak dikkat çekmekte ve araştırmalara konu olmaktadır. Bitkisel kökenli bir biyopolimer olan GG, bir polisakkarit olup belirgin hidrofilik karakteri, hızlı hidratasyon özelliği ve zemin daneleri arasında bağlayıcı bir polimer ağı oluşturabilmesi ve diğer birçok biyopolimere kıyasla daha ekonomik olması nedeniyle geoteknik uygulamalarda yaygın şekilde araştırılmaktadır. Önceki çalışmalar GG'nin zemin mukavemetini ve durabilitesini artırabildiğini, geçirgenliği azaltabildiğini ve zemin daneleri arasındaki bağlanmayı geliştirebildiğini göstermektedir (Ayeldeen vd., 2017; Dehghan vd., 2019; Sujatha ve Saisree, 2019; Soldo vd., 2020; Bagriacik vd., 2021; Bozyigit vd., 2021; Vydehi ve Moghal, 2022; Sulaiman vd., 2022; Armistead vd., 2023; Kumar vd., 2023).Bununla birlikte, biyopolimerlerle stabilize edilmiş zeminlere ilişkin araştırmaların büyük bölümü mekanik özelliklere odaklanmış, emme ve su tutma davranışı nispeten daha sınırlı olarak incelenmiştir. Mevcut emme çalışmalarının önemli bir kısmının kumlu veya nispeten iri daneli zeminlere odaklanmış olması da yüksek plastisiteli killer açısından önemli bir araştırma boşluğu oluşturmaktadır (Almajed ve Al-Mahbashi, 2026; Al-Mahbashi ve Almajed, 2024; Wang vd., 2023; Mahamaya vd., 2021). GG açısından bu konu ayrıca önem taşımaktadır. Çünkü GG'nin stabilizasyon için avantaj sağlayan hidrofilik yapısı aynı zamanda zemin içerisindeki suyun tutulma biçimini ve hacimsel davranışı değiştirebilir. GG'nin su ile güçlü etkileşimi nedeniyle polimer hidratasyonu, özellikle yüksek dozajlarda, stabilizasyonun mekanik faydalarının yanında istenmeyen şişme davranışının ortaya çıkmasına da neden olabilir. Bu nedenle GG ile stabilize edilen yüksek plastisiteli zeminlerin yalnızca mukavemet açısından değil, hidrolik ve hacimsel davranışları açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir.

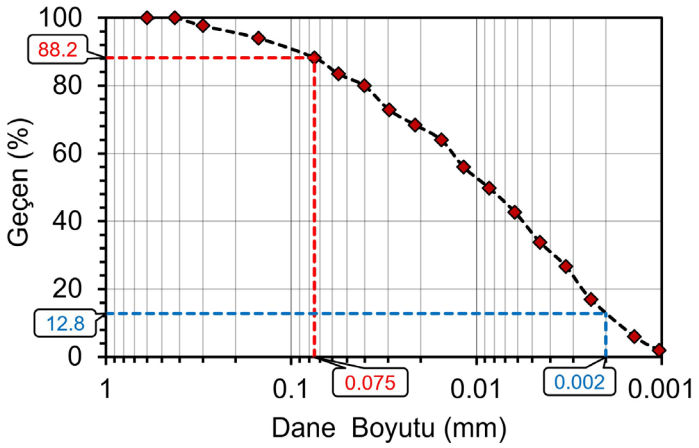
Bu çalışmada, yüksek plastisiteli bir kil zemine kuru zemin ağırlığının %0.5, %1, %2, %4 ve %8'i miktarınca GG ilave edilmiş ve toplam emme değerleri WP4C cihazı kullanılarak kürsüz durumda ve 28 günlük kontrollü kürleme sonunda belirlenmiştir. Ayrıca, GG'nin yüksek hidratasyon eğiliminin hacimsel davranış üzerindeki olası etkisini değerlendirmek amacıyla %8 GG içeren numunelerin kürsüz ve 28 günlük kürleme sonrasındaki şişme davranışları katkısız zeminle karşılaştırılmıştır. Böylece çalışmada, GG dozajı ve kürleme süresinin emme üzerindeki etkisinin ortaya konulmasının yanı sıra, yüksek dozajlı GG

kullanımının erken dönemde oluşturabileceği şişme eğiliminin de değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu yaklaşım ile GG' nin yüksek plastisiteli killerin stabilizasyonundaki performansının yalnızca mekanik iyileşme açısından değil, hidrolik ve hacimsel etkileri ile birlikte dikkate alınarak değerlendirilmesine katkı sağlanması hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kullanılan Zemin

Bu çalışmada, biyopolimer stabilizasyonunun emme ve şişme davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla yüksek plastisiteli kil zemin kullanılmıştır. Zeminin dane çapı dağılım eğrisi Şekil 1'de, temel fiziksel ve geoteknik özellikleri ise Tablo 1'de sunulmuştur. Zemin, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 1. Kil zeminin dane boyu dağılım eğrisi

Tablo 1. Zeminin mühendislik özellikleri

Özellik	Değer	Deney standardı
Kıvam Limitleri		
Likit limit (%)	57.4	ASTM D 4318
Plastik limit (%)	26.7	
Plastisite indisi (%)	30.7	
Kompaksiyon Özellikleri		
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3)	14.0	ASTM D 698
Optimum su muhtevası (%)	26.7	
75 µm'den daha küçük dane yüzdesi (%)	88.2	ASTM D 422
Özgül Ağırlık	2.67	ASTM D 854
USCS'ye Göre Sınıflandırma	CH	ASTM D 2487

2.2. Guar Gum

Bu çalışmada, yüksek plastisiteli kil zeminin stabilizasyonunda bitkisel kökenli bir biyopolimer olan GG kullanılmıştır. GG, baklagiller familyasına ait *Cyamopsis tetragonolobus* bitkisinin tohumlarından elde edilen ve temel olarak D-mannoz ile D-galaktoz birimlerinden oluşan bir galaktomannan polisakkaritidir (Chudzikowski, 1971). Suda çözünebilen ve yüksek hidrofilik özelliğe sahip olan GG, hidratasyon sonucunda yüksek viskoziteli kolloidal çözeltiler oluşturabilmektedir (Eldaw, 1994). Bu özellikleri

GG'nin su ile güçlü etkileşime girmesini sağlamakta ve zemin içerisindeki su tutma ve hacimsel davranışı etkileyebilmektedir. Çalışmada kullanılan ticari GG, guar fasulyesi tohumlarından elde edilmiş olup üretici tarafından %100 GG olarak tanımlanmaktadır. Üretici tarafından bildirilen GG'ye ait başlıca fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2'de sunulmuştur. GG, Smart Kimya firmasından temin edilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan GG'nin temel özellikleri

Özellik	**Değer**
Köken	Bitkisel
Renk	Sarımsı beyaz
Yük	Nötr
Partikül boyutu	200 mesh
pH (%1'lik solüsyon)	5.5-7.0
Kaynak	Guar fasulyesi tohumu
Suda çözünürlük	Çözünür
Formül	$(C_6H_{10}O_5)_n$
E kodu	E412

2.3. Numunelerin Hazırlanması

Emme ve şişme deneylerinde kullanılan katkısız ve GG ile stabilize edilmiş numuneler, Standart Proctor deneyi sonucunda doğal zemin için belirlenen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık esas alınarak hazırlanmıştır. GG içeren karışımlarda, biyopolimer ilavesinin toplam kuru katı miktarını ve dolayısıyla başlangıç kuru yoğunluğunu artırmasını önlemek amacıyla ikame yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde GG, kuru zemine ilave bir katı olarak eklenmemiş, kullanılan GG miktarına karşılık gelecek şekilde zemin miktarı azaltılmıştır. Böylece tüm karışımlarda zemin ve GG'nin toplam kuru ağırlığı, katkısız zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığında ilgili numune hacmini doldurmak için gerekli kuru ağırlığa eşit tutulmuştur. GG dozajları, biyopolimerin kuru ağırlığının zeminin kuru ağırlığına oranı esas alınarak %0.5, %1, %2, %4 ve %8 olarak belirlenmiştir. Literatürde GG ile zemin stabilizasyonu çalışmalarında düşük katkı oranlarının, özellikle %0.5-%2 aralığının, yaygın olarak incelendiği görülmektedir (Sujatha ve Saisree, 2019; Bozyigit vd., 2021). Bu çalışmada bu düşük dozajlara ek olarak %4 ve %8 oranları da kullanılarak GG'nin su tutma ve şişme davranışındaki dozaja bağlı değişimin daha geniş bir aralıkta ve özellikle yüksek dozajlardaki olası hidratasyon etkileri açısından değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Her bir dozaj için kullanılacak kuru zemin ve GG miktarları, hem hedeflenen GG/zemin oranını sağlayacak hem de toplam kuru katı kütlesini sabit tutacak şekilde Eşitlik (1) ve (2) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$D = \frac{M_G}{M_s} x100 \tag{1}$$

$$M_s + M_G = M_k \tag{2}$$

Burada D biyopolimer dozajını, M_G biyopolimerin kuru kütlesini, M_s kuru zemin kütlesini ve M_k hedef maksimum kuru birim hacim ağırlık ile ilgili numune hacmi esas alınarak hesaplanan toplam kuru katı kütlesini ifade etmektedir. Böylece GG dozajındaki artışın toplam kuru ağırlıkta ve hedef kuru birim hacim ağırlıkta oluşturabileceği farklılıkların deney sonuçları üzerindeki etkisi sınırlandırılmıştır. GG-zemin karışımlarının hazırlanmasında kuru karıştırma yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak, hesaplanan miktardaki toz GG, kuru zemin ile homojen bir dağılım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Ardından

doğal zeminin optimum su muhtevasını sağlayacak miktarda su ilave edilerek karıştırma işlemine devam edilmiştir. Hazırlanan karışımlar, deney türüne uygun kalıp için hedef kuru birim hacim ağırlık ve kalıp hacmi esas alınarak gerekli karışım kütlesi önceden hesaplanmış; hesaplanan miktar kalıba yerleştirildikten sonra numune hedef yüksekliğe ulaşıncaya kadar düşey yönde hidrolik presle statik yük uygulanarak sıkıştırılmıştır. Böylece tüm numunelerde doğal zemin için belirlenen hedef maksimum kuru birim hacim ağırlık korunmuştur. Kürleme etkisinin belirlenmesi amacıyla numunelerin bir bölümü hazırlandıktan sonra kür uygulanmadan (0 gün) deneye tabi tutulmuş, diğer bölümü ise nem kaybını sınırlandıracak şekilde muhafaza edilerek 20±2 °C sıcaklık ve >%95 bağıl nem koşullarında bir plastik poşet içerisinde 28 gün süreyle kontrollü olarak kürlenmiştir. Aynı numune hazırlama ve kürleme prosedürü hem emme hem de şişme deneylerinde uygulanmıştır. Bununla birlikte, her bir GG dozajı için ayrı bir Standart Proctor deneyi gerçekleştirilmemiş; doğal zemine ait optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri tüm karışımlar için sabit tutulmuştur. Su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığın emme ve şişme davranışı üzerinde önemli etkileri bulunması nedeniyle, numunelerin aynı başlangıç koşullarında hazırlanmasıyla GG dozajının etkisinin diğer değişkenlerden mümkün olduğunca bağımsız olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte, GG ilavesinin zeminin kompaksiyon özelliklerini değiştirebileceği dikkate alındığında, kullanılan sabit hazırlama koşullarının her bir GG dozajına ait optimum kompaksiyon koşullarını temsil etmemesi bu çalışmanın bir sınırlamasını oluşturmaktadır.

2.4. WP4C ile Emme Ölçümleri

Katkısız ve %0.5, %1, %2, %4 ve %8 GG içeren numunelerin toplam emme-su muhtevası ilişkisi, WP4C çiy noktası potansiyometresi kullanılarak belirlenmiştir. WP4C, numune ile kapalı ölçüm haznesindeki hava arasında buhar dengesi sağlandıktan sonra bağıl nemi çiy noktası sıcaklığı üzerinden belirlemekte ve buna karşılık gelen toplam emme değerini hesaplamaktadır. Cihaz, 0-5 MPa aralığında ±0.05 MPa, 5-300 MPa aralığında ise ±%1 ölçüm hassasiyetine sahiptir (Şekil 2a). Deneylerden önce cihaz, üretici talimatlarına uygun olarak KCl çözeltisi kullanılarak kalibre edilmiş ve kalibrasyon deneyler süresince düzenli aralıklarla kontrol edilmiştir. WP4C ile elde edilen değerler toplam emmeyi temsil etmekte olup matrik ve ozmotik emme bileşenleri bu deney düzeniyle ayrı ayrı belirlenmemiştir. Bu nedenle çalışmada sunulan emme-su muhtevası ilişkileri toplam emme esaslı olarak değerlendirilmiş; metinde kullanılan SWCC ifadesi de WP4C ile belirlenen toplam emme-su muhtevası ilişkisini ifade etmektedir. Emme deneyleri için karışımlar, 15 mL kapasiteli WP4C ölçüm kaplarının yaklaşık 7 mL'lik kısmını dolduracak şekilde hedef kuru birim hacim ağırlıkta statik olarak sıkıştırılmıştır (Şekil 2b). Ölçümler 20±2 °C laboratuvar sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin beklenen emme basıncına bağlı olarak 40 MPa'dan büyük değerler için "fast", daha küçük emme değerleri için "precise" ölçüm modları kullanılmıştır. Tek bir ölçümün tamamlanma süresi yaklaşık 5-45 dakika arasında değişmiştir.

Zemin-su karakteristik eğrisinin kuruma kolunun belirlenmesi amacıyla ölçümlere başlangıçtaki yüksek su muhtevasından başlanmış ve numuneler kademeli olarak kurutularak farklı su muhtevalarında emme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her ölçüm öncesinde numune kütlesi hassas terazi ile belirlenmiş ve hesaplanan gravimetrik su muhtevası ilgili toplam emme değeriyle eşleştirilmiştir. Bu prosedür tüm GG dozajlarında hem kürsüz hem de 28 gün kürlenmiş numunelere uygulanmış ve elde edilen veriler SWCC'nin kuruma kolunun oluşturulmasında kullanılmıştır. Şekillerde deneysel noktalar arasında gösterilen çizgiler yalnızca eğilimin görsel olarak izlenmesini kolaylaştırmak

amacıyla noktaları birleştiren kılavuz eğrilerdir; verilere Van Genuchten, Fredlund-Xing veya benzeri parametrik bir SWCC modeliyle eğri uydurma uygulanmamıştır.



Şekil 2. (a) WP4C cihazı, (b) WP4C numunesi

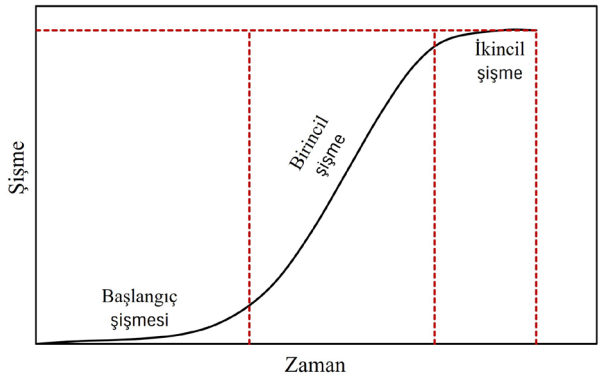
2.5. Şişme Deneyleri

GG'nin yüksek su tutma kapasitesinin yüksek plastisiteli kilin hacimsel davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla katkısız zemin ile %8 GG içeren numuneler üzerinde serbest şişme deneyleri gerçekleştirilmiştir. %8 GG oranı, emme deneylerinde kullanılan en yüksek biyopolimer dozajını temsil etmesi ve GG'nin belirgin hidrofilik karakterinin şişme davranışı üzerindeki olası etkisinin daha belirgin olarak değerlendirilebilmesi amacıyla seçilmiştir. %8 GG içeren numuneler hem kürsüz hem de 28 gün kontrollü kürleme sonrasında deneye tabi tutulmuş ve sonuçlar katkısız zeminin şişme davranışıyla karşılaştırılmıştır. Şişme numunelerinin hazırlanmasında, 75 mm iç çapa ve 60 mm yüksekliğe sahip, alt kısmına 75 mm iç çapında ve 20 mm yüksekliğindeki ödometre ringinin bağlanabildiği özel olarak imal edilmiş ayrılabilir silindirik bir kalıp kullanılmıştır. Bu düzenek, ödometre ringine uzatma yakası işlevi görerek karışımın doğrudan ring içerisinde statik olarak sıkıştırılmasına olanak sağlamıştır. Sıkıştırma işleminin ardından uzatma yakası çıkarılmış ve numuneler ringlerinden çıkarılmadan doğrudan deneye alınmış veya ilgili kür koşullarında bekletilmiştir. Böylece numunelerin kalıptan çıkarılması ve yeniden ring içerisine yerleştirilmesi sırasında oluşabilecek örselenme en aza indirilmiştir. Hazırlanan numuneler bir boyutlu ödometre cihazına yerleştirilmiş ve ASTM D4546-21 standardında tanımlanan bir boyutlu serbest şişme yaklaşımı esas alınarak yaklaşık 1 kPa başlangıç düşey gerilmesi altında su verilmiş ve numunelerin serbestçe şişmelerine izin verilmiştir. Şişme deformasyonları 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 ve 1440. dakikalarda ve sonrasında şişme dengeye ulaşıncaya kadar kaydedilmiştir. Numunelerin serbest şişme yüzdesi (SP), maksimum düşey şişme deformasyonunun başlangıç numune yüksekliğine oranı kullanılarak Eşitlik (3) ile hesaplanmıştır.

$$SP = \frac{\Delta H}{H_o} x100 \tag{3}$$

Burada SP serbest şişme yüzdesini, ΔH maksimum düşey şişme deformasyonunu ve H_o numunenin başlangıç yüksekliğini ifade etmektedir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak katkısız zemin ile %8 GG içeren kürsüz ve 28 gün kürlenmiş numunelerin zamana bağlı şişme davranışları karşılaştırılmıştır. Zeminlerin zamana bağlı şişme davranışı genel olarak başlangıç, birincil ve ikincil şişme olmak üzere üç aşamada değerlendirilebilmektedir (Şekil 3). Başlangıç şişmesi, numunenin su ile temasını takiben meydana gelen sınırlı hacimsel değişimi; birincil şişme, şişme deformasyonunun belirgin şekilde hızlandığı ve toplam hacim değişiminin önemli bir bölümünün gerçekleştiği aşamayı; ikincil şişme ise deformasyon hızının giderek azaldığı ve numunenin nihai şişme değerine yaklaştığı aşamayı ifade etmektedir (Zeng ve Kong, 2019). Bu çalışmada elde edilen şişme-zaman eğrileri

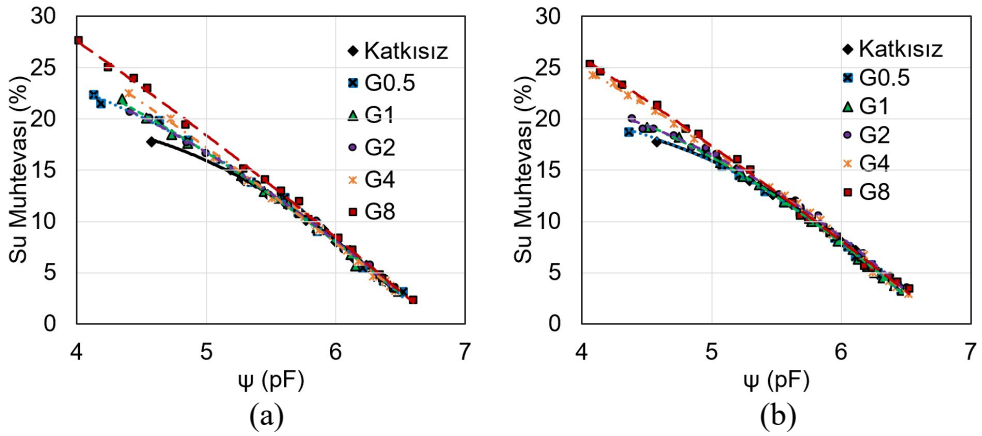
değerlendirilirken, özellikle birincil şişme davranışının belirginleştiği zaman dikkate alınmış ve GG ilavesi ile kürleme süresinin şişme kinetiği üzerindeki etkisinin karşılaştırılmasında kullanılmıştır.



Şekil 3. Şişme-zaman eğrisinde başlangıç, birincil ve ikincil şişme bölgelerinin şematik gösterimi

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

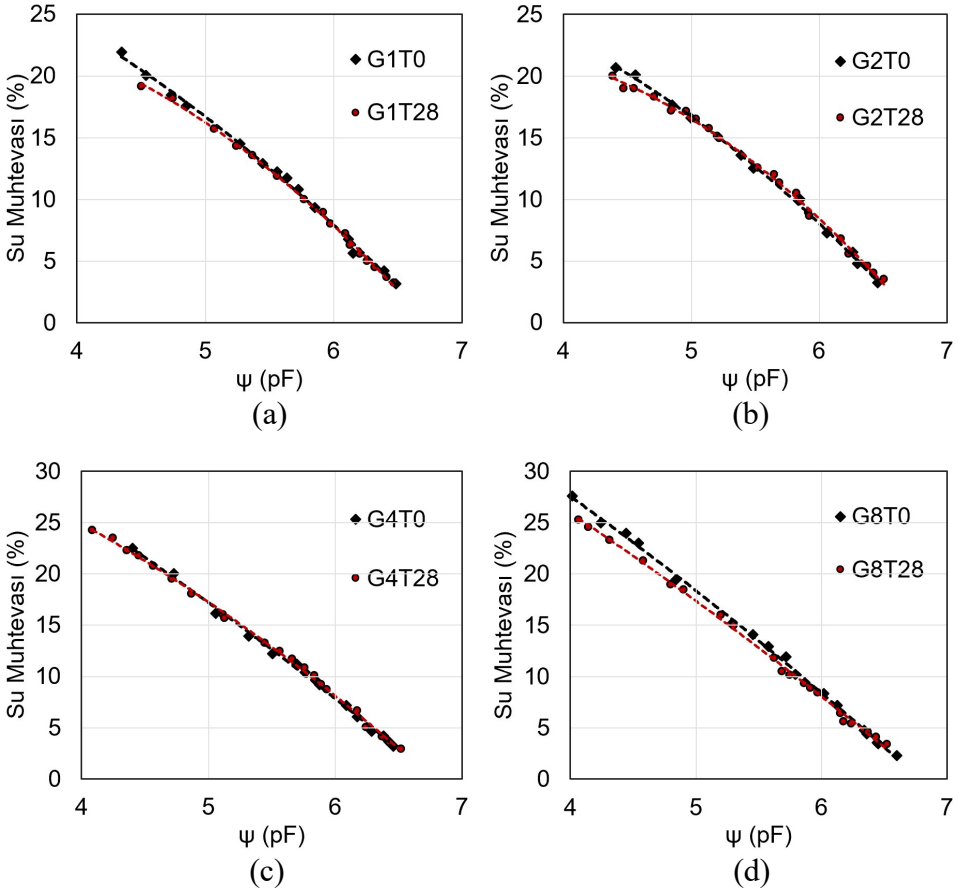
GG ile stabilize edilmiş ve katkısız CH zemine ait gravimetrik su muhtevası-emme ilişkileri WP4C cihazı kullanılarak belirlenmiş ve farklı kür süreleri sonunda biyopolimer dozajına bağlı olarak elde edilen SWCC' ler Şekil 4'te sunulmuştur. Şekil 4 incelendiğinde, GG dozajındaki artışın SWCC davranışı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu ve bu etkinin özellikle eğrinin geçiş bölgesinde yoğunlaştığı görülmektedir. Her iki kür süresinde de GG dozajının artmasıyla belirli bir gravimetrik su muhtevasına karşılık gelen emme değerleri genel olarak artmış ve SWCC' ler daha yüksek su muhtevalarına doğru kaymıştır. Bu değişim özellikle %8 GG dozajında daha belirgin hale gelmiştir. Buna karşılık, su muhtevasının azaldığı ve yüksek emme değerlerine ulaşılan rezidüel bölgede farklı dozajlara ait eğriler birbirine yaklaşmış ve GG dozajının etkisi önemli ölçüde azalmıştır.



Şekil 4. (a) 0 ve (b) 28 gün kürleme sonrasına ait WP4C deney sonuçları

Biyopolimer ilavesinin su tutma ve emme davranışı üzerindeki benzer etkileri Muguda vd. (2017) tarafından XG ile stabilize edilmiş kumlu zeminlerde, Wang vd. (2023) tarafından ise gellan gum, XG ve GG ile stabilize edilmiş düşük plastisiteli zeminlerde bildirilmiştir. Mevcut çalışmada geçiş bölgesinde GG dozajının artmasıyla gözlenen emme artışının,

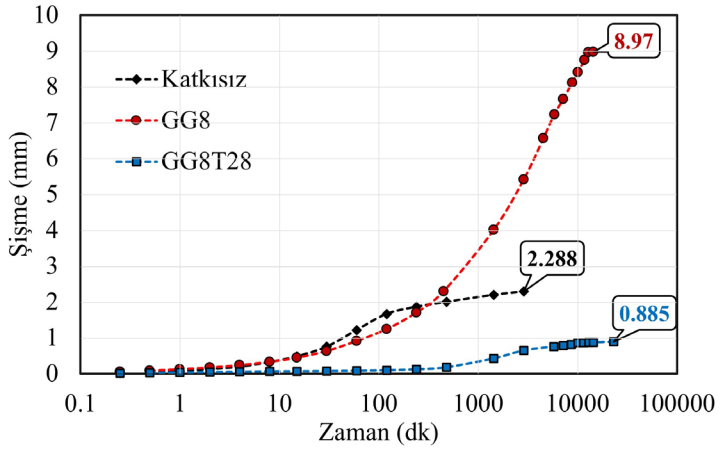
GG'nin hidrofilik yapısı ve hidratasyon sırasında su tutabilen jel yapılar oluşturma özelliğiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir (Zhou vd., 2020). Buna karşılık Wang vd. (2023), biyopolimerin su tutma davranışı üzerindeki etkisinin düşük emme değerlerinde daha belirgin olduğunu, 10 MPa'ın üzerindeki emme değerlerinde ise katkılı ve katkısız zeminler arasındaki farkın önemli ölçüde azaldığını bildirmiştir. Bu davranış, düşük su muhtevası ve yüksek emme koşullarında suyun tutulmasında kil minerali yüzeylerindeki adsorptif etkileşimlerin daha baskın hale gelmesiyle açıklanabilir (Fang vd., 2022; Lu ve Likos, 2006; Malaya ve Sreedeep, 2012; Uzundurukan, 2023). Bu nedenle rezidüel bölgede GG'nin göreli etkisinin azalması, farklı dozajlara ait SWCC'lerin birbirine yaklaşmasına katkıda bulunmuş olabilir. Stabilize edilmiş numunelerde kürleme süresinin emme-su muhtevası ilişkisi üzerindeki etkisini gösteren SWCC'ler Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. (a) %1, (b) %2, (c) %4 ve (d) %8 GG içeren örneklerin SWCC eğrilerinin kürleme süresine bağlı değişimi

Şekil 5 incelendiğinde, kürleme süresinin SWCC üzerindeki etkisinin GG dozajının etkisine kıyasla daha sınırlı olduğu görülmektedir. Nitekim 28 günlük kürleme sonrasında belirli bir su muhtevasına karşılık gelen emme değerlerinde yalnızca hafif bir azalma meydana gelmiştir. Biyopolimerlerin su tutma davranışının hidratasyon durumuna bağlı olarak değişebildiği ve biyopolimer-su sisteminin zaman içerisinde dengeye ulaşmasının bu davranışı etkileyebildiği bilinmektedir (Wang vd., 2023). Bu nedenle, kürleme sonrasında gözlenen sınırlı emme azalmasının, GG'nin zamanla ilerleyen hidratasyonu ve zemin-GG-su sisteminin daha kararlı bir nem dengesine ulaşmasıyla ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Literatürde GG ile stabilizasyonun zeminlerin mukavemet özellikleri üzerinde genel olarak olumlu etkiler sağladığı bildirilmekle birlikte, GG'nin su ile güçlü

etkileşimi ve mevcut çalışmada artan GG dozajıyla birlikte gözlenen yüksek su tutma eğilimi, stabilizasyon performansının değerlendirilmesinde hacimsel davranışın da dikkate alınması gerektiğini düşündürmektedir. Özellikle yüksek GG dozajlarında biyopolimerin hidratasyonunun zeminin şişme davranışı açısından olası bir dezavantaj oluşturabileceği göz önünde bulundurularak, bu çalışmada kullanılan en yüksek biyopolimer dozajını temsil eden %8 GG ile stabilize edilmiş kil zeminin şişme davranışı ayrıca incelenmiştir. Bu amaçla, %8 GG içeren numuneler üzerinde kürsüz ve 28 gün kürlenmiş koşullarda serbest şişme deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar katkısız zeminle karşılaştırılmıştır. Şişme-zaman ilişkileri Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. %8 GG ile stabilize edilmiş ve katkısız zemine ait şişme-zaman eğrileri

Şekil 6 incelendiğinde, katkısız zeminin nihai şişme deformasyonunun 2.288 mm (%11.44) olduğu, %8 GG içeren kürsüz numunede ise bu değerin 8.97 mm'ye (%44.85) ulaşarak yaklaşık 3.9 kat arttığı görülmektedir. Buna karşılık, 28 gün kürlenen %8 GG içeren numunenin nihai şişme deformasyonu 0.885 mm'ye (%4.43) düşmüş ve katkısız zemine göre yaklaşık %61, kürsüz GG8 numunesine göre ise yaklaşık %90 daha düşük gerçekleşmiştir. Şişme-zaman eğrileri, GG ilavesi ve kürlemenin nihai şişme miktarının yanı sıra şişmenin gelişim hızını da önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Katkısız zeminde belirgin şişme gelişimi yaklaşık 5-10. dakikalarda başlarken, bu süre kürsüz GG8 numunesinde yaklaşık 100. dakikaya, 28 gün kürlenmiş GG8 numunesinde ise yaklaşık 300-400. dakikaya kadar gecikmiştir. Bu davranışın, GG'nin yüksek su tutma kapasitesi ve biyopolimerlerin zeminlerin hidrolik özellikleri üzerindeki etkileriyle ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Biyopolimerlerin hidratasyon sırasında su adsorplayarak jel benzeri yapılar oluşturabildiği ve önemli miktarda su tutabildiği bildirilmiştir (Zhou vd., 2020). Ayrıca, GG ilavesinin zeminlerin hidrolik iletkenliğini azaltabildiği literatürde belirtilmektedir (Sujatha ve Saisree, 2019). Bu etkiler birlikte değerlendirildiğinde, GG içeren numunelerde suyun numune içerisine ilerleme hızının azalması, şişmenin numune genelinde gelişmesi için gereken süreyi artırarak belirgin şişme davranışının daha ileri zamanlara ötelenmesine katkıda bulunmuş olabilir. Bununla birlikte, suyun numune içerisindeki ilerlemesinin gecikmesi nihai şişmenin azalması anlamına gelmemiştir. Kürsüz GG8 numunesinde yaklaşık 100. dakikadan sonra hacimsel deformasyon giderek hızlanmış ve nihai şişme katkısız zeminin yaklaşık 3.9 katına ulaşmıştır. Bu davranışın, suyun numune içerisine ilerlemesiyle GG'nin giderek daha fazla suyla temas ederek hidratasyona uğraması ve buna bağlı olarak hacimsel değişim göstermesiyle ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Zhou vd. (2020), biyopolimerlerin su tutabildiğini ve hidratasyona bağlı şişmelerinin zemin

hacminde değişime neden olabileceğini belirtmiştir. Bu nedenle, kürsüz GG8 numunesinde biyopolimerin hidratasyona bağlı hacimsel tepkisinin önemli bir bölümünün şişme deneyi sırasında gelişerek kil zeminin kendi şişmesine ilave bir deformasyona katkıda bulunmuş olması mümkündür. Buna karşılık, 28 günlük kürleme sonrasında GG8 numunesinde hem belirgin şişme gelişimi daha ileri zamanlara ötelenmiş hem de nihai şişme büyük ölçüde azalmıştır. Numunelerin optimum su muhtevasında hazırlanarak nem kaybının sınırlandırıldığı koşullarda kürlenmesi dikkate alındığında, GG'nin hidratasyonunun ve zemin-GG-su sistemindeki zamana bağlı etkileşimlerin önemli bir bölümünün şişme deneyinden önce gerçekleşmiş olması mümkündür. Böylece, kürsüz numunede deney sırasında gerçekleşen yoğun GG hidratasyonunun ve buna eşlik eden hacimsel tepkinin, kürlenmiş numunede daha sınırlı kaldığı düşünülmektedir. Kürlenmiş numunede belirgin şişmenin yaklaşık 300-400. dakikalara kadar gecikmesi ise kürleme sonrasında suyun numune içerisindeki ilerlemesinin daha fazla sınırlandırılmış olabileceğini düşündürmektedir. Dikkat çekici olarak, kürleme SWCC ve emme davranışında yalnızca sınırlı bir değişime neden olurken, GG8 numunesinin nihai şişmesini yaklaşık %90 oranında azaltmıştır. Bu durum, GG ile stabilize edilmiş zeminlerde su tutma ve hacimsel şişme davranışlarının birbiriyle ilişkili olmakla birlikte doğrudan eşdeğer olmadığını ve GG'nin stabilizasyon performansının değerlendirilmesinde dozajın yanı sıra kürleme koşullarının da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Mevcut literatürde GG ile stabilizasyonun zeminlerin mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkiler sağladığı yaygın olarak bildirilmekle birlikte, bu çalışmadan elde edilen bulgular, GG'nin stabilizasyon performansının değerlendirilmesinde mukavemet kazanımlarının yanı sıra kürleme koşulları ve suya bağlı hacimsel deformasyonların da dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yüksek plastisiteli bir kil zeminin emme ve şişme davranışı üzerine GG dozajı ve kürleme süresinin etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, %0.5, %1, %2, %4 ve %8 GG içeren numunelerin toplam emme-su muhtevası ilişkileri WP4C cihazı kullanılarak kürsüz ve 28 günlük kontrollü kürleme sonunda belirlenmiştir. Ayrıca, GG'nin yüksek hidratasyon eğiliminin hacimsel davranış üzerindeki olası etkisini değerlendirmek amacıyla çalışmadaki en yüksek dozaj olan %8 oranında GG içeren numunelerin kürsüz ve 28 gün kontrollü kür sonrası serbest şişme davranışları incelenerek katkısız zeminle karşılaştırılmıştır. Böylece GG stabilizasyonunun yalnızca literatürde yaygın olarak ele alınan mekanik performans açısından değil, hidrolik ve hacimsel davranış açısından da değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. GG ilavesi, yüksek plastisiteli kilin toplam emme değerlerini artırmış ve bu etki artan GG dozajıyla daha belirgin hale gelmiştir. En belirgin farklılaşma, en yüksek biyopolimer içeriği olan %8 GG dozajında gözlenmiştir.
2. GG dozajına bağlı SWCC değişimleri esas olarak geçiş bölgesinde belirginleşmiştir. Düşük su muhtevası ve yüksek emme değerlerinin hâkim olduğu rezidüel bölgede ise farklı GG dozajlarına ait SWCC'ler birbirine yaklaşmış ve biyopolimer dozajının etkisi azalmıştır.
3. Kürleme süresinin emme-su muhtevası ilişkisi üzerindeki etkisi GG dozajının etkisine kıyasla sınırlı kalmıştır. Genel olarak 28 günlük kontrollü kürleme sonrasında emme değerlerinde hafif bir azalma gözlenmiştir.
4. GG'nin yüksek dozajda kürsüz kullanımı şişme davranışı açısından önemli bir dezavantaj oluşturmuştur. Katkısız zeminde %11.44 olan nihai serbest şişme, kürsüz

%8 GG içeren numunede %44.85'e yükselmiş ve yaklaşık 3.9 kat artmıştır. Buna karşılık, 28 günlük kürleme sonrasında %8 GG içeren numunenin serbest şişmesi %4.43'e düşmüş; bu değer katkısız zeminden yaklaşık %61, kürsüz GG8 numunesinden ise yaklaşık %90 daha düşük gerçekleşmiştir.

5. GG ilavesi ve kürleme, şişmenin yalnızca büyüklüğünü değil, hızını da önemli ölçüde değiştirmiştir. Katkısız zeminde birincil şişme bölgesi yaklaşık 5-10. dakikalarda başlarken, bu davranış kürsüz GG8 numunesinde yaklaşık 100. dakikaya, 28 gün kürlenmiş GG8 numunesinde ise yaklaşık 300-400. dakikalara kadar gecikmiştir.
6. Emme ve şişme sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, GG'nin yüksek su tutma kapasitesinin tek başına şişme potansiyelini belirlemediği görülmüştür. Kürleme, emme davranışını sınırlı ölçüde etkilerken %8 GG içeren numunenin şişmesini önemli ölçüde azaltmıştır. Bu bulgu, GG ile stabilize edilmiş yüksek plastisiteli killerde dozajın yanı sıra kürleme koşulları ve hacimsel davranışın da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.
7. GG ile stabilize edilen zeminlerde, özellikle yüksek dozajlarda erken yaşta gelişebilecek aşırı şişmenin önlenmesi amacıyla, stabilize tabakanın yeterli kürleme sağlanıncaya kadar doğrudan su girişine karşı korunması önerilmektedir. Bununla birlikte, gerekli kür süresinin belirlenmesi için farklı kür sürelerini kapsayan ilave çalışmaların yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Al-Mahbashi, A.M. ve Almajed, A. (2024), "The Role of Biopolymers on the Water Retention Capacity of Stabilized Sand", Sustainability, Vol 16(19), 8612.

Almajed, A. ve Al-Mahbashi, A.M. (2026), "Contribution of Fine Contents on Retention Characteristics of Biopolymer-Stabilized Sand", Arabian Journal for Science and Engineering, Vol 51(4), 4559–4575.

Armistead, S.J., Smith, C.C. ve Staniland, S.S. (2023), "Sustainable Biopolymer Soil Stabilisation: The Effect of Microscale Chemical Characteristics on Macroscale Mechanical Properties", Acta Geotechnica, Vol 18(6), 3213–3227.

Ayeldeen, M., Negm, A., El-Sawwaf, M. ve Kitazume, M. (2017), "Enhancing Mechanical Behaviors of Collapsible Soil Using Two Biopolymers", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol 9(2), 329–339.

Bagriacik, B., Ok, B. ve Kahiyah, M.T.M.A. (2021), "An Experimental Study on Improvement of Cohesive Soil with Eco-Friendly Guar Gum", Soils and Rocks, Vol 44, e2021060020.

Bozyigit, I., Javadi, A. ve Altun, S. (2021), "Strength Properties of Xanthan Gum and Guar Gum Treated Kaolin at Different Water Contents", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol 13(5), 1160–1172.

Bulut, R. ve Leong, E.C. (2008), "Indirect Measurement of Suction", Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils, Springer Netherlands, Dordrecht, 21–32.

Bulut, R. ve Wray, W.K. (2005), "Free Energy of Water-Suction in Filter Papers", Geotechnical Testing Journal, Vol 28, 264–355.

Chudzikowski, R.J. (1971), "Guar Gum and Its Applications", Journal of the Society of Cosmetic Chemists, Vol 22, 43–60.

Dehghan, H., Tabarsa, A., Latifi, N. ve Bagheri, Y. (2019), "Use of Xanthan and Guar Gums in Soil Strengthening", Clean Technologies and Environmental Policy, Vol 21(1), 155–165.

Ebrahimi-Birang, N. ve Fredlund, D.G. (2016), "Assessment of the WP4-T Device for Measuring Total Suction", Geotechnical Testing Journal, Vol 39, 500–506.

Eldaw, G.E. (1994), "A Study of Guar Seed and Guar Gum Properties (Cyamopsis tetragonolabous)", MSc Thesis, University of Khartoum, Sudan, 134 p.

Fang, Q., Ren, X., Zhang, B., Chen, X. ve Guo, Z. (2022), "A Flexible Soil-Water Characteristic Curve Model Considering Physical Constraints of Parameters", Engineering Geology, Vol 305, 106717.

Kumar, M.A., Moghal, A.A.B., Vydehi, K.V. ve Almajed, A. (2023), "Embodied Energy in the Production of Guar and Xanthan Biopolymers and Their Cross-Linking Effect in Enhancing the Geotechnical Properties of Cohesive Soil", Buildings, Vol 13(9), 2304.

Lu, N. ve Likos, W.J. (2006), "Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 132, 131–142.

Mahamaya, M., Das, S.K., Reddy, K.R. ve Jain, S. (2021), "Interaction of Biopolymer with Dispersive Geomaterial and Its Characterization: An Eco-Friendly Approach for Erosion Control", Journal of Cleaner Production, Vol 312, 127778.

Malaya, C. ve Sreedeep, S. (2012), "Critical Review on the Parameters Influencing Soil-Water Characteristic Curve", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol 138, 55–62.

Marinho, F.A.M. (2005), "Nature of Soil-Water Characteristic Curve for Plastic Soils", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 131, 654–661.

Muguda, S., Booth, S.J., Hughes, P.N., Augarde, C.E., Perlot, C., Bruno, A.W. ve Gallipoli, D. (2017), "Mechanical Properties of Biopolymer-Stabilised Soil-Based Construction Materials", Géotechnique Letters, Vol 7, 309–314.

Soldo, A., Miletić, M. ve Auad, M.L. (2020), "Biopolymers as a Sustainable Solution for the Enhancement of Soil Mechanical Properties", Scientific Reports, Vol 10(1), 1–13.

Sujatha, E.R. ve Saisree, S. (2019), "Geotechnical Behaviour of Guar Gum-Treated Soil", Soils and Foundations, Vol 59(6), 2155–2166.

Sulaiman, H., Taha, M.R., Abd Rahman, N. ve Mohd Taib, A. (2022), "Performance of Soil Stabilized with Biopolymer Materials – Xanthan Gum and Guar Gum", Physics and Chemistry of the Earth, Vol 128, 103276.

Uzundurukan, S. (2023), "Predictive Models for the Residual Saturation Zone of the Soil-Water Characteristic Curve", Journal of Soils and Sediments, Vol 23, 3974–3989.

Vydehi, K.V. ve Moghal, A.A.B. (2022), "Effect of Biopolymeric Stabilization on the Strength and Compressibility Characteristics of Cohesive Soil", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 34(2), 04021428.

Wang, S., Zhao, X., Zhang, J., Jiang, T., Wang, S., Zhao, J. ve Meng, Z. (2023), "Water Retention Characteristics and Vegetation Growth of Biopolymer-Treated Silt Soils", Soil and Tillage Research, Vol 225, 105544.

Yong, R.N. ve Warkentin, B.P. (1975), Soil Properties and Behaviour, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Zeng, Z. ve Kong, L. (2019), "Effect of Wetting-Drying-Freezing-Thawing Cycles on the Swelling Behaviour of the Yanji Mudstone", Environmental Earth Sciences, Vol 78(15), 435.

Zhai, Q., Rahardjo, H. ve Satyanaga, A. (2019), "Uncertainty in the Estimation of Hysteresis of Soil-Water Characteristic Curve", Environmental Geotechnics, Vol 6, 204–213.

Zhou, C., So, P.S. ve Chen, X.W. (2020), "A Water Retention Model Considering Biopolymer-Soil Interactions", Journal of Hydrology, Vol 586, 124874.