Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

BİYOPOLİMER İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ SEPİYOLİT VE ZEOLİT KARIŞIMLARININ OTURMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE SETTLEMENT BEHAVIOR OF BIOPOLYMER-IMPROVED SEPIOLITE AND ZEOLITE MIXTURES

Meltem Buse BAYINDIR[1], Eren BALABAN[2], Eren BAYRAKCI[3], Yücel GÜNEY[4]

ÖZET

Geleneksel zemin iyileştirme yöntemlerinde kullanılan çimento ve kireç gibi malzemelerin yüksek karbon salınımına neden olması, çevre dostu alternatif malzeme arayışlarını artırmıştır. Bu çalışmanın amacı, ülkemizde önemli rezervlere sahip yerli malzemeler olan sepiyolit ve zeolitin farklı oranlardaki karışımlarının, guar gum biyopolimeri ile iyileştirilmesi sonucunda elde edilen malzemelerin oturma davranışlarını deneysel olarak incelemektir. Çalışma kapsamında, farklı oranlarda hazırlanan sepiyolit–zeolit karışımlarına %1.5 oranında guar gum ilave edilerek kompozit zemin numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş; biyopolimer katkısının oturma davranışı üzerindeki etkisi tek boyutlu konsolidasyon deneyleri ile değerlendirilmiştir. Konsolidasyon deneyleri sonucunda sıkışma indisi, şişme indisi, konsolidasyon katsayısı ve hidrolik iletkenlik değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, guar gum katkısının sepiyolit–zeolit karışımlarının oturma davranışını karışım mineralojisine bağlı olarak etkilediğini göstermiştir. Sepiyolit ağırlıklı karışımlarda %1.5 guar gum katkısının hidrojel ağ yapısı ve taneler arası köprüleme etkisi sayesinde c_c ve c_s değerlerinde düşüş meydana gelirken; granüler yapıdaki zeolit ağırlıklı karışımlarda ise hidrojel şişmesi nedeniyle bu değerlerde artış olduğu gözlenmiştir. Biyopolimer jeli gözenekleri tıkayarak suyun drenajını zorlaştırmış ve tüm karışımlarda c_v değerlerini azaltmıştır. Ayrıca guar gum katkısı ile karışımların hidrolik iletkenlik değerlerinde azalmalar gözlenmiştir. Sonuçlar, guar gum katkılı sepiyolit-zeolit karışımlarının sürdürülebilir bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Biyopolimer, Guar gum, Sepiyolit, Zeolit, Konsolidasyon.*

ABSTRACT

High carbon emissions of traditional binders like cement and lime used in soil stabilization have driven the search for eco-friendly alternatives. The aim of this study is to experimentally investigate the settlement behavior of sepiolite–zeolite mixtures with different mixing ratios, improved with guar gum biopolymer, using locally abundant materials with significant reserves in Türkiye. Composite soil specimens were prepared by adding 1.5% guar gum to various sepiolite–zeolite blends. Physical and mechanical properties were determined, and the biopolymer's effect on settlement behavior was evaluated via one-dimensional consolidation tests. Consequently, the compression index, swelling index, coefficient of consolidation, and hydraulic conductivity values were determined. Results showed that guar gum influenced settlement behavior depending on mixture mineralogy. In sepiolite-dominant mixtures, 1.5% guar gum reduced c_c and c_s values

[1] İnşaat Müh., meltembb.94@gmail.com (Sorumlu yazar)
[2] Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, erenb@eskisehir.edu.tr
[3] Öğr. Gör. Dr., Eskişehir Teknik Üniversitesi, erenbayrakci@eskisehir.edu.tr
[4] Prof. Dr., Anadolu Üniversitesi, yucelguney@anadolu.edu.tr

due to hydrogel network formation and interparticle bridging. Conversely, these values increased in granular, zeolite-dominant mixtures due to hydrogel swelling. The biopolymer gel clogged soil pores, restricting water drainage and reducing c_v values across all mixtures. Furthermore, guar gum addition decreased the hydraulic conductivity of the mixtures. The findings indicate that guar gum-improved sepiolite–zeolite mixtures offer a highly sustainable alternative for geotechnical applications.
Keywords: *Biopolymer, Guar Gum, Sepiolite, Zeolite, Consolidation.*

1. GİRİŞ

Zemin iyileştirmenin temel amacı, zayıf zeminlerin taşıma gücünü artırırken; oturma miktarını azaltmak, hidrolik iletkenlik ve sızıntı özelliklerini kontrol altına almaktır. Bu amaç doğrultusunda çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri ve kimyasal katkılar kullanılmaktadır. Ancak bu katkıların çoğu toksik özellik göstererek çevre açısından ciddi tehdit oluşturmaktadır. Özellikle en yaygın yöntem olan çimento stabilizasyonu, yüksek karbondioksit salınımı nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik açısından sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle, çevre dostu ve ekonomik zemin iyileştirme yöntemlerinin geliştirilmesi bir gereklilik haline gelmiştir. Son yıllarda biyolojik temelli zemin iyileştirme yaklaşımları, hem mühendislik performansı hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından umut verici sonuçlar sunmaktadır. Bu doğrultuda, biyopolimerler, çimento veya diğer kimyasalların yerini alabilecek sürdürülebilir mühendislik uygulamaları için büyük potansiyele sahip çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Sulaiman vd., 2022; Worrell vd., 2001).

Guar gum biyopolimeri, guar fasulyesinin tohumlarından elde edilen, galaktomannan yapıda, suda çözünebilen doğal bir polisakkarittir. Yapısındaki hidroksil grupları sayesinde su ile etkileşime girerek yüksek viskoziteli hidrojel yapıları oluşturmakta ve zemin tanecikleri arasında hidrojen bağları aracılığıyla bağlayıcı bir etki sağlamaktadır (Chang vd., 2020; Risica vd., 2005; Sharma vd., 2018). Düşük miktarlarda dahi viskoziteyi artırabilen guar gum, toksik olmaması, biyolojik olarak parçalanabilir yapısı ve kolay temin edilebilirliği sayesinde sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumlu bir malzeme olarak öne çıkmaktadır (Sulaiman vd., 2022; Fatehi vd., 2021).

Sepiyolit ve zeolit ise yüksek özgül yüzey alanı, gözenekli yapıları ve adsorpsiyon kapasiteleri sayesinde geoteknik uygulamalarda dikkat çeken doğal kil mineralleridir. Sepiyolit lifsi yapısı ve yüksek su tutma kapasitesiyle, zeolit ise yüksek katyon değişim kapasitesi ve kararlı kristal yapısıyla zeminlerin mühendislik performansını geliştirebilecek önemli malzemeler arasında yer almaktadır (Galan, 1996; Duman vd., 2015; Şener, 2013). Yapılan çalışmalar, sepiyolit ve zeolit karışımlarının dayanımı artırabildiğini ve geçirgenlik davranışını iyileştirebildiğini göstermektedir.

Bununla birlikte, sepiyolit ve zeolit karışımlarının uzun dönemli deformasyon davranışları ile oturma özelliklerine ilişkin çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu nedenle, guar gum biyopolimerinin bu karışımların konsolidasyon davranışı üzerindeki etkisinin araştırılması, sürdürülebilir ve yüksek performanslı zemin malzemelerinin geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında farklı sepiyolit-zeolit karışımlarının %1.5 oranında guar gum biyopolimeri ile iyileştirilmesi sonucu elde edilen kompozit malzemelerin konsolidasyon davranışları incelenmiş; biyopolimer katkısının oturma davranışı ile hidrolik iletkenlik üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada zemin malzemesi olarak Eskişehir'den temin edilen sepiyolit ile Manisa'nın Gördes ilçesinden temin edilen zeolit kullanılmıştır. Sepiyolit, açık bej renkte ve lifsi morfolojiye sahipken zeolit ise açık gri renkte, granül formda ve gözenekli bir yapıya sahiptir. Deneylerde kullanılan malzemeler herhangi bir kimyasal veya mekanik işleme tabi tutulmamıştır. Malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Sepiyolit, % 88.5 kil, % 8.0 silt ve %3.5 kum içeriği ile Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır. Zeolit ise %77.1 kum, %21.2 silt ve %1.6 kil oranları ile siltli kum (SM) sınıfında yer almaktadır. Sepiyolitin dane özgül ağırlığı 2.50, zeolitin dane özgül ağırlığı ise 2.15'tir.

Tablo 1. Sepiyolit ve zeolitin geoteknik özellikleri

Özellikler	Sepiyolit	Zeolit
Özgül ağırlık	2.50	2.15
Kum (%)	3.51	77.14
Silt (%)	8.02	21.22
Kil (%)	88.47	1.64
Likit limit (%)	271.92	NP
Plastik limit (%)	176.37	NP
Zemin sınıfı (USCS)	CH	SM

Biyopolimer katkı maddesi olarak ise Hindistan menşeli, galaktomannan yapısına sahip doğal bir polisakkarit olan guar gum tercih edilmiştir. Deneylerde kullanılan guar gum, ticari olarak temin edilmiş olup açık beyaz renkte ve ince toz formundadır. Malzeme herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan, doğrudan toz formunda karışımlara ilave edilmiştir. Çalışmada kullanılan sepiyolit, zeolit ve guar gum Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan sepiyolit, zeolit ve guar gum

Bu kapsamda, hem katkısız hem de guar gum katkılı sepiyolit ve zeolit karışımlarının oturma davranışlarını değerlendirebilmek amacıyla karışımlar geniş bir oran aralığında tercih edilmiştir (Tablo 2). Sepiyolit-zeolit karışım oranları, Güney vd. (2014) tarafından önerilen karışım oranları esas alınarak belirlenmiştir. Konsolidasyon deneylerinde, öncül serbest basınç deneylerinde kullanılan %0.5, %1, %1.5 ve %2 guar gum oranları arasından optimum dayanımı sağlayan %1.5 guar gum oranı kullanılmıştır.

Tablo 2. Numune kodları, sepiyolit-zeolit ve guar gum oranları

Numune kodu	Sepiyolit (%)	Zeolit (%)	Guar Gum (%)
S100Z0-G0	100	0	0
S100Z0-G1.5	100	0	1.5
S90Z10-G0	90	10	0
S90Z10-G1.5	90	10	1.5
S70Z30-G0	70	30	0
S70Z30-G1.5	70	30	1.5
S50Z50-G0	50	50	0
S50Z50-G1.5	50	50	1.5
S30Z70-G0	30	70	0
S30Z70-G1.5	30	70	1.5
S0Z100-G0	0	100	0
S0Z100-G1.5	0	100	1.5

2.2. Numune Hazırlama

Bu çalışmada, konsolidasyon deneyleri için biyopolimer içermeyen kontrol numuneleri ile biyopolimer katkılı sepiyolit–zeolit karışımları hazırlanmış ve karşılaştırmalı değerlendirmelerde kullanılmıştır. Kontrol numunelerinin hazırlanmasında Pakbaz ve Farzi (2015) tarafından önerilen kuru karıştırma yöntemi uygulanmıştır. 105°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat kurutulan malzemeler, kuru halde homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra kompaksiyon deneylerinden elde edilen optimum su içeriğine ulaşmak için numunelere kademeli olarak su ilave edilmiştir. Hazırlanan karışımlar, homojen nem dağılımı sağlamak amacıyla ağzı kapalı poşetlerde, oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir.

Biyopolimer katkılı numunelerde ise guar gum, nemlendirme işleminin ardından %1.5 oranında toz formunda karışıma ilave edilerek homojen bir dağılım sağlanıncaya kadar karıştırılmıştır (Şekil 2). Hazırlanan konsolidasyon numuneleri, deney programı kapsamında konsolidasyon deneylerinden önce 28 gün süreyle kürlenmiştir.



Şekil 2. Guar gum katkılı numunelerin hazırlanma aşaması

2.3. Deneysel Yöntemler

Bu çalışmada farklı oranlarda sepiyolit ve zeolit içeren zemin karışımlarının mühendislik özelliklerini değerlendirmek üzere kapsamlı bir deneysel program uygulanmıştır. Numunelerin özgül ağırlık değerleri ASTM D 854 standardına göre piknometre yöntemiyle

tespit edilmiştir. Dane çapı dağılımları ASTM D 422 uyarınca elek ve hidrometre analizleri ile belirlenmiş; karışımların kıvam özelliklerini belirlemek amacıyla ise Atterberg limit deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler ASTM D 4318 standardına uygun olarak yürütülmüş, likit limit, plastik limit ve plastisite indeksi değerleri belirlenmiştir.

Karışımların optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını belirlemek amacıyla kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Hedeflenen su içeriğine ulaşmak için karışımlara kontrollü ve kademeli olarak su eklenmiş ve her su ilavesinin ardından malzemeler karıştırılarak homojen bir yapı elde edilmiştir. Hazırlanan karışımlar 101.5 mm çapında ve 114.3 mm yüksekliğindeki standart kalıplar kullanılarak, ASTM D 698 standardında tanımlanan Standart Proctor kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılmıştır. Bu deney ile elde edilen optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri konsolidasyon deneylerinin ön hazırlık sürecinde kullanılmıştır. Her karışım oranı için ayrı deneyler gerçekleştirilerek, karışım içeriğinin zeminin kompaksiyon karakteristiklerine olan etkisi değerlendirilmiştir.

Zemin karışımlarının oturma davranışlarını ve hidrolik iletkenlik özelliklerini değerlendirmek amacıyla ASTM D 2435 standardına uygun olarak konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Bu kapsamda, katkılı ve katkısız sepiyolit–zeolit karışımları üzerinde konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiş; biyopolimer katkısının bu parametrelere etkisi sistematik biçimde incelenmiştir. Konsolidasyon deneyleri için numuneler %1.5 guar gum oranı ile hazırlanmış ve 28 gün açık havada kürlenmiştir. 28 günlük kür süresinin ardından numuneler tek eksenli konsolidasyon deneyine tabi tutulmuştur. Konsolidasyon deneyleri için kompaksiyon deneylerinden elde edilen optimum su içeriği esas alınarak, 70 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde numuneler hazırlanmıştır. Deformasyon saati sıfırlanarak, yük koluna sırasıyla 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa ve 800 kPa olmak üzere yükler kademeli olarak uygulanmıştır. Maksimum yük kademesinde oturmalar tamamlandıktan sonra yük kaldırma aşamalarına geçilmiş, yine oturmaların tamamlanması beklenecek şekilde yükler kademeli olarak kaldırılmış ve belirli aralıklarda deformasyon okumaları alınmıştır. Deney tamamlandıktan sonra numune çıkarılarak deney sonu su muhtevası hesaplanmıştır. Deney sonuçlarından sıkışma indisi (c_c), şişme indisi (c_s), konsolidasyon katsayısı (c_v) ve hidrolik iletkenlik (k) değerleri hesaplanarak biyopolimer katkısının oturma davranışı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar paylaşılmaktadır. Öncelikle sepiyolit ve zeolitin malzeme karakterizasyonu yapılmış, ardından %1.5 oranındaki guar gum katkısının bu karışımların oturma davranışları ve hidrolik iletkenlik üzerindeki etkisini anlamak için konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Katkısız ve biyopolimer katkılı numuneler karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir.

3.1. Malzeme Karakterizasyonu

Hazırlanan sepiyolit–zeolit karışımlarına ait dane özgül ağırlık değerleri, kıvam limitleri ve kompaksiyon parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

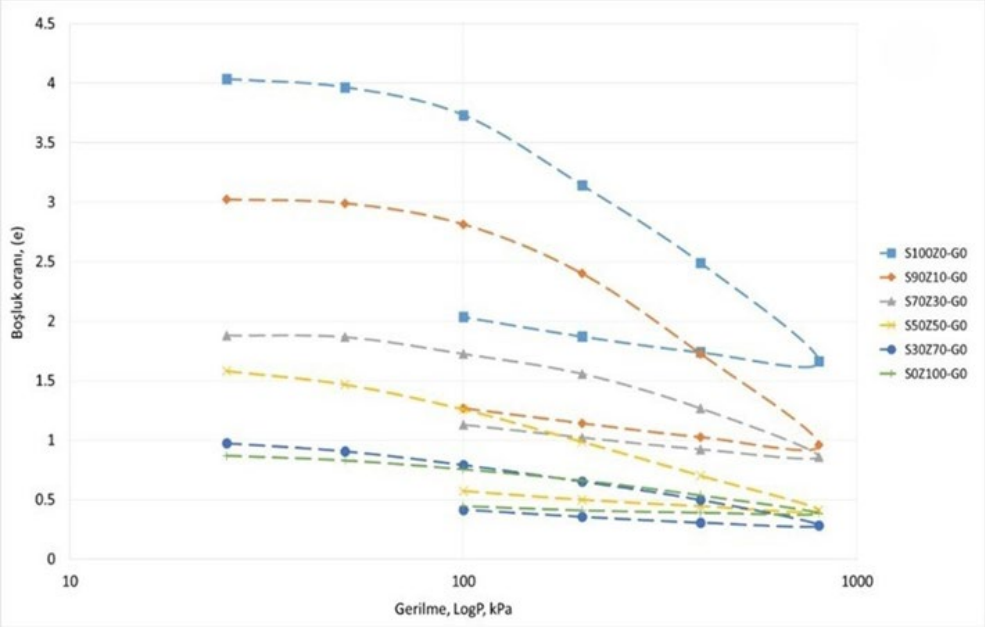
Tablo 3. Sepiyolit ve zeolit karışımlarının malzeme karakterizasyonu

Malzeme	Dane Özgül Ağırlığı	LL (%)	PL (%)	PI (%)	γ_{kmax} (kN/m^3)	w_{opt} (%)
S100Z0-G0	2.50	271.92	176.37	95.55	6.62	77
S90Z10-G0	2.39	237.09	144.64	92.45	7.15	75.15
S70Z30-G0	2.34	199.03	129.35	69.68	7.75	73
S50Z50-G0	2.27	150.89	103.34	47.55	7.88	70
S30Z70-G0	2.22	123.96	77.90	46.06	9.35	60.5
S0Z100-G0	2.15	NP	NP	NP	11.23	41.9

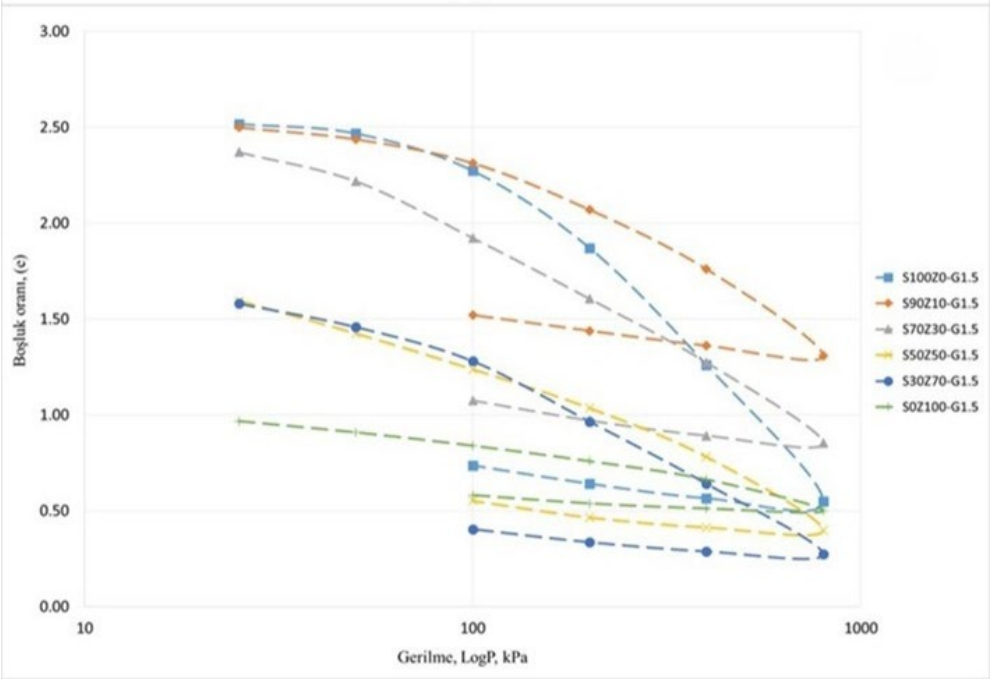
Literatürde biyopolimer katkılı zeminlerde yapılan bazı çalışmalarda, biyopolimer ilavesinin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğu, özellikle düşük katkı oranlarında bu değişimin ihmal edilebilir düzeyde kaldığı görülmüştür. Azimi vd. (2024), çalışmalarında farklı biyopolimer türü ve dozajının zeminlerin kompaksiyon özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Biyopolimer katkısı ile zeminlerin kompaksiyon parametrelerindeki değişimlerin ASTM D698 standardında belirtilen kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığını ve biyopolimer katkılı numunelerin katkısız zeminin optimum kompaksiyon koşullarında hazırlanabileceğini belirtmişlerdir. Bu literatür bulguları ışığında bu çalışmada standart Proktor deneyi, sepiyolit-zeolit karışımlarının yalnızca katkısız halleri için gerçekleştirilmiş; biyopolimer katkılı numuneler için ayrıca kompaksiyon deneyi yapılmamıştır.

3.2. Guar Gum Katkısının Konsolidasyon Davranışı ve Permeabiliteye Etkisi

Guar gum katkısının numunelerin konsolidasyon parametreleri ve geçirgenlikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla katkısız numunelerle karşılaştırmalı olarak analiz yapılmıştır (Şekil 3, Şekil 4). Karışımların konsolidasyon katsayıları, sıkışma indisi, şişme indisi ve hidrolik iletkenlikleri hesaplanmıştır.



Şekil 3. Katkısız numunelere ait e–logP eğrileri



Şekil 4. %1.5 guar gum katkılı numunelere ait e–logP eğrileri

Sıkışma İndisi ve Şişme İndisi

Katkısız ve %1.5 guar gum katkılı numunelerin sıkışma indisleri, konsolidasyon deneyleriyle belirlenmiş ve e–logP eğrilerinden elde edilmiştir. Zemin numunelerinin şişme indisleri, konsolidasyon deneyinde yükleme tamamlandıktan sonra kademeli olarak boşaltma yapılarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4'te gösterilmektedir.

Tablo 4. Karışımların C_c ve C_s değerleri

Karışım	C_c		C_s	
	Guar Gum Oranı		Guar Gum Oranı	
	%0	%1.5	%0	%1.5
S100Z0	2.753	2.362	0.544	0.317
S90Z10	2.547	1.502	0.388	0.275
S70Z30	1.348	1.397	0.331	0.348
S50Z50	0.959	1.268	0.244	0.287
S30Z70	0.715	1.223	0.198	0.226
S0Z100	0.506	0.541	0.121	0.144

Katkısız karışımlarda sıkışma indisi, sepiyolit oranının artmasıyla yükselirken zeolit oranı arttıkça azalmış; en yüksek c_c değeri S100Z0-G0, en düşük c_c değeri ise S0Z100-G0 numunesinde elde edilmiştir. S100Z0 ve S90Z10 numunelerinde, %1.5 guar gum ilavesiyle c_c ve c_s değerlerinde azalma gözlenmiştir. Bu durum guar gumun su ile etkileşerek hidrojel matrisi oluşturması ve sepiyolitin lifsi yapısı sayesinde taneler arası köprüleme mekanizmasının gelişmesiyle açıklanabilir. Oluşan hidrojel ağ yapısı, boşlukların doldurulmasına ve zemin matrisinin rijitleşmesine neden olarak hacim değişimine karşı direnci artırmıştır.

Sujatha vd. (2020) ve Nugent vd. (2009)'nin belirttiği gibi, düşük biyopolimer konsantrasyonlarında baskın olan hidrojen bağları ve hidrojel-sertleştirme mekanizması zemin matrisini hacim değişimine karşı daha dirençli hale getirmektedir.

Buna karşılık, zeolit oranı yüksek karışımlarda biyopolimer ilavesi c_c ve c_s değerlerinde bir artışa yol açmıştır. Zeolitin sepiyolite kıyasla daha granüler ve kristal yapısı nedeniyle biyopolimerin bağlayıcı etkisinin sınırlı kaldığı; buna karşın guar gumun hidrofilik yapısı sayesinde su tutma kapasitesinin arttığı ve hidrojel şişmesinin baskın hâle geldiği düşünülmektedir. Bu durum zeminin sıkışabilirliğinin artmasına yol açmıştır. Elde edilen bu bulgular, literatürdeki sonuçlarla yüksek düzeyde uyum göstermektedir.

Singh ve Das (2020), biyopolimer katkısının hidrojel şişmesi ve yumuşak polimer bağlantıları nedeniyle c_c ve c_s değerlerini artırabildiğini belirtmiştir. Vydehi vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada guar gum ve xanthan gum biyopolimerlerinin zeminlerin sıkışabilirlik davranışı üzerindeki etkilerinin tek yönlü olmadığı, biyopolimer dozajı ve zemin–biyopolimer etkileşim mekanizmalarına bağlı olarak değiştiği ortaya konmuştur.

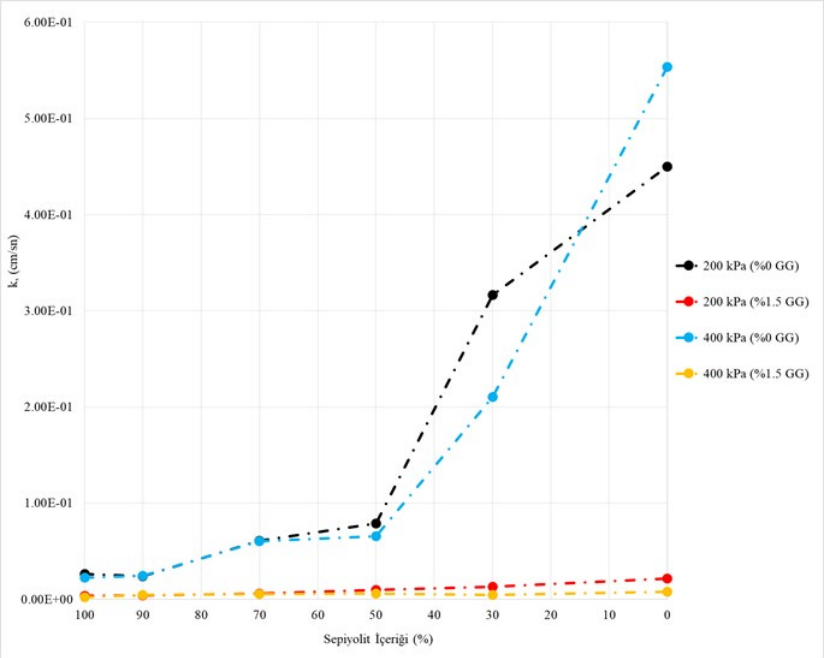
Çalışmada gözlenen farklı c_c ve c_s eğilimleri, literatürde sunulan “hidrojel-sertleştirme” ve “elektrostatik itme” mekanizmalarının zemin mineralojisine bağlı olarak farklı derecede baskın hâle gelmesiyle uyumludur. Tüm bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, guar gum katkısının konsolidasyon davranışı üzerindeki etkisinin biyopolimer dozajı, zemin mineralojisi ve biyopolimerin taneler arası ağ oluşturma kapasitesine bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

Konsolidasyon Katsayısı

200 ve 400 kPa yük kademeleri için elde edilen c_v değerleri incelendiğinde, guar gum katkısının sepiyolit–zeolit karışımlarının konsolidasyon hızını doğrudan etkilediği görülmüştür (Şekil 5).

Katkısız numunelerde zeolit oranının artmasıyla c_v değerleri yükselirken, %1.5 guar gum ilavesiyle tüm karışımların c_v değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum, guar gum’ın zeminin gözenek yapısında viskoz bir tabaka oluşturup drenaj yollarını daraltması ve suyun gözeneklerden geçişini zorlaştırmasıyla açıklanmaktadır.

Nitekim Ayhan (2011) ve Souley (2020), biyopolimer kullanımının boşluk suyunun hareketini sınırlandırarak konsolidasyon hızını düşürdüğünü vurgulamışlardır. Benzer şekilde Kwon vd. (2023) de biyopolimer ilavesinin gözenekleri tıkayarak c_v değerlerinde %50 ila %90 arasında azalmaya yol açtığını bildirmişlerdir.



Şekil 5. Katkısız ve %1.5 GG katkılı karışımların 200 ve 400 kPa yük kademeleri için konsolidasyon katsayısının sepiyolit içeriğine bağlı değişimi

Hidrolik İletkenlik

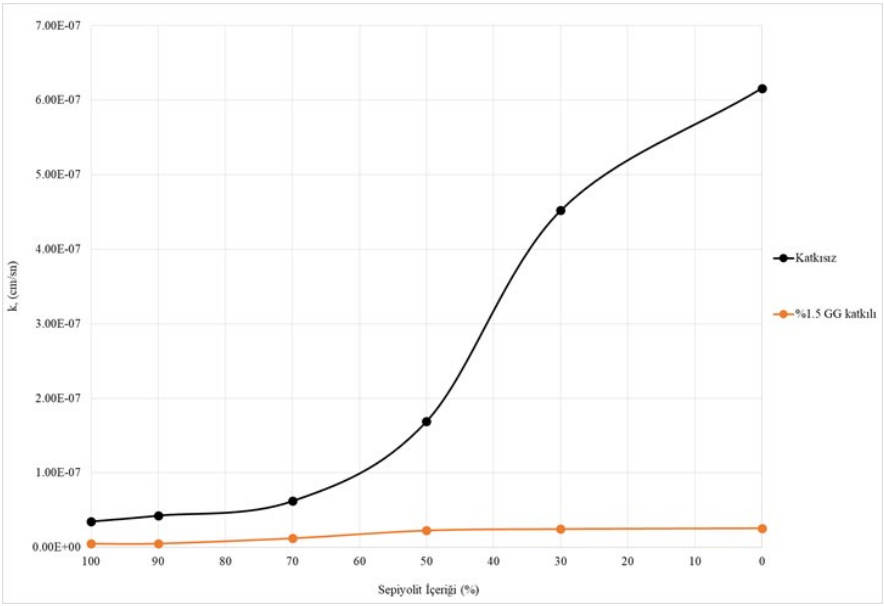
Katkısız ve %1.5 guar gum katkılı sepiyolit–zeolit karışımlarının hidrolik iletkenlik değerleri, konsolidasyon deneylerinin tüm yük kademelerinde elde edilen geçirimlilik katsayılarının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır (Tablo 6).

Tablo 6. Karışımların hidrolik iletkenlik değerleri

Karışım	GG (%)	k (cm/sn)
S100Z0	0.00	3.47E-08
	1.50	4.93E-09
S90Z10	0.00	4.26E-08
	1.50	5.10E-09
S70Z30	0.00	6.20E-08
	1.50	1.22E-08
S50Z50	0.00	1.69E-07
	1.50	2.26E-08
S30Z70	0.00	4.52E-07
	1.50	2.46E-08
S0Z100	0.00	6.16E-07
	1.50	2.57E-08

Deney sonuçları incelendiğinde, katkısız numunelerde hidrolik iletkenlik değerlerinin sepiyolit oranının artmasıyla azaldığı, zeolit oranının artmasıyla ise yükseldiği görülmüştür (Şekil 6). Sepiyolitin yüksek özgül yüzey alanı ve lifsi yapısı sayesinde gözeneklerin tıkanması, suyun geçişini zorlaştırmış ve iletkenliği düşürmüştür. Bu bulgular, Benson vd. (1994) tarafından kil minerallerinin özgül yüzey alanlarının yüksek olması nedeniyle hidrolik iletkenliğin azaldığını belirten çalışmalarla da uyumludur. %1.5 guar gum ilavesi ise tüm karışımlarda hidrolik iletkenlik değerlerini önemli ölçüde düşürmüş, katkısız

numunelere kıyasla yaklaşık %80–96 arasında iyileşme sağlamıştır. Bu durum, guar gum'ın su ile temas ettiğinde şişerek hidrojel formuna dönüşmesi ve bu hidrojelin kapiler boşlukları doldurarak boşluk suyunun viskozitesini artırmasıyla açıklanmaktadır (Singh ve Das, 2020).



Şekil 6. Katkısız ve katkılı karışımların hidrolik iletkenlik değerleri

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, farklı oranlardaki sepiyolit-zeolit karışımlarının %1.5 guar gum biyopolimeri ile iyileştirilmesi sonucu elde edilen malzemelerin oturma davranışları araştırılmıştır.

Katkısız numunelerde en düşük hidrolik iletkenlik değeri 3.47×10^{-8} cm/sn olarak sepiyolitte, en yüksek hidrolik iletkenlik değeri ise 6.16×10^{-7} cm/sn olarak zeolitte gözlenmiştir. %1.5 guar gum katkısı, tüm sepiyolit–zeolit karışımlarında hidrolik iletkenliği önemli ölçüde azaltarak malzemelerin geçirimsizlik performansını artırmıştır. %1.5 guar gum katkısı ile en düşük hidrolik iletkenlik değeri S100Z0-G1.5 numunesinde 4.93×10^{-9} cm/sn olarak elde edilmiştir.

Katkısız numunelerde sıkışma indisi, sepiyolit oranı arttıkça yükselmiştir. %1.5 oranındaki guar gum katkısı, sepiyolit oranı fazla olan karışımlarda sıkışabilirliği azaltırken, zeolit oranı arttıkça sıkışabilirliği artırma eğilimi göstermiştir. Bu durum, karışımın mineralojik bileşimine bağlı olarak biyopolimer–zemin matrisi etkileşimlerinin farklı mekanizmalara yol açtığını göstermektedir. Katkısız numunelerde c_v, zeolit oranı arttıkça yükselmiştir. %1.5 guar gum ilavesi, oluşan viskoz jel tabakasının gözenek drenaj yollarını daraltması sebebiyle tüm karışımlarda konsolidasyon katsayısını belirgin şekilde düşürmüştür.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, %1.5 guar gum katkılı sepiyolit–zeolit karışımlarının düşük hidrolik iletkenliğin gerekli olduğu saha uygulamalarında kullanılması önerilmektedir. Biyopolimer hidrojellerinin zamanla biyolojik olarak ayrışma hızı ve bunun uzun vadeli oturma parametrelerine etkisi arazi koşullarını simüle eden mikro-yapısal analizlerle desteklenerek araştırılmalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında 24LÖT237 nolu proje ile desteklenmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı teşekkürlerini sunmaktadırlar.

KAYNAKLAR

Abdou Souley, I. (2020). *Improvement of engineering properties of sandy soils using biopolymer*. Doctoral Thesis. Adana: Cukurova University, Institute of Natural and Applied Sciences.

ASTM D 422. (2002), Standard test method for particle-size analysis of soils. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM D 4318. (2005), Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM D 698. (2007b), Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ [600 kN-m/m³]). American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM D 2435. (2011), Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM D 854. (2014), Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

Ayhan, A. (2011). *Biyopolimer katkıları ile zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Manisa: Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Azimi, M., Soltani, A., Mirzababaei, M., Jaksa, M. B., Ashwath, N. (2024). Biopolymer stabilization of clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *16*(7), 2801–2812. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.12.020

Benson, C. H., Zhai, H. and Wang, X. (1994). Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, *120*(2), 366–387. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120

Chang, I., Lee, M., Tran, A. T. P., Lee, S., Kwon, Y., Im, J., Cho, G.-C. (2020). Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices. *Transportation Geotechnics*, 24, 100385 https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100385

Duman, O., Tunç, S. and Polat, T. G. (2015). Adsorptive removal of triarylmethane dye (Basic Red 9) from aqueous solution by sepiolite as effective and low-cost adsorbent. *Microporous and Mesoporous Materials*, 210, 176–184. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.02.040

Fatehi, H., Ong, D. E. L., Yu, J., Chang, I. (2021). Biopolymers as green binders for soil improvement in geotechnical applications: A review. Geosciences, 11, 291, 1–39.

Galan, E. (1996). Properties and applications of palygorskite-sepiolite clays. *Clay Minerals*, 31, 443–453. https://doi.org/10.1180/claymin.1996.031.4.01

Güney, Y., Çetin, B., Aydilek, A. H., Tanyu, B. F., Koparal, S. (2014). Utilization of sepiolite materials as a bottom liner material in solid waste landfills. *Waste Management*, *34*(1), 112–124. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.008

Kwon, Y., Chang, I. and Cho, G. (2023). Consolidation and swelling behavior of kaolinite clay containing xanthan gum biopolymer. *Acta Geotechnica*, *18*(7), 3555–3571. https://doi.org/10.1007/s11440-023-01794-8

Nugent, R.A., Zhang, G. and Gambrell, R.P. (2009). Effect of exopolymers on the liquid limit of clays and its engineering implications. Transp. Res. Rec. 2101, 34–43. https://doi. org/10.3141/2101-05.

Pakbaz, M. S. and Farzi, M. (2015), Comparison of the effect of mixing methods (dry vs. wet) on mechanical and hydraulic properties of treated soil with cement or lime, *Applied Clay Science*, 105-106, 156-169.

Risica, D., Dentini, M. and Crescenzi, V. (2005). Guar gum methyl ethers. Part I. Synthesis and macromolecular characterization. Polymer, 46(26), 12247–12255. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.10.083

Sharma, G., Sharma, S., Kumar, A., Al-Muhtaseb, A. H., Naushad, M., Ghfar, A. A., Mola, T. G., Stadler, F. J. (2018). Guar gum and its composites as potential materials for diverse applications: A review. *Carbohydrate Polymers*, 199, 534–545. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.07.053

Singh, S. P. and Das, R. (2020). Geo-engineering properties of expansive soil treated with xanthan gum biopolymer. *Geomechanics and Geoengineering*, *15*(2), 107–122. https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1632495

Sujatha, E. R. and Saisree, S. (2020). Geotechnical behaviour of guar gum-treated soil. *Soils and Foundations*, *59*(6), 2155–2166. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.012

Sulaiman, H., Taha, M. R., Abd Rahman, N., Mohd Taib, A. (2022). Performance of soil stabilized with biopolymer materials – xanthan gum and guar gum. *Physics and Chemistry of the Earth*, 128, 103276. https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103276

Şener, A. G. (2013). *Zeolit süspansiyonun farklı değerlikli katyonlara sahip inorganik tuzlar ile koagülasyonu*. Yüksek Lisans Tezi. Konya: Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Tian, C., Wang, X., Sun, F., Wu, S., Jiang, Q., Ji, K., Li, R. (2024). Study on cadmium retardation by guar gum modified bentonite barrier wall. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100212. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100212

Vydehi, K. V., Moghal, A. A. B. and Basha, B. M. (2022). Target reliability-based design of embankments using biopolymer-modified cohesive soil. *International Journal of Geomechanics*, *22*(8). https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002429

Vydehi, K. V. and Moghal, A. A. B. (2022). Effect of biopolymeric stabilization on the strength and compressibility characteristics of cohesive soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *34*(2), 04021428.

Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emission from the global cement industry. *Annual Review of Environment and Resources*, *26*(1), 303–329. https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
Cc	**Sıkışma indisi**	**LL**	**Likit limit**
CH	**Yüksek plastisiteli kil**	**PI**	**Plastisite indisi**
Cs	**Şişme indisi**	**PL**	**Plastik limit**
Cv	**Konsolidasyon katsayısı**	**S**	**Sepiyolit**
GG	**Guar gum**	**SM**	**Siltli kum**
γ_{kmax}	**Maksimum kuru birim hacim ağırlık**	W_{opt}	**Optimum su muhtevası**
k	**Hidrolik iletkenlik**	**Z**	**Zeolit**