Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

FARKLI GALAKTOMANNAN BİYOPOLİMERLERİNİN KİLİN SERBEST BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ

EFFECT OF DIFFERENT GALACTOMANNAN BIOPOLYMERS ON THE UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF CLAY

Mehtap ERİM[1], Ahmet Talha GEZGİN[2]

ÖZET

Bu çalışmada, farklı galaktomannan biyopolimerlerin (guar, tara ve keçiboynuzu sakızı) yüksek plastisiteli bir kil karışımının serbest basınç davranışı üzerindeki etkileri, 20 °C'deki hidrate olabilme farklılıkları da göz önünde bulundurularak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kuru kütlece %80 kaolin ve %20 bentonitten oluşan karışıma guar sakızı (GG), tara sakızı (TG) ve keçiboynuzu sakızı (LBG), kuru zemin kütlesine göre %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında ıslak karıştırma yöntemiyle eklenmiştir. Başlangıç su muhtevası %36 olarak sabit tutulmuştur. Bu numuneler 20 °C sıcaklıkta ve %95 bağıl nem koşullarında 28 gün kürlenmiştir. Serbest basınç deneyleri 0,76 mm/dakika yükleme hızıyla gerçekleştirilmiş; eksenel birim deformasyonlar sabit yükleme hızı ve deney süresinden hesaplanarak kesit alanı düzeltmesi uygulanmıştır. Katkısız karışımın serbest basınç dayanımı 258 kPa iken, biyopolimer katkılı numunelerde 418–2557 kPa arasında değerler elde edilmiştir. Üç biyopolimerde de en yüksek dayanım %1 katkı düzeyinde ölçülmüş; bu düzeyde GG, TG ve LBG için sırasıyla 2557, 1694 ve 1693 kPa olarak belirlenmiştir. GG bütün konsantrasyonlarda en yüksek dayanımı sağlamıştır. Gerilme–birim deformasyon eğrilerinin biçimi ve post-tepe davranışı, biyopolimer türüne ve konsantrasyonuna bağlı olarak farklılaşmıştır. Bulgular, galaktomannan türü ve katkı düzeyinin kilin serbest basınç davranışını birlikte etkilediğine ilişkin karşılaştırmalı ön bulgular sunmaktadır.
Anahtar Kelimeler: *Galaktomannan, biyopolimer, yüksek plastisiteli kil, serbest basınç dayanımı, zemin iyileştirme*

ABSTRACT

This study comparatively investigated the effects of different galactomannan biopolymers (guar, tara, and locust bean gum) on the unconfined compression response of a high-plasticity clay mixture, accounting for their differing hydration capacities at 20 °C. A mixture containing 80% kaolin and 20% bentonite by dry mass was treated with guar gum (GG), tara gum (TG), and locust bean gum (LBG) at 0.5%, 1%, and 1.5% of dry soil mass using wet mixing. The initial water content was fixed at 36%, and the specimens were cured for 28 days at 20 °C and 95% relative humidity. Unconfined compression tests were conducted at 0.76 mm/min. Axial strains were calculated from the constant loading rate and elapsed time, and cross-sectional area correction was applied. The untreated mixture had a UCS of 258 kPa, whereas the treated specimens yielded UCS values ranging from 418 to 2557 kPa. All three biopolymers reached their highest strength at 1% concentration, giving 2557, 1694, and 1693 kPa for GG, TG, and LBG, respectively. GG provided the highest strength at every concentration. The stress–strain curves varied in shape and post-peak behavior depending on biopolymer type and concentration. The findings provide comparative preliminary evidence that galactomannan type and dosage jointly influence the unconfined compression response of clay.
Keywords: *Galactomannan, biopolymer, high-plasticity clay, unconfined compressive strength, soil improvement*

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, Bursa Uludağ Üniversitesi, mehtaperim99@hotmail.com
[2] Dr. Öğr. Üyesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, ahmettalhagezgin@uludag.edu.tr (Sorumlu yazar)

1. GİRİŞ

Yüksek plastisiteli killer, su muhtevasındaki değişimlere duyarlılıkları, hacim değiştirme eğilimleri ve düşük dayanım gösterebilmeleri nedeniyle geoteknik uygulamalarda iyileştirme gerektiren zeminler arasında yer almaktadır. Bu tür zeminlerin mühendislik özelliklerinin geliştirilmesinde çimento ve kireç gibi geleneksel bağlayıcılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, geleneksel bağlayıcıların üretiminde ortaya çıkan enerji tüketimi ve çevresel etkiler, daha sürdürülebilir iyileştirme malzemelerine yönelik araştırmaları hızlandırmıştır. Yenilenebilir kaynaklardan elde edilebilmeleri ve biyolojik olarak parçalanabilir nitelikleri nedeniyle biyopolimerler, zemin iyileştirme uygulamalarında değerlendirilen alternatif malzemelerden biri hâline gelmiştir (Chang vd., 2016; Fatehi vd., 2021).

Biyopolimerlerin zemin tanecikleriyle etkileşimi; tanecik yüzeylerine tutunma, hidrojen bağlarının gelişmesi, hidrojel oluşumu ve tanecikler arasında bağlayıcı bir matris meydana gelmesi gibi mekanizmalarla açıklanmaktadır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, farklı biyopolimerlerin zeminlerin serbest basınç dayanımını artırabildiğini ve yükleme altındaki gerilme–birim deformasyon tepkisini değiştirebildiğini göstermektedir (Latifi vd., 2017; Soldo vd., 2020; Cheng ve Geng, 2023). Bununla birlikte, elde edilen iyileştirme düzeyi yalnızca biyopolimer kullanımına değil; biyopolimer türüne, zemin mineralojisine, su muhtevasına, karıştırma yöntemine, katkı konsantrasyonuna ve kür koşullarına da bağlıdır (Bozyigit vd., 2021; Cheng ve Geng, 2023). Özellikle biyopolimer konsantrasyonundaki artış her durumda daha yüksek dayanım sağlamamakta ve belirli bir katkı düzeyinden sonra dayanım artışı sınırlanabilmekte ya da tersine dönebilmektedir (Soldo vd., 2020). Bu durum, biyopolimer türü ile katkı konsantrasyonunun birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Zemin iyileştirmesinde kullanılan bitkisel kökenli polisakkarit gruplarından biri galaktomannanlardır. Galaktomannanlar, mannoz birimlerinden oluşan ana zincir ile bu zincire bağlanan galaktoz yan gruplarından meydana gelmektedir. Galaktomannanların mannoz/galaktoz (M/G) oranı, elde edildikleri bitkisel kaynağa bağlı olarak değişmekte ve çözünürlük, hidratasyon, viskozite, su tutma ve film oluşturma özelliklerini etkileyebilmektedir (Mikkonen vd., 2007; Liu vd., 2020). Ticari olarak yaygın kullanılan guar sakızı, tara sakızı ve keçiboynuzu sakızının nominal M/G oranları sırasıyla yaklaşık 2:1, 3:1 ve 4:1'dir (Liu vd., 2020). Aynı biyopolimer ailesinde bulunmalarına rağmen, bu yapısal farklılıklar biyopolimerlerin suyla ve zemin tanecikleriyle etkileşimlerini, dolayısıyla sağladıkları dayanım gelişimini değiştirebilir. Nitekim Armistead vd. (2023), farklı galaktomannanların makroskobik mekanik etkilerinin kimyasal özellikler kadar zemin mineralojisine de bağlı olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, M/G oranının yanında molekül ağırlığı, ürün saflığı ve galaktoz gruplarının zincir üzerindeki dağılımı da biyopolimer davranışını etkileyebileceğinden, performans farklılıklarının yalnızca M/G oranıyla açıklanması yeterli olmayabilir.

Geoteknik literatüründe guar sakızı ve keçiboynuzu sakızının zemin davranışına etkisini ayrı ayrı inceleyen çalışmalar bulunmasına karşın, guar, tara ve keçiboynuzu sakızlarını aynı kil bileşimi, hazırlama ve kür koşulları altında karşılaştıran çalışmalar sınırlıdır. Mevcut çalışmaların önemli bir bölümü tek bir biyopolimere veya farklı kimyasal ailelerden gelen biyopolimerlerin karşılaştırılmasına odaklanmaktadır. Bu nedenle, aynı polisakkarit ailesine ait ancak farklı M/G oranları taşıyan galaktomannanların ortak konsantrasyon düzeylerindeki dayanım ve genel yükleme davranışlarının karşılaştırılması, biyopolimer–kil etkileşimlerinin anlaşılmasına katkı sağlayabilir.

Bu çalışma, Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FGA-2025-2250 numaralı proje kapsamında desteklenen “Sürdürülebilir Zemin İyileştirme Malzemesi Olarak Galaktomannan Biyopolimerler: Mannoz/Galaktoz Oranının Kil Zeminlerin Mekanik ve Kimyasal Davranışları Üzerindeki Etkisi” başlıklı projenin mekanik davranışa yönelik deneysel aşamalarından birini oluşturmaktadır. Çalışmada GG, TG ve LBG’nin kuru kütlece %80 kaolin ve %20 bentonitten oluşan yüksek plastisiteli bir kil karışımının serbest basınç dayanımı ve gerilme–birim deformasyon tepkisi üzerindeki etkileri %0,5, %1 ve %1,5 katkı düzeylerinde karşılaştırılmıştır. Böylece sabit hazırlama ve kür koşulları altında biyopolimer türü ile konsantrasyonun tepe dayanımı üzerindeki etkilerinin, üç galaktomannanda ortaya çıkan ortak konsantrasyon eğilimlerinin ve genel post-tepe davranış farklılıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Kullanılan Malzemeler

Çalışmada, kuru kütlece %80 kaolin ve %20 bentonitten oluşan, laboratuvarda hazırlanmış bir kil karışımı kullanılmıştır. Karışımın özgül ağırlığı ASTM D854, kıvam limitleri ise ASTM D4318 esas alınarak belirlenmiştir. Karışımın optimum su muhtevası ile maksimum kuru birim hacim ağırlığı, Sridharan ve Sivapullaiah (2005) tarafından önerilen minyatür kompaksiyon deneyi kullanılarak belirlenmiş ve sırasıyla %36 ve 12,3 kN/m³ olarak elde edilmiştir. Kil karışımına ait temel indeks ve kompaksiyon özellikleri Tablo 1’de sunulmuştur. Tablo 1'de sunulan kıvam limitleri (w_L=%69, I_p=35) değerlendirildiğinde, karışım Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre A-hattının (I_p=35,8) marjinal bir farkla hemen altında kalarak yüksek plastisiteli silt (MH) sınıfına girmektedir. Ancak karışım tamamen ticari kil minerallerinden (%80 kaolin, %20 bentonit) oluşturulduğundan, zemin mineralojik doğasını ve mekanik davranışını daha doğru yansıtmak amacıyla çalışmada 'yüksek plastisiteli kil' olarak nitelendirilmiştir.

Tablo 1. Kil karışımının temel geoteknik özellikleri

Parametre	Birim	Değer
Özgül ağırlık, G_s	-	2,65
Likit limit, w_L	%	69
Plastik limit, w_p	%	34
Plastisite indisi, I_p	%	35
Optimum su muhtevası, w_{opt}	%	36
Maksimum kuru birim hacim ağırlık	kN/m^3	12,3

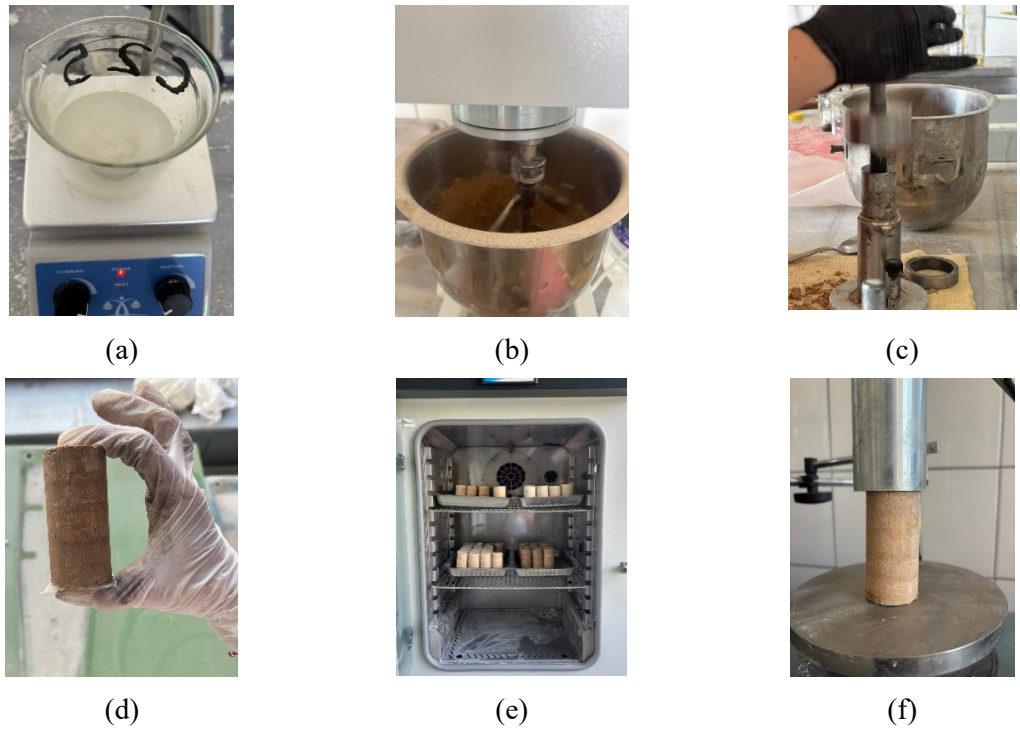
İyileştirme malzemesi olarak aynı polisakkarit ailesinde yer alan guar sakızı (GG), tara sakızı (TG) ve keçiboynuzu sakızı (LBG) kullanılmıştır. Bu biyopolimerlerin nominal mannoz/galaktoz oranları sırasıyla yaklaşık 2:1, 3:1 ve 4:1’dir. Biyopolimerler ticari olarak toz formunda temin edilmiş ve ilave bir kimyasal işleme tabi tutulmadan kullanılmıştır. Kullanılan guar sakızı, tara sakızı ve keçiboynuzu sakızı, Smart Kimya Tic. ve Dan. Ltd. Şti. (Türkiye) firmasından 'Tito' markasıyla gıda endüstrisine uygun saflık derecesinde temin edilmiştir. Katkı oranları kuru zemin kütlesine göre %0,5, %1 ve %1,5 olarak belirlenmiştir.

2.2. Numune Hazırlanması ve Kürlenmesi

Biyopolimer katkılı numuneler ıslak karıştırma yöntemiyle hazırlanmıştır. Öncelikle her katkı düzeyi için gerekli biyopolimer miktarı kuru zemin kütlesi esas alınarak belirlenmiştir. Biyopolimer, 20 °C sıcaklığındaki karışım suyuna yavaşça ilave edilmiş ve homojen bir

biyopolimer–su karışımı elde edilmesi amacıyla 5 dakika boyunca karıştırılmıştır (Şekil 1a). Hazırlanan karışım suyu, önceden kuru halde homojenleştirilen kaolin–bentonit karışımına kademeli olarak eklenmiş ve bileşenler, homojen bir kıvam elde edilinceye kadar karıştırılmıştır (Şekil 1b). Başlangıçtaki su muhtevası bütün numunelerde kuru zemin kütlesine göre %36 olarak sabit tutulmuştur.

Hazırlanan karışımlar, 38 mm çapında ve 76 mm yüksekliğindeki silindirik kalıplara 3 katman hâlinde yerleştirilmiştir. Her katmana 1 kg kütleli tokmak kullanılarak 16 cm sabit düşme yüksekliğinden 25 vuruş uygulanmış; kullanılan sıkıştırma aracı, vuruş sayısı ve sıkıştırma işlemi tüm numunelerde aynı tutulmuştur (Şekil 1c). Numunelerin kalıptan çıkarılması sırasında örselenmesini sınırlandırmak amacıyla kalıpların iç yüzeyleri ince plastik filmle kaplanarak hafifçe yağlanmıştır. Sıkıştırma işleminin ardından numuneler, numune çıkarıcı kullanılarak kontrollü biçimde kalıptan çıkarılmıştır (Şekil 1d). Katkısız referans numunesi de aynı kil bileşimi, su muhtevası, karıştırma ve sıkıştırma prosedürleri kullanılarak hazırlanmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler, (katkısız referans numunesi de dâhil olmak üzere tüm seri için) 20 °C sıcaklık ve %95 bağıl nem koşullarının sağlandığı kontrollü bir ortamda 28 gün boyunca kürlenmiştir (Şekil 1e). Böylece biyopolimer türü ve katkı düzeyi dışındaki hazırlama ve kür koşulları tüm deney serilerinde sabit tutulmuştur.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Şekil 1. Biyopolimerli kil numunelerinin hazırlanması ve deney süreci: (a) biyopolimer–su karışımının hazırlanması, (b) hazırlanan karışımın kile eklenmesi ve homojenleştirilmesi, (c) biyopolimerli kilin kalıba yerleştirilmesi ve sıkıştırılması, (d) kalıptan çıkarılmış silindirik numune, (e) numunelerin kontrollü ortamda kürlenmesi ve (f) serbest basınç deneyinin gerçekleştirilmesi

2.3. Serbest Basınç Deneyleri ve Verilerin Değerlendirilmesi

Yirmi sekiz günlük kür süresini tamamlayan numuneler üzerinde standart serbest basınç deney cihazı kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Numuneler cihazın yükleme plakaları arasına merkezlenerek yerleştirilmiş ve 0,76 mm/dakika sabit yükleme hızı altında eksenel basınca maruz bırakılmıştır (Şekil 1f). Deney düzeni ve yükleme işlemlerinde

ASTM D2166/D2166M standardının genel esasları dikkate alınmış ve kuvvet değerleri 1 saniyelik aralıklarla kaydedilmiştir. Doğrudan deplasman kayıtlarının tüm deneylerde karşılaştırılabilir olmaması nedeniyle eksenel kısalma değerleri, tüm numuneler için sabit yükleme hızı ve deney başlangıcından itibaren geçen süre kullanılarak belirlenmiştir. Bu hesaplamada yükleme plakası hareketinin numunenin eksenel kısalmasına eşit olduğu kabul edilmiştir. Her kayıt noktasındaki eksenel birim deformasyon, yükleme plakası hareketi dikkate alınarak Eşitlik (1) ile hesaplanmıştır:

$$\varepsilon_{a,i} = \Delta H_i / H_0 = (v \times [t_i - t_0]) / (60 \times H_0) \quad (1)$$

Burada $\varepsilon_{a,i}$ kayıt noktasındaki eksenel birim deformasyonu; ΔH_i, numunenin eksenel kısalmasını; H_0, başlangıç numune yüksekliğini; v, yükleme hızını; t_i, deney başlangıcından itibaren geçen süreyi ve t_0, yüklemenin/numune temasının başladığı zamanı göstermektedir. Eşitlikte v mm/dakika ve t_i saniye cinsinden kullanıldığından 60 dönüşüm katsayısı uygulanmıştır.

Numune hacminin yükleme sırasında sabit kaldığı varsayılarak, numune kesit alanında eksenel deformasyonla meydana gelen değişim dikkate alınarak her kayıt noktasındaki düzeltilmiş kesit alanı Eşitlik (2) ile belirlenmiştir:

$$A_i = A_0 / \left(1 - \varepsilon_{a,i}\right) = (\pi d^2 / 4) / \left(1 - \varepsilon_{a,i}\right) \quad (2)$$

Burada A_i, i. kayıt noktasındaki düzeltilmiş kesit alanını; A_0, numunenin başlangıç kesit alanını ve d, başlangıç numune çapını ifade etmektedir. Alan düzeltmesinde eksenel birim deformasyon ondalık biçimde kullanılmıştır.

Her kayıt noktasındaki düzeltilmiş eksenel basınç gerilmesi ile serbest basınç dayanımı Eşitlik (3) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$q_i = F_i / A_i \quad (3)$$

Burada F_i kN, A_i m² ve q_i kPa cinsindedir.

Gerilme değerlerinin en büyüğü serbest basınç dayanımı (q_u) olarak kabul edilmiş ve tepe değerin tekil bir sinyal sıçramasından kaynaklanmadığını doğrulamak amacıyla komşu kuvvet kayıtları kontrol edilmiştir. Gerilme–birim deformasyon eğrilerinin post-tepe bölümleri, eğrilerin görsel olarak karşılaştırılabilmesi amacıyla, eksenel gerilmenin ilk kez tepe dayanımının %50'sine veya daha düşük bir değere ulaştığı noktaya kadar gösterilmiştir. Bu gösterim ölçütü tüm numunelere aynı şekilde uygulanmıştır.

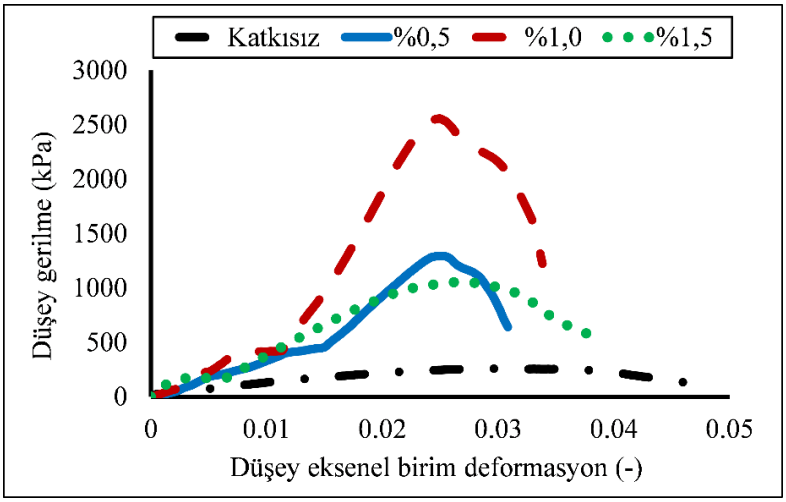
Her deney koşulu tek bir numune ile temsil edildiğinden, sonuçlar betimsel olarak karşılaştırılmış ve çıkarımsal istatistiksel analiz uygulanmamıştır. Bu nedenle çalışma kapsamında kesin bir optimum konsantrasyon belirlemek yerine, üç galaktomannanın ortak katkı seviyelerindeki göreli dayanım performansları değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR

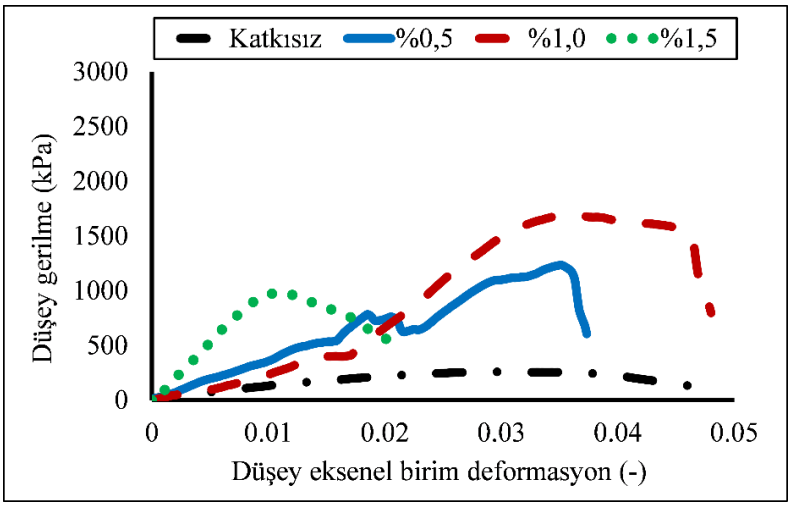
3.1. Gerilme – Birim Deformasyon Davranışı

Alan düzeltmesi uygulanarak elde edilen eksenel gerilme–birim deformasyon ilişkileri Şekil 2'de sunulmuştur. GG, TG ve LBG içeren numunelere ait eğriler sırasıyla Şekil 2a, 2b ve

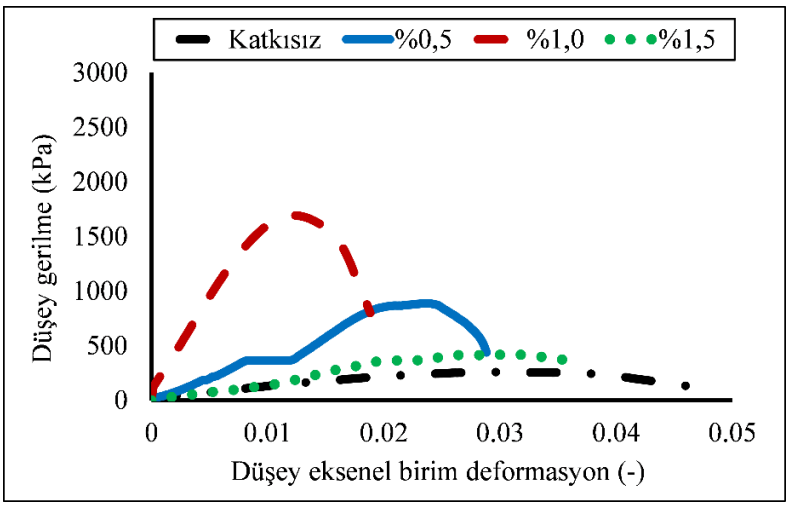
2c'de verilmiştir. Biyopolimer katkısının etkisinin doğrudan karşılaştırılabilmesi amacıyla aynı katkısız referans numunesine ait eğri her üç panelde de gösterilmiştir.



(a)



(b)



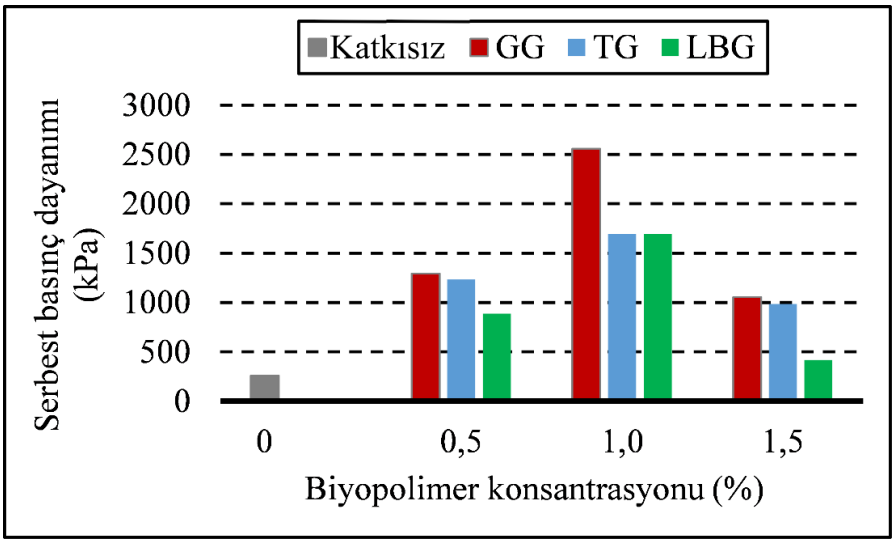
(c)

Şekil 2. Galaktomannan katkılı kil numunelerinin 28 günlük kür sonrası gerilme–birim deformasyon davranışı: (a) GG, (b) TG ve (c) LBG

Eğriler genel olarak değerlendirildiğinde, biyopolimer katkılı numunelerin tepe gerilmelerinin katkısız referans numunesinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Her üç biyopolimerde de %1 katkı seviyesinde eğrinin en yüksek tepe gerilmesine ulaştığı, %1,5 katkı seviyesinde ise tepe gerilmesinin azaldığı belirlenmiştir. Dolayısıyla konsantrasyon değişimine bağlı benzer bir genel eğilim üç galaktomannan türünde de gözlenmiştir. Bununla birlikte, bazı numunelerin gerilme–birim deformasyon eğrilerinde tepe öncesi platolar (örneğin %1 GG ve %0,5 LBG'de $\varepsilon \approx 0{,}01 - 0{,}015$ arasında) ve lokal dalgalanmalar veya ani düşüşler (örneğin %0,5 TG'de $\varepsilon \approx 0{,}02$'de) gözlenmiştir. Bu durumların, deney başlangıcında yükleme plakasının numune başlığına oturması sırasındaki temas düzensizliklerinden veya numunelerin katmanlar hâlinde sıkıştırılması nedeniyle katman arayüzlerinde oluşabilecek zayıf düzlemlerdeki lokal kaymalardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Eğrilerin tepe sonrası bölümlerinde eksenel gerilmenin farklı oranlarda azaldığı görülmüş; ancak deney koşullarının tek bir numuneyle temsil edilmesi nedeniyle eğri biçimlerinden hareketle nicel rijitlik veya süneklik karşılaştırması yapılmamıştır.

3.2. Serbest Basınç Dayanımı

Biyopolimer türü ve konsantrasyonuna göre elde edilen 28 günlük serbest basınç dayanımları Şekil 3'te sunulmuştur. Katkısız referans numunesinin serbest basınç dayanımı 258 kPa olarak belirlenmiştir. Biyopolimer katkılı numunelerde ise 418–2557 kPa arasında değişen değerler elde edilmiş ve incelenen tüm biyopolimer türü–konsantrasyon kombinasyonlarında, katkısız referanstan daha yüksek dayanım gözlenmiştir. Katkılı numunelerin dayanımları, referans numunenin dayanımının yaklaşık 1,62–9,91 katı arasında değişmiştir.



Şekil 3. Biyopolimer türü ve konsantrasyonunun 28 günlük serbest basınç dayanımına etkisi

%0,5 konsantrasyonda GG, TG ve LBG için sırasıyla 1293, 1234 ve 887 kPa dayanım değerleri elde edilmiştir. Konsantrasyonun %1'e çıkarılmasıyla bu değerler sırasıyla 2557, 1694 ve 1693 kPa'a yükselmiştir. %1,5 konsantrasyonda ise GG, TG ve LBG numunelerinin dayanımları sırasıyla 1055, 986 ve 418 kPa olarak belirlenmiştir. GG bütün konsantrasyon seviyelerinde en yüksek dayanımı sağlamıştır. TG, %0,5 ve %1,5 seviyelerinde LBG'den daha yüksek dayanım gösterirken, %1 seviyesinde iki biyopolimerin dayanımları pratik olarak birbirine eşdeğer bulunmuştur.

Her üç biyopolimer için de incelenen katkı seviyeleri arasında en yüksek dayanım %1 konsantrasyonda gözlenmiştir. Konsantrasyonun %0,5'ten %1'e çıkarılmasıyla GG, TG ve LBG numunelerinin dayanımları sırasıyla yaklaşık %98, %37 ve %91 artmıştır. Buna karşılık, konsantrasyonun %1'den %1,5'e yükseltilmesiyle dayanımlar sırasıyla yaklaşık %59, %42 ve %75 oranında azalmıştır. Her deney koşulunun tek bir numuneyle temsil edilmesi nedeniyle bu değişimler betimsel olarak değerlendirilmiş ve istatistiksel anlamlılık göstergesi olarak yorumlanmamıştır.

4. TARTIŞMA

Elde edilen bulgular, incelenen üç galaktomannanın da 28 günlük kür sonunda katkısız zemine göre belirgin bir dayanım artışı sağladığını göstermiştir. Galaktomannan zincirlerinde bulunan hidroksil grupları ile kil yüzeyleri arasında hidrojen bağlarının gelişmesi, uzun polimer zincirlerinin kil tanecikleri arasında fiziksel köprüler oluşturması ve boşluklarda bağlayıcı bir hidrojel yapısının meydana gelmesi bu artışın olası nedenleri arasında değerlendirilebilir. Bu mekanizmaların kil tanecikleri arasındaki bağlanmayı güçlendirebildiği ve daha bütünleşik bir zemin matrisi oluşturabildiği literatürde de belirtilmektedir (Bukhary ve Azam, 2023; Mudgil vd., 2014).

Azimi vd. (2024) uygun biyopolimer içeriği ve kür koşullarında kil ve siltli zeminlerin serbest basınç dayanımının çoğunlukla katkısız zeminin 5–7 katına ulaşabildiğini bildirmiştir. Mevcut çalışmada %1 TG ve LBG içeren numunelerin dayanımları katkısız zeminin yaklaşık 6,57 katına ulaşarak bu genel aralıkla uyum göstermiştir. %1 GG içeren numunenin dayanımının ise katkısız zeminin yaklaşık 9,91 katına ulaşması, GG'nin incelenen zemin ve hazırlama koşullarında daha güçlü bir iyileştirme etkisi oluşturduğunu göstermektedir. Bozyigit vd. (2021) tarafından guar sakızıyla iyileştirilen kaolinde bildirilen 8,53 kata varan dayanım değerleri, GG'nin ince taneli zeminlerde yüksek dayanım artışı sağlama potansiyelini desteklemektedir. Bununla birlikte, çalışmalar arasındaki zemin bileşimi, su muhtevası, numune yoğunluğu ve kür koşulları farklı olduğundan, bu değerlerin doğrudan karşılaştırılması uygun değildir.

Her üç biyopolimerde de incelenen seviyeler arasında en yüksek dayanımın %1 konsantrasyonda elde edilmesi, galaktomannanların bu deney koşullarında benzer bir etkin konsantrasyon aralığı gösterebileceğine işaret etmektedir. Bu sonuç, farklı biyopolimerlerle iyileştirilmiş kil zeminlerde en yüksek mekanik performansın sıklıkla %1–2 katkı aralığında elde edildiğini bildiren çalışmalarla genel olarak uyumludur (Cheng ve Geng, 2023). Bununla birlikte, %1,5 katkı seviyesinde dayanımın bütün biyopolimerlerde azalması, katkı miktarı ile dayanım arasında doğrusal bir ilişki bulunmadığını açıkça göstermektedir. Belirli bir konsantrasyonun üzerinde oluşan fazla hidrojel yapısının tanecikler arasındaki boşluk hacmini artırabilmesi ve bağ yapısını zayıflatabilmesi, bu eğilimin olası açıklamalarından biridir (Weng vd., 2023). Ayrıca artan biyopolimer miktarıyla karışım viskozitesinin yükselmesi, homojen dağılımın güçleşmesi ve numunenin sıkıştırılabilirliğinin değişmesi de dayanım kaybına katkıda bulunmuş olabilir.

Bu noktada başlangıç su muhtevasının bütün karışımlarda %36 olarak sabit tutulmuş olması da dikkate alınmalıdır. Biyopolimer katkısının zeminin optimum su muhtevasını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını değiştirebildiği bilinmektedir (Chang ve Cho, 2014; Hamza vd., 2023). Özellikle yüksek katkı seviyesinde (%1,5) biyopolimerin artan su tutma kapasitesi, karışım suyunun viskozitesini artırarak hidratlaşmayı ve zemin işlenebilirliğini

sınırlandırmaktadır. Bu durumun, uygulanan sabit tokmaklama enerjisi (katman başına 1 kg tokmak ile 25 vuruş) altında numunenin hedeflenen kuru birim hacim ağırlığa ulaşmasını zorlaştırdığı düşünülmektedir. Bu nedenle %1,5 seviyesindeki dayanım kaybının yalnızca fazla biyopolimer kullanımından değil, artan viskoziteye bağlı olarak değişen sıkıştırma koşullarından ve numune yoğunluğundaki olası düşüşten de kaynaklanması kuvvetle muhtemeldir.

Deneyler sırasında göz önünde bulundurulması gereken bir diğer husus, kürlenme koşullarının su muhtevasına etkisidir. Numuneler plastik filmle sarılmadan %95 bağıl nemli ortama konulduğu için, 28 günlük kür süresince çevreyle etkileşime girerek bir miktar su kaybetmeleri ve buna bağlı olarak matris emmesinin (suction) artmasıyla dayanım gelişimine katkıda bulunmaları muhtemeldir. Katkısız referans numunesinin gösterdiği 258 kPa'lık başlangıç dayanımının bir kısmı bu kısmi kuruma etkisiyle açıklanabilir. Ancak katkısız zemin dâhil tüm numuneler 28 gün boyunca aynı şartlarda kürlendiğinden, ortamdan kaynaklanan bu fiziksel etkiler tüm seri için ortak kabul edilmiş; elde edilen sonuçlar göreli dayanım artışları üzerinden değerlendirilerek biyopolimer–kil etkileşimine odaklanılmıştır.

Biyopolimer türleri karşılaştırıldığında, GG bütün konsantrasyonlarda en yüksek dayanımı sağlamıştır. GG'nin daha düşük nominal mannoz/galaktoz oranına sahip olması, galaktoz yan gruplarının daha fazla bulunması ve ortam sıcaklığındaki suda daha kolay hidratlaşması bu davranışa katkıda bulunmuş olabilir. Galaktomannan çözeltilerinin hidratlaşma hızı ve viskozite gelişiminin sıcaklığa bağlı olduğu bilinmektedir (Mudgil vd., 2014). Buna karşılık, LBG'nin ortam sıcaklığındaki çözünürlüğünün daha sınırlı olduğu ve hidratlaşmasının ısıtmayla arttığı bildirilmiştir (Dakia vd., 2008; Gezgin, 2026). Biyopolimer–su karışımlarının 20 °C'de hazırlanması, bu nedenle GG lehine, LBG açısından ise kısıtlayıcı bir koşul oluşturmuş olabilir. Bununla birlikte, performans farklılıklarının yalnızca mannoz/galaktoz oranına bağlanması uygun değildir. Ticari biyopolimerlerin molekül ağırlığı, saflığı, parçacık boyutu ve galaktoz gruplarının ana zincir üzerindeki dağılımı, zeminle etkileşimini de etkileyebilir. Nitekim %1 konsantrasyonda TG ve LBG için sırasıyla 1694 ve 1693 kPa elde edilmesi, iki biyopolimerin bu koşulda pratik olarak aynı dayanım seviyesine ulaştığını göstermektedir; aradaki 1 kPa farkın biyopolimer türüne bağlı anlamlı bir üstünlük olarak yorumlanması mümkün değildir.

Çalışmanın başlıca sınırlılığı, her deney koşulunun yalnızca bir numuneyle temsil edilmesidir. Bu nedenle deneysel saçılım belirlenememiş, hata çubukları oluşturulamamış ve istatistiksel anlamlılık sınanamamıştır. Ayrıca tek bir model zemin, başlangıç su muhtevası, karıştırma yöntemi, karışım suyu sıcaklığı ve kür koşulu kullanılmıştır. Bu sınırlılıklar gözlenen dayanım artışlarını geçersiz kılmamakla birlikte, konsantrasyon ve biyopolimer türü hakkında genellenebilir veya nedensel sonuçlar çıkarılmasını sınırlandırmaktadır.

Buna karşın çalışmanın, benzer kimyasal yapıya sahip fakat farklı nominal mannoz/galaktoz oranları taşıyan üç galaktomannanı aynı zemin ve hazırlama koşullarında karşılaştırması önemli bir ön bulgu sunmaktadır. Gezgin ve Ercan (2026) biyopolimerlerin kimyasal ve moleküler farklılıklarının zemin iyileştirme performansına etkisinin yeterince açıklanamadığını önemli bir araştırma boşluğu olarak tanımlamıştır. Bu çalışma söz konusu boşluğa yönelik yürütülen BAP projesinin ön aşamasını oluşturmaktadır. Projenin devamında deneylerin bağımsız tekrarlarla gerçekleştirilmesi; %2 katkı seviyesinin, farklı su muhtevalarının, kuru ve ıslak karıştırma yöntemlerinin, 20–60 °C arasındaki karışım suyu

sıcaklıklarının, farklı pH koşullarının ve kür sürelerinin incelenmesi planlanmaktadır. UCS sonuçlarının pH, elektriksel iletkenlik ve SEM analizleriyle desteklenmesi; uzun süreli kür, ıslanma–kuruma ve donma–çözülme deneylerinin gerçekleştirilmesiyle galaktomannanların kimyasal özellikleri ile zemin davranışı arasındaki ilişkilerin daha güvenilir biçimde ortaya konulması hedeflenmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı nominal mannoz/galaktoz oranlarına sahip GG, TG ve LBG'nin yüksek plastisiteli bir kil zeminin 28 günlük serbest basınç dayanımı üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- İncelenen bütün biyopolimer türleri ve konsantrasyonları 258 kPa serbest basınç dayanımına sahip katkısız zemine göre dayanım artışı sağlamıştır. Biyopolimerli numunelerin dayanımları katkısız zeminin yaklaşık 1,62–9,91 katı arasında değişmiştir.

- Her üç galaktomannan için incelenen seviyeler arasında en yüksek dayanım %1 konsantrasyonda elde edilmiştir. Bu seviyede GG, TG ve LBG için sırasıyla 2557, 1694 ve 1693 kPa dayanım belirlenmiştir.

- GG bütün konsantrasyonlarda en yüksek dayanımı sağlamıştır. TG ve LBG'nin %1 konsantrasyondaki dayanımları ise pratik olarak aynı düzeyde gerçekleşmiştir.

- Biyopolimer konsantrasyonunun %1'den %1,5'e yükseltilmesi bütün galaktomannanlarda dayanım kaybına yol açmıştır. Bu sonuç, incelenen koşullarda biyopolimer miktarı ile serbest basınç dayanımı arasında doğrusal bir eğilim bulunmadığına işaret etmektedir.

- GG'nin genel olarak daha yüksek performans göstermesi, galaktomannanların kimyasal yapısı ve hidratlaşma özellikleriyle ilişkili olabilir. Bununla birlikte, biyopolimerlerin molekül ağırlığı, saflığı ve reolojik özellikleri belirlenmediğinden, gözlenen farklılıkların yalnızca mannoz/galaktoz oranından kaynaklandığı söylenemez.

Her deney koşulunun tek bir numuneyle temsil edilmesi nedeniyle sonuçlar ön bulgu niteliğindedir ve %1 konsantrasyon kesin bir optimum olarak değerlendirilmemelidir. Bulgular, yürütülen BAP projesinin sonraki aşamalarında gerçekleştirilecek tekrarlı deneyler ile farklı su muhtevası, karıştırma yöntemi, sıcaklık, pH ve kür koşullarını kapsayan daha geniş bir deney programının oluşturulmasına temel sağlamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FGA-2025-2250 numaralı "Sürdürülebilir Zemin İyileştirme Malzemesi Olarak Galaktomannan Biyopolimerler: Mannoz/Galaktoz Oranının Kil Zeminlerin Mekanik ve Kimyasal Davranışları Üzerindeki Etkisi" başlıklı proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, sağlanan mali ve kurumsal destek için teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

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, 3213-3227.

ASTM International (2016), "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil", ASTM D2166/D2166M-16, West Conshohocken, PA.

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

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

Azimi, M., Soltani, A., Mirzababaei, M, vd. (2024), "Biopolymer stabilization of clayey soil", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol 16:7, 2801-2812.

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, 1160-1172.

Bukhary A, ve Azam S. (2023). "A review of physicochemical stabilization for improved engineering properties of clays", Geotechnics, Vol 3, 744–759.

Chang, I. ve Cho, G.C. (2014), "Geotechnical behavior of a beta-1,3/1,6-glucan biopolymer-treated residual soil", Geomechanics and Engineering, Vol 7, 633-647.

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

Cheng, Z. ve Geng, X. (2023), "Investigation of Unconfined Compressive Strength for Biopolymer Treated Clay", Construction and Building Materials, Vol 385, 131458.

Dakia, P.A., Blecker, C., Robert, C., Wathelet, B. ve Paquot, M. (2008), "Composition and Physicochemical Properties of Locust Bean Gum Extracted from Whole Seeds by Acid or Water Dehulling Pre-Treatment", Food Hydrocolloids, Vol 22, 807-818.

Fatehi, H., Ong, D.E.L., Yu, J. ve Chang, I. (2021), "Biopolymers as Green Binders for Soil Improvement in Geotechnical Applications: A Review", Geosciences, Vol 11, 291.

Gezgin, A.T. (2026), "A Study on the Influence of Locust Bean Gum on the Swelling Behavior of Clay Soils with Different Plasticity", Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, Vol 31, No 2, 685-704.

Gezgin, A.T. ve Ercan, C. (2026), "Harnessing Biopolymers for Sustainable Soil Improvement in Geotechnical Engineering: A State-of-the-Art Review", International Journal of Environmental Science and Technology, Vol 23, Article 83.

Hamza, M., Nie, Z., Aziz, M., vd., (2023), "Geotechnical properties of problematic expansive subgrade stabilized with xanthan gum biopolymer", Road Materials and Pavement Design, Vol 24, 1869–1883.

Latifi, N., Horpibulsuk, S., Meehan, C.L., Abd Majid, M.Z., Tahir, M.M. ve Mohamad, E.T. (2017), "Improvement of Problematic Soils with Biopolymer—An Environmentally Friendly Soil Stabilizer", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 29, 04016204.

Liu, F., Chang, W., Chen, M., Xu, F., Ma, J. ve Zhong, F. (2020), "Film-Forming Properties of Guar Gum, Tara Gum and Locust Bean Gum", Food Hydrocolloids, Vol 98, 105007.

Mikkonen, K.S., Rita, H., Helén, H., Talja, R.A., Hyvönen, L. ve Tenkanen, M. (2007), "Effect of Polysaccharide Structure on Mechanical and Thermal Properties of Galactomannan-Based Films", Biomacromolecules, Vol 8, 3198-3205.

Mudgil, D., Barak, S. ve Khatkar, B.S. (2014), "Guar gum: Processing, properties and food applications - A Review", J Food Sci Technol, Vol 51, 409–418.

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, 267.

Sridharan, A. ve Sivapullaiah, P.V. (2005), "Mini Compaction Test Apparatus for Fine Grained Soils", Geotechnical Testing Journal, Vol 28, 240-246.

Weng, Z.Y., Yu, J., Deng, Y.F., Cai, Y.Y. ve Wang, L.N. (2023), "Mechanical Behavior and Strengthening Mechanism of Red Clay Solidified by Xanthan Gum Biopolymer", Journal of Central South University, Vol 30, 1948-1963.

SEMBOL LİSTESİ

Bildiride kullanılan semboller iki sütunlu tablo halinde 10 punto kullanılarak listelenmelidir.

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
A_0	Başlangıç kesit alanı (m^2)	A_i	i. kayıt noktasındaki düzeltilmiş kesit alanı (m^2)
d	Başlangıç numune çapı (m)	F_i	i. kayıt noktasındaki eksenel kuvvet (kN)
H_0	Başlangıç numune yüksekliği (mm)	H_i	i. kayıt noktasındakinumune yüksekliği (mm)
q_i	i.kayıt noktasındaki eksenel gerilme (kPa)	q_u	Serbest basınç dayanımı (kPa)
t_i	Deney başlangıcından i. kayıt noktasına kadar geçen süre (s)	t_0	Deney başlangıcındaki süre (s)
v	Eksenel yükleme hızı (mm/dakika)	ε_i	i.kayıt noktasındaki eksenel birim deformasyon (-)
M/G	Mannoz/galaktoz oranı	GG	Guar sakızı
TG	Tara sakızı	LGB	Keçiboynuzu sakızı
SEM	Taramalı elektron mikroskopisi		