



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 22.07.2024  
Kabul Tarihi : 23.09.2024

Received Date : 22.07.2024  
Accepted Date : 23.09.2024

## UÇUCU KÜL VE GUAR SAKIZI İLE STABİLİZE EDİLMİŞ BİR KİL ZEMİNİN MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN TAGUCHİ TEKNİĞİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

### EVALUATION OF THE STRENGTH PROPERTIES OF A CLAY SOIL STABILIZED WITH FLY ASH AND BIOPOLYMER USING THE TAGUCHI TECHNIQUE

Mehmet Fatih YAZICI<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-3557-7817)  
Mehmet Fahri SARAÇ<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-0760-5569)  
Çağla AYDIN<sup>3</sup> (ORCID: 0009-0009-9863-4522)  
Melce Begüm POLAT<sup>3</sup> (ORCID: 0009-0006-3411-5246)  
Can Mustafa ÇALIK<sup>3</sup> (ORCID: 0000-0003-3281-4925)  
Caner ÖZEN<sup>3</sup> (ORCID: 0000-0002-2728-706X)

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye  
<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye  
<sup>3</sup>Yeşilirmak Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi, YEDAŞ, Samsun, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mehmet Fatih YAZICI, mehmet yazici@sdu.edu.tr

#### ÖZET

Geoteknik mühendisliğinde problemleri zeminlerin iyileştirilmesinde araştırmacılar uzun yıllardır çimento ve kireç gibi geleneksel kimyasal katkıları yaygın bir şekilde kullanmaktadırlar. Bu malzemelerin zemin stabilizasyonunda sağladığı faydaların yanı sıra çevresel açıdan getirdiği zararlar göz ardı edilemeyecek seviyelerdedir. Bu sebeple araştırmacılar yıllardır farklı stabilizasyon malzemeleri ile laboratuvar ve arazi şartlarında deneyler yaparak çevre, sürdürülebilirlik, ekonomiklik ve sağladığı diğer faydalar açısından en iyiye ulaşabilmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışma, yukarıda bahsi geçen amaca ulaşabilmek için mükemmel pozzolanik özelliklere sahip bir atık olan uçucu kül ile çevre dostu ve sürdürülebilirlik açısından son zamanlarda geoteknik araştırmacıların gözdesi olan guar sakızının bir kil zeminin mukavemet özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Zaman, emek ve maliyet açısından tasarruf ederek deneysel sürecin yürütülebilmesi için Taguchi deney tasarımı yönteminden istifade edilmiştir. Sonuç olarak uçucu kül ve biyopolimer ilavesi ile doğal zeminin serbest basınç mukavemetinin 6,5, sekant elastisite modülünün ise 20,4 kata kadar artış gösterdiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar sadece uçucu kül ve sadece kireçle stabilize edilmiş numunelerin mukavemet özellikleri ile karşılaştırılmış ve kil zemine uçucu kül ile guar sakızı ilave etmenin çok daha yüksek mukavemet artışları verdiği gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin stabilizasyonu, uçucu kül, guar gum, taguchi deney tasarımı

#### ABSTRACT

Researchers in geotechnical engineering have used traditional chemical additives such as cement and lime for many years to improve problematic soils. In addition to the benefits of these materials in soil stabilization, their environmental damage cannot be ignored. For this reason, researchers have been trying to achieve the best in environment, sustainability, economy, and other benefits by conducting tests with different stabilization materials in laboratory and field conditions for years. To achieve the goal mentioned above, this study assessed the combined effects of fly ash, a waste with excellent pozzolanic properties, and guar gum, which has recently become a favorite of geotechnical researchers in terms of environmental friendliness and sustainability, on the strength properties of clay soil. Taguchi's design of the experiment method was used to carry out the experimental process by saving time, labour, and cost. As a result, the unconfined compressive strength of the natural soil increased by 6.5 times, and the ToCite: YAZICI, M. F., SARAÇ, M. F., AYDIN, Ç., POLAT, M. B., ÇALIK, C. M., & ÖZEN, C., (2025). UÇUCU KÜL VE GUAR SAKIZI İLE STABİLİZE EDİLMİŞ BİR KİL ZEMİNİN MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN TAGUCHİ TEKNİĞİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(1), 89-103.

secant elasticity modulus increased by 20.4 times with the addition of fly ash and biopolymer. The results were compared with the strength properties of specimens stabilized only fly ash and lime, and it was observed that adding fly ash and guar gum to the clay soil increased strength much more.

**Keywords:** Soil stabilization, fly ash, guar gum, taguchi experimental design

## GİRİŞ

Mühendislik yapılarının ekonomik ve güvenli bir şekilde inşa edilmesinde zemin ortamının oynadığı rol oldukça büyüktür. İnşaat mühendisliği uygulamalarında problemlili bir zemin ile karşılaşılması durumunda, inşası gerçekleştirilecek mühendislik yapılarının türüne göre zeminlerin mukavemet, geçirimsizlik, sıkışabilirlik ve durabilite gibi geoteknik özelliklerinde arzu edilen değerlere ulaşılabilmesi için kimyasal zemin stabilizasyon yöntemlerine sıklıkla başvurulmaktadır. Kimyasal stabilizasyon, zemine kimyasal katkıları eklenerek zemin özelliklerinin kimyasal olarak iyileştirilmesini ifade etmektedir. Portland çimentosu, kireç ve uçucu kül bu amaç için kullanılan geleneksel stabilizasyon malzemeleridir. Sahada zeminlerin stabilizasyonunda en çok tercih edilen kimyasal reaktifler çimento ve kireçtir (Eliaslankaran vd., 2021). Ancak bu stabilizasyon ajanlarının kullanmanın bazı dezavantajları mevcuttur. Üretim aşamasında yüksek enerji gerektirmeleri, ham madde kaynaklarını tüketmeleri, çevreye CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> gibi zararlı gazlar yaymaları, zemin içerisinde kullanımı ile bitki gelişimini kısıtlamaları, toprağın pH'ında meydana getirdikleri değişiklikler ve yeraltı suyunun kirliliğine katkıları bu dezavantajlardan bazılarıdır. Çimento üretim tesisleri küresel CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık olarak %5-8'inden sorumludur. Her bir ton çimento üretimi sonucu atmosfere bir ton, bir ton kireç üretimi ile ise yaklaşık olarak 0,86 ton CO<sub>2</sub> salınmaktadır (Thangaraj & Thenmozhi, 2013). Kömür santrallerinde yanma işlemi sırasında bir yan ürün olarak ortaya çıkan uçucu külün küresel üretim miktarı, 2005-2015 yılları arasında 500-750 milyon ton civarındadır. Ancak bu miktarın yalnızca %25'inin sahada efektif bir şekilde kullanıldığı ve arta kalan kısmın mükemmel puzolanik özelliklere sahip olmasına rağmen depolama sahalarında bertaraf edildiği görülmektedir (Blissett & Rowson, 2012). Uçucu külün zemin iyileştirmede katkı maddesi olarak kullanılması, zeminin mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesinin yanı sıra, bu atığın depolama maliyetlerinin ve çevreye zararlı etkilerinin azaltılması veya ortadan kaldırılması anlamına gelmektedir (Sengul vd., 2023). Uçucu kül ilavesinin zeminlerin mukavemet özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen araştırmalardan elde edilen sonuçlar, zeminlerin mukavemeti, şişme-büzülme ve oturma gibi hacim değişimleri, geçirimsizliği ve durabilitesi gibi geoteknik özelliklerinde önemli miktarda iyileşmelerin elde edildiğini göstermiştir (Bakare vd., 2019; Parsons & Kneebone, 2015; Kang vd., 2014; Harichane vd., 2011; Tastan vd., 2011; Brooks vd., 2010; Kim & Prezzi, 2008; Zha vd., 2008; Phanikumar & Sharma, 2007; Nalbantoğlu, 2004; Prabakar vd., 2004). Zeminlerin kompaksiyon karakteristiği üzerine yapılan birçok araştırma, uçucu kül ile stabilize edilen zeminlerde optimum nem içeriğinin arttığını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının ise azaldığını göstermektedir (Mccarthy vd., 2009; Degirmenci vd., 2007; Senol vd., 2006; Sezer vd., 2006). Son zamanlarda doğal kaynaklardan üretilen ve ilaç, gıda, tarım ve kozmetik gibi birçok endüstride efektif bir şekilde kullanılan biyopolimerler, sürdürülebilir ve çevre dostu olmaları ve zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine sağladığı birçok fayda ile geleneksel kimyasal stabilizasyon malzemelerine bir alternatif olarak geoteknik araştırmacıların dikkatini çekmeyi başarmıştır. Üretildikleri kökenlere göre biyopolimerler bitki bazlı, hayvan bazlı ve mikroorganizma bazlı olmak üzere üç ayrı başlık altında sınıflandırılmaktadır. Guar sakızı (GG), lignin, agar, beta-glukan ve aljinat bitki bazlı biyopolimerlerdir. Süt ve süt ürünlerinden ekstrakte edilen protein bazlı bir biyopolimer olan kazein ve atık kabuklu deniz hayvanlarının atık kabuklarından üretilen kitosan hayvan bazlı biyopolimerlerdir. Ksantan gum, gellan gum ve dekstran gibi mikroorganizma bazlı biyopolimerler ise fermantasyon işlemi neticesinde üretilmektedir. Geoteknik literatürü incelendiğinde uygun fiyatları ve kararlı davranışları nedeniyle araştırmacıların daha çok guar ve ksantan gum üzerine araştırmalarını yoğunlaştırdığı görülmektedir. Farklı zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde GG (Kumar vd., 2023; Sulaiman vd., 2022; Bagriacik vd., 2021; Bozyigit vd., 2021; Vydehi & Moghal, 2021; Soldo vd., 2020), ksantan gum (Hamza vd., 2023; Kumar vd., 2023; Oliveira & Reis, 2023; Berkane vd., 2022; ; Lee vd., 2022; Sulaiman vd., 2022; Zhang vd., 2022; Reddy & Varaprasad, 2021; Sujatha vd., 2021; Singh & Das, 2020; Soldo vd., 2020; Dehghan vd., 2019; Lee vd., 2019), karajenan (Fatehi vd., 2024; Ni vd., 2022), kazein (Ni vd., 2022), sodyum aljinat (Bagherinia, 2024; Ahn vd., 2021; Soldo vd., 2020), Beta 1,3/1,6 glukan (Chang & Cho, 2012), kitosan (Hataf vd., 2018), agar (Smitha & Rangaswamy, 2020; Smitha & Sachan, 2016) ve lignin (Zhang vd., 2015) gibi biyopolimerlerin oldukça etkili olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalar, genel olarak farklı zemin türlerinin mekanik özelliklerinin ve durabilitesinin artırılması, biyo-tıkanma yoluyla zemin geçirgenliğinin, sıkışabilirliğinin ve toprak erozyonunun önemli ölçüde azaltılması konusunda biyopolimer işleminin umut verici potansiyelini vurgulamaktadır. Zeminlerin stabilizasyonunda biyopolimer teknolojisini kullanmanın

detaylarının daha iyi anlaşılması için farklı zeminler ile biyopolimerin etkileşimleri ve bu etkileşimlerin doğal zeminlerin geoteknik özellikleri üzerinde meydana getireceği değişikliklerin detaylı bir şekilde araştırılması gerekmektedir. Hem bu amaca hizmet edebilmek hem de puzolanik reaksiyon ve biyopolimer hidrasyonu gibi farklı iki mekanizmanın etkilerinden faydalanabilmek için bu çalışmada uçucu kül ve GG ilavesinin yüksek plastisiteli bir kil zeminin mukavemeti üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Deneysel tasarım sürecine ait plan Taguchi yönteminden faydalanarak oluşturulmuştur. Bu plana bağlı olarak hazırlanan iyileştirilmiş ve doğal zemin numuneleri serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar sadece uçucu kül ve sadece kireç içeren numunelere ait mukavemet değerleri ile karşılaştırılmıştır.

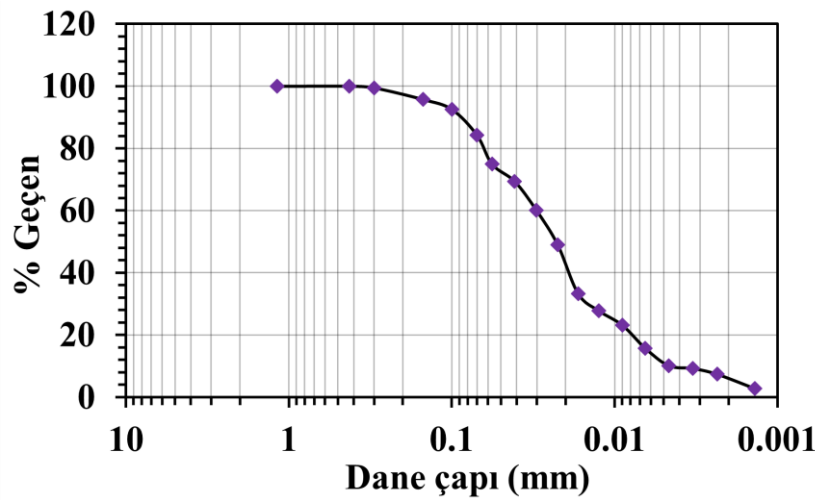
## MATERYAL VE YÖNTEM

### Test Edilen Zeminin Geoteknik Özellikleri

Deneylerde kullanılan zemin örneği Samsun ilinin Atakum ilçesinden alınmıştır. Alınan numune laboratuvar ortamında yere serilerek oda sıcaklığında kurutulmuş ve yapılacak deneyler için gerekli miktarlar, çeyrekleme yöntemi (TS 1900-1) kullanılarak bu numunedan alınmıştır. Zeminin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla piknometre, kıvam limitleri, elek analizi, hidrometre, standart proktor ve serbest basınç testleri yapılmıştır. Sonuç olarak zemine ait özellikler Tablo 1'de dane çapı dağılımı ise Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Zeminin Geoteknik Özellikleri

Özellik	Değer	Deney Standardı
<b>Kıvam Limitleri</b>		
Likit limit (%)	59,97	ASTM (2000)
Plastik limit (%)	27,20	
Plastisite indisi (%)	32,77	
<b>Kompaksiyon Karakteristikleri</b>		
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	1,455	ASTM (2007a)
Optimum su içeriği (%)	24	
#200 nolu elekten geçen yüzde (%)	86	ASTM (2007b)
Özgül Gravite	2,65	ASTM (2002)



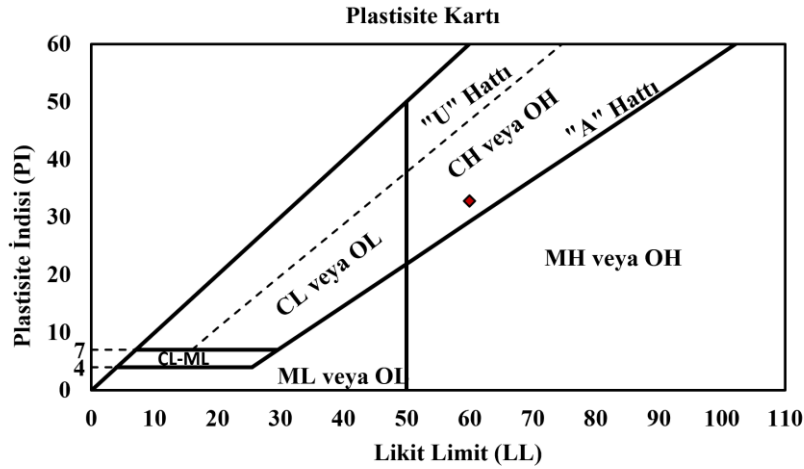
Şekil 1. Kil Zeminin Granülometri Eğrisi

Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre mevcut zemin, düşük plastisiteli inorganik killi zemin olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 2).

### Uçucu Kül

Uçucu kül, termik santrallerde toz kömürün yakılması sırasında baca gazlarındaki taneciklerin elektrostatik veya elektromekanik teknikler ile tutulmasıyla elde edilen bir küldür. Yakılan kömürün kaynağına ve mineralojik bileşimine, kömürün pulverizasyon derecesine, fırının türü ve oksidasyon koşullarına ve kullanımdan önce uçucu külün toplanması, yönetimi ve depolanmasına bağlı olarak, uçucu kül bileşenleri önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir (Ahmad vd., 2024; De Belie vd., 2018). Ancak genel olarak uçucu küller önemli miktarlarda silisyum

dioksit ( $\text{SiO}_2$ ), alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) içerir. Özet olarak uçucu kül esas olarak termik santrallerde kömürün yakılması neticesinde ortaya çıkan puzolanik, kristal olmayan, hafif çimentolu ve bertaraf edilmezse çevreye ve insan sağlığına zararları olan katı bir atık malzemedir.



Şekil 2. Kil Zeminin Plastisite Kartındaki Yeri

### Uçucu Kül

Uçucu kül, termik santrallerde toz kömürün yakılması sırasında baca gazlarındaki taneciklerin elektrostatik veya elektromekanik teknikler ile tutulmasıyla elde edilen bir küldür. Yakılan kömürün kaynağına ve mineralojik bileşimine, kömürün pulverizasyon derecesine, fırının türü ve oksidasyon koşullarına ve kullanımdan önce uçucu külün toplanması, yönetimi ve depolanmasına bağlı olarak, uçucu kül bileşenleri önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir (Ahmad vd., 2024; De Belie vd., 2018). Ancak genel olarak uçucu kül esas olarak termik santrallerde kömürün yakılması neticesinde ortaya çıkan puzolanik, kristal olmayan, hafif çimentolu ve bertaraf edilmezse çevreye ve insan sağlığına zararları olan katı bir atık malzemedir.

### Uçucu külün sınıflandırılması ve geoteknik özellikleri

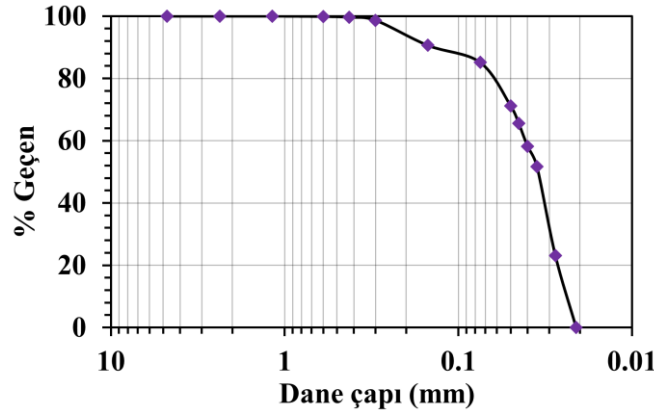
ASTM (2003) oksit bileşenlerinin yüzdelere göre küllü F ve C olmak üzere iki farklı sınıfa ayırmaktadır. Uçucu kül içerisindeki  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oksitlerinin toplam yüzdesi 70'ten fazla ise uçucu kül, antrasit veya bitümlü kömürden üretilen F sınıfına girmektedir. Bu sınıfa mensup küllerde %10'dan daha düşük CaO bulunduğu için düşük kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. Ayrıca F sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptirler.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oksitlerinin toplam yüzdesi minimum %50 olan küller ise linyit veya alt bitümlü kömürden üretilen C sınıfı uçucu kül olarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıf küller %10'dan daha fazla CaO içerebilir. C sınıfı uçucu küller puzolanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptir.

X-Ray Diffraction (XRD) spektrometresi; minerallerin, kayaların, çökeltilerin, polimerlerin ve sıvıların tahribatsız kimyasal analizi için kullanılan, dalga boyu dağılım spektroskopisinin prensiplerine göre çalışan bir cihazdır. Uçucu külün kimyasal analizi neticesinde belirlenen oksit bileşenleri Tablo 2'de gösterilmektedir. Buna göre  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oksitlerinin toplam yüzdesi %83,3>%70 olduğundan uçucu kül F tipi olarak sınıflandırılmıştır.

Tablo 2. Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri

	$\text{SiO}_2$ (%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{MgO}$ (%)	$\text{CaO}$ (%)	$\text{K}_2\text{O}$ (%)	$\text{SO}_3$ (%)	$\text{TiO}_2$ (%)	$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	$\text{NiO}$ (%)	$\text{BaO}$ (%)	$\text{P}_2\text{O}_5$ (%)	$\text{MnO}$ (%)	$\text{Cr}_2\text{O}_3$ (%)
Uçucu kül	78,8	2,7	1,8	0,9	4,4	1,3	0,9	2,2	3,0	0,3	1,6	0,4	0,6	1,1

Uçucu külün granülometrisinin tayini için #200 nolu elekte yıkama yapılmıştır. #200 nolu eleğin üzerinde kalan malzeme ASTM (2007b) standardına uygun olarak elek analizine, altında kalan ise hidrometre analizine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak uçucu küle ait dane çapı dağılım eğrisi Şekil 3'te gösterilmiştir. Külün özgül gravite değerinin tayini için ASTM (2002) Metot B'ye göre piknometre deneyi yürütülmüş olup uçucu külün özgül gravite değeri 2,28 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Uçucu küle Ait Dane Çapı Dağılım Eğrisi

### Guar Sakızı (Guar Gum)

Guar sakızı veya guaran, botanik adı *Cyamopsis tetragonolobus* olan baklagiller familyasına ait bir bitki olan guar fasulyesinin tohumundan üretilen bir biyopolimerdir. Guar sakızı (GG), 1:2 oranında D-galaktoz ve D-mannoz şekerlerini içeren bir polisakarittir. (Chudzikowski, 1971) GG iyonik olmayan, geniş pH aralığına sahip (1,0-10,5), suda çözünebilir bir hidro-kolloidaldır (Ayeldeen vd., 2017; Mudgil vd., 2014). Hidrasyon ile GG, tiksotropik olan viskoz kolloidal dispersiyonlar oluşturmaktadır. GG, hidrate olduktan sonra jel benzeri kohezif yapıların oluşumuna neden olan borat iyonları içermektedir (Hamza vd., 2023; Eldaw, 1998). Bu jelimsi kohezif viskoz yapılar zemin danelerinin etrafını sararak onların adezyonunu arttırmaktadır. Ayrıca zemin ile GG arasında meydana gelen hidrojen bağları, zemin-GG matrisinin mukavemet kazanımına katkıda bulunmaktadır (Sujatha vd., 2020). Diğer biyopolimerlere nispeten daha fazla galaktoz dallanma noktasına ve çözünürlüğe sahip olması onu daha iyi bir stabilizör malzemesi yapmaktadır (Risica vd., 2005). Diğer biyopolimerlere nispeten daha ekonomik olan GG; %40,83 K<sub>2</sub>O, %16,26 CaO, %10,24 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %7,03 SO<sub>3</sub>, %5,84 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, %4,5 PbO, %4,25 Cl, %3,18 MgO, %2,39 CuO, %1,62 SiO<sub>2</sub> ve %3,86 diğer oksitler içermektedir (Sujatha & Saisree, 2019). Bu nedenle bu çalışmada biyopolimer materyal olarak GG malzemesi seçilmiştir.

### Taguchi Yöntemi

Taguchi (1987) tarafından geliştirilen Taguchi yöntemi, deneysel tasarımların performans kalitesi ve maliyet açısından optimizasyonu için basit, etkili ve sistematik bir yaklaşım sağlayan en yaygın Deney Tasarımı (DOE) analiz yöntemlerinden biridir. Taguchi deneysel tasarım yöntemini kullanmanın temel avantajı gerçekleştirilecek simülasyon sayısını azaltarak deneysel çabadan büyük oranda tasarruf sağlamaktır. Taguchi, her bir bağımsız faktörü veya bunların süreç özellikleri üzerindeki etkileşim etkilerini değerlendirmek için standart ortogonal diziler kullanır. Daha sonra deneysel değer ile istenen değer arasındaki sapmaları hesaplamak için bir kayıp fonksiyonu tanımlanır. Bu kayıp fonksiyonu ayrıca sinyal-gürültü (S/N) oranına aktarılır. Karakteristik türüne bağlı olarak genellikle üç S/N oranı mevcut olup her bir duruma karşılık gelen formülleri Eşitlik 1-3'te verilmiştir (Keleştemur vd., 2014).

1-) Daha düşük daha iyi,

$$S / N = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (1)$$

2-) Daha yüksek daha iyi

$$S / N = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (2)$$

3-) Nominal daha iyi

$$S / N = 10 \log \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (3)$$



Yukarıdaki eşitliklerde  $n$ ,  $Y_i$ ,  $\sigma^2$ , ve  $\mu^2$  değerleri sırasıyla faktör düzeyi kombinasyonundaki yanıt sayısı, verilen faktör düzeyi kombinasyonuna ait yanıtları, tekrarlanan yanıt değerlerinin gözlemlerinin varyansını ve ortalamasının karesini temsil etmektedir.

Taguchi deney tasarımı aşamaları Şekil 4'te özetlenmiştir.



Şekil 4. Taguchi Deney Tasarım Aşamaları

Geoteknik literatürü incelendiğinde deneysel süreçlerin daha az emek ve maliyetle yürütülebilmesi ve deney parametrelerinin optimizasyonu amacıyla son zamanlarda Taguchi tekniğinden çokça faydalandığı görülmektedir. Abd Elaty vd. (2023), düşük geçirgenliğe ve yeterli mukavemete sahip bir bentonit-çimento harcı üretmek için bentonit, çimento tozu, kül, kireç ve polipropilen elyaf gibi farklı malzemelerin kullanımını Taguchi yöntemiyle incelemişlerdir. Ackah vd. (2022), Taguchi deney tasarım yöntemini kullanarak siltli bir kil zeminin serbest basınç dayanımı üzerine kireç, kuru yoğunluk ve su muhtevasının etkilerini araştırmışlardır. Hamed and Demiröz (2024), uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu esaslı geopolimerin yüksek plastisiteli killi zeminlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek amacıyla Taguchi Yöntemini kullanarak deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Ramezani vd. (2023), kötü derecelenmiş bir kum zeminin mekanik özelliklerindeki iyileşmeler açısından şeker kamışı küspesi külü, cam tozu ve silis dumanı bazlı geopolimerlerin miktarlarının optimize edilmesinde Taguchi yönteminden istifade etmişlerdir. Khaleghi and Heidarvand (2023), farklı kütleme ve başlangıç koşulları altında salep biyopolimeri ile stabilize edilmiş çöl kumunun tek eksenli mukavemetini Taguchi metodolojisini kullanarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, Tablo 3'te gösterildiği gibi üç seviyeye sahip üç faktörün (uçucu kül miktarı, biyopolimer dozajı ve kür süresi) zeminin serbest basınç dayanımı (SBD) üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bahsi geçen deney planında tam faktöriyel tasarım uygulanmak istenilirse mümkün olan tüm kombinasyonların tasarıma dahil edilmesi gerektiğinden 27 ( $3 \times 3 \times 3$ ) adet deney yapılması gerekmektedir. Deney sayısını azaltarak zaman, iş gücü ve maliyetten tasarruf edebilmek için yalnızca 9 adet deney noktası veren  $L_9$  ( $3 \times 3$ ) ortogonal dizisi benimsenerek kesirli faktöriyel tasarım uygulanmıştır. Mevcut çalışmada maksimum SBD değerini veren karışım oranının belirlenmesi amaçlandığından daha yüksek-daha iyi için S/N değerleri dikkate alınmıştır. Seçilen ortogonal diziyeye ait deney tasarım planı Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Deney Tasarımında Kullanılan Faktörler ve Seviyeleri

Faktör	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Uçucu kül miktarı	%	5	10	20
GG dozajı	%	1	2	4
Kür süresi	gün	0	7	14

### Numunelerin Hazırlanması

Biyopolimerle stabilize edilmiş karışımların hazırlanmasında iki tür karıştırma yöntemi kullanılmaktadır; ıslak karıştırma, kuru karıştırma. Islak karıştırma yönteminde karışımda kullanılacak biyopolimer yüzdesi ve karışımın su muhtevasına göre biyopolimer konsantrasyonu belirlenmekte ve ilk olarak bu konsantrasyona göre toz halindeki

biyopolimer suda çözülerek jel haline getirilmektedir. Jel haline getirilen biyopolimer genellikle kuru zemin ile karıştırılarak biyopolimer içeren karışımlar hazırlanmaktadır. Bazı araştırmacılar (Sujatha vd., 2020; Sujatha & Saisree, 2019) bu jeli, hidrate olabilmesi için 24 saat hava almayacak şekilde kapalı bir yerde bekletmiş ve daha sonra kuru zemin ile karıştırarak karışımlarını hazırlamışlardır. Kuru karıştırma yönteminde ise ilk olarak toz haldeki biyopolimer ile kuru zemin, biyopolimer zemin içerisinde eşit bir şekilde dağıtılana kadar karıştırılmaktadır. Daha sonra bu karışıma ilgili su muhtevası eklenerek biyopolimer-zemin karışımı hazırlanmaktadır. Islak karıştırma yönteminde, eklenen biyopolimer miktarının çözünürlük noktasından fazla olması durumunda biyopolimer çözeltisinin viskozitesi önemli ölçüde artmaktadır. Bu durum, işlenebilirliğin zayıf olmasına ve büyük ölçekli işler için karıştırma işleminin zorlaşmasına yol açmaktadır (Chang vd., 2015; Nugent vd., 2009). Bu nedenle özellikle arazi uygulamaları gibi büyük ölçekli işlerde kuru karıştırma yönteminin kullanılması daha uygun olacaktır (Vydehi & Moghal, 2021). Bu çalışmada biyopolimer ile zemin malzemesi kuru bir şekilde karıştırılmıştır. Uçucu kül-zemin karışımları ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde ilk olarak kuru kül ile kuru zeminin karıştırıldığı ve daha sonra bu karışıma suyun ilave edildiği görülmüştür. Yukarıda bahsi geçen literatür bilgileri ışığında ve deneme-yanılma deneyleri neticesinde numune hazırlama aşaması için tercih edilen ve uygulanan prosedür şu şekildedir. Etüvden çıkartılan zemin soğuduktan sonra sırasıyla %95 rölatif kompaksiyona karşılık gelen düşük su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerlerine göre kuru zemin ve su miktarları tartılmıştır. Tablo 2'deki deney planına göre kuru kil zeminin bir yüzdesi olarak toz halindeki biyopolimer ve uçucu kül miktarı tartılmıştır. İlk olarak kuru zemin ile uçucu kül karıştırılmış, daha sonra bu karışıma toz halindeki biyopolimer eklenmiştir. Zemin+biyopolimer+kül karışımına ilgili su miktarı ilave edilerek homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Karışım içerisindeki suyun eşit bir şekilde dağılabilmesi için zemin+biyopolimer+kül+su karışımı kapalı bir kutuda kilitli poşet içerisinde 18 saat bekletilmiştir. Nihai olarak bu karışım ayrılabilir silindir bir kalıp içerisinde statik olarak sıkıştırılarak 5 cm çap ve 10 cm yüksekliğe sahip silindir numuneler üretilmiştir.

**Tablo 4.** Taguchi L9 Ortogonal Dizi

Deney kodu	Uçucu kül miktarı (%)	GG Dozajı (%)	Kür süresi (gün)
1	5	1	0
2	5	2	7
3	5	4	14
4	10	1	7
5	10	2	14
6	10	4	0
7	20	1	14
8	20	2	0
9	20	4	7

Uçucu kül+biyopolimer hibrit karışımının zeminin mukavemeti üzerine etkisini yorumlayabilmek adına zeminin kuru ağırlığının %10'una eşdeğer miktarda sadece uçucu kül içeren numuneler de yukarıdaki prosedüre uygun olarak hazırlanmış ve 0, 7 ve 14 gün küre tabi tutulmuştur. Ayrıca geleneksel stabilizasyon malzemelerinden biri olan kireç ile stabilize edilmiş numuneler ile uçucu kül+biyopolimer içeren numunelerde meydana gelen mukavemet artışlarını karşılaştırabilmek amacıyla kireç içeren numuneler de hazırlanmıştır. Literatürde kireç ile stabilizasyonunda genellikle zeminin kuru ağırlığının maksimum %10'una eşdeğer miktarda kireç kullanılmış ve genellikle %4-6 oranında kirecin optimum mukavemet sağladığı tespit edilmiştir (Boz vd., 2018; Bell, 1996). Bu nedenle kireç ile stabilize edilen numunelerde ağırlıkça %6 dozajında sönmüş kireç kullanılmıştır. Bu amaç için ilk olarak etüvden çıkan ve soğumuş kuru zemine %6 dozajında kireç kuru olarak ilave edilmiş ve hazırlanan karışıma %95 rölatif kompaksiyona karşılık gelen düşük su muhtevası değerinde su eklenmiştir. Kireç+zemin+su karışımı da kilitli poşetler içerisinde 18 saat bekletildikten sonra mevcut karışım proktor enerjisinde sıkıştırılarak 5 cm çapa ve 10 cm yüksekliğe sahip silindir numuneler hazırlanmış ve 0, 7 ve 14 gün küre tabi tutulmuştur.

### **Serbest Basınç Deneyi**

Hazırlanan numuneler Taguchi deney tasarımı yönteminin sunduğu deney programına uygun olarak kontrollü küre (20°C oda sıcaklığı ve >%99 rölatif nem) tabi tutulmuştur. Hem iyileştirilmiş hem de doğal zemin üzerinde ASTM (2006) standardına göre serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Serbest basınç deneyleri 1 mm/dak eksenel şekil değiştirme hızında göçme meydana gelene kadar yürütülmüştür.

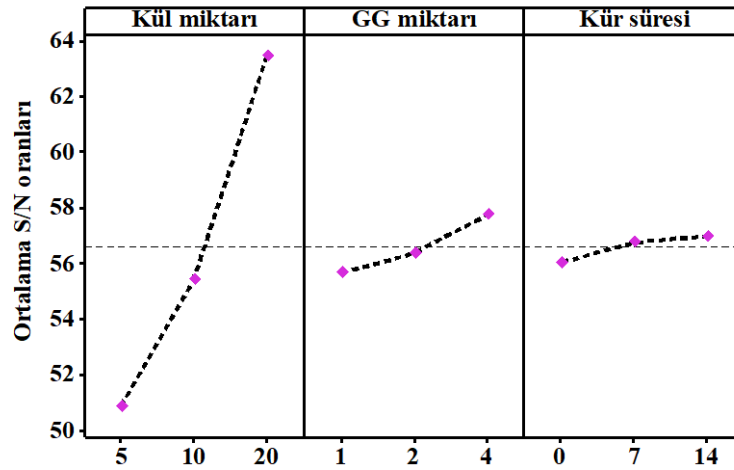
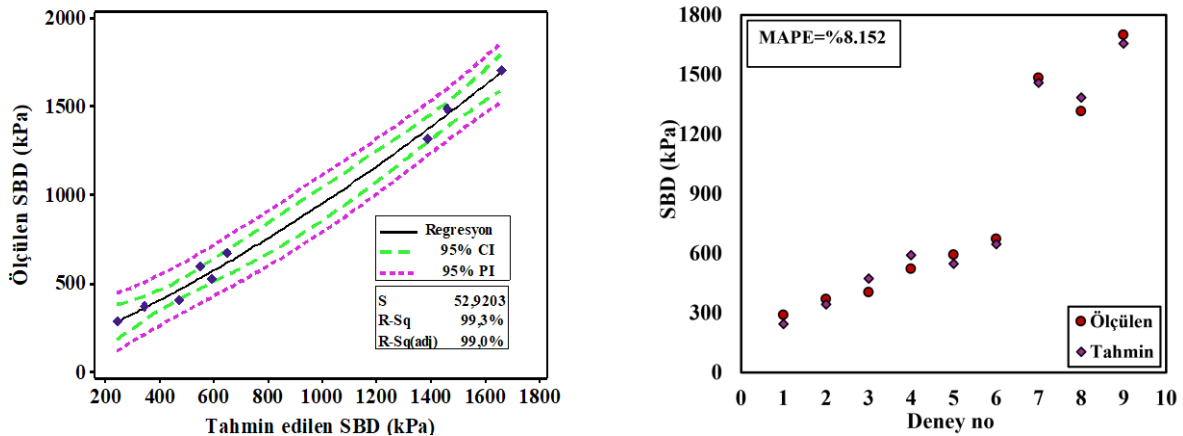
**BULGULAR VE TARTIŞMA****Taguchi deney sonuçları**

Tablo 4'teki ortogonal diziyeye göre yürütülen deneyler neticesinde belirlenen SBD değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 5. Deney Sonuçları**

Deney no	Uçucu kül miktarı (%)	GG Dozajı (%)	Kür süresi (gün)	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)
1	5	1	0	288,516
2	5	2	7	368,849
3	5	4	14	403,254
4	10	1	7	521,996
5	10	2	14	591,983
6	10	4	0	671,826
7	20	1	14	1483,769
8	20	2	0	1315,315
9	20	4	7	1700,182

Taguchi analizlerinde en yüksek SBD değerinin elde edildiği karışım oranlarının belirlenmesi amaçlandığı için en büyük-en iyi koşulu göre S/N oranları hesaplanmış olup sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiştir. Deneysel olarak ölçülen ve Taguchi tarafından tahmin edilen SBD değerlerinin karşılaştırıldığı grafikler ise Şekil 6'da verilmiştir.

**Şekil 5. S/N Oranları için Ana Etki Grafiği****Şekil 6. Tahminler ile Ölçülen Değerlerin Karşılaştırılması**

Şekil 5 incelendiğinde diğer faktörlere nispeten SBD üzerinde en etkili parametrenin uçucu kül miktarı olduğu görülmüştür. Şekil 5'te her bir faktöre ait grafiğin pik noktaları, en yüksek yanıt değerinin elde edileceği faktör seviyelerini göstermektedir. Buna göre, kül ve GG materyallerinden en yüksek miktarlarında kullanıldığında ve en



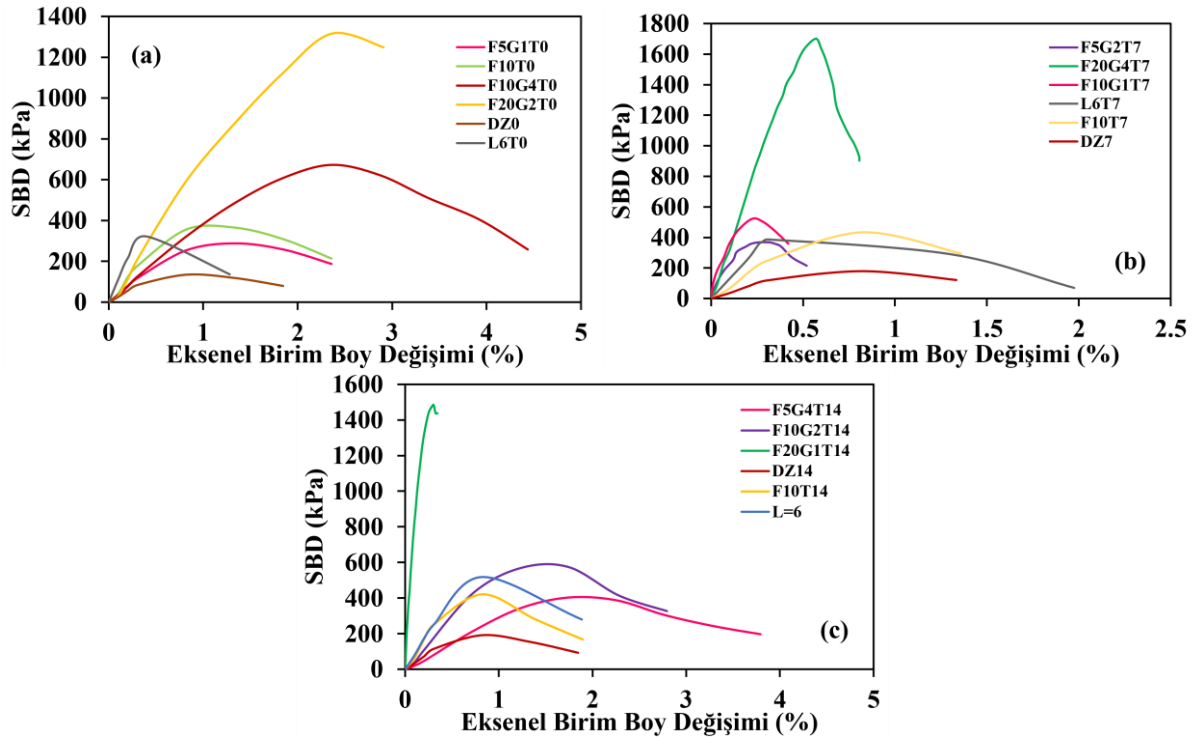
uzun küreleme sağlandığında en yüksek SBD değerinin elde edildiği söylenebilir. Taguchi tarafından tahmin edilen ve deneysel olarak ölçülen SBD değerleri, %95 güven (CI) ve tahmin aralığı (PI) için Şekil 6'da karşılaştırılmıştır. Şekil 6'dan Taguchi tahminlerinin %8,152 büyüklüğünde ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ile ölçülen değerlere oldukça yakın olduğu görülmektedir.

### Gerilme-Şekil Değiştirme Analizi

Bu çalışma kapsamında serbest basınç deneyinde kırılan numunelere Tablo 6'daki sembol isimler verilmiştir. Tablo 4'te verilen Taguchi numunelerine ilave olarak doğal zemin, %6 kireç muhteva eden zemin ve sadece %10 oranında uçucu kül içeren zemin numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 7'de sunulmuştur.

**Tablo 6.** Deney Numunelerinin Sembol İsimleri

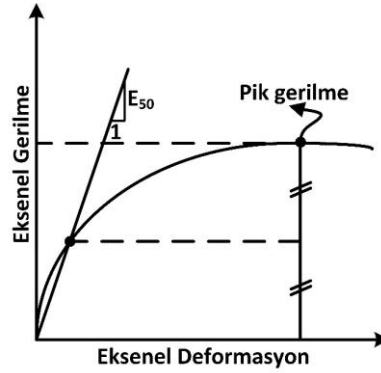
Deney kodu	Deney sembolü	Uçucu kül miktarı (%)	GG Dozajı (%)	Kireç dozajı (%)	Kür Süresi (gün)
1	F5G1T0	5	1	0	0
2	F5G2T7	5	2	0	7
3	F5G4T14	5	4	0	14
4	F10G1T7	10	1	0	7
5	F10G2T14	10	2	0	14
6	F10G4T0	10	4	0	0
7	F20G1T14	20	1	0	14
8	F20G2T0	20	2	0	0
9	F20G4T7	20	4	0	7
10	F10T0	10	0	0	0
11	F10T7	10	0	0	7
12	F10T14	10	0	0	14
13	DZ0	0	0	0	0
14	DZ7	0	0	0	7
15	DZ14	0	0	0	14
16	L6T0	0	0	6	0
17	L6T7	0	0	6	7
18	L6T14	0	0	6	14



**Şekil 7.** a. 0 Gün b. 7 Gün c. 14 Gün Küre Karşılık İyileştirilmiş ve İyileştirilmemiş Zemine Ait Gerilme-Şekil Değiştirme Tepkileri

Tüm numunelere ait gerilme-şekil değiştirme tepkileri, genel olarak kırılmanın %0,22-2,36 şekil değiştirme seviyelerinde meydana geldiğini göstermektedir. İyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş tüm numunelerin genel olarak gevrek kırılma davranışı sergilediği gözlenmiştir (Şekil 7).

Tüm zemin numunelerine ait sekant elastisite modülü ( $E_{50}$ ), pik gerilmenin yarısına eşit olan gerilmenin gerilme-şekil değiştirme eğrisini kestiği nokta ile orijinden geçen doğrunun eğimi olarak hesaplanmıştır (Şekil 8).

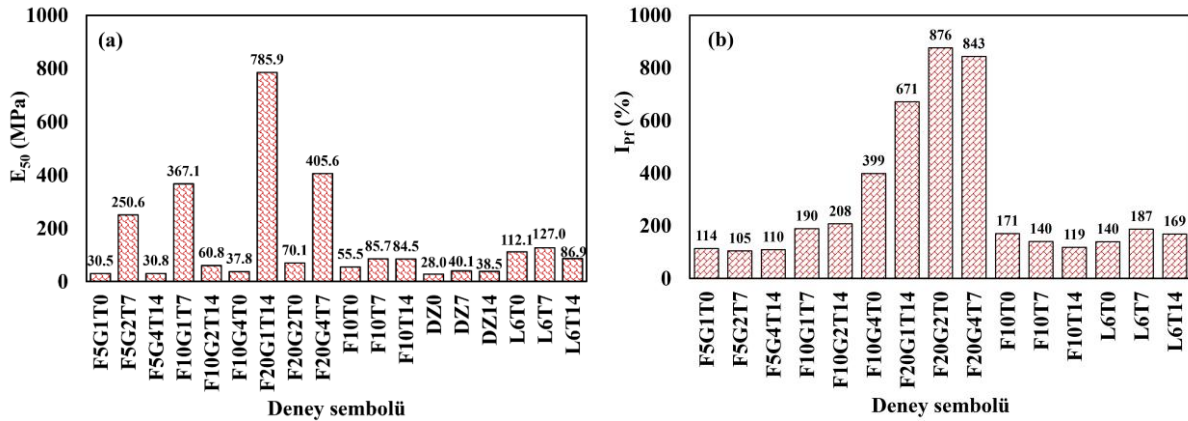


Şekil 8. Sekant Elastisite Modülü ( $E_{50}$ ) Hesabı (Lee vd., 2022)

Serbest basınç dayanımında meydana gelen iyileşme faktörü ( $I_{Pf}$ ) Eşitlik 4 ile hesaplanmıştır:

$$I_{Pf} = \frac{SBD_i - SBD_d}{SBD_d} * 100 \quad (4)$$

Burada  $SBD_i$  ve  $SBD_d$  sırasıyla iyileştirilmiş ve doğal zemin numunesinin serbest basınç dayanımını temsil etmektedir. Bahsi geçen bu prosedürlere göre hesaplanan  $E_{50}$  ve  $I_{Pf}$  değerleri Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. İyileştirilmiş ve İyileştirilmemiş Zemine Ait a. Sekant Elastisite Modülü b.  $I_{Pf}$  Değerleri

14 gün kür süresi sonunda doğal zeminin 38,5 MPa olan sekant elastisite modülü, uçucu kül+biyopolimer ilavesi ile yaklaşık 20,4 kat artarak F20G1T14 numunesinde 785,9 MPa seviyesine ulaşmıştır (Şekil 9a). En yüksek SBD değerine sahip F20G4T7 numunesi için  $E_{50}$  değeri, doğal zemininkine nispeten 10,13 kat artarak 405,6 MPa değerini almıştır. Bahsi geçen F20G1T14 ve F20G4T7 numunelerinde kireç ile stabilize edilmiş numunelere nispeten  $E_{50}$  değerleri 9,04 ve 3,19 kat artmıştır. Sadece %10 miktarında uçucu kül içeren numunelere göre ise bu artışlar sırasıyla 9,30 ve 4,74 kat mertebesinde meydana gelmiştir. SBD değerinde meydana gelen iyileşmeler incelendiğinde (Şekil 9b), doğal zemin numunelerine nispeten F20G2T0, F20G4T7 ve F20G1T14 numunelerinde sırasıyla %876, %843 ve %671 oranlarında en yüksek iyileşmelerin meydana geldiği görülmektedir (Şekil 9b). Şekil 5'te Taguchi analizleri neticesinde üretilen S/N oranlarına göre SBD üzerinde GG ilavesi ile kür süresinin etkilerinin zayıf olduğu sonucu elde edilmişti. Ancak Şekil 9b'den görüldüğü üzere, sadece uçucu kül içeren F10T0, F10T7 ve F10T14 numunelerine göre uçucu kül+GG içeren F10G4T0, F10G1T7 ve F10G2T14 numunelerinde mukavemet dikkate değer bir biçimde artmıştır. F10G4T0, F10G1T7 ve F10G2T14 numunelerinde SBD değerleri F10T0, F10T7 ve F10T14 numunelerine göre sırasıyla 1,84; 1,20 ve 1,41 kat daha yüksek çıkmıştır. Bu nedenle GG ilavesinin SBD üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. En yüksek SBD değerlerine sahip F20G2T0, F20G4T7 ve F20G1T14

numunelerinde kireç içeren L6T0, L6T7 ve L6T14 numunelerine nispeten ise sırasıyla 4,07; 4,40 ve 2,86 kat daha yüksek SBD değerleri elde edilmiştir. Tüm bu sonuçlara dayanarak kil zemin içerisine belirli bir miktarda uçucu kül+GG ilave edilmesi ile doğal zeminin mukavemet özelliklerinin önemli miktarda iyileştirildiği sonucuna varılmaktadır.

Uçucu kül içeren zeminlerde stabilizasyon mekanizması genel olarak katyon değişimi, flokülasyon, puzolanik reaksiyon ve karbon sementasyonu yoluyla gerçekleşmektedir. Uçucu külle stabilize edilmiş zeminlerin mikro yapıları ve kimyasal süreçlerinin incelendiği araştırmalar (Saride & Dutta, 2016; Sharma vd., 2012; Akbulut & Arasan, 2010; Nalbantoğlu, 2004; Nalbantoglu & Gucbilmez, 2001) puzolanik reaksiyonun diğer mekanizmalardan daha etkili olduğunu göstermektedir. Zemin suyu ile GG'nin hidrasyonu neticesinde meydana gelen üç boyutlu jelimsi ağ yapısı zemin danelerini birbirine bağlayarak dengeleyici bir etki yaratmakta (Kumar vd., 2023) ve bu durum puzolanik reaksiyonlar neticesinde oluşan mukavemet sağlayıcı yapıların iyileştirme potansiyelini daha da arttırmaktadır. Hem uçucu kül hem de GG malzemelerini birlikte içeren numunelerde sadece uçucu kül ile stabilize edilmiş olanlara nispeten mukavemet artışlarının oldukça yüksek olması, GG'nin bahsi geçen bu potansiyelini desteklemektedir (Şekil 9b). Sonuç olarak yüksek plastisiteli bir kil zeminin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde uçucu kül ve GG'yi birlikte kullanmanın, geleneksel stabilizasyon malzemeleri olan kireç ve uçucu külü bireysel olarak kullanmaktan daha verimli olduğu görülmektedir.

## SONUÇLAR

Bu çalışmada yüksek plastisiteli bir kil zemin içerisine farklı miktarlarda uçucu kül ve GG materyallerinin birlikte katılması neticesinde SBD değerinde meydana gelen değişim araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar uçucu kül ve kirecin bireysel etkileri ile karşılaştırılmıştır. Deney planının oluşturulmasında Taguchi yönteminden faydalanılmıştır. Bu çalışmadan çıkarılan ana sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1-) Gevrek kırılma davranışı sergileyen doğal zemine uçucu kül ve GG eklemenin kırılma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.

2-) Kil zemin içerisine çok küçük miktarlarda da olsa uçucu kül ve GG eklenmesi neticesinde doğal zeminin mukavemetinde dikkate değer miktarda artışlar elde edilmiştir. Uçucu kül+GG ile stabilize edilmiş numunelerin doğal zemine nispeten erken dayanım özelliklerinin dahi önemli miktarda iyileştiği, yüksek miktarda uçucu kül ve GG içeren numunelerde (F20G2T0, F20G4T7 ve F20G1T14) kür süresinin de artması ile mukavemette 6,5 kata varan artışlara ulaşıldığı görülmüştür. Sadece kireç içeren numunelere kıyasla bu numunelerde (F20G2T0, F20G4T7 ve F20G1T14) meydana gelen mukavemet artışları 2,88-4,4 kat mertebelerindedir.

3-) Taguchi deney tasarımı ile iş gücü, zaman ve maliyetten tasarruf edilerek deney süreci tamamlanmış ve %95 güven aralığı içerisinde kalacak şekilde ortalama %8,152 hata ile başarılı tahminler üretilmiştir. Taguchi yöntemi SBD üzerinde en etkili parametrenin uçucu kül olduğunu, GG ve kür süresinin etkilerinin az olduğunu göstermektedir. Ancak sadece %10 oranında uçucu kül içeren numunelerin SBD değerleri, içlerine GG da ilave edilmesiyle ortalama 1,5 kat artmıştır. Bu da GG'nin SBD üzerindeki etkisinin anlamlı olduğunu somut olarak göstermektedir.

4-) Kil zemin içerisine uçucu kül+GG ilave edilmesiyle doğal zeminin sekant elastisite modülü yaklaşık 20,4 kat artarak en yüksek değeri olan 785,9 MPa seviyesine ulaşmıştır. En yüksek sekant elastisite modülüne sahip bu numune, sadece %10 miktarında uçucu kül ve sadece %6 oranında kireç içeren numunelerin sekant elastisite modülüne nispeten yaklaşık olarak 9 kat daha yüksektir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından onaylanan "Poliüretan Stabilizatör ile Temel Dolgusunun Geliştirilmesi ve Saha Uygulamasının Yapılması" isimli Ar-Ge projesi kapsamında desteklenmektedir. Yazarlar bu destek için EPDK'ya teşekkür etmektedir.

## KAYNAKLAR

Abd Elaty, M. A. A., Azzam, W. R., & Eldesoky, A. G. (2023). Properties of cement–bentonite mortar developed by mineral additives for primary firm secant pile by Taguchi method. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(10), 259.

- Ackah, F. S., Hailiang, W., Huaiping, F., Cheng, L., & Feng, L. Z. (2022). Use of Taguchi method to evaluate the unconfined compressive strength of quicklime stabilized silty clayey subgrade. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01417.
- Ahmad, S., Shah Alam Ghazi, M., Syed, M., & Al-Osta, M. A. (2024). Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review. *Results in Engineering*, 22, 102079. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.102079>
- Ahn, S., Ryou, J.-E., Ahn, K., Lee, C., Lee, J.-D., Jung, J., ... Kopel, P. (2021). Evaluation of Dynamic Properties of Sodium-Alginate-Reinforced Soil Using A Resonant-Column Test. *Materials*, 14(11), 2743. <https://doi.org/10.3390/MA14112743>
- Akbulut, S., & Arasan, S. (2010). The Variations of Cation Exchange Capacity, pH, and Zeta Potential in Expansive Soils Treated by Additives. *Internatioanl Journal of Civil and Structural Engineering*, 1(2), 139–154.
- ASTM C 618-03, 2003. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM, United States.
- ASTM D 2166-06, 2006. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM, United States.
- ASTM D 422-63, 2007b. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM, United States.
- ASTM D 4318, 2000. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM, United States.
- ASTM D 698-07, 2007a. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM, United States.
- ASTM D 854-02, 2002. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM, United States.
- Ayeldeen, M., Negm, A., El-Sawwaf, M., & Kitazume, M. (2017). Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(2), 329–339. <https://doi.org/10.1016/J.JRMGE.2016.11.007>
- Bagherinia, M. (2024). Mechanical, durability, and microstructure of soft clay stabilised with anionic biopolymer. *Construction and Building Materials*, 417, 135343. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.135343>
- Bagriacik, B., Ok, B., & Kahiyah, M. T. M. A. (2021). An experimental study on improvement of cohesive soil with eco-friendly guar gum. *Soils and Rocks*, 44(2), e2021060020. <https://doi.org/10.28927/SR.2021.060020>
- Bakare, M. D., Pai, R. R., Patel, S., & Shahu, J. T. (2019). Environmental Sustainability by Bulk Utilization of Fly Ash and GBFS as Road Subbase Materials. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 23(4), 04019011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000450](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000450)
- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4), 223–237. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- Berkane, H. A., Della, N., Benziane, M. M., Denine, S., Elroul, A. B., & Feknous, H. (2022). Laboratory investigation on the effect of a combination of xanthan gum and clay on the behavior of sandy soil. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(4), 1–12. <https://doi.org/10.1007/S41062-022-00867-Z/FIGURES/13>
- Blissett, R. S., & Rowson, N. A. (2012). A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel*, 97, 1–23. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2012.03.024>
- Boz, A., Sezer, A., Özdemir, T., Hızal, G. E., & Azdeniz Dolmacı, Ö. (2018). Mechanical properties of lime-treated clay reinforced with different types of randomly distributed fibers. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(6), 1–14. <https://doi.org/10.1007/S12517-018-3458-X/FIGURES/15>
- Bozyigit, I., Javadi, A., & Altun, S. (2021). Strength properties of xanthan gum and guar gum treated kaolin at different water contents. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(5), 1160–1172. <https://doi.org/10.1016/J.JRMGE.2021.06.007>

- Brooks, R., Udoeyo, F. F., & Takkalapelli, K. V. (2010). Geotechnical Properties of Problem Soils Stabilized with Fly Ash and Limestone Dust in Philadelphia. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(5), 711–716. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000214](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000214)
- Chang, I., & Cho, G. C. (2012). Strengthening of Korean residual soil with  $\beta$ -1,3/1,6-glucan biopolymer. *Construction and Building Materials*, 30, 30–35. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.11.030>
- Chang, I., Prasidhi, A. K., Im, J., Shin, H. D., & Cho, G. C. (2015). Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes. *Geoderma*, 253–254, 39–47. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2015.04.006>
- Chudzikowski, J. R. (1971). Guar Gum and its Applications. *Journal of the Society of Cosmetics Chemists*, 22(1), 43.
- De Belie, N., Soutsos, M., & Gruyaert, E. (Eds.). (2018). Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials. 25. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1>
- Degirmenci, N., Okucu, A., & Turabi, A. (2007). Application of phosphogypsum in soil stabilization. *Building and Environment*, 42(9), 3393–3398. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2006.08.010>
- Dehghan, H., Tabarsa, A., Latifi, N., & Bagheri, Y. (2019). Use of xanthan and guar gums in soil strengthening. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(1), 155–165. <https://doi.org/10.1007/S10098-018-1625-0/FIGURES/9>
- Eldaw, G. E. (1998, June 1). A study of guar seed and guar gum properties (Cyamopsis tetragonolabous). Retrieved from [http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig\\_q=RN:31037745](http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:31037745)
- Eliaslankaran, Z., Daud, N. N. N., Yusoff, Z. M., & Rostami, V. (2021). Evaluation of the effects of cement and lime with rice husk ash as an additive on strength behavior of coastal soil. *Materials*, 14(5), 1140.
- Fatehi, H., Ong, D. E. L., Yu, J., & Chang, I. (2024). Sustainable soil treatment: Investigating the efficacy of carrageenan biopolymer on the geotechnical properties of soil. *Construction and Building Materials*, 411, 134627. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.134627>
- Hamed, E., & Demiröz, A. (2024). Optimization of geotechnical characteristics of clayey soils using fly ash and granulated blast furnace slag-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 441, 137488.
- Hamza, M., Nie, Z., Aziz, M., Ijaz, N., Akram, O., Fang, C., ... Madni, M. F. (2023). Geotechnical behavior of high-plastic clays treated with biopolymer: macro–micro-study. *Environmental Earth Sciences*, 82(3), 1–18. <https://doi.org/10.1007/S12665-023-10760-2/TABLES/6>
- Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., & Grine, K. (2011). Use of Natural Pozzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(5), 759–769. <https://doi.org/10.1007/S10706-011-9415-Z/FIGURES/6>
- Hataf, N., Ghadir, P., & Ranjbar, N. (2018). Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1493–1500. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.09.256>
- Kang, X., Kang, G.-C., Chang, K.-T., & Ge, L. (2014). Chemically Stabilized Soft Clays for Road-Base Construction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(7), 04014199. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001156](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001156)
- Keleştemur, O., Yildiz, S., Gökçer, B., & Arici, E. (2014). Statistical analysis for freeze–thaw resistance of cement mortars containing marble dust and glass fiber. *Materials & Design*, 60, 548–555. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2014.04.013>
- Khaleghi, M., & Heidarvand, M. (2023). A novel study on hydro-mechanical characteristics of biopolymer-stabilized dune sand. *Journal of Cleaner Production*, 398, 136518.
- Kim, B., & Prezzi, M. (2008). Evaluation of the mechanical properties of class-F fly ash. *Waste Management*, 28(3), 649–659. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2007.04.006>
- Kumar, M. A., Moghal, A. A. B., Vydehi, K. V., & 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*, 13(9), 2304.



- Lee, M., Kwon, Y. M., Park, D. Y., Chang, I., & Cho, G. C. (2022). Durability and strength degradation of xanthan gum based biopolymer treated soil subjected to severe weathering cycles. *Scientific Reports*, 12(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23823-4>
- Lee, S., Chung, M., Park, H. M., Song, K.-I., & Chang, I. (2019). Xanthan Gum Biopolymer as Soil-Stabilization Binder for Road Construction Using Local Soil in Sri Lanka. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(11), 06019012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002909](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002909)
- Mccarthy, M. J., Csetenyi, L. J., Sachdeva, A., & Jones, R. (2009, May). Role of Fly Ash in the Mitigation of Swelling in Lime Stabilised Sulfate-Bearing Soils. In *World of Coal Ash (WOCA) Conference* (pp. 1–18).
- Mudgil, D., Barak, S., & Khatkar, B. S. (2014). Guar gum: processing, properties and food applications-A Review. *Journal of Food Science and Technology*, 51(3), 409–418. <https://doi.org/10.1007/S13197-011-0522-X>
- Nalbantoğlu, Z. (2004). Effectiveness of Class C fly ash as an expansive soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, 18(6), 377–381. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2004.03.011>
- Nalbantoglu, Z., & Gucbilmez, E. (2001). Improvement of calcareous expansive soils in semi-arid environments. *Journal of Arid Environments*, 47(4), 453–463. <https://doi.org/10.1006/JARE.2000.0726>
- Ni, J., Li, S. S., & Geng, X. Y. (2022). Mechanical and biodeterioration behaviours of a clayey soil strengthened with combined carrageenan and casein. *Acta Geotechnica*, 17(12), 5411–5427. <https://doi.org/10.1007/S11440-022-01588-4/FIGURES/11>
- Nugent, R., Zhang, G., & Gambrell, R. (2009). Effect of Exopolymers on the Liquid Limit of Clays and Its Engineering Implications. *Transportation Research Record*, 2101(1), 34–43. <https://doi.org/10.3141/2101-05>
- Oliveira, P. J. V., & Reis, M. J. F. C. C. (2023). Effect of the Organic Matter Content on the Mechanical Properties of Soils Stabilized with Xanthan Gum. *Applied Sciences*, 13(8), 4787. <https://doi.org/10.3390/APP13084787>
- Parsons, R. L., & Kneebone, E. (2015). Field performance of fly ash stabilised subgrades. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 9(1), 33–38. <https://doi.org/10.1680/GRIM.2005.9.1.33>
- Phanikumar, B. R., & Sharma, R. S. (2007). Volume Change Behavior of Fly Ash-Stabilized Clays. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(1), 67–74. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:1\(67\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:1(67))
- Prabakar, J., Dendorkar, N., & Morchhale, R. K. (2004). Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Construction and Building Materials*, 18(4), 263–267. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2003.11.003>
- Ramezani, S. J., Toufigh, M. M., & Toufigh, V. (2023). Utilization of glass powder and silica fume in sugarcane bagasse ash-based geopolymer for soil stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(4), 04023042.
- Reddy, J. J., & Varaprasad, B. J. S. (2021). Long-term and durability properties of xanthan gum treated dispersive soils – An eco-friendly material. *Materials Today: Proceedings*, 44, 309–314. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.09.472>
- Risica, D., Dentini, M., & 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>
- Saride, S., & Dutta, T. T. (2016). Effect of Fly-Ash Stabilization on Stiffness Modulus Degradation of Expansive Clays. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 04016166. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001678](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001678)
- Sengul, T., Akray, N., & Vitosoglu, Y. (2023). Investigating the effects of stabilization carried out using fly ash and polypropylene fiber on the properties of highway clay soils. *Construction and Building Materials*, 400, 132590. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.132590>
- Senol, A., Edil, T. B., Bin-Shafique, M. S., Acosta, H. A., & Benson, C. H. (2006). Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes. *Resources, Conservation and Recycling*, 46(4), 365–376. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2005.08.005>
- Sezer, A., Inan, G., Yilmaz, H. R., & Ramyar, K. (2006). Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. *Building and Environment*, 41(2), 150–155. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2004.12.009>

- Sharma, N. K., Swain, S. K., & Sahoo, U. C. (2012). Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: A Micro Level Investigation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(5), 1197–1205. <https://doi.org/10.1007/S10706-012-9532-3/FIGURES/8>
- Singh, S. P., & 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>
- Smitha, S., & Rangaswamy, K. (2020). Effect of Biopolymer Treatment on Pore Pressure Response and Dynamic Properties of Silty Sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(8), 04020217. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003285](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003285)
- Smitha, S., & Sachan, A. (2016). Use of agar biopolymer to improve the shear strength behavior of sabarmati sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 10(4), 387–400. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1152674>
- Soldo, A., Miletić, M., & Auad, M. L. (2020). Biopolymers as a sustainable solution for the enhancement of soil mechanical properties. *Scientific Reports*, 10(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57135-x>
- Sujatha, E. R., Atchaya, S., Sivasaran, A., & Keerdthe, R. S. (2021). Enhancing the geotechnical properties of soil using xanthan gum—an eco-friendly alternative to traditional stabilizers. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(2), 1157–1167. <https://doi.org/10.1007/S10064-020-02010-7/FIGURES/8>
- Sujatha, E. R., & Saisree, S. (2019). Geotechnical behaviour of guar gum-treated soil. *Soils and Foundations*, 59(6), 2155–2166. <https://doi.org/10.1016/J.SANDF.2019.11.012>
- Sujatha, E. R., Sivaraman, S., & Subramani, A. K. (2020). Impact of hydration and gelling properties of guar gum on the mechanism of soil modification. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(23), 1–12. <https://doi.org/10.1007/S12517-020-06258-X/FIGURES/8>
- 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, Parts A/B/C*, 128, 103276. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2022.103276>
- Taguchi, G. (1987). *System of Experimental Design*, Unipub/Kraus, International Publication.
- Tastan, E. O., Edil, T. B., Benson, C. H., & Aydilek, A. H. (2011). Stabilization of Organic Soils with Fly Ash. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(9), 819–833. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000502](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000502)
- Thangaraj, R., & Thenmozhi, R. (2013). Industrial and Environmental Application of High Volume Fly Ash in Concrete Production. *Nature Environment and Pollution Technology*, 12(2), 315.
- TS 1900-1, 2006. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini. TSE, Ankara.
- Vydehi, K. V., & Moghal, A. A. B. (2021). Effect of Biopolymeric Stabilization on the Strength and Compressibility Characteristics of Cohesive Soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(2), 04021428. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004068](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004068)
- Zha, F., Liu, S., Du, Y., & Cui, K. (2008). Behavior of expansive soils stabilized with fly ash. *Natural Hazards*, 47, 509-523.
- Zhang, J., Meng, Z., Jiang, T., Wang, S., Zhao, J., & Zhao, X. (2022). Experimental Study on the Shear Strength of Silt Treated by Xanthan Gum during the Wetting Process. *Applied Sciences*, 12(12), 6053. <https://doi.org/10.3390/APP12126053>
- Zhang, T., Liu, S., Cai, G., & Puppala, A. J. (2015). Experimental investigation of thermal and mechanical properties of lignin treated silt. *Engineering Geology*, 196, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2015.07.003>