



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## İki Farklı Kil Zeminin Stabilizasyonunda Amorf Silika Katkısı Kullanımının Karşılaştırılması

 Ömür ÇİMEN<sup>a,\*</sup>,  Burak DERELİ<sup>b</sup>,  Fatih Şerif COŞAN<sup>c</sup>

<sup>a,\*</sup> İnşaat Müh. Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Tatvan Meslek Yüksekokulu, Bitlis Eren Üniversitesi, Bitlis, TÜRKİYE

<sup>c</sup> Yapı İşl. Ve Tek. Dai. Baş., Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: omurcimen@sdu.edu.tr

DOI : 10.29130/dubited.586366

### ÖZET

Bu çalışmada, inşaat endüstrisinde başta hazır beton imalatlarında, mineral katkı maddelerinde ve yalıtım malzemeleri imalatında yaygın olarak kullanım alanları bulunan amorf silikanın, killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla yüksek plastisiteli Eşen kili ve yüksek plastisiteli Sodyum Bentonit kiline %2 ve %10 oranlarında amorf silika ilave edilerek, kıvam limitleri, standart kompaksiyon, serbest basınç ve sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır. Amorf silikanın iki farklı zemindeki etkisi değerlendirilmiştir. Amorf silikanın yüksek plastisiteli zeminlerde serbest basınç mukavemetini arttırmak için stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilceği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Stabilizasyon, Kil, Bentonit, Amorf Silika

## Comparison of the Use of Amorphous Silica Additive in the Stabilization of Two Different Clay Soils

### ABSTRACT

In this study, the effect of Amorphous Silica, which is widely used in the construction industry, especially in the production of ready-mixed concrete, mineral additives and insulation materials, on improving the engineering properties of clayey soils was investigated. For this purpose, 2% and 10% amorphous silica has added to high plasticity Eşen and Sodium Bentonite clays and then the consistency limits, standard compaction, unconfined pressure and constant volume swelling tests were performed. The effect of amorphous silica on two different soils was evaluated. It has been determined that Amorphous Silica can be used as a stabilizing material to increase the unconfined compressive strength in high plasticity soils.

**Keywords:** Stabilization, Clay, Bentonite, Amorphous Silica

## I. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliği uygulama sahalarda zeminler bazı durumlarda istenilen özelliklerde ve kalitede olmayabilir. Taşıma kapasitesi düşük, şişme ve geçirgenlik özelliği fazla olabilir. Geoteknik mühendisi için uygun çözümlerden biri, yapının temelini zemindeki geoteknik şartlara göre ayarlamak veya zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirmektir. Bunlardan ekonomik olan bazen ikinci seçenek olabilir. Zemin iyileştirme çeşitli araştırmacılarca farklı sınıflandırılmış olsa da uygun olmayan zeminlerin stabilizasyonunda genel olarak; mekanik, hidrolik, fiziksel ve kimyasal olmak üzere başlıca dört tür iyileştirme metodu kullanılır. Bu yöntemler sayesinde zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanır.

Kil zeminlerin stabilizasyonu ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde farklı atık malzemelerin farklı oranlarda kil zemine karıştırılarak mühendislik özelliklerinin değişiminin araştırıldığı görülmüştür. Sevcen [1], yaptığı çalışmada yüksek plastisiteli Ankara kilinin mühendislik özelliklerinin, değişik oranlarda polipropilen fiber ve Çayırhan uçucu külü katkılarıyla nasıl değiştiğini araştırmıştır. Standart kompaksiyon deney bulgularına göre, uçucu kül-kil karışımlarındaki uçucu kül oranı arttıkça karışımın optimum su içeriği azalırken maksimum kuru birim hacim ağırlık artmaktadır. Tek eksenli basınç deneyleri sonucunda, karışımdaki uçucu kül oranı veya kür süresi arttıkça karışımın tek eksenli basınç dayanımının da arttığı belirtilmiştir. Son olarak, fiber tipinin ve fiber boyunun tek eksenli basınç dayanımını etkilediği sonucuna varılmıştır.

Gücek [2], yaptığı çalışmada mermer tozu (MT) ve uçucu külün (UK) kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Numuneler, kil zemin kuru ağırlığına göre mermer tozu (%5, %10 ve %15) ve uçucu kül (%10, %20 ve %30) ile belli oranlarda karıştırılarak elde edilmiştir. Karışımlar, %15 ve %20 su muhtevalarında standart kompaksiyon sıkıştırma enerjisinde hazırlanmıştır. Bu numuneler; eksenel basınç, Kaliforniya taşıma oranı (CBR), şişme, donma-çözülme ve donma-çözülme sonrası eksenel basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre; mermer tozu ve uçucu kül katkısının dayanımı yükselttiği, şişmeyi azalttığı gözlenmiştir. Deney sonuçlarının birçoğuna göre en uygun karışım oranının %10 MT + %20 UK olduğu belirtilmiştir. Mermer tozu ve uçucu külün zemin iyileştirmesinde kullanımı ile atıklar ekonomiye kazandırılırken çevre kirliliği de azaltılmış olacaktır.

Öntürk [3], çalışmasında Seyitömer uçucu külü (UK), yapay granit atığı (polisaj) ve bağlayıcı malzeme olarak da kireç kullanarak, mevcut olan zayıf zeminlerin iyileştirilmesi üzerine etkilerini araştırmıştır. Esas zemin numunesi olarak ele alınan kaolin kiline UK, polisaj ve kireç belirli oranlarda katılarak homojen karışımli numuneler oluşturulmuştur. Hazırlanan yapay numunelere katılan kireç ve uçucu kül miktarı %15 oranında sabit tutularak, %10, %15, ve %20 oranlarında polisaj malzemesi ilave edilerek deneyler yapılmıştır. Yapılan tüm deneysel çalışmalar sonucunda kaolin kiline ilave edilen katkı maddeleri ile hazırlanan zemin numunesinin mevcut durumdaki zeminin mukavemet değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir.

Ünver [4], yaptığı çalışma kapsamında düşük plastisiteli killi bir zemini Soma ve Çatalağzı uçucu külü ile stabilize etmek için, katkısız ve %5,10, 15, 20, 25, 30 uçucu kül katkı seviyelerindeki numuneler üzerinde serbest basınç, şişme ve dispersibilite deneyleri yapmıştır. Yapılan deneyler, kil zeminin dayanım, şişme ve dispersibilite özelliklerinin iyileştiğini göstermiştir. Özellikle Soma uçucu külünün kil zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde Çatalağzı uçucu külüne oranla daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Bağrıaçık [5], yaptığı çalışmada, karayollarında temel/alt temel zemini olarak, CBR değerlerinin düşüklüğü nedeniyle kullanılamayacağı belirlenen zeminlerin, optimum su içeriğinde kireçle stabilizasyonu sonucunda elde edilen iyileşme durumlarını belirleyebilmek amacıyla laboratuvar ortamında kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Temel/alt temel zemininin stabilizasyonunda su içeriğinin etkisini belirleyebilmek amacıyla hacimce %5, %10, %15 ve %20 su içeriklerindeki zemin numuneleri hazırlanmış ve CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, farklı kireç oranları ile temel/alt temel

zemininin stabilizasyonunda optimum değerleri belirleyebilmek için hacimce %3, %4, %5 ve %6 oranlarında kireç karışımları yapılarak oluşturulan numunelerde CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, temel/alt temel zeminleri için optimum su içeriğinin yaklaşık %10, optimum kireç oranının ise hacimce yaklaşık %5 olduğu belirlenmiştir.

Soltani vd. [6], yaptıkları çalışmada kireç, çimento, polimer ve fiber kullanarak stabilize edilmiş şişen kilin mühendislik özelliklerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Polimer ve fiber kullanarak stabilize edilmiş numunelerin kireç ve çimento kullanılarak iyileştirilmiş numunelere göre şişme ve mukavemet açısından oldukça iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Adami ve Rinaldi [7], çalışmasında amorf silika oranı yüksek ve düşük olan iki farklı numuneyi kalsiyum hidroksil çözeltisiyle karıştırarak kompaksiyonla sıkıştırılmış numuneler hazırlamıştır. Bu numunelere farklı kür süreleri uyguladıktan sonra konsolidasyon, tek eksenli basınç, drenajlı üç eksenli basınç, kayma dalgası hızı ve emme deneyleri yapmışlardır. Çalışma sonucunda amorf silika miktarının fazla olmasının bu numuneleri daha mukavemetli yaptığını ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada ise Isparta Keçiborlu bölgesinde doğal oluşumlu puzolan bir kayaç olan amorf silikanın bentonit kili ve Eşen kili üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

## **II. KULLANILAN NUMUNELERİN TANIMLANMASI**

Bentonit çok miktarda montmorillonit minerali içeren alüminyum ve magnezyum açısından zengin volkanik küllerin ve lavların kimyasal ayrışması sonucu oluşan malzemeye verilen addır. Hacimlerinin 20-25 katı kadar şişme özelliği gösterebilir. Bu özellikleri bakımından çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [8]. Çalışmada kullanılan Karakaya bentonitinin ve Eşen kilinin kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Kil üzerinde yapılan elek ve hidrometre analizinde numunenin içerisinde %0 çakıl, %2 kum, %38 silt ve %60 kil olduğu belirlenmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine ve TS1500 Zemin Sınıflandırma Sistemine göre zeminin CH (Yüksek plastisiteli kil) sınıfında olduğu tespit edilmiştir. Karakaya bentonit ve Eşen kili üzerinde kıvam limitleri, standart kompaksiyon, piknometre ve serbest basınç deneyleri yapılarak sonuçlar Tablo 2’ de verilmiştir [9]. Tablo 2’de; LL: likit limiti, PL: plastik limiti, PI: plastisite indisini,  $\gamma_{kmax}$ : maksimum kuru birim hacim ağırlığı,  $w_{opt}$ : optimum su muhtevası,  $G_s$ : özgül ağırlığı ve  $q_u$ : serbest basınç mukavemetini göstermektedir.

Amorf silika, volkanik-hidrotermal sistemler içinde; doymuş silikadan direkt çökmeyle yeraltı damarları biçiminde, pH’ı nötr, kloritli sular yakınında ve yüzeyde ise silika tortuları olarak veya birincil kuvars hariç bütün orijinal minerallerin yer aldığı amorf silika + kristobalit + doğal kükürt + alunit + kaolin + limonit gibi ikincil mineral topluluğunda oluşum olarak, yüzey veya yan kayaçlarının asit alterasyonundan oluşan ve yataklanmış tortul bir kayaçtır [10]. Amorf silikanın kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3’de verilmiştir. Tablo 3’de A.Z.: Ateş Zaiyatını simgelemektedir.

**Tablo 1.** Doğal sodyum bentonit ve Eşen kilinin kimyasal özellikleri

<b>Kimyasal Analiz Test Sonuçları</b>		
	<b>Doğal Bentonit</b>	<b>Eşen Kili</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	61.28	47.1
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	17.79	4.3
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.01	16.6
<b>CaO</b>	4.54	2.8
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	2.70	<0.1
<b>MgO</b>	2.10	17.4
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1.24	0.3

**Tablo 2.** Doğal sodyum bentonit ve Eşen kilinin mühendislik özellikleri

	<b>LL</b> (%)	<b>PL</b> (%)	<b>PI</b> (%)	$\gamma_{kmax}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	<b>w<sub>opt</sub></b> (%)	<b>Gs</b>	<b>q<sub>u</sub></b> (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>Eşen Kili</b>	108	38	70	1.16	38	2.70	1.96
<b>Doğal Bentonit</b>	640	28	612	1.12	48	2.69	1.87

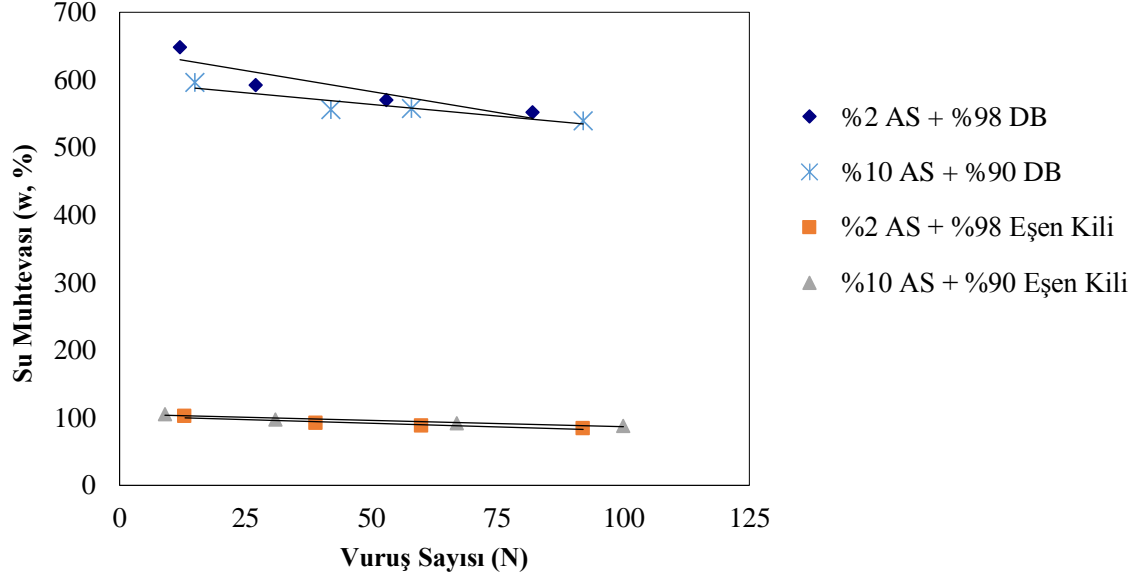
**Tablo 3.** Amorf silikanın kimyasal ve fiziksel özellikleri [10]

<b>Kimyasal Özellikler</b>		<b>Fiziksel Özellikler</b>	
<b>SiO<sub>2</sub></b>	92.48	Renk	Açık Krem
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2.60	Sertlik	5.5-6
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.09	Özgül ağırlık	2.39 gr/cm <sup>3</sup>
<b>CaO</b>	0.31	Kuru Birim Hacim Ağırlık	630 kg/m <sup>3</sup>
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1.08	Görünür porozite	%45
<b>MgO</b>	0.00	Su emme (ağırlıkça)	%50
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.04		
<b>TiO<sub>2</sub></b>	1.34		
<b>SiO<sub>3</sub></b>	0.09		
<b>A.Z.</b>	1.85		

Bu çalışma kapsamında bentonit ve Eşen killere %2 ve %10 amorf silika eklenerek amorf silikanın kil numuneler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu oranların seçilmesinde bu konu ile ilgili yapılan daha önceki çalışmalardan yararlanılmıştır [11, 12]. Katkısız halde yapılan deneyler katkılı halde yapılan deneylerle karşılaştırılmıştır.

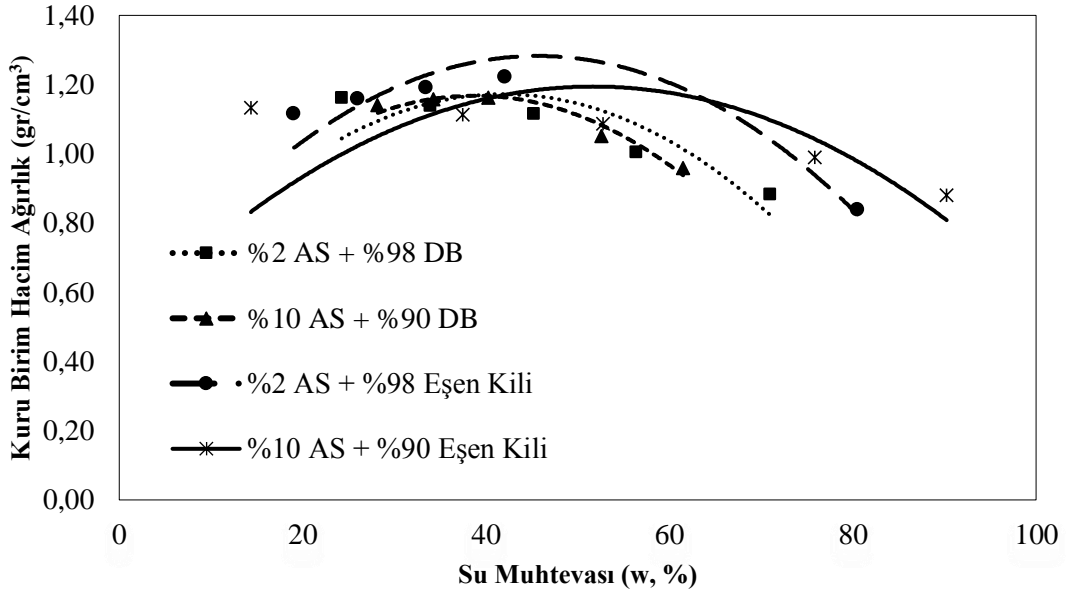
### **III. BULGULAR**

Yüksek plastisiteli Eşen ve bentonit killere ağırlıkça %2 ve %10 oranlarında amorf silika katılarak oluşturulan numuneler üzerinde likit limit, plastik limit, kompaksiyon, tek eksenli serbest basınç ve sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyleri için katkılı numuneler laboratuvar şartlarında optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında hazırlanarak deneyler yapılmıştır. Likit limit deney sonuçları Şekil 1’de verilmiştir. Buna göre artan amorf silika katkısı her iki zeminde de likit limiti azaltmıştır.

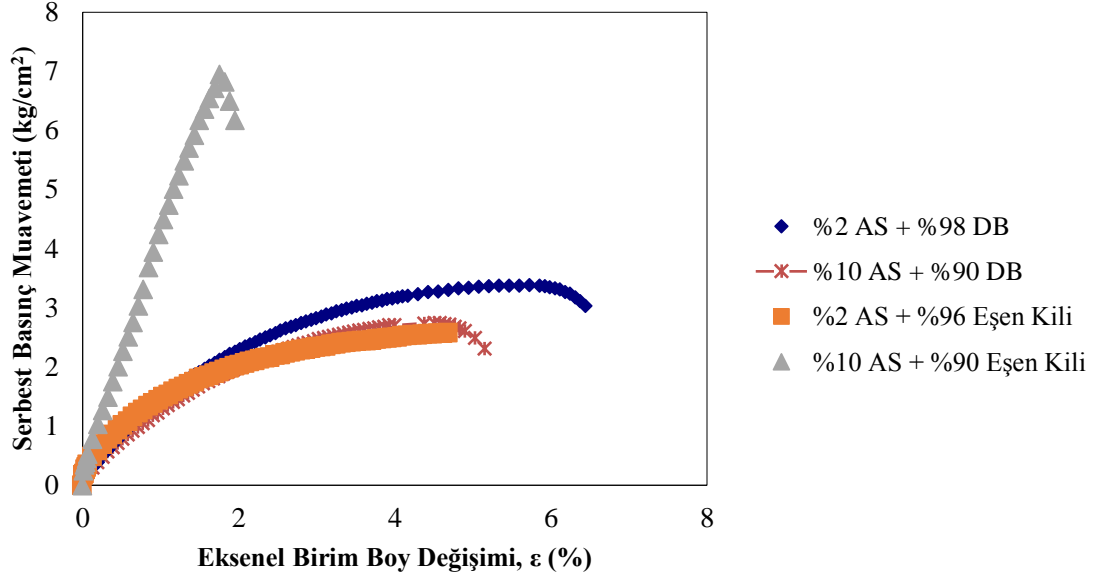


Şekil 1. Kıvam limitleri deney sonuçları

Standart kompaksiyon deneyleri ile elde edilen sonuçlar Şekil 2’de verilmiştir. Artan amorf silika miktarı her iki kilde de maksimum kuru birim hacim ağırlığının artmasını sağlamıştır. Kompaksiyon deneylerinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası şartlarında hazırlanan numuneler üzerinde tek eksenli serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen gerilme - eksenel birim boy değişimi eğrileri Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 2. Kompaksiyon deney sonuçları



Şekil 3. Serbest basınç deney sonuçları

Buna göre artan amorf silika katkısı her iki kil numunede de gerilme artışı meydana getirmiştir. Sabit hacimli şişme deneyleri için kompaksiyon şartlarında numuneler hazırlanarak kapiler yolla alt taraftan poroz taş seviyesine kadar su ilave edilmiştir. Böylelikle şişme olayı kontrollü bir şekilde devam etmiştir. Hücre tamamen su ile doldurularak numuneye serbestçe su girişine izin verilmiş, ancak numunenin hacmi sabit tutulacak şekilde yüklemeler uygulanmıştır. Yüklemelerin uygulanması sırasında, deformasyonların 0.005 mm' de tutulmasına ve 0.01 mm' den büyük deformasyonların meydana gelmemesine dikkat edilmiştir. Daha fazla yükleme yapılmaksızın numune hacminde herhangi bir artış eğiliminin gözlenmediği durumda deneye son verilmiştir. Zemin numunesine uygulanan nihai basınç, şişme basıncı ( $P_{\text{şişme}}$ ) olarak belirlenmiştir. Amorf silikanın doğal bentonit ve Eşen kiline olan etkisinin araştırıldığı çalışmada yapılan deney sonuçları Tablo 4' de verilmiştir.

Tablo 4. Katkısız deney sonuçları ile katkılı deney sonuçlarının karşılaştırılması

	LL (%)	PL (%)	PI (%)	$\gamma_{kmax}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$W_{opt}$ (%)	$q_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$P_{\text{şişme}}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>%100 Eşen Kili</b>	108	38	70	1.16	38	1.96	1.60
<b>%2AS+%98 Eşen Kili</b>	97	40	57	1.20	42	2.58	0.856
<b>%10AS+%90 Eşen Kili</b>	100	45	55	1.22	28	7.00	1.917
<b>%100 Doğal Bentonit (DB)</b>	640	28	612	1.12	48	1.87	1.87
<b>%2AS+%98 DB</b>	612	36.5	575.5	1.18	38	5.91	3.38
<b>%10AS+%90 DB</b>	582	30	552	1.19	46	4.45	2.74

## IV. SONUÇ

Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Amorf silika katkısı her iki kil zeminin de likit limitini ve plastisite indisini azaltmış, plastik limitini arttırmıştır. Eşen kiline ilave edilen amorf silika miktarı %10 olduğunda %2 ile kıyaslandığında likit limitte artma meydana gelmiştir.
- Amorf silika katkısı her iki kil zeminin de maksimum kuru birim hacim ağırlığının artmasını sağlamıştır.

- Amorf silika katkısı %2 oranında kullanıldığında her iki kil zeminin de serbest basınç mukavemetinin artmasını sağlamıştır. %10 oranında kullanıldığında ise Eşen kilinde serbest basınç mukavemeti daha çok artarken, doğal bentonitte serbest basınç mukavemetinde %2 ile kıyaslandığında azalma meydana gelmiştir.
- Amorf silika katkısı Eşen kiline %2 oranında katıldığında sabit hacimli şişme basıncını azaltırken, %10 katıldığında şişme basıncını arttırmıştır. Doğal bentonitte ise her iki oranda da şişme basıncında artış meydana gelmiştir.
- Deney sonuçları değerlendirildiğinde amorf silikanın kil zeminlerde serbest basınç mukavemetini arttırmada etkili bir stabilizasyon malzemesi iken şişme basıncının azaltılmasında etkili olmadığı görülmüştür. Mukavemet artışı dikkate alındığında şişmenin azaltılması için amorf silikanın kile kireç ile birlikte karıştırılması önerilebilir.

## **V. KAYNAKLAR**

- [1] Ü. Sevensan, “Polipropilen Fiber ve Uçucu Kül Katkılı Ankara Kilinin Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye, ss.65, 2009.
- [2] S. Gücek, “Mermer Tozu Ve Uçucu Külün Kil Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanımı,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, ss.103, 2011.
- [3] K. Öntürk, “Zemin İyileştirmesinde Polisaj, Kireç ve Uçucu Külün Kullanımı,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, ss.178, 2011.
- [4] E. Ünver, “Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, ss.155, 2015.
- [5] B. Bağrıaçık, “Ulaşım Yapıları Temel/Alt Temel Zeminlerinin Kireçle Stabilizasyonu,” *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c.32, s.1, ss. 39-47, 2017.
- [6] A. Soltani, A. Taheri, M. Khatibi, A.R.Estabragh, “Swelling potential of a stabilized expansive soil: A Comparative Experimental Study”, *Geotech. Geol. Eng.*, vol.35, pp.1717-1744, 2017.
- [7] A. Adami, V.A. Rinaldi, “The influence of amorphous silica on the aging of a remoulded loessial soil”, *Soils and Foundations*, vol. 57, pp. 315-327, 2017.
- [8] A. Akbulut, *Bentonit*, 2. Baskı, Ankara, Türkiye: MTA Genel Müdürlüğü Yayınları, s.32, ss.78-79, 1996.
- [9] E. Kalay, “Farklı Katkı Maddeleri ile Zemin İyileştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, ss. 54, 2010.
- [10] M. Davraz, L. Gündüz, “Isparta Yöresi Amorf Silika Kayacının Katkı Maddesi Olarak Beton Dayanımına Etkisi,” III. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, İstanbul, Türkiye, ss. 36-42, 2003.

[11] B. Dereli, “Bor ve Amorf Silikanın Bentonitin Mühendislik Özelliklerine Etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, ss. 62, 2013.

[12] F.Ş. Coşan, “Amorf Silika, Volkanik Tuf ve Kireç Kullanılarak İyileştirilmiş Yüksek Plastisiteli Kilin Mühendislik Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, ss. 118, 2016.