



## Tüf katkılı yüksek plastisiteli killerde kıvam limitleri ve şişme potansiyeli ilişkisi

### Consistency limits and swelling potential relationship in tuff added high plasticity clays

Yasemin Aslan Topçuoğlu<sup>1,\*</sup> , Zülfü Gürocak<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Firat Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

#### Öz

Bu çalışmada asidik ve bazik tüf katkısının yüksek plastisiteli kilin kıvam limitleri ile şişme potansiyeline olan etkileri ve bu özellikler arasındaki ilişkileri incelenmiştir. Bu amaçla %5, 10, 15 ve 20 oranlarında asidik tüf ve bazik tüf katkıları içeren örnekler optimum su içeriğinde sıkıştırılarak kür öncesi ve 28 günlük kür sonrasındaki kıvam limitleri, şişme basıncı ve şişme yüzdesi belirlenmiştir. Katkısız kil ve tüf katkılı örneklerde şişme basıncı ve şişme yüzdesi değişimlerinin kıvam limitleriyle olan ilişkisi incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda artan katkı oranı ve kür etkisiyle hem LL hem de PI değerlerinde azalmalar, PL değerlerinde ise artma ve azalmalar oluşmuştur. Örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri de artan katkı oranı ile azalmıştır. Regresyon analizi sonuçlarına göre asidik tüf katkılı örneklerin LL, PL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında çok kuvvetli-kuvvetli pozitif ilişkilerin olduğu belirlenmiştir. Bazik tüf katkılı örnekler de ise LL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında çok kuvvetli bir pozitif ilişkiler bulunurken, PL ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında herhangi bir anlamlı ilişki belirlenmemiştir.

**Anahtar kelimeler:** Likit limit, Plastik limit, Regresyon analizi, Şişme basıncı, Şişme yüzdesi, Tüf

#### Abstract

In this study, the effects of acidic and basic tuff additives on the consistency limits and swelling potential of high plasticity clay and the relationship between these properties were investigated. For this purpose, samples containing 5, 10, 15 and 20% acidic tuff and basic tuff additives were compressed at optimum water content, and the consistency limits, swelling pressure and swelling percentage were determined before and after curing for 28 days. The relationship of swelling pressure and swelling percentage changes with consistency limits in pure clay and tuff added samples was investigated. As a result of the experimental studies, decreases in both LL and PI values, and increases and decreases in PI values have occurred with increasing additive ratio and curing effect. Swelling pressure and swelling percentage values of the samples also decreased with increasing additive ratio. According to the results of the regression analysis, it was determined that there were very strong positive relationships between LL, PL and PI of the acidic tuff added samples, with swelling pressure and swelling percentage. In the basic tuff added samples, there was a very strong positive relationship between LL and PI with swelling pressure and swelling percentage, but no significant relationship was found between PL with swelling pressure and swelling percentage.

**Keywords:** Liquid limit, Plastic limit, Regression analysis, Swelling pressure, Swelling percentage, Tuff

#### 1 Giriş

Artan su içeriğine bağlı olarak hacimsel artışın meydana geldiği killi zeminler, şişen zeminler olarak adlandırılır ve bu zeminlerde meydana gelen şişmenin miktarı su içeriğine, zeminin içerdiği kilin yüzdesine ve özellikle kilin mineralojik bileşimine bağlı olarak değişebilmektedir. Şişen zeminlerde şişmeyi karakterize etmek için kullanılan ve şişme potansiyeli olarak adlandırılan iki terim vardır. Bunlar, şişme yüzdesi ve şişme basıncıdır. Zemindeki değişebilir katyonların bileşimi, karbonatların oranı, doku, zemin suyunun kimyasal bileşimi ve kil daneleri arasındaki

çimentolanma gibi pek çok faktörden etkilenen şişme potansiyeli, zeminin hem şişme yüzdesini hem de şişme basıncını ifade etmektedir [1]. Şişme, sadece su içeriğindeki artışa bağlı olarak hacimdeki artışı değil, aynı zamanda ortamdaki suyun yokluğu durumunda hacimde meydana gelen azalmayı yani büzülme de vurgulamaktadır. Özellikle, yağışlı bölgelerde şişme potansiyeline sahip killi zeminler üzerinde inşa edilmiş olan yapılarda, zeminin şişme basıncının, üzerindeki yapıdan kaynaklanan ek gerilmelerden daha büyük olması durumunda yapıda önemli hasarlar meydana gelebilmektedir [2, 3]. Şişme nedeniyle meydana

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yaslan@firat.edu.tr (Y. Aslan Topçuoğlu)  
Geliş / Received: 16.02.2023 Kabul / Accepted: 24.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023  
doi: 10.28948/ngumuh.1251975

gelebilecek bu hasarların önlenmesi ve doğru zemin iyileştirme yöntemine karar verilebilmesi ancak zeminin şişme potansiyelinin özellikle de şişme basıncının doğru şekilde belirlenmesi ve tasarım sırasında dikkate alınması ile mümkündür [4-6]. Killerin şişme basıncının izin verilebilir değerlerden daha yüksek olduğu durumlarda zeminde iyileştirme yöntemlerine başvurulur ve yapılan iyileştirmeler ile zeminin şişme potansiyelinin azaltılmasına çalışılır. Bu amaçla yapılan zemin iyileştirmelerinden birisi de katkı malzemeleri kullanılarak yapılan stabilizasyondur. Bu yöntemde, killi zemine eklenen ve puzolanik özelliğe sahip olan tuf, silis dumanı, sönmüş kireç, uçucu kül, mermer tozu, pomza ve çimento gibi katkı maddeleri ile zeminde puzolanik reaksiyonların oluşumu sağlanmakta ve böylece zeminin taşıma gücü, dayanım, oturma, sıkışma, şişme ve geçirimsizlik gibi mühendislik özellikleri iyileştirilebilmektedir [7-21]. Bu konuda yapılan çalışmalarda, katkı malzemesinin eklenmesinden sonra katkı ile zemine ait elementlerin reaksiyona girdiği ve bunun sonucu olarak da zeminin su içeriğinin kısa sürede azalarak işlenebilir hale geldiği, uzun süreçte ise zeminin dayanım ve duraylılığının arttığı, sıkışabilirlik, şişme potansiyeli ve hacimsel değişimin ise azaldığı belirtilmektedir. Yapılan çalışmalarda araştırmacılar farklı türde ve oranda katkı kullanımıyla birlikte sıkışabilirliğin azaldığını ifade etmişlerdir [22-24]. Ayrıca katkı kullanımının şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerini de azalttığı belirlenmiştir [25-29]. Literatür incelendiğinde ön konsolidasyon basıncı ve konsolidasyon katsayısının, zeminde katkı malzemesi kullanımına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir [30-32]. Zorluer ve Gücek [33]'e göre yüksek plastisiteli inorganik kile belirli oranlarda mermer tozu (%0, 3, 5, 10, 15) karıştırılarak optimum su içeriğinde dört farklı örnek hazırlanmış ve hazırlanan karışımlarda mermer tozu oranı arttıkça şişme yüzdesinin azaldığı ifade edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, %15 oranına kadar mermer tozu katkısının şişme potansiyelini önemli derecede azalttığı belirlenmiştir. Çimen vd. [34] yaptıkları çalışmada katkı olarak pomza kullanımının LL, PL, PI ve şişme basıncını azalttığını belirlemişlerdir.

Başarılı bir stabilizasyon için kullanılacak katkı malzemesinin seçimi önemli olmakla birlikte katkı malzemesinin puzolanik özelliğe sahip olması, ucuz olması, kolay bulunabilir ve çevre dostu olması oldukça önemlidir. Malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken bu özellikler, kireç, silis dumanı, uçucu kül gibi yapay katkı malzemesi yerine pomza, volkanik kül ve tuf gibi doğal katkı malzemelerin kullanımının artırılması gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle doğal katkı malzemelerinin araştırılması, bu malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi ve stabilizasyonda kullanılmaları durumunda zeminin hangi özellikleri üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduklarının ortaya konulması önem taşımaktadır. Bu çalışmada, tuf katkısının yüksek plastisiteli kilin kıvam limitleri ve kilin şişme potansiyeline olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, yüksek plastisite özelliğine sahip bentonit kili, katkı malzemesi olarak da ekonomik ve ekolojik kriterlere sahip, sürdürülebilir bir malzeme olan asidik ve bazik karakterli tüfler kullanılmıştır. Bentonite farklı oranlarda asidik ve

bazik tuf eklenerek hazırlanan örneklerin kür öncesi ve sonrasındaki likit limit, plastik limit, şişme basıncı ve şişme yüzdesinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

## 2 Materyal ve metod

Çalışma örneklerin derlenmesi, deneye hazırlanması, Standard proktor, likit limit, plastik limit, şişme basıncı ve şişme yüzdesi deneylerinin yapılması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

### 2.1 Örneklerin derlenmesi ve hazırlanması

Çalışmada kullanılan bentonit kili Reşadiye (Tokat) kil ocağından, bazik karakterli tuf Ağın (Elazığ) bölgesinde yüzeyleme veren Karabakır Formasyonu'ndan, asidik karakterli tuf ise Gümüşhane bölgesinde yüzeyleme veren Kızılkaya Formasyonu'ndan derlenmiştir. Bentonitin literatüre girişi ilk kez sabun kili adıyla 1876 yılında olmuştur ve bentonit adı bulunduğu Rock Creek sahasındaki Fort Benton'dan (Montana, ABD) gelmektedir. Alüminyum ve magnezyum içeriği bakımından zengin volkanik küllerin, volkanik kayaçların ve tüflerin kimyasal ayrışması ya da bozuşması sonucunda meydana gelen bentonit kili, simektit grubu minerallerden montmorilloniti yüksek oranda içermekte ve kimyasal olarak hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşmaktadır. Bentonitler, ana değişebilir katyon türlerine göre sodyum bentonit, kalsiyum bentonit ve sodyum-kalsiyum (ara tip) bentonit olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır [35]. Dane boyutu 2 µm (0.002 mm) veya daha küçük olan ve en ayırt edici özelliği ise özellikle Na-bentonitlerin su ile etkileşimi durumunda şişerek hacimlerinde büyük değişimin meydana gelmesidir. Bentonit kurduğunda ise büzülerek hacimleri küçülmekte ve yüzeyinde çatlaklar oluşmaktadır [36]. Bu çalışmada, kullanılan yüksek plastisiteli kil, Reşadiye bentonit ocağından temin edilen katkısız bentonittir. Aslan Topçuoğlu [37] tarafından yaptırılan XRD analizlerine göre, bu ocaktan alınan bentonit kili montmorillonit, kuvars ve kalsit minerallerinden oluşmaktadır ve XRF analizi sonuçları (Tablo 1) bu bentonit kilinin Na-Bentonit sınıfında olduğunu göstermektedir. Laboratuvara getirilen bentonit kili 200 nolu elekten elenmiş ve sabit kütleyle gelinceye kadar 105°C'de etüvde kurutularak deneylere hazır hale getirilmiştir.

Katkı malzemesi olarak kullanılan asidik karakterli tuf, Gümüşhane ili ve civarında yüzeyleme veren Kızılkaya Formasyonu'ndan derlenmiştir. Bu formasyon ilk kez Güven [38] tarafından tanımlanmıştır. Riyodasit/dasit ve bunların piroklastitlerden oluşan formasyonun kayaçları otobreşik ve akıntı yapıları olmak üzere iki farklı formdadır ve üst seviyelerinde piroklastik kayaçlar yüzeylenmektedir. Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda formasyonun yaşı Geç Kretase olarak verilmektedir [39-41]. XRF analizi sonuçlarına göre tüflerin SiO<sub>2</sub> miktarı %63'den fazladır ve asidik karakterlidir (Tablo 1). XRD analizi sonuçlarına göre kuvars, kalsit, feldspat ve ikincil kil minerallerinden oluşmaktadır [37].

Bazik karakterli tuf ise Elazığ ili Ağın bölgesinde yüzeyleme veren Karabakır Formasyonu'nundan derlenmiştir. Pliyo-Pleistosen yaşlı Karabakır Formasyonu, genel olarak bazalt, volkanik breş ve tüflerden oluşan bir litolojiye sahiptir. Elazığ'ın batı ve kuzey bölgelerinde yüzeylenen bazaltik

bileşimli bu kayalar alkalın özelliktedir [42]. Karabakır Formasyonu'na ait tüflerde yapılan XRD ve XRF analizlerine göre tüfler esas olarak feldispat, dolomit, kalsit ve ikincil kil minerallerinden oluşmaktadır [37]. SiO<sub>2</sub> miktarı ise %45'den azdır ve bazik karakterlidir (Tablo 1). Bu çalışmada katkı olarak kullanılan asidik ve bazik karakterli tüflerin puzolanik özellikleri Aslan Topçuoğlu ve Gürocak [43] tarafından incelenmiş, yapılan analiz sonuçları standartlarda verilen sınır değerler ile karşılaştırılmıştır (Tablo 2).

**Tablo 1.** Katkısız kil, asidik ve bazik tüflere ait ana oksit yüzdeleri [37]

Ana Oksitler (%)	Kil	Asidik Tüf	Bazik Tüf
SiO <sub>2</sub>	62.10	69.10	31.40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.60	20.70	7.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.63	0.47	3.49
MgO	2.00	0.19	2.11
CaO	2.86	0.76	28.70
Na <sub>2</sub> O	2.58	0.39	0.60
K <sub>2</sub> O	0.92	1.43	0.87
MnO	0.10	<0.01	0.03
TiO <sub>2</sub>	0.32	0.29	0.41
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.06	0.09
SO <sub>3</sub>	0.076	0.90	0.036
Sr	0.073	0.024	0.033
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.01	<0.01	0.02
Ateşte kayıp	6.60	5.50	24.80

Araştırmacılar tarafından yapılan değerlendirmeye göre asidik tüflerin tüm özellikleri TS 25 [44], TS EN 450-1 [45] ve ASTM C 618 [46] standartlarında verilen limit değerlere uygun olmasına karşın, puzolanik aktivite deneyinden ve 7 günlük basınç dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlara göre asidik tüflerin CaO miktarının az olması nedeniyle bu tüfler yeterli puzolanik aktivite gösterememektedir. Araştırmacılar, asidik tüflerin katkı malzemesi olarak kullanılmalarda durumunda, puzolanik aktivitenin geliştirilebilmesi için CaO eksikliğini giderilmesine ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. Aynı çalışmanın sonuçlarına göre,

**Tablo 2.** Asidik ve bazik tüflerin TS 25 [44], TS EN 450-1 [45] ve ASTM C 618 [46]'e göre puzolan olarak kullanılabilirlik sınırlarına uygunluğu

Özellik	Asidik Tüf	Bazik Tüf	TS 25 [44]	TS EN 450-1 [45]	ASTM C 618 [46]
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	90.27	42.04	≥ 70.00	≥ 70.00	≥ 70.00
MgO (%)	0.19	2.11	≤ 5.00	≤ 4.00	
SO <sub>3</sub> (%)	0.90	0.036	≤ 3.00	≤ 3.00	≤ 4.00
K <sub>2</sub> O + 0.658Na <sub>2</sub> O * (%)	1.69	1.27	-	≤ 5.00	≤ 1.50
Serbest CaO (%)	0.76	28.70	-	≤ 2.50	-
Reaktif SiO <sub>2</sub> (%)	28.11	23.15	≥ 25.00	≥ 25.00	-
Ateşte kayıp (%)	5.50	24.80	-	≤ 5.00-9.00	≤ 10.00
7 Günlük Serbest Basınç Dayanımı (MPa)	2.05	3.60	≥ 4 MPa	-	-

\* Eşdeğer alkali madde içeriği

bazik tüflere ait değerlerin birçoğunun TS 25 [44], TS EN 450-1 [45] ve ASTM C 618 [46] standartlarında verilen limitler dışında olduğu ve bu tüflerin tek başına puzolanik özellik göstermediği belirtilmektedir.

Arazi çalışması ile derlenen asidik ve bazik tüf blokları laboratuvara getirildikten sonra öğütülerek 200 nolu elekten elenmiş ve sabit kütleye gelinceye kadar 105°C'de etüvde kurutulmuştur. Daha sonra iki ayrı grup örnek hazırlanmıştır. İlk gruptaki örnekler bentonit kiline %5, 10, 15 ve 20 oranlarında asidik tüf, ikinci gruptaki örnekler ise aynı oranlarda bazik tüf katkısı ilave edilerek hazırlanmıştır.

## 2.2 Deneysel çalışmalar

Bu çalışma kapsamındaki deneysel çalışmalar kür öncesi ve kür sonrası deneysel çalışmalar olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Kür öncesi deneysel çalışmaların ilk safhasında katkısız bentonit ve katkılı örneklerin optimum su içeriklerini belirlemek amacıyla standard proktor deneyleri yapılmıştır. Sonraki aşamada ise hazırlanan katkılı ve katkısız örnekler optimum su içeriği değerleri dikkate alınarak sıkıştırılmış ve bu örneklerin yarısında kür öncesinde likit limit, plastik limit, şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında ise 28 günlük küre tabi tutulan katkısız ve katkılı örneklerde aynı deneyler tekrarlanmıştır.

### 2.2.1 Standard Proktor deneyi

Maksimum kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{kmax}$ ) ve optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan bu deney, ASTM D 698 [47] standardına göre 30.5 cm yükseklikten serbest düşmeye bırakılan 2.5 kg'lık yük altında zeminin üç tabaka halinde kalıp (mold) içerisine sıkıştırılması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Deneysel çalışmaların ilk aşamasında katkısız kil ve kuru ağırlıkça %5 AT, %10 AT, %15 AT, %20 AT, %5 BT, %10 BT, %15 BT ve %20 BT katkıları eklenerek hazırlanmış olan katkılı örneklerde ASTM D 698 [47] standardına göre standard proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Örneklerde gerçekleştirilen proktor deneyleri ile belirlenen  $\gamma_{kmax}$  ve  $w_{opt}$  değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Katkısız kil ve tuf katkılı kil örneklerinin  $\gamma_{kmax}$  ve  $w_{opt}$  değerleri

Örnek	$\gamma_{kmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_{opt}$ (%)
K	11.57	38
K+%5AT	10.49	40
K+%10AT	11.47	41
K+%15AT	11.24	42
K+%20AT	11.07	48
K+%5BT	10.98	40
K+%10BT	10.79	43
K+%15BT	10.55	46
K+%20BT	10.49	47

K:Kil, AT: Asidik tuf, BT: Bazik tuf

Deney sonuçlarına göre, katkısız kilin  $w_{opt}$  değeri %38,  $\gamma_{kmax}$  değeri ise 11.57 kN/m<sup>3</sup>'tür. Katkılı örneklerde  $\gamma_{kmax}$  değerleri 10.49-11.47 kN/m<sup>3</sup> arasında,  $w_{opt}$  değerleri ise %40-48 arasında değişmektedir. Asidik ve bazik tuf katkı oranları arttıkça, örneklerin  $\gamma_{kmax}$  değerleri azalmakta, buna karşın  $w_{opt}$  değerleri ise artmaktadır.

### 2.2.2 Likit ve Plastik Limit deneyleri

Kıvam (Atteberg) limitleri su içeriğine bağlı olarak ince daneli zeminlerde kıvamın değişim gösterdiği sınırlardır ve bu limitlerden en önemlileri ise likit limit (LL) ve plastik limittir. Zeminin viskoz kıvamdan plastik kıvama geçtiği andaki su içeriği LL, zeminin yarı katı kıvamdan plastik kıvama geçtiği andaki su içeriği ise PL olarak tanımlanmaktadır. Laboratuvar çalışmalarının bu aşamasında, hazırlanmış olan 18 adet katkısız ve katkılı örneğin 9 tanesinde ASTM D4318-17e1 [48] standardına göre LL ve PL deneyleri gerçekleştirilmiş ve örneklerin kür öncesi LL ve PL değerleri belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak örneklerin kür öncesi plastisite indisi (PI) değerleri hesaplanmıştır. 28 günlük kür uygulanan 9 örnekte LL ve PL deneyleri tekrarlanmış, örneklerin kür sonrası LL ve PL değerleri belirlenerek PI değerleri hesaplanmıştır. Deneylere ait sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

Katkısız örnek için yapılan zemin sınıflamasında çalışmada kullanılan bentonitin zemin sınıfı Birleştirilmiş Zemin Sınıflamasına (UCSC) göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak belirlenmiştir.

### 2.2.3 Şişme basıncı ve şişme yüzdesi deneyleri

Zeminlerde şişme, su içeriği ve gerilme şartlarındaki değişimlerin sonucunda meydana gelen hacim artışıdır. Bu özellik hem şişme yüzdesini hem de şişme basıncını ifade eden şişme potansiyeli olarak adlandırılır [49, 50]. Şişme potansiyelinin en önemli bileşeni olan şişme basıncı, killi zeminlerin, suyla teması sonucunda, matris emmedeki azalma nedeniyle ortaya çıkan hacim artışları engellenmeye çalışıldığında, oluşan basınçtır ve kilin su veya elektrolit absorbe etmesine izin verilmesi halinde, kil-su sistemini

istenen boşluk oranında tutmak için gerekli basınç olarak tanımlanmaktadır [51].

**Tablo 4.** Katkısız ve katkılı örneklerin kür öncesi ve sonrası LL, PL ve PI değerleri

Örnek	Kürsüz			Kürlü		
	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
K	507	41	466	480	42	438
K+%5AT	463	37	426	441	39	402
K+%10AT	433	34	399	415	35	380
K+%15AT	424	35	389	406	36	370
K+%20AT	377	34	343	360	37	323
K+%5BT	487	43	444	458	38	420
K+%10BT	463	32	431	443	36	407
K+%15BT	454	30	424	430	34	396
K+%20BT	435	39	396	410	43	367

K:Kil, AT: Asidik tuf, BT: Bazik tuf

Şişme basıncının ölçülmesinde kullanılan yöntemler sabit yük ve sabit hacim ödometre deneyleri olmak üzere iki tiptir. Sabit yük ödometre deneyinin, serbest şişme ödometre deneyi, çift ödometre deneyi, yüklü şişme ödometre deneyi ve Chinese yöntemi olmak üzere 4 tipi vardır [49, 50, 52-55]. Sabit hacim ödometre deneyleri ise sabit hacim ödometre deneyi ve deformasyon kontrollü deney yöntemi [49, 56, 57] olmak üzere iki çeşittir. Bu çalışmada, zemin örneklerinin şişme basınçlarını belirlemek için ASTM D 4546 [58] tarafından önerilen sabit hacim ödometre deney yöntemine (Metot-C) göre bir boyutlu ödometre deney aletinde şişme basıncı deneyleri yapılmıştır.

Zeminlerin şişme potansiyelinin önemli bir göstergesi olan şişme yüzdesi, örselenmemiş veya sıkıştırılarak hazırlanmış zemin örneğinin su altında bırakılması sonucu hacminde meydana gelen artışın, başlangıç hacmine göre yüzdesini ifade etmektedir [59]. Zeminlerin şişme yüzdelere belirlenmesi konusunda farklı araştırmacılar tarafından önerilen ve prensipleri arasında önemli farklılıklar bulunan deney yöntemleri bulunmaktadır. Holtz ve Gibbs [60] zeminin şişme yüzdesini zeminin kuru halden, 7 kPa sürşarj yükü altında doymuş hale gelmesi sırasında meydana gelen toplam hacim değişikliği olarak tanımlarken, Seed vd. [61] optimum su içeriğinde sıkıştırılmış zemin örneğinin, ödometre koşullarında 7 kPa sürşarj basıncı altında, su altında bırakılması sonucu meydana gelen düşey boy değiştirmesinin başlangıç numune yüksekliğine oranı olarak tanımlamaktadırlar. Snethen [62] ise örselenmemiş zemin örneğinin ödometre koşullarında, arazide maruz kalacağı yüke eşdeğer sürşarj yükü altında ıslatılması ve nihai denge doymunluk durumuna kadar örneğin hacminde meydana gelen değişiminin, başlangıç örnek yüksekliğine oranı olarak tanımlamaktadır. Günümüzde en fazla tercih edilen yöntem, ASTM D 4546 (2008) tarafından önerilen ve doğrudan bir

ölçüm tekniği olan tek boyutlu ödometre yöntemidir. Bu yöntemde Metot-A, B ve C olmak üzere üç farklı deney yöntemi önerilmektedir. Bu çalışmada Metod-A olarak önerilen serbest şişme yöntemi kullanılmıştır.

Katkısız ve %5, 10, 15 ve 20 oranlarında asidik ve bazik tuf katkılı örnekleri Tablo 3'te verilen  $w_{opt}$  değerlerinde Standard proktor ile sıkıştırılarak 18 adet örnek hazırlanmış ve bu örneklerin yarısına kür uygulanmadan, geriye kalan örneklerde ise 28 günlük kür sonrasında şişme basıncı ve şişme yüzdesi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ring içerisindeki örnekler ödometre hücresine yerleştirildikten sonra, sadece üst poroz blok ve yükleme başlığı ağırlığı altında 5 dk bekletildikten sonra hücre su ile doldurulmuş ve örneğin şişmesine izin verilmeden, hacmi sabit kalacak şekilde yüklemeler yapılmıştır. Yüklemelerde 0.01 mm'den büyük deformasyonların meydana gelmemesine dikkat edilmiştir. Örneğin hacminde artışın olmadığı ve daha fazla yüklemeye gerek görülmediği durumda deney sonlandırılmıştır. Bu deneyde, örneğe uygulanan nihai basınç, örneğin şişme basıncıdır.

**Tablo 5.** Katkısız ve katkılı örneklerin kür öncesi ve sonrası şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri

Örnek	Kürsüz		Kürlü	
	Şişme Basıncı (kPa)	Şişme Yüzdesi (%)	Şişme Basıncı (kPa)	Şişme Yüzdesi (%)
K	1030.72	21.5	861.05	18.92
K+%5AT	761.02	18.35	638.44	10.25
K+%10AT	760.04	16.75	563.9	9.4
K+%15AT	662.95	12.5	490.35	8.45
K+%20AT	588.42	9.45	393.26	6.75
K+%5BT	761.02	21.1	686.49	18.2
K+%10BT	741.41	18.8	662.95	17.15
K+%15BT	686.49	17.25	574.69	14.5
K+%20BT	564.88	12.6	490.35	11.75

K:Kil, AT: Asidik tuf, BT: Bazik tuf

Şişme yüzdesi ise optimum su içeriğindeki katkısız ve katkılı örneklerin standart proktor ile sıkıştırılması ile hazırlanan 18 adet örnekte gerçekleştirilmiştir. Örnekler öncelikle 7 kPa'lık sürşarj yükü altında 5 dk bekletildikten sonra ödometre hücresi tamamen su ile doldurularak örneğin serbestçe şişmesine izin verilmiş, örneklerin su altında bırakılmasından hemen sonra, farklı zaman aralıklarında şişme deformasyonları tamamlanana kadar kayıt altına alınmıştır. Katkısız ve katkılı örneklere ait kür öncesi ve sonrasına ait şişme basıncı ve şişme yüzdesi deney sonuçları Tablo 5'de verilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, katkısız kilin kür öncesi şişme basıncı 1030.72 kPa'dır ve bu değer kür sonrasında azalarak 861.05 kPa'a düşmüştür. Katkılı örneklerde şişme basıncı değerleri kür öncesinde 564.88-761.02 kPa arasında, kür sonrasında ise 393.26-686.49 kPa arasında değişmektedir.

Katkısız kilin şişme yüzdesi değeri %21.5 olup kür sonrasında %18.92'ye düşmüştür. Katkılı kil örneklerinde şişme yüzdesi değerlerinin kür öncesinde %9.45-21.1 arasında, kür sonrasında ise %6.75-18.2 arasında değiştiği belirlenmiştir.

### 3 Deneysel sonuçlarının değerlendirilmesi

Deneysel çalışmalar ile belirlenen katkılı ve katkısız örneklerin kür öncesi ve kür sonrası LL, PL, PI, şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri değerlendirilerek kürün, katkı oranı ve tipinin bu değerler üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Ayrıca basit istatistiksel analizler ile örneklerin LL, PL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasındaki ilişkiler ortaya konulmaya çalışılmıştır.

#### 3.1 LL, PL ve PI değerlerindeki değişimler

Deney sonuçlarına göre katkısız kilin kür öncesi LL değeri %507, PL değeri %41 ve PI değeri ise %466 iken, kür sonrası LL değeri %480'e, PL %42, PI ise %438 olarak belirlenmiştir. Kür etkisi ile katkısız örneğin LL değeri %5.33, PI değeri %6.01 oranında azalırken, PL değeri ise %2.44 oranında artmıştır (Tablo 6).

Asidik tuf katkısı eklenmiş örneklerin kür öncesi LL, PL ve PI değerlerinde azalmalar belirlenmiştir. Meydana gelen azalma oranları katkı oranına bağlı olarak artmaktadır. Bu örneklerde kür sonrası belirlenen LL, PL ve PI değerlerindeki değişimlere bakıldığında, LL ve PI değerlerinin kür öncesine göre daha fazla oranda azaldığı görülmektedir. Örneklerin kür sonrası PL değerlerinde meydana gelen azalmalar LL ve PI değerlerindeki gibi düzenli azalma oranları şeklinde değildir. Kür sonrasında PL değerindeki maksimum azalma %10 asidik tuf katkılı örnekte %14.63 oranında meydana gelmiştir. Katkı oranının artışına bağlı olarak PL değerlerinde meydana gelen değişim oranları da azalmıştır (Tablo 6).

Bazik tuf katkılı örneklerde kür öncesi LL ve PI değerleri asidik tuf katkılı örneklerde olduğu gibi azalmalar meydana gelmiştir. Katkı oranının artışına bağlı olarak LL ve PI değerlerindeki azalmalarda artmaktadır. Ancak oluşan bu azalmalar asidik tuf katkılı örneklere göre daha az orandadır. Bu örneklerde kür uygulanması sonucunda belirlenen LL ve PI değerlerindeki azalmalar kür öncesine göre daha fazla oranda meydana gelmiştir. PL değerleri ise düzenli olmayan değişimler sunmaktadır. Nitekim %5, 10 ve 15 bazik tuf katkılı örneklerde PL değerleri katkı oranının artışı ile azalmakta, ancak katkı oranının %20 olduğu örnekte PL değeri %4.88 oranında artış göstermektedir (Tablo 6).

Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda zeminde katkı malzemelerinin kullanılmasıyla LL ve PI değerlerinin azaldığı belirlenmiştir [25, 34]. Bazı çalışmacılar da artan katkı oranı ve topaklanma ile kilin plastisitesinin azaldığını ve daha düşük plastisite özelliği kazanmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir [63-66]. Bu çalışmada, kilde katkı malzemesi olarak tüflerin kullanılmasına ve kür süresine bağlı olarak LL ve PI değerlerinde meydana gelen azalmanın literatürdeki mevcut çalışmalardan elde edilen verilerle uyumlu olduğu görülmektedir.

**Tablo 6.** Örneklerin kür öncesi ve sonrası LL, PL ve PI değerlerinde katkı oranına bağlı olarak oluşan değişimler

Örnek	Kür öncesi % değişim			Kür sonrası % değişim		
	LL	PL	PI	LL	PL	PI
K	-	-	-	-5.33	2.44	-6.01
K+%5AT	-8.68	-9.76	-8.58	-13.02	-4.88	-13.73
K+%10AT	-14.60	-17.07	-14.38	-18.15	-14.63	-18.45
K+%15AT	-16.37	-14.63	-16.52	-19.92	-12.20	-20.60
K+%20AT	-25.64	-17.07	-26.39	-28.99	-9.76	-30.69
K+%5BT	-3.94	4.88	-4.72	-9.66	-7.32	-9.87
K+%10BT	-8.68	-21.95	-7.51	-12.62	-12.20	-12.66
K+%15BT	-10.45	-26.83	-9.01	-15.19	-17.07	-15.02
K+%20BT	-14.20	-4.88	-15.02	-19.13	4.88	-21.24

K:Kil, AT: Asidik tuf, BT: Bazik tuf

### 3.2 Şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerindeki değişimler

Katkısız ve katkılı örneklerde şişme basıncı değerleri incelendiğinde (Tablo 7), katkısız kil örneğinin kür öncesi 1030.77 kPa olarak belirlenen şişme basıncının kür sonrasında %16.46 azalarak 861.05 kPa değerine düştüğü görülmektedir. Asidik ve bazik tuf katkılı örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri de benzer şekilde kür sonrasında azalmaktadır.

Farklı oranlarda asidik tuf katkısının eklenmesi sonucunda örneklerin hem şişme basıncı hem de şişme yüzdesinde önemli sayılabilecek azalmalar meydana gelmiştir. Bu azalmalar katkı oranının artışına bağlı olarak fazlaşmış ve %20 asidik tuf katkılı örneğin şişme basıncında %42.91, şişme yüzdesinde ise %56.05 oranında azalmalar oluşmuştur.

**Tablo 7.** Örneklerin kür öncesi ve sonrası şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerinde katkı oranına bağlı olarak oluşan değişimler

Örnek	Kür öncesi % değişim		Kür sonrası % değişim	
	Şişme Basıncı	Şişme Yüzdesi	Şişme Basıncı	Şişme Yüzdesi
K	-	-	-16.46	-12.00
K+%5AT	-26.17	-14.65	-38.06	-52.33
K+%10AT	-26.26	-22.09	-45.29	-56.28
K+%15AT	-35.68	-41.86	-52.43	-60.70
K+%20AT	-42.91	-56.05	-61.85	-68.60
K+%5BT	-26.17	-1.86	-33.40	-15.35
K+%10BT	-28.07	-12.56	-35.68	-20.23
K+%15BT	-33.40	-19.77	-44.24	-32.56
K+%20BT	-45.20	-41.40	-52.43	-45.35

K:Kil, AT: Asidik tuf, BT: Bazik tuf

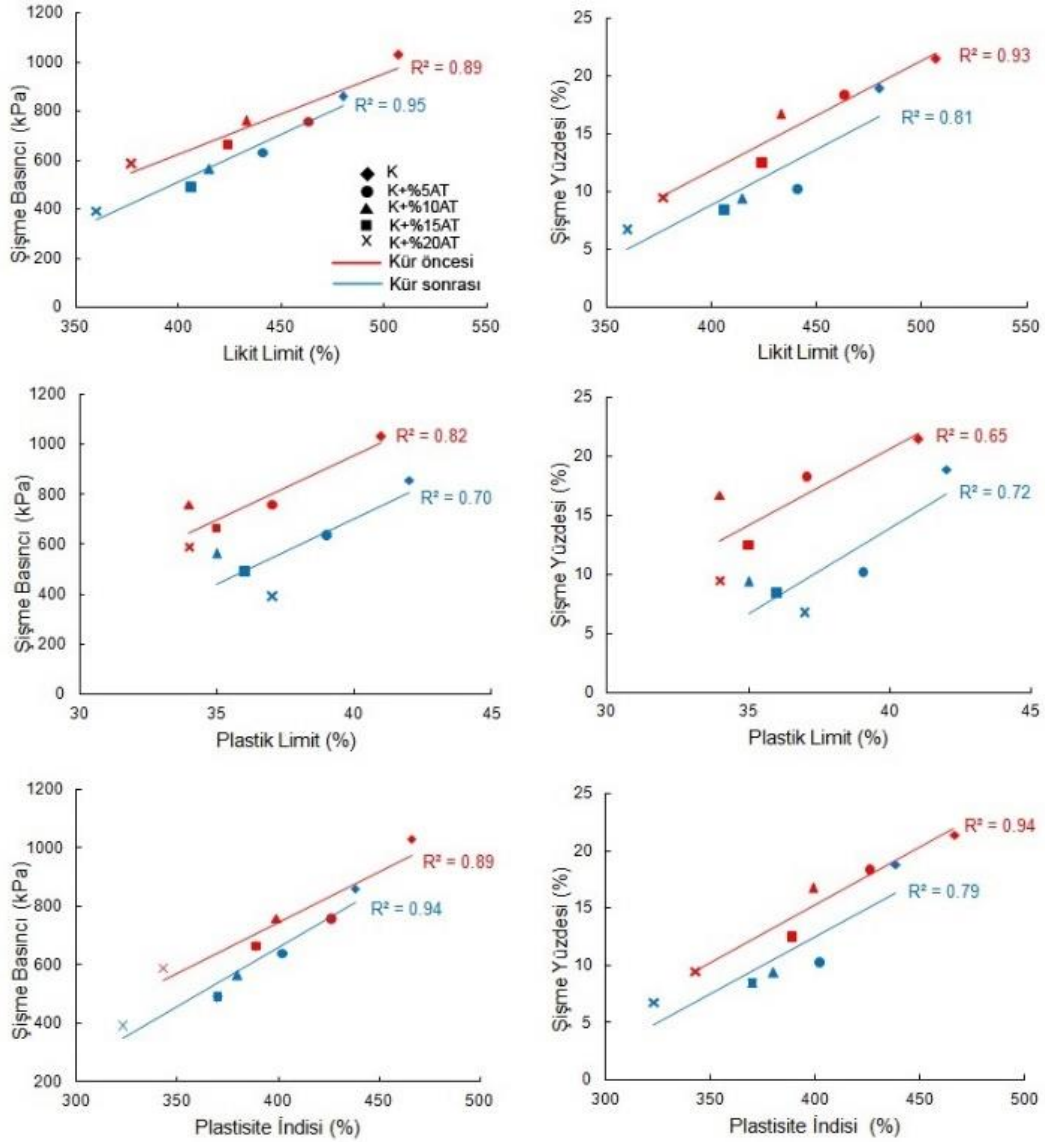
Bazik tuf katkılı örneklerde de asidik tuf katkılı örneklere göre değişim oranlarında olduğu gibi şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerinde önemli oranlarda azalmalar ortaya çıkmıştır. En fazla katkı oranının kullanıldığı %20 bazik tuf katkılı örnekte şişme basıncındaki azalma oranı %45.20'ye, şişme yüzdesindeki azalma oranı ise %41.40'a ulaşmıştır.

Katkılı örneklerin kür sonrası şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerindeki değişimler incelendiğinde; bu değerlerdeki azalmanın kür öncesine göre daha fazla olduğunu görmek mümkündür. Asidik tuf katkılı örneklerde kür sonrasında şişme basıncındaki azalma oranı %61.85'e ulaşırken, şişme yüzdesindeki azalma oranı ise %68.60 olarak belirlenmiştir. Bazik tuf katkılı örneklerde de kür sonrası şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerinin kür öncesine göre azaldığı belirlenmiştir. Ancak bu azalma asidik tüflere göre daha az oranlarda meydana gelmiştir. %20 bazik tuf katkılı örneğin kür sonrasındaki şişme basıncı %52.43, şişme yüzdesi ise %45.35 oranında azalmıştır.

Farklı malzemelerin katkı olarak kullanılmasıyla zeminin şişme basıncının ve şişme yüzdesi değerlerinin azaldığı farklı araştırmacılar tarafından belirlenmiştir [29, 33, 34]. Ayrıca Little vd. [63] şişme potansiyeli ve şişme basıncında meydana gelen önemli miktardaki azalmanın, stabilizasyon sonucu zeminin plastisite indisindeki azalma ile ilişkili olduğunu tespit etmiştir. Bu çalışmada kullanılan tuf katkılarının ve kür uygulamasının etkisiyle şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerinde azalma meydana gelmiştir ve bu anlamda elde edilen verilerin literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

### 3.3 LL, PL, PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasındaki ilişkiler

Asidik ve bazik tuf katkılı örneklerde kür öncesi ve sonrasına ait LL, PL ve PI değerleri ile örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasındaki ilişkiler basit regresyon analizleri ile incelenmiş ve veri dağılım grafikleri Şekil 1 ve 2'de verilmiştir. Şekil 1'de asidik tuf katkılı örnekler için verilen grafikler incelendiğinde, hem kür öncesi, hem de kür sonrasında artan katkı oranı ile birlikte örneklerin LL, PL ve PI değerlerinin azalmasına bağlı olarak örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 1. Asidik tuf katkılı örneklerde LL, PL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasındaki ilişkiler

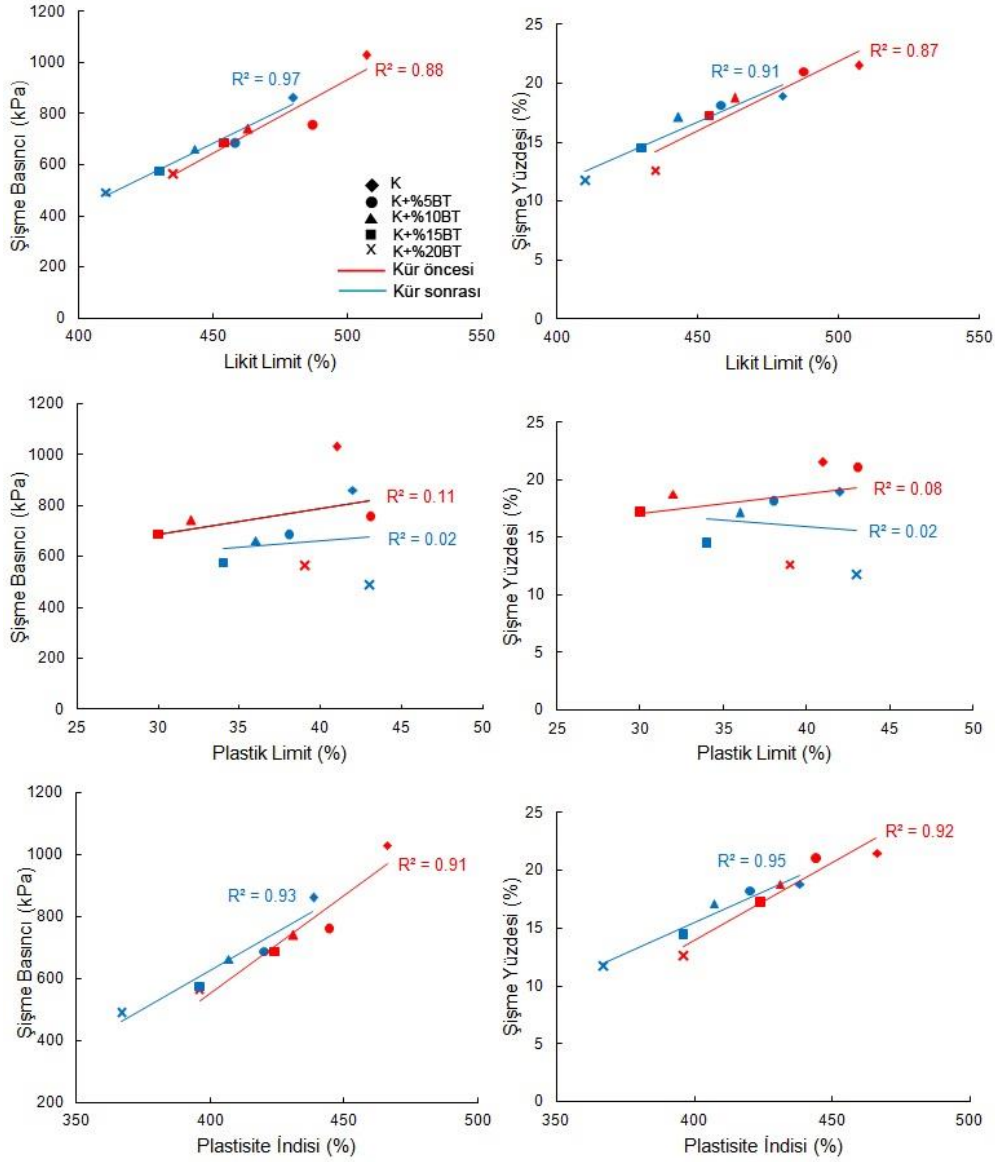
LL ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında çok kuvvetli pozitif, PL ile şişme basıncı arasında çok kuvvetli-kuvvetli pozitif, PL ile şişme yüzdesi arasında kuvvetli pozitif, PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında ise çok kuvvetli pozitif korelasyonlar vardır.

Bazık tuf katkılı örneklerde olduğu gibi hem küre öncesi, hem de küre sonrasında artan katkı oranı ile birlikte örneklerin LL, PL ve PI değerlerinin azalmasına bağlı olarak örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesi de azalmaktadır. Örneklerde LL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında çok kuvvetli pozitif korelasyonlar bulunurken, bazık tuf katkılı örneklerde PL ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında anlamlı bir ilişki söz konusu değildir.

#### 4 Sonuçlar

Asidik ve bazık tuf katkılarının yüksek plastisiteli kilin LL, PL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerine olan etkilerinin ve bu parametreler arasındaki ilişkilerin araştırıldığı bu çalışmadan ortaya çıkan sonuçları şu şekilde sıralamak mümkündür.

1. Katkısız kilin küre öncesi LL değeri %507, PL değeri %41 ve PI değeri ise %466 olarak belirlenmiştir. Kilin küre sonrasında belirlenen LL değeri %480, PL %42, PI ise %438'dir. Küre etkisi ile katkısız örneğin LL değeri %5.33 ve PI değeri %6.01 oranında azalmış, PL değeri ise %2.44 oranında artmıştır.
2. Asidik ve bazık tuf katkılarının eklenmesi ve artan katkı oranı ile birlikte örneklerin küre öncesi ve sonrası LL ve PI değerleri azalmıştır. Örneklerin PL değerleri ise artışlar ve azalmalar şeklindedir.



Şekil 2. Bazık tuf katkılı örneklerde LL, PL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasındaki ilişkiler

Nitekim asidik tuf katkılı örneklerde kür öncesi PL değerlerindeki en yüksek azalma oranı %10 ve 20 katkı oranına sahip örneklerde meydana gelirken, kür sonrasında ise en yüksek azalma oranı %10 katkılı örnekte belirlenmiştir. Ayrıca, kür sonrasında LL, PL ve PI değerlerindeki azalmalar kür öncesine göre daha yüksek oranlardadır.

3. Bazık tuf katkılı örneklerin hem kür öncesi hem de kür sonrası LL ve PI değerleri, asidik tuf katkılı örneklerde olduğu gibi artan katkı oranı ile birlikte azalmıştır. Meydana gelen azalma oranları asidik tuf katkılı örneklere göre daha azdır. Örneklerin kür öncesi PL değerleri de %15 katkı oranında maksimuma ulaşmış, ancak katkı oranının %20 olduğu örnekte azalma göstermiştir. Kür sonrası PL değerlerine bakıldığında, kür öncesine göre daha az

bir azalma söz konusudur. Kür sonrasında %15 katkıya sahip örnekte PL değerindeki azalma maksimumdur. Ancak katkı oranının %20 olduğu örnekte PL değerinde azalma değil artış meydana gelmiştir.

4. Katkısız kilin kür öncesi şişme basıncı 1030.72 kPa, şişme yüzdesi ise %21.5 olarak belirlenmiştir. Kür uygulandıktan sonra şişme basıncı %16.46, şişme yüzdesinde ise %12.00 oranında azalma oluşmuştur.
5. Katkılı örneklerde şişme basıncı ve şişme yüzdesinin artan katkı oranı ve kür etkisiyle önemli oranda azaldığı belirlenmiştir. Katkılı örneklerde kür öncesi şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerindeki en fazla azalma oranı %20



katkılı örneklerde meydana gelmiştir. Kür öncesinde bazik tuf katkı örneklerin şişme basıncında meydana gelen azalma asidik tuf katkı örneklerine göre daha fazladır. Ancak şişme yüzdesinde asidik tuf katkı örneklerde daha fazla bir azalma oranı ortaya çıkmıştır. Kür sonrasında ise hem şişme basıncı, hem de şişme yüzdesi değerlerinde en fazla azalmanın olduğu örnekler asidik tuf katkı örneklerdir. Bu sonuçlar şişme basıncı ve şişme yüzdesi açısından asidik tuf katkı örneklerde kürün daha fazla etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

6. Asidik tuf katkı örneklerde hem kür öncesi, hem de kür sonrasında artan katkı oranı ile birlikte örneklerin LL, PL ve PI değerlerinin azalmasına bağlı olarak örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesi azalmıştır. Basit regresyon analizlerinden ortaya çıkan sonuçlara göre LL ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında çok kuvvetli pozitif, PL ile şişme basıncı arasında çok kuvvetli-kuvvetli pozitif, PL ile şişme yüzdesi arasında kuvvetli pozitif, PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında ise çok kuvvetli pozitif korelasyonlar vardır.
7. Bazik tuf katkı örneklerde de asidik tuf katkı örneklerde olduğu gibi hem kür öncesi, hem de kür sonrasında artan katkı oranı ile birlikte örneklerin LL, PL ve PI değerlerinin azalmasına bağlı olarak örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesi de azalmaktadır. Örneklerde LL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında çok kuvvetli pozitif korelasyonlar belirlenmiştir. Ancak bazik tuf katkı örneklerde PL ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında anlamlı bir ilişki söz konusu değildir.
8. Tüm parametreler birlikte değerlendirildiğinde asidik ve bazik tuf katkısı ve kür uygulanmasına bağlı olarak oluşan topraklanma ile tane boyutundaki artış zemin tanelerini yüksek plastisiteli kilden daha düşük plastisiteli yapıya taşımakta ve buna bağlı olarak PI değerinin azalmasıyla şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri de azalmaktadır. Plastisite indisinin azalması zeminin suya karşı hassasiyetinin azaldığını gösteren bir parametre olarak kabul edilmektedir ve plastisite indisindeki azalmanın zeminin işlenebilirliğini artıracakı düşünülmektedir.
9. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, kür uygulamasının killerin stabilizasyonunda çok önemli bir yere sahip olduğunu göstermesi açısından önem taşımaktadır.
10. Elde edilen sonuçlar, kolay elde edilebilir, ekonomik ve çevreci bir malzeme olan tüflerin stabilizasyonda katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğini ortaya koyması bakımından oldukça önemlidir.
11. Katkılı stabilizasyon yöntemi, yarma ve dolgularda, su tutma yapılarında, hafif yapıların temellerinde, yol kaplaması altında ve üstyapı tabanında

uygulanabilmektedir. Bu çalışmanın sonuçları asidik ve bazik karakterli tüflerin iyileştirme çalışmalarında hangi oranda ve ne kadar süre ile küremeye tabi tutularak kullanılması durumunda başarılı bir iyileştirmenin gerçekleştirilebileceğini göstermesi açısından önemlidir.

12. Ayrıca, tüflerin katkı malzemesi olarak kullanımının, ülke ekonomisi ve çevre duyarlılığı açısından önem taşıdığı ortaya konmuştur.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): % 13

#### Kaynaklar

- [1] P.J. Thomas, Quantifying properties and variability of expansive soils in selected map units. PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- [2] A.E. Dif and W.F. Bluemel, Expansive soils under cyclic drying and wetting. *Geotechnical Testing Journal*, 14(1), 96-102, 1991.
- [3] J.H. Hardcastle, Evaluation and treatment of. expansive volcanic soils. US95, Owyhee County, Idaho. Final Report, 2003.
- [4] D. Mohan, G.S. Jain and D. Sharma, Foundation practice in expansive soils in India. *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*, Haifa, Israel, 125-132, 1973.
- [5] M.E. Popescu, Engineering problems associated with expansive clays from Romania. *Engineering Geology*, 14(1), 43-53, 1979. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(79\)90062-0](https://doi.org/10.1016/0013-7952(79)90062-0).
- [6] F.H. Chen, *Foundation expansive soils*. 2nd ed. New York, Elsevier Scientific Pub. Co., 280p., 1988.
- [7] J. Locat, M.A. Berube ve M. Choquette, Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(3), 294-304, 1990. <https://doi.org/10.1139/t90-040>.
- [8] S.C. Chu ve H.S. Kao, Study of engineering properties of a clay modified by fly ash and slag, *American Society of Civil Engineers*, 36, 89-99, 1993.
- [9] F.G. Bell, Lime stabilization of clay minerals and soils. *Elsevier Science*, 42(4), 223-237, 1996. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2).
- [10] D.I. Boardman, S. Glendinning ve C.F.D. Rogers, Development of stabilization and solidification in lime-clay mixes. *Geotechnique*, 51(6), 533-543, 2001. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.6.533>.
- [11] E. Kalkan, and S. Akbulut, The positive effects of silica fume on the permeability, swelling preure and compresive strength of natural clay liners. *Engineering Geology*, 73(1/2), 145-156, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.001>.
- [12] H.S. Aksoy, M. Yılmaz ve E.E. Akarsu, Stabilization of a clayey soil with Tunçbilek fly ash. *Fırat Üniversitesi, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 6(3), 88-92, 2008.

- [13] O. Cuisinier, J-C. Auriol, T. Le Borgne and D. Deneele, Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. *Engineering Geology*, 123(3), 187-193, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.07.010>.
- [14] K. Harichane, M. Ghrici, S. Kenai and K. Grine, Use of natural pozzolana and lime for stabilization of cohesive soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(5), 759-769, 2011. DOI 10.1007/s10706-011-9415-z.
- [15] K.M.A. Hossain and L. Mol, Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3495-3501, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.042>.
- [16] B. Lin, A.B. Cerato, S.M. Andrew and M.E.E. Madden, Effect of fly ash on the behavior of expansive soils: microscopic analysis. *Environmental and Engineering Geoscience*, 19(1), 85-94, 2013. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.19.1.85>.
- [17] P. Voottipruex and P. Jamsawang, Characteristics of expansive soils improved with cement and fly ash in Northern Thailand. *Geomechanics and Engineering*, 6(5), 437-453, 2014. <https://doi.org/10.12989/gae.2014.6.5.437>.
- [18] M.R. Asgari, A.B. Dezfule ve M. Bayat, Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(3), 1439-1452, 2015. DOI 10.1007/s12517-013-1173-1.
- [19] A.R. Goodarzi, S. Goodarzi ve H.R. Akbari, Assessing geo-mechanical and micro-structural performance of modified expansive clayey soil by silica fume as industrial waste. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*, 39, 333-350, 2015.
- [20] H. Bahadori, A. Hasheminezhad ve F. Taghizadeh, Experimental study on marl soil stabilization using natural pozzolans. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), 1-10, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002577](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002577).
- [21] Y. Aslan Topçuoğlu and Z. Gürocak, Changes in the strength of high-plasticity clays after stabilization: an experimental study, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2022a.
- [22] S.W. Lee and U. Dutto, Improved resilient modulus realized with waste products, grouting. *Soil Improvement and Geosynthetics*, ASCE Publishing, 1987.
- [23] R.C. Joshi, and T.S. Nagaraj, Fly ash utilization for soil stabilization, Balkema Rotterdam. *Environmental Geotechnics and Problematic Soils and Rocks*, 77-93, 1987.
- [24] A.M. Al-Swaidani, I. Hammoud ve A. Meziab, Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 714-725, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.04.002>.
- [25] S. Keskin, ve Ö. Çimen, Killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde pomza kullanımının araştırılması, I. Isparta Pomza Sempozyumu, Isparta, Türkiye, 1997.
- [26] Ö. Çimen, B. Dereli, F. Yıldırım, Ö.F. Şevkatlioğlu ve A. Eralp, Manisa kula yöresi volkanik tüfünün yüksek plastisiteli kilin mühendislik özelliklerine etkisi. 5. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2013.
- [27] R. Kılıç, Ö. Küçükali ve K. Ulaş, Stabilization of high plasticity clay with lime and gypsum (Ankara, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(2), 35-744, 2015. DOI:10.1007/s10064-015-0757-2.
- [28] A. Cheshomi, A. Eshaghi ve J. Haanpour, Effect of lime and fly ash on swelling percentage and atterberg limits of sulfate-bearing clay. *Applied Clay Science*, 135, 190-198, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.09.019> Get rights and content.
- [29] Ö. Çimen ve F.Ş. Coşan, Volkanik tüf ve amorf silikanın kilin mühendislik özelliklerine etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(3), 459-466, 2019.
- [30] T.W. Tao and Y. Lee, Consolidation behaviour of a soft mud treated with small cement content. *Engineering Geology*, 59, 327-335, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00021-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00021-7).
- [31] A.K. Mishra, M. Ohtsubo, L.Y. Li and T. Higashi, Influence of the bentonite on the consolidation behaviour of soil-bentonite mixtures. *Carbonates and Evaporites*, 25(1), 43-49, 2010. DOI 10.1007/s13146-010-0006-5.
- [32] D. Wang, N.E. Abriak, R. Zentar and W. Chen, Effect of lime treatment on geotechnical properties of dunkirk sediments in France. *Road Materials and Pavement Design*, 14(3), 485-503, 2013. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.755935>.
- [33] İ. Zorluer and S. Gücek, Şişen killerin mermer tozu katkı maddesiyle stabilizasyonu. *International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology*, 2019.
- [34] Ö. Çimen, B. Dereli ve E. Keleş. Üç farklı bölgeye ait pomzanın yüksek plastisiteli kile etkisinin karşılaştırılması. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 9 (1), 427-433, 2020.
- [35] B.S. Avcı, Soda ve MgO ile aktiflendirilmiş ara tip bentonitlerin sondaj ve döküm bentoniti karakteristiklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2009.
- [36] A. Akbulut, Bentonit. MTA Eğitim Serisi-32, Ankara, 1996.
- [37] Y. Aslan Topçuoğlu, Farklı katkı maddelerinin zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.

- [38] İ.H. Güven, Doğu pontidler'in jeolojisi ve 1/250 000 ölçekli kompliasyonu. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, 1993.
- [39] G. Gülibrahimoğlu, Trabzon Maçka güneyi maden jeolojisi raporu no: 1850. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, 1985.
- [40] B. Yalçınalp, Güzeyayla (Maçka-Trabzon) porfiri Cu-Mo cevherleşmesinin jeolojik yerleşimi ve jeokimyası. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 1992.
- [41] A. Korkmaz, Tonya-Düzköy (GB Trabzon) yöresinin stratigrafisi. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 36, 151-158, 1993.
- [42] S. Kürüm ve Ö. Tanyıldızı, Geochemical and sr-nd isotopic characteristics of upper cretaceous (calc-alkaline) and miocene (alkaline) volcanic rocks: Elazığ, Eastern Taurides, Turkey. Journal of African Earth Sciences, 134, 332-344, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.06.020>.
- [43] Y. Aslan Topçuoğlu ve Z. Gürocak, Asidik ve bazik karakterli tüflerin puzolanik özelliklerinin araştırılması: Elazığ ve Gümüşhane yörelerinden örnek bir çalışma, 12(4), 1024-1035, 2022b.
- [44] TS 25, Doğal puzolan (tras)-çimento ve betonda kullanılan tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [45] TS EN 450-1, Uçucu kül-betonda kullanılan-bölüm 1:tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [46] ASTM C-618, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [47] ASTM D 698, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [48] ASTM D 4318-17e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [49] A. Sridharan, A.S. Rao and P.V. Sivapullaiah, Swelling pressure of clays. Geotechnical Testing Journal, 9(1), 24-33, 1986. DOI: 10.1520/GTJ10608J.
- [50] F. Shuai, Simulation of swelling preure measurements on expansive soils. Doctoral Thesis, University of Saskatchewan, 1996.
- [51] A. Sridharan and D. Choudhury, Swelling pressure of sodium montmorillonites. Geotechnique, 52(6), 459-462, 2002. <https://doi.org/10.1680/geot.2002.52.6.459>.
- [52] F. Shuai and D.G. Fredlund, Model for the simulation of swelling-preure measurements on expansive soils. Canadian Geotechnical Journal, 35(1), 96-114, 1998. <https://doi.org/10.1139/t97-071>.
- [53] A.W. Skempton, Horizontal strees in an over-consolidated eocene clay. The 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, 1961.
- [54] E.L. Matyas, Some properties of two expansive clays from western Canada. 2nd International Conference on Expansive Clay Soils, Texas A&M University, College Station, 263-278, 1969.
- [55] M. Feng, A study of swelling preure using various laboratory testing methods, Research Report. Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1995.
- [56] D.G. Fredlund, J.U. Hasan ve H. Filson, The prediction of total heave. 4th International Conference on Expansive Soils, Denver, 1980.
- [57] A.A. Porter and J.D. Nelson, Strain controlled testing of expansive soils. In Expansive Soils, 34-44, 1980.
- [58] ASTM D 4546, Standard test methods for one-dimensional swell or collapse of cohesive soils. Annual book of ASTM standards, West Conshohocken, PA, 2008.
- [59] S.N. Keskin, H. Yıldırım ve M.A. Ansal, Killi zeminlerde yanal şişme davranışları, zemin mekaniği ve temel mühendisliği. 4. Ulusal Kongresi, İstanbul, Türkiye, 1992.
- [60] W.G. Holtz and H.J. Gibbs, Engineering properties of expansive clays: Transactions. ASCE 121, 641-677, 1956. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0007325>.
- [61] H.B. Seed, C.K. Chan and C.E. Lee, Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements. International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Supplement University of Michigan, 1962.
- [62] D.R. Tan Sneathen, Evaluation of expedient methods for identification and claification of potentially expansive soils. In XV International Conference on Expansive Soils, Australia, 1984.
- [63] D.N. Little, T. Scullion, P.B.V.S. Kota and J. Bhuiyan, Guidelines for mixture design and thickness design for stabilized bases and subgrades. Texas A and M University, Austin, Texas, 1995.
- [64] J. Mallela, P. Harold Von Quintus, K.L. Smith and E. Consultants, Consideration of limestabilized layers in mechanistic-empirical pavement design. The National Lime Association, Arlington, Virginia, USA, 2004.
- [65] B.R.P. Kumar and R.S. Sharma, Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 130(7), 764-767, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:7\(764\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:7(764))
- [66] S. Aydın, Yenikent (Ankara) yerleşim alanı killilerinin kireç ve uçucu küllü geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2010.

