

**ŒIŒEN KİLLERİN STABİLİZASYONUNDA
KATKI MALZEMESİ OLARAK ATIK CAM KULLANIMI**

**USE OF WASTE GLASS AS AN ADDITIVE MATERIAL
IN STABILIZATION OF SWELLING CLAYS**

ASLIHAN DADANLAR

PROF. DR. DİLEK TÜRER

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü


YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2019

Aslıhan DADANLAR'ın hazırladığı “**Şişen Killerin Stabilizasyonunda Katkı Malzemesi Olarak Atık Cam Kullanımı**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Harun SÖNMEZ
Başkan



.....

Prof. Dr. Dilek TÜRER
Danışman



.....

Prof. Dr. Murat ERCANOĞLU
Üye



.....

Prof. Dr. Adil BİNAL
Üye



.....

Doç. Dr. Mehmet Celal TUNUSLUOĞLU
Üye



.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak / /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

13/06/2019

Aslıhan DADANLAR

YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

13/06/2019

Aslıhan DADANLAR

ÖZET

ŞİŞEN KİLLERİN STABİLİZASYONUNDA KATKI MALZEMESİ OLARAK ATIK CAM KULLANIMI

Aslıhan DADANLAR

Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Dilek TÜZER

Haziran 2019, 115 sayfa

Genellikle kurak iklime sahip bölgelerde yer alan killi zeminlerde su içeriğinin artması sonucu gelişen ve ‘şişme’ olarak bilinen hacim artışları çeşitli mühendislik problemlerinin oluşmasına yol açmaktadır. Zeminlerdeki killerin şişme özelliklerine bağlı olarak mühendislik yapılarında oluşan deformasyonları en aza indirmek için zeminlerin şişme davranışlarının incelenmesi ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi son derece önemlidir. Katkılı stabilizasyon, şişen killerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan maliyet ve uygulama sürecinde büyük tasarruf sağlayan avantajlı bir yöntemdir. Bu yöntemde amaç, zemine değişik katkı maddelerinin karıştırılması ile kimyasal reaksiyon oluşturarak zeminin fiziksel ve mekanik parametrelerinde iyileşme sağlanmasıdır. Katkılı stabilizasyon tekniğinin uygulanması ile zeminin su içeriği ve boşluk oranı düzenlenerek taneler arası bağlayıcılık artırılır. Killi zeminlerin stabilizasyonuna yönelik birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen stabilizasyon işlemlerinde katkı maddesi olarak atık camların kullanıldığı çalışmaların sayısı sınırlıdır. Literatürde yer alan çalışmalarda ise yapılan stabilizasyon işleminin doğal koşullar altındaki performansının değerlendirilmediği görülmektedir. Tez çalışması kapsamında; yüksek şişme potansiyeline sahip Ankara Kili’nin stabilizasyonunda atık

cam kullanımının uygunluğu araştırılmıştır. Ankara Kili'ne belirli oranlarda atık cam tozu ilave edilerek tek eksenli sıkışma dayanımı ve serbest şişme indeksinde yarattığı değişim tespit edilmiştir. Atık cam tozunun zeminin makaslama dayanımı parametrelerine olan etkisi ayrıca değerlendirilmiştir. Stabilize edilen örnekler ıslanma-kuruma ve donma-çözölme döngülerine tabi tutularak doğal koşullar altında dayanımlarındaki değişim miktarı öngörölmeye çalışılmıştır. XRD yöntemi ile toprak örneklerinin stabilizasyon işlemi sonrası mineralojik değişimleri incelenmiştir. SEM tekniği kullanılarak mikroyapısal analiz çalışmaları gerçekteştirilmiştir. Bu çalışma ile şişen killerin mühendislik özelliklerinin geliştirilmesinde atık camların katkı malzemesi olarak tek başına kullanıldığında etkilerinin sınırlı olduğu anlaşılmıştır. Cam tozunun alkali maddeler ile aktivitesi sağlandığında stabilizasyon işleminin başarısının arttırılabileceği gözlenmiştir. Stabilizasyon malzemesi olarak CaO ile aktive edilmiş atık cam tozunun kullanıldığı deneylerde daha verimli sonuçlar elde edilmiştir. %15 cam tozu ve %5 CaO katkılı örneklerin 14 günlük kür süresi sonunda tek eksenli sıkışma dayanımında % 291 oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Cam tozuna ek olarak CaO ile hazırlanan örneklerin serbest şişme indeksinde %72.7 oranında düşüş olduğu belirlenmiştir. Islanma-kuruma ve donma-çözölme döngüleri sonunda örneklerin dayanımları kendi içinde değerlendirildiğinde en etkili katkı türünün %15 cam tozu + %5 CaO olduğu anlaşılmıştır. %15 cam tozu ve %5 CaO ile stabilize edilen zeminin 2 ıslanma-kuruma döngüsü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımı 2052.4 kPa olarak belirlenmiştir. Islanma-kuruma sonrası örneğin dayanımında düşüş beklenirken bu durumun aksine dayanım değerinde %179.6 oranında bir artış olduğu saptanmıştır. 3 donma-çözölme döngüsü sonunda en yüksek dayanım değeri ise 548.7 kPa ile %15 cam tozu + %5 CaO katkılı örnekte elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ankara Kili, şişme, Atık cam, Stabilizasyon, Islanma-kuruma, Donma-çözölme.

ABSTRACT

USE OF WASTE GLASS AS AN ADDITIVE MATERIAL IN STABILIZATION OF SWELLING CLAYS

Ashhan DADANLAR

Master of Science, Department of Geological Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Dilek TÜRER

June 2019, 115 pages

The increase in volume, known as ‘swelling’, developing as a result of increase in the water content of clayey soils, which are generally located in arid climates, causes various engineering problems. In order to minimize deformations, which are developed in engineering structures due to the swelling characteristics of clays in soils, it is very important to examine the swelling behaviour of the soils and improve their mechanical properties. Additive stabilization is an advantageous method, which saves a lot in the cost and application process, for improving the engineering properties of swelling clays. The aim of this method is to improve the physical and mechanical parameters of the soil by forming a chemical reaction by mixing different additives to the soil. By the application of additive stabilization technique, water content and void ratio of the soil are regulated and intergranular bonding is increased. Although many studies have been done to stabilize clayey soils, the number of studies using waste glass as an additive in the stabilization process is limited. It is observed that the performance of the stabilization process under natural conditions is not evaluated in the literature. Within the scope of the thesis, the use of waste glass in stabilization of Ankara Clay which has high swelling potential was investigated. A certain proportions of waste glass powder were added to the Ankara Clay and the change in uniaxial compressive strength and free swelling index

were determined. The effect of waste glass powder on shear strength parameters of the soil was also evaluated. Stabilized samples were subjected to wetting-drying and freezing-thawing cycles and the amount of change in their strength under natural conditions was predicted. The mineralogical changes of soil samples after stabilization process were investigated by XRD method. Microstructural analysis studies were performed by using SEM technique. In this study, it has been observed that when waste glass was used alone, its effects were limited. It has been observed that the success of the stabilization process can be increased if the activity of the glass powder is provided with the alkali materials. More efficient results were obtained in the experiments using CaO-activated waste glass powder as a stabilizing material. 15% glass powder and 5% CaO added samples were determined to have a 291% increase in uniaxial compressive strength at the end of 14 days of curing period. It was determined that in samples that were prepared with CaO in addition to the glass powder, the free swelling index decreased by 72.7%. At the end of the wetting-drying and freezing-thawing cycles, when the strength of the samples were evaluated among themselves, the most effective additive type was found to be 15% glass powder + 5% CaO. At the end of 2 wetting-drying cycles, the uniaxial compressive strength of the soil, which was stabilized with 15% glass powder and 5% CaO, was determined as 2052.4 kPa. After wetting-drying cycles, a decrease in the strength of the sample is expected. In this case, however, an increase of 179.6% in the strength of the sample was determined. At the end of 3 freezing-thawing cycles, the highest strength value was obtained 15% glass powder + 5% CaO added sample with 548.7 kPa.

Keywords: Ankara Clay, Swelling, Waste glass, Stabilization, Wetting-drying, Freezing-thawing.

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, desteğini benden esirgemeyerek her zaman yanımda olduğunu hissettiren, sabrı ve hoşgörüsü ile bana her konuda yardımcı olan değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Dilek TÜNER'e,

Çalışmada kullanılan toprağın temin edilmesindeki katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. Ahmet TÜNER'e,

Tez savunmam sırasında değerli yorumları ve önerileri ile katkıda bulunan jüri üyelerim Sayın Prof. Dr. Harun SÖNMEZ, Sayın Prof. Dr. Murat ERCANOĞLU, Sayın Prof. Dr. Adil BİNAL ve Sayın Doç. Dr. Mehmet Celal TUNUSLUOĞLU'na,

Tez çalışmamın sürdürülmesinde uzmanlık alanlarında bana destek veren Sayın Prof. Dr. Abidin TEMEL ve Sayın Dr. Ebru KAVUKÇU'ya,

Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarının kullanılmasında gerekli izni sağlayan Sayın Prof. Dr. Zafir EKMEKÇİ'ye, laboratuvar çalışmaları sırasında destek veren Araş. Gör. Dr. Alper TOPRAK, Mustafa YILMAZ ve Cem VURAL'a,

Uzun süreli laboratuvar çalışmaları boyunca bana her zaman yardımcı olan, tecrübelerinden yararlandığım Özgür EROL'a ve Ahmet BAY'a,

SEM analizlerinin yapılmasındaki katkılarından dolayı Mehmet ÖZCAN'a,

Bugünlere gelmemde büyük katkıları olan ve bana her koşulda destek veren aileme,

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aslıhan DADANLAR

Haziran 2019, Ankara

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER	viii
ÇİZELGELER.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
2.1. Katkılı Stabilizasyon Çalışmaları	5
2.2. Atık Camların Kullanıldığı Çalışmalar.....	10
2.3. Ankara Kili İle İlgili Çalışmalar	22
3. YÖNTEM.....	29
3.1. Örnek Alımı.....	29
3.2. Deneylerde Kullanılan Ankara Kili'nin Özelliklerinin Belirlenmesi.....	31
3.3. Katkı Malzemelerinin Hazırlanması.....	31
3.3.1. Atık Cam.....	31
3.3.2. Alkali aktivatörler	33
3.3.2.1. Sönmemiş Kireç (CaO).....	33
3.3.2.2. Sodyum Hidroksit (NaOH)	34
3.4. Serbest Şişme İndeksinin Belirlenmesi	35
3.5. pH Ölçümleri	36
3.6. Standart Proktor Deneyi	36
3.7. Doğrudan Makaslama Deneyi	37
3.8. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımlarının Belirlenmesi.....	38
3.9. Islanma-Kuruma Döngüleri.....	40
3.10. Donma-Çözülme Döngüleri	40
3.11. XRD Analizleri.....	40
3.12. SEM Analizleri.....	41
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ELDE EDİLEN VERİLER	44
4.1. Çalışmada kullanılan Toprağın İndeks ve Sınıflandırma Deneyleri	44

4.1.1. Tane Boyu Dağılımı Analizi	44
4.1.2. Atterberg Limitleri	44
4.1.3. Özgül Ağırlık.....	46
4.2. Serbest Şişme İndeksinin Belirlenmesi.....	46
4.3. pH Ölçümleri.....	50
4.4. Standart Proktor Deneyi	51
4.5. Doğrudan Makaslama Deneyi.....	53
4.6. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı	58
4.7. Islanma-Kuruma Deneyi	65
4.8. Donma-Çözülme Deneyi.....	72
4.9. XRD Analizleri	85
4.10. SEM Analizleri.....	91
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	103
6. KAYNAKLAR	108
EKLER.....	116
EK 1 - %15 Cam Tozu Katkılı Örneğin XRD Grafikleri	117
EK 2 - %15 cam tozu+%5 CaO Katkılı Örneğin XRD Grafikleri.....	122
EK 3 - %15 cam tozu+2M NaOH Katkılı Örneğin XRD Grafikleri	127
EK 4 – Tez Çalışması Orjinallik Raporu	132
ÖZGEÇMİŞ	133

ŞEKİLLER

Şekil 3.1.	Örnekleme alanından alınmış toprak örneğine ait görüntü.	29
Şekil 3.2.	Çalışmada kullanılan toprak örneğinin alındığı lokasyon.....	30
Şekil 3.3.	Cam öğütme aşamaları a) çeneli kırıcı, b) merdaneli kırıcı.	31
Şekil 3.4.	a) Bilyalı değirmen, b) Öğütülen camların eleme işlemi.	32
Şekil 3.5.	Öğütme işleminden sonra elde edilen farklı tane boylarında camlar.	32
Şekil 3.6.	Standart proktor deneyinden görüntüler.	36
Şekil 3.7.	Örneğin makaslama deneyi için hazırlanması.	37
Şekil 3.8.	Örneğin makaslama dayanımının ölçülmesi.	37
Şekil 3.9.	Nem dolabında bekletilen örneklerden bir görünüm.	39
Şekil 3.10.	CaO içerikli örnek hazırlanırken karşılaşılan olumsuzluk.	40
Şekil 3.11.	Yöntem aşamaları.	42
Şekil 4.1.	Tane boyu dağılımı eğrisi.	44
Şekil 4.2.	Casagrande likit limit deneyi verileri.	45
Şekil 4.3.	Atterberg limitleri deneylerine ait görüntüler.	45
Şekil 4.4.	a) Katkısız (%0), b) %15 cam tozu katkılı örneğin 24 saat sonundaki hacim değişimi.	47
Şekil 4.5.	a) % 15 cam tozu+%5 CaO, b) % 15 cam tozu+2M NaOH katkılı örneklerin 24 saat sonundaki hacim değişimleri.	47
Şekil 4.6.	Cam tozu yüzdesi – serbest şişme indeksi değişimi.	48
Şekil 4.7.	Katkı türlerine göre serbest şişme indeksindeki değişimin grafiksel gösterimi.	50
Şekil 4.8.	pH metre ile yapılan ölçümler.	50
Şekil 4.9.	Katkı türüne göre toprakta pH değişimi.	51
Şekil 4.10.	Doğal zemin ve katkılı örneklere ait kompaksiyon eğrileri.	52
Şekil 4.11.	Cam tozu yüzdesi – maksimum kuru yoğunluk değişimi.	52
Şekil 4.12.	Cam tozu yüzdesi – optimum su içeriği değişimi.	53
Şekil 4.13.	Katkısız (%0) örneğe ait makaslama gerilmesi (τ) – makaslama yer değiştirmesi (δ) grafiği.	54
Şekil 4.14.	Katkısız (%0) örneğe ait doruk ve artık makaslama için τ - σ grafiğinde yenilme zarfları.	54

Şekil 4.15.	%15 cam tozu katkılı örneğe ait makaslama gerilmesi (τ) - makaslama yer değiştirmesi (δ) grafiği.....	55
Şekil 4.16.	%15 cam tozu katkılı örneğe ait doruk ve artık makaslama için $\tau - \sigma$ grafiğinde yenilme zarfları.....	55
Şekil 4.17.	%25 cam tozu katkılı örneğe ait makaslama gerilmesi (τ) – makaslama yer değiştirmesi (δ) grafiği.....	56
Şekil 4.18.	%25 cam tozu katkılı örneğe ait doruk ve artık makaslama için $\tau - \sigma$ grafiğinde yenilme zarfları.....	57
Şekil 4.19.	Katkısız (%0) toprak örneklerinin deney sonrası görüntüleri.....	59
Şekil 4.20.	Katkısız (%0) toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.....	59
Şekil 4.21.	%15 cam tozu katkılı toprak örneklerinin deney sonrası görüntüleri.....	60
Şekil 4.22.	%15 cam tozu katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.....	61
Şekil 4.23.	%15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneklerinin deney sonrası görüntüleri.....	62
Şekil 4.24.	%15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.....	62
Şekil 4.25.	%15 cam tozu + 2M NaOH katkılı toprak örneklerinin deney sonrası görüntüleri.....	63
Şekil 4.26.	%15 cam tozu + 2M NaOH katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.....	64
Şekil 4.27.	Katkı türüne göre örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımındaki değişimin grafiksel gösterimi.....	65
Şekil 4.28.	İlk 10 dk içinde toprak örneklerinin üst kısımlarında başlayan dağılmalar.....	66
Şekil 4.29.	30 dk sonra toprak örneklerinin su içinde yığılması.....	66
Şekil 4.30.	%15 cam tozu katkılı örneklerin ıslanma döngüsü aşamasında dağılmaya başlaması.....	67
Şekil 4.31.	%15 cam tozu + 2M NaOH katkılı örneklerin 1. Islanma-kuruma döngüsü sonundaki görüntüsü.....	67

Şekil 4.32.	%15 cam tozu + 2M NaOH katkılı toprak örneklerinde 1. ıslanma-kuruma döngüsü sonunda oluşan ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi.	68
Şekil 4.33.	%15 cam tozu+2M NaOH katkılı örneklerin 2. döngü ıslanma aşaması ve sudan çıkarıldığında oluşan parçalanmalar.	68
Şekil 4.34.	%15 cam tozu+%5 CaO katkılı örneklerin 1. Islanma-kuruma döngüsü sonundaki görüntüsü.	69
Şekil 4.35.	%15 cam tozu+%5 CaO katkılı örnekler 2. Islanma-kuruma döngüsü aşamasında sudan çıkarıldığında.	69
Şekil 4.36.	Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonrası kırılan örneklerin görüntüsü.	70
Şekil 4.37.	Islanma-kuruma sonrası %15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.	70
Şekil 4.38.	%15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneklerinde ıslanma-kuruma döngülerine bağlı ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi.	71
Şekil 4.39.	%15 cam tozu + %5 CaO katkılı örneğin 2 ıslanma-kuruma döngüsü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımının başlangıç değerine göre değişimi.	72
Şekil 4.40.	Katkısız (%0) toprak örneklerinin a) deney öncesi, b) 1. döngü, c) 2. döngü, d) 3. döngü sonundaki görünümü.	73
Şekil 4.41.	Katkısız (%0) toprak örneklerinin deney sonundaki görüntüleri.	73
Şekil 4.42.	Donma-çözünme sonrası katkısız (%0) toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.	74
Şekil 4.43.	Katkısız (%0) toprak örneklerinde donma-çözülme döngülerine bağlı ağırlık kayıpları.	75
Şekil 4.44.	%15 cam tozu katkılı toprak örneklerinin a) deney öncesi, b) 1. döngü, c) 2. döngü, d) 3. döngü sonundaki görünümü.	75
Şekil 4.45.	%15 cam tozu katkılı toprak örneklerinin deney sonundaki görüntüleri.	76
Şekil 4.46.	Donma-çözünme sonrası %15 cam tozu katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.	76
Şekil 4.47.	%15 cam tozu katkılı toprak örneklerinde donma-çözünme döngülerine bağlı ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi.	77

Şekil 4.48.	%15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprak örneklerinin a) deney öncesi, b) 1. döngü, c) 2. döngü, d) 3. döngü sonundaki görünümü.	78
Şekil 4.49.	%15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprak örneklerinin deney sonundaki görüntüleri.	78
Şekil 4.50.	Donma-çözünme sonrası %15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.	79
Şekil 4.51.	%15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneklerinde donma-çözünme döngülerine bağlı ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi.	80
Şekil 4.52.	%15 cam tozu + 2M NaOH katkılı toprak örneklerinin a) deney öncesi, b) 1. döngü, c) 2. döngü, d) 3. döngü sonundaki görünümü.	81
Şekil 4.53.	%15 cam tozu + 2M NaOH katkılı toprak örneklerinin deney sonundaki görüntüleri.	81
Şekil 4.54.	Donma-çözünme sonrası %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.	82
Şekil 4.55.	%15 cam tozu+ 2M NaOH katkılı toprak örneklerinde donma-çözünme döngülerine bağlı ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi.	83
Şekil 4.56.	Toprak örneklerinin donma-çözünme döngüleri sonunda tek eksenli sıkışma dayanımlarının başlangıç değerlerine göre değişimi.	84
Şekil 4.57.	Donma-çözünme döngüleri sonunda örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımlarındaki azalmanın yüzdesel değişimi.	84
Şekil 4.58.	Stabilize edilmemiş toprağa ait tüm kayaç analizi sonuçları.	86
Şekil 4.59.	Stabilize edilmemiş toprağa ait kil fraksiyonu (normal).	87
Şekil 4.60.	Stabilize edilmemiş toprağa ait kil fraksiyonu (etilen glikol).	88
Şekil 4.61.	Stabilize edilmemiş toprağa ait kil fraksiyonu (350°C ısı).	89
Şekil 4.62.	Stabilize edilmemiş toprağa ait kil fraksiyonu (550°C ısı).	90
Şekil 4.63.	Katkısız (%0) toprağın SEM görüntüsü.	91
Şekil 4.64.	Katkısız (%0) toprak örneğinin yakınlaştırılmış SEM görüntüsü.	91
Şekil 4.65.	Katkısız (%0) toprak örneğinin SEM görüntüsü (14 gün sonunda).	92
Şekil 4.66.	Katkısız (%0) örneğin EDS spektrumu.	93
Şekil 4.67.	Cam tozunun SEM görüntüsü (Büyütme: 83).	94
Şekil 4.68.	Cam tozunun SEM görüntüsü (Büyütme: 696).	94
Şekil 4.69.	Cam tozunun EDS spektrumu.	95
Şekil 4.70.	%15 cam tozu katkılı örneğin SEM görüntüsü.	96

Şekil 4.71.	%15 cam tozu katkılı örneğin yakınlaştırılmış SEM görüntüsü (Büyütme: 1690).....	97
Şekil 4.72.	%15 cam tozu katkılı örneğin yakınlaştırılmış SEM görüntüsü (Büyütme: 6690).....	97
Şekil 4.73.	%15 cam tozu + %5 CaO katkılı örneğin SEM görüntüsü.	98
Şekil 4.74.	Örnek yüzeyini temsil eden bir diğer SEM görüntüsü.....	98
Şekil 4.75.	%15 cam tozu+%5 CaO katkılı örneğin SEM görüntüsü (Büyütme: 2200).....	99
Şekil 4.76.	%15 cam tozu+2M NaOH katkılı örneğin SEM görüntüsü.....	99
Şekil 4.77.	%15 cam tozu+2M NaOH katkılı örneğin SEM görüntüsü (Büyütme: 1640).....	100
Şekil 4.78.	Örnek yüzeyinin yakınlaştırılmış SEM görüntüsü (Büyütme: 6210). ...	100
Şekil 4.79.	%15 cam tozu+2M NaOH katkılı örneğin EDS spektrumu.....	102

ÇİZELGELER

Çizelge 3.1.	Soda kireç camının çeşitli özellikleri [95].....	32
Çizelge 3.2.	Serbest şişme indeksi ve şişebilirlik derecesi.....	35
Çizelge 3.3.	Deney programı ve örnek sayıları.....	43
Çizelge 4.1	Deneylerde kullanılan kil için Atterberg limitleri ve parametreleri.	46
Çizelge 4.2.	Özgül ağırlık deneyi verileri.....	46
Çizelge 4.3.	Katkısız (%0) ve cam tozu katkılı örneklere ait deney verileri.	48
Çizelge 4.4.	Cam tozu ve kireç (CaO) katkılı örneklere ait veriler.	49
Çizelge 4.5.	Cam tozu ve NaOH katkılı örneklere ait veriler.....	49
Çizelge 4.6.	Doğrudan makaslama deneyi doruk makaslama parametreleri.....	58
Çizelge 4.7.	Doğrudan makaslama deneyi artık makaslama parametreleri.....	58
Çizelge 4.8.	Katkısız toprak örneklerine ait tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi parametreleri.	60
Çizelge 4.9.	%15 cam tozu katkılı toprak örneklerine ait tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi parametreleri.....	61
Çizelge 4.10.	%15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneklerine ait tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi parametreleri.	63
Çizelge 4.11.	%15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örneklerine ait tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi parametreleri	64
Çizelge 4.12.	Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonrası %15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprak örneklerine ait parametreler.....	71
Çizelge 4.13.	Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonrası katkısız toprak örneklerine ait parametreler.	74
Çizelge 4.14.	Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonrası %15 cam tozu katkılı toprak örneklerine ait parametreler.....	77
Çizelge 4.15.	Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonrası %15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprak örneklerine ait parametreler.....	79
Çizelge 4.16.	Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonrası %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örneklerine ait parametreler.....	82
Çizelge 4.17.	Stabilize edilmemiş toprakta bulunan kil mineralleri.....	85
Çizelge 4.18.	Katkısız (%0) örneğin içerdiği element türleri ve miktarları.	92
Çizelge 4.19.	Cam tozunun içerdiği element türleri ve miktarları.....	96

Çizelge 4.20. %15 cam tozu + 2M NaOH katkılı örneğin içerdiği element türleri ve miktarları.	101
---	-----

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al	Alüminyum
c	Kohezyon
°C	Santigrad
Ca	Kalsiyum
Fe	Demir
Ø	İçsel sürtünme açısı
G _s	Özgül ağırlık
K	Potasyum
kPa	KiloPaskal
M	Molarite
Mg	Magnezyum
µm	Mikrometre
ml	Mililitre
mm	Milimetre
MPa	MegaPaskal
Na	Sodyum
O	Oksijen
OH ⁻	Hidroksit iyonu
Si	Silisyum
σ	Normal gerilme
τ	Makaslama gerilmesi
δ	Makaslama yer değiştirmesi

Kısaltmalar

AASHTO	Amerikan Devlet Otoyolları ve Resmi Taşımacılık Birliği
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
ASR	Alkali silika reaksiyonu

ASTM	Amerikan Test ve Materyal Topluluğu
CaO	Kalsiyum oksit
Ca(OH) ₂	Kalsiyum hidroksit
CAH	Kalsiyum Alümina Hidrat
CASH	Kalsiyum Alümina Silika Hidrat
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı
CCR	Kalsiyum Karbür Kalıntısı
CH	Yüksek Plastisiteli Kil
CL	Düşük Plastisiteli Kil
CSH	Kalsiyum Silika Hidrat
EDS	Enerji Dağılımlı X-ışınları Spektrometresi
HDEP	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
H.Ü. Müh. Fak.	Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
LL	Likit Limit
MBV	Metilen Mavisi Değeri
MgO	Magnezyum oksit
ML	Düşük Plastisiteli Silt
Na ₂ O	Sodyum oksit
NaOH	Sodyum hidroksit
OH	Organik Kil - Silt
PI	Plastisite İndeksi
PL	Plastik Limit
SC	Killi Kum
SL	Büzülme Limiti
SM	Siltli Kum
SP	Kötü derecelenmiş Kum
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SiO ₂	Silisyum dioksit
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
UCS	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
XRD	X- Işınları Kırınım Yöntemi

1. GİRİŞ

Şişme potansiyeline sahip killi zeminlere yıllık yağışın yıllık buharlaşmadan daha az olduğu, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde sıkça rastlanılmaktadır. Şişen zeminler özellikle Arabistan, Güney Afrika, Avustralya, Amerika, Hindistan, Çin gibi ülkelerin yanı sıra, Türkiye’de de bulunmaktadır [1, 2, 3, 4]. Türkiye’de şişen zeminlerin yoğun olarak bulunduğu illerden birisi de Ankara’dır. Literatürde ‘Ankara Kili’ olarak da bilinen kilin büyük ölçüde şişme potansiyeli gösterdiği birçok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur [5, 6, 7, 8, 9]. Suyla temas ettiklerinde şişen zeminler çoğunlukla bentonit türü (montmorillonit içerikli) kil içermektedir ve bu tür zeminlerin serbest şişmesi %1200-2000 aralığında değişmektedir [10]. Su içeriğindeki değişim ve içerdiği kil minerali türüne bağlı olarak büyük hacim değişikliklerinin görüldüğü killi zeminler, mühendislik açısından problemleri bir grubu oluşturmaktadır. Şişen killerde meydana gelen hacimsel değişimler; hafif yapılar (az katlı binalar), yollar ve tretuvarlar, havaalanları, park alanları, boru hatları, tüneller, sulama kanalları, istinat ve bahçe duvarları gibi mühendislik yapılarını etkilemekte ve önemli derecede hasar oluşturmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri’nde 1987 yılında yapılan bir araştırmada şişen zeminlerin; binalara, yollara, havaalanlarına, boru hatlarına ve diğer tesislere verdiği yıllık zarar 9 milyar dolar olarak tespit edilmiş ve bu miktarın deprem, taşkın, kasırga ve hortumların birleştirilmiş hasarlarından iki kat daha fazla olduğu belirtilmiştir [11]. Su geçirgenliği az olan killi zeminler, bünyelerine suyu alıp doygun hale geldiklerinde, suyu hapsederek zamana yayılı olarak konsolide olmaktadır. Konsolidasyon sonrası oluşabilecek oturmaların farklı oturmalar olarak gerçekleşmesi neticesinde de yıllar sonra üst yapının taşıyıcı sisteminde çatlaklar ve göçmeler görülebilmektedir.

Mekanik ve kimyasal yöntemler olarak ikiye ayrılan stabilizasyon teknikleri, problemleri zeminlerin mühendislik özelliklerini geliştirmek amacıyla uygulanan yöntemlerdir. Mekanik veya katkısız stabilizasyon tekniğinde uygulanan işlemlerle zeminlerin fiziksel, hidrolik ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi sağlanır. Kimyasal veya katkılı stabilizasyon tekniği ise zeminlere değişik katkı maddelerinin karıştırılması suretiyle kimyasal reaksiyon oluşturularak zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Zayıf mühendislik özelliklerine sahip mevcut zemin ile farklı malzemelerin belirli

oranlarda karıştırılması ile stabilizasyon sağlamak son yıllarda sıkça uygulanan, maliyet ve yapım sürecinde büyük tasarruf sağlayan avantajlı bir yöntemdir.

Kimyasal stabilizasyonda iki önemli reaksiyon gerçekleşmektedir. Bunlardan birincisi katyon değişimi reaksiyonu (ilerleyen aşamada yumaklaşma ve agregasyon), diğeri ise çimentolaşmadır [12]. Katyon değişimi reaksiyonunun oluşabilmesi için kalsiyumlu bileşikler ve organik kimyasallar kullanılır. Çimentolaşma reaksiyonu için çimento, kireç, puzolanlar, sodyum silikat, fosforik asit, sodyum hidroksit, jips, alüminyum tuzları ve bitüm emülsiyonları zemine eklenir. Kimyasal stabilizasyonun en etkili sonuçları ise katyon değişimi ve çimentolaşma reaksiyonlarının birlikte olduğu çalışmalarda elde edilmektedir.

Zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılan katkı maddeleri; kireç, çimento, bitüm, uçucu kül ve bazı kimyasallardır [13]. Kimyasal (puzolanik) reaksiyon yapma özelliğine sahip bu katkı malzemeleri stabilizasyonda oldukça etkili olsalar da çevresel, ekonomik koşullar ve mühendislik uygulamaları açısından düşünüldüğünde kullanımlarında bazı kısıtlamalar mevcuttur.

Kireç ve çimento gibi kalsiyum kökenli katkıları sülfat içeriği yüksek zeminlerde şişme problemine neden olmaktadır [14]. İnce taneli ve organik zeminlerde çimento katkılı stabilizasyon çalışmaları ekonomik olmamaktadır. Ayrıca çimento üretim endüstrisinin fosil yakıtların aşırı tüketimi ve özellikle karbondioksit (CO₂) olmak üzere yüksek miktarda sera gazı emisyonu yoluyla zararlı çevresel etkilere neden olduğu düşünüldüğünde çimento stabilizasyonu çevresel açıdan da sorunludur. İri taneli zeminlerde ve sızma probleminin olduğu yerlerde kireç ile stabilizasyon yapılamamaktadır [15, 16]. Uçucu küllerin bileşimindeki ağır metaller çevre kirliliği sorunlarına yol açmaktadır. Bitüm daha çok granüler zeminlerde uygulanmaktadır ve kullanılacak malzemenin kil ve organik maddelerden arınmış olması gereklidir [17].

Katkılı stabilizasyon çalışmaları kapsamında jeoteknik mühendisliği son yıllarda alternatif malzeme arayışına girmiştir. Özellikle kohezyonlu zeminlere kohezyonsuz bir malzemenin ilavesi ile doğal zeminin şişme ve konsolidasyon oturması gibi problemleri azaltılabilmektedir. Bu bağlamda atık camlar alternatif bir malzeme olarak stabilizasyon

çalışmalarında yerini almıştır. Bu atıkların değerlendirilmesi ile depolanması gereken atık miktarı ve zemin stabilizasyonu maliyetlerinin azaltılması hedeflenmektedir.

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde katı atıklar sosyal, ekonomik ve çevresel sorunların en büyüğünü oluşturmaktadır. Katı atıkların önemli bir bölümünü oluşturan cam atıklar, bazı durumlarda kaynağında özel olarak ayrılırken bir kısmı da yeniden değerlendirmek için toplanmaktadır. Türkiye’de 2017 yılı verilerine göre camın geri kazanım oranı %23’tür ve yılda yaklaşık olarak 193.563 ton atık camın geri kazanımı sağlanmıştır [18]. Amerika Birleşik Devletleri’nde 2015 yılında belediye atıklarında yaklaşık olarak 11.47 milyon ton cam bulunurken bunun sadece 3.03 milyon tonu (%26.4’ü) geri dönüştürülmüştür [19]. Avustralya’da ise her yıl yaklaşık olarak 850.000 ton cam kullanılmakta ve bunun sadece 340.000 tonu (%40’ı) geri dönüştürülmektedir [20]. Sonuç olarak gelişmiş ülkeler dahi atık camın ancak %20-40’ını geri dönüştürebilmekte kalan kısmı ise atık depolama merkezlerinde gömülmektedir. Bu nedenle atık camların zemin stabilizasyonu gibi çeşitli uygulamalarda katkı malzemesi olarak değerlendirilmesi çevresel ve ekonomik ölçekte önemli bir etkiye sahiptir.

Camın en yaygın şekli pencere ve şişelerin yapımında kullanılan soda-kireç camlarıdır. Soda-kireç camlarının en önemli bileşenleri SiO_2 , Na_2O , CaO ve Al_2O_3 ’tir. Kumun temel içeriğini oluşturan silika (SiO_2), camın en temel bileşenlerinden biridir ve kohezyonsuz olma özelliğine sahiptir. Cam da toz haline getirildiğinde kohezyonsuz malzeme gibi davranır. Cam tozu, şişme potansiyeline sahip kohezyonlu zeminlere eklendiğinde zeminin bazı mühendislik özelliklerini iyileştirmesi beklenmektedir. Önceki çalışmalarda, cam tozunun silika içeriği ve alkali özelliklerine bağlı olarak jeopolimerizasyon sürecinde kaynak malzeme olarak kullanılmasının uygun olduğu belirtilmiştir [21]. Cam tozunun bünyesinde bulunan amorf silika ve alüminanın çeşitli alkali çözeltiler ile çözünmesi sağlandığında jeopolimer olarak isimlendirilen bağlayıcılık özelliği yüksek malzemelerin elde edilmesi de muhtemeldir.

Killi zeminlerin stabilizasyonuna yönelik birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen stabilizasyon işlemlerinde katkı maddesi olarak atık cam tozunun kullanıldığı çalışmaların sayısı sınırlıdır. Literatürde, cam tozu ile yapılan stabilizasyon işleminin doğal koşullar altındaki performansını değerlendirmeye yönelik herhangi bir çalışma

gerçekleştirilmemiştir. Tez çalışması kapsamında atık cam tozu katkısının dayanım ve şişme parametreleri üzerindeki etkisinin belirlenmesinin yanı sıra, örnekler ıslanma-kuruma ve donma-çözülme döngülerine tabi tutularak doğal koşullar altındaki performansları öngörülme çalışılmıştır. Bu atıkların değerlendirilmesi ile çevresel ve ekonomik olarak katkı sağlanması hedeflenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Katkılı Stabilizasyon Çalışmaları

Zeminlerin iyileştirilmesi (stabilizasyonu) jeoteknik mühendisliği alanında uygulanmakta olan en eski yöntemlerden biri olarak günümüzde de pek çok araştırmacının ilgisini çekmekte ve sürekli olarak gelişim göstermektedir. Zeminlerin iyileştirilmesi; zeminin kayma direnci ve dayanımını arttıran, geçirimsizlik ve hacimsel değişim yeteneğini azaltan her türlü işlemdir. Zemin iyileştirme yöntemlerinde temel amaç, mekanik araçlarla zeminin boşluk oranının azaltılması veya zemin boşluklarının çeşitli karışımlarla doldurulmasıdır [22].

Stabilizasyon teknikleri genellikle mekanik stabilizasyon ve kimyasal stabilizasyon olarak iki ana grup altında toplanmaktadır [16, 17, 23]. Mekanik veya katkısız stabilizasyon, fiziksel birtakım işlemlerle zeminlerin fiziksel, mekanik ve hidrolik özelliklerini değiştirmeye yarayan yöntemleri içermektedir. Kimyasal stabilizasyon Lambe ve ark. [23] tarafından; mekanik stabilizasyonla iyileştirilemeyen zeminlerde çeşitli katkı maddeleri ile kimyasal reaksiyon oluşturarak zeminin mühendislik özelliklerinin değiştirilmesi esasına dayanan işlemler olarak tanımlanmıştır.

Zeminlerin mühendislik özelliklerinin geliştirilmesinde önemli etkileri olan katkı malzemeleri; kireç, çimento, bitüm, uçucu kül ve çeşitli tuzlardır. Özellikle çevresel ve ekonomik koşullar dikkate alındığında son yıllarda zeminlerin stabilizasyonunda endüstriyel yan ürünler ve atık malzemelerin ön plana çıktığı görülmektedir. Literatüre bakıldığında; uçucu kül, metal cürufu, silis dumanı, kırmızı çamur gibi malzemeler ile pirinç kabuğu külü, küspe külü, atık kağıt külü, yer fıstığı kabuğu külü gibi çeşitli endüstriyel ve zirai atıkların stabilizasyon çalışmalarında değerlendirildiği görülmektedir. Ayrıca katkı malzemesi olarak doğal taş işleme tesisi atıklarının, kullanılmış lastiklerin, cam, plastik ve alüminyum ambalaj ürünü atıklarının ve çeşitli biyopolimerlerin kullanımına yönelik araştırmalar da yapılmaktadır.

Çeşitli katkı maddelerinin stabilizasyon çalışmalarında değerlendirildiği araştırmalardan bazıları aşağıda özet şeklinde sunulmuştur.

Kireç ilk kez 1924 yılında modern inşaat uygulamalarında, toprağın stabilize edilmesinde kullanılmıştır [24]. McDowell [25], Yunanların ve Romalıların toprak-kireç karışımlarını kullandıklarından bahsetmiştir. Kireç ayrıca II. Dünya Savaşı döneminde otoyol ve demiryolu yapımında stabilizasyon yöntemi olarak sıkça tercih edilmiştir [26].

Al-Mukhtar ve ark. [27] tarafından killi bir zeminde uzun vadeli iyileşme sağlayabilmek için kil mineralleri ile reaksiyona giren kireç miktarının minimum konsantrasyonunun saptanmasına yönelik bir çalışma yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, zemin örneğinde katyon değişimini içeren kısa süreli reaksiyon için %5'lik kireç ilavesinin yeterli olduğunu göstermiştir. Daha fazla miktarda kireç ilavesinin puzolanik reaksiyonları teşvik ettiği ve kalsiyum alümina hidrat (CAH) gibi yeni fazların oluşumunu sağladığı yönünde bulgular kaydedilmiştir.

Mohamedzein ve Al-Rawas [28], bünyesinde silikat ve karbonat mineralleri içeren, siltli kum olarak sınıflandırılan Sabhka topraklarının makaslama dayanımını iyileştirmek amacıyla çimento kullanma olasılığını araştırmıştır. %7.5 oranında çimento katkısı ile stabilize edilen zeminin 12 ıslatma/kurutma döngüsünden sonra ağırlık kaybı %6 olarak hesaplanmıştır. Üç eksenli sıkışma deneyi (Konsolidasyonlu drenajsız, CU) sonuçlarına göre örneğin makaslama dayanımının çimento içeriği ve kür süresi ile birlikte artış gösterdiği belirtilmiştir.

Khemissa ve Mahamedi [29], yüksek plastisiteli kil ile çimento-kireç karışımları üzerinde yapmış olduğu CBR ve drenajsız makaslama dayanımı testleri sonucunda optimum iyileşmenin sağlanabilmesi için %8 çimento ve %4 kireç katkısının ideal olduğu sonucuna varmıştır.

Ogundipe [30], farklı oranlarda bitüm katkısı ile granüler yapıdaki bir zeminin dayanım ve sıkışma özelliklerindeki değişimi analiz etmiştir. Araştırmacı, elde ettiği sonuçlar ile en yüksek maksimum kuru yoğunluk ve CBR değerine ulaşmada gereken optimum bağlayıcı içeriğinin %4 olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca daha fazla miktarda bitüm katkısı kayma ve agregalar arasındaki bağın zayıflaması nedeniyle maksimum kuru yoğunluk ve CBR değerlerinde azalmaya yol açtığını belirtmiştir.

Yılmaz ve Civelekoğlu [31], yüksek şişme potansiyeline sahip bentonit içerikli zeminlerde jips katkısının etkilerini yorumlamıştır. Araştırmacılar tarafından optimum iyileşmenin sağlanabilmesi için kür süresi 7 gün olarak belirlenmiştir. %5 oranında jips katkısı ile bentonitin şişme yüzdesinde %69.1'lik bir azalma meydana gelirken tek eksenli sıkışma dayanımında 7 gün içerisinde %31.9'luk artış görülmüştür. Çalışma sonucunda araştırmacılar, şişen killerin stabilizasyonunda jips kullanımının etkili bir yöntem olduğunu, jipsin kirece göre daha ekonomik olmasından dolayı stabilizasyon çalışmalarında doğal jipslerin yanı sıra, jips bazlı atık ürünlerin de kullanılabileceğini belirtmiştir.

Şenol ve ark. [32], 2006 yılında ABD'nin Wisconsin eyaletindeki yol güzergahlarından aldıkları dört farklı yumuşak alt tabaka türünün çeşitli uçucu külleri kullanarak stabilizasyonunu araştırmıştır. Araştırmacılar, uçucu kül katkısı ile birlikte dayanımdaki artışların sırasıyla CL, ML, OH ve CH türü zemin örneklerinde olduğunu belirtmiştir. Organik madde varlığının uçucu kül ve su arasındaki puzolanik reaksiyonu engelleyerek inorganik topraklara kıyasla CBR değerlerinde daha küçük artışa neden olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, uçucu kül stabilizasyonunun dayanım ve CBR değerlerinde artış sağladığı için otoyol inşasında yumuşak alt tabakanın iyileştirilmesine yönelik bir alternatif olabileceği vurgulanmıştır.

Manso ve ark. [33], farklı türdeki killi zeminler ile pota ocağı cürufu ve kireç karışımları üzerinde yaptığı çalışmada jeoteknik parametrelerdeki iyileşmenin (plastisite, CBR, şişme, tek eksenli sıkışma dayanımı) %2 kireç ve %5 cüruf karışımı için benzer olduğu sonucunu paylaşmıştır. Araştırmacılar, tek eksenli sıkışma dayanımının %2 kireç katkılı karışımlarda 1.4 kat, %5 cüruf katkılı karışımlarda ise 1.8 kat artış gösterdiğini bildirmiştir. Çalışmada genel olarak cüruf katkılı karışımlarda kireçli karışımlardan daha yüksek dayanıklılık indeksleri kaydedilmiştir. Bu sonuç, araştırmacılar tarafından kil partikülleri ile cüruf arasındaki reaksiyonlar sonucu oluşan çimentolanma ürünlerinin kireç-zemin reaksiyonunda oluşan ürünlere göre daha dayanıklı olmasına atfedilmiştir.

Kalkan [34], farklı oranlarda silis dumanı-kireç ve uçucu kül-kireç karışımları kullanarak granüler toprağın stabilizasyonunu sağlamıştır. Kompaksiyon, sıkışma dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneylerinin sonuçları atık malzemeler ile kireç kullanımının toprağın dayanım özelliklerini geliştirdiğini doğrulamıştır. Araştırmacı, silis

dumanı-kireç ve uçucu kül-kireç karışımları ile stabilize edilen toprağın daha dayanımlı ve daha kırılğan olduğunu belirtmiştir. Sıkışma dayanımı ve CBR değerinin özellikle ilk 28 günde olmak üzere kür süresinin artması ile birlikte arttığı belirtilmiştir.

Bayer prosesi ile boksitten alümina üretimi sırasında cevherin yaklaşık %35 ila %40'ının kırmızı çamur atığı olarak açığa çıktığını belirten Kalkan [35] çalışmasında, bir hidrolik bariyer olarak sıkıştırılmış kil astarlarının tek eksenli sıkışma dayanımı, hidrolik iletkenlik ve şişme yüzdesi üzerinde kırmızı çamurun etkilerini incelemiştir. Araştırmacının elde ettiği sonuçlar, kırmızı çamur ve çimento-kırmızı çamur katkıları içeren sıkıştırılmış kil örneklerinin yüksek sıkışma dayanımına sahip olduğunu ve hidrolik iletkenlik ile şişme yüzdesinin doğal kil örneklerine kıyasla azaldığını göstermiştir. Araştırmacı, kırmızı çamur ve çimento-kırmızı çamur malzemelerinin jeoteknik uygulamalarda kil astarlarının stabilizasyonu için başarıyla kullanılabileceği sonucuna varmıştır.

Brooks [36], yüksek plastisiteli kil ile farklı oranlarda pirinç kabuğu külü ve uçucu kül karışımları üzerinde yapmış olduğu CBR ve serbest basınç dayanımı deneyleri sonucunda optimum pirinç kabuğu külü oranını ağırlıkça %12 olarak hesaplamıştır. Ağırlıkça %12 pirinç kabuğu külü katkısı ile tek eksenli sıkışma dayanımı testinde %97 artış sağlanırken bu oran CBR testinde %47 olmuştur.

Benzer şekilde Rahgozar ve ark. [37], killi kum (SC) sınıfı zeminlere %6 pirinç kabuğu külü ile %8 çimento katkısı ekleyerek hazırladıkları karışımların 28 günlük kür süresi sonunda tek eksenli sıkışma dayanımında 25.44 kat, CBR değerinde ise 18.2 kat artış olduğu sonucunu elde etmiştir.

Singh ve Yadav [38], yüksek plastisiteli kil içerikli zeminlerde mermer tozu katkısı ile zeminin indeks özelliklerindeki değişimi gözlemlemiştir. Maksimum iyileşmenin sağlandığı %40 oranında katkı ile likit limitte %23.77, plastisite indeksinde %11.68, serbest şişme oranında % 46.6 oranında azalma, büzülme limiti değerinde ise %10.33 artış görülmüştür.

Ene ve Okagbue [39], çalışmalarında şişebilen killi zeminlere lapilli, tüfit gibi piroklastik kayaların tozunun katılmasıyla zeminin serbest basınç dayanımı ve CBR değerinde artış

sağlandığını ortaya koymuşlardır. Optimum CBR değerlerinin %8'e kadar piroklastik kayaç tozu eklenmesiyle elde edildiğini vurgulamışlardır.

Igwe ve Adepehin [40], düşük plastisiteli kil ile değişik yüzdelerde (%10, 15 ve 20) granit ve dolerit tozu karışımları üzerinde yapmış olduğu atterberg limitleri, standart proktor ve CBR deneylerinin sonuçlarını yorumlamıştır. Granit ya da dolerit tozu yüzdesinin CBR için yaklaşık %20, kompaksiyon özellikleri için %15 olarak düşünülebileceği belirtilmiştir. Ayrıca plastisite açısından dolerite kıyasla 2 kat fazla granit tozu kullanımının gerekebileceği ifade edilmiştir.

Yadav ve Tiwari [41], düşük plastisiteli kil ile farklı oranlarda çimento ve lastik lif karışımları üzerinde uygulamış olduğu kompaksiyon, sıkışma ve çekme dayanımı, şişme basıncı, CBR ve durabilite testlerinin sonucunu değerlendirmiştir. Kil-çimento-lastik karışımının şişme basıncının, çimento ve lastik lif içeriğindeki artışla birlikte azaldığını belirten araştırmacılar, lastik lif içeriğinin % 2.5'a kadar çıkmasıyla kilin CBR değerinin arttığını bildirmiştir. Lastik lifin % 2.5'a kadar eklenmesi, çimentosuz kilin sıkışma ve çekme dayanımını artırırken çimentolu kile eklendiğinde bu değerlerin azaldığı görülmüştür. Araştırmacılar tarafından, 180 günlük kür süresi uygulanan %6 çimento-%7.5'a kadar lastik içeren karışımların ıslanma/kuruma döngüleri sırasında ağırlık kaybının ilgili durabilite standartlarını karşıladığı belirtilmiştir. Sonuç olarak çimento ile stabilize edilmiş kile eklenebilecek lastik lif içeriğinin %5 ile %7.5 arasında olduğu ortaya konulmuştur.

Babu ve Chouksey [42], plastik şişe atıklarını kullanarak zeminin dayanım ve sıkışabilirlik gibi parametrelerindeki değişimi araştırmıştır. Atık plastikler şeritler (4 mm) halinde kesilerek zemin örneklerine katılmıştır. %1.0 oranında plastik atık karıştırılmış zeminlerde sıkışma indeksinin ortalama %31.9 oranında azaldığı, tek eksenli sıkışma dayanımının ise %83.75 oranında arttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak; plastik atıklar ile stabilizasyon tekniğinin sığ temellerin tasarımında taşıma kapasitesinin geliştirilmesi ve oturmanın azaltılmasında avantajlı olarak kullanılabilceği yorumu yapılmıştır.

Çanakçı ve ark. [43], atık alüminyum içecek kutularını kullanarak zayıf killerin kompaksiyon, dayanım ve şişme özelliklerine olan etkisi üzerine bir araştırma yapmıştır. Çalışmada, atık içecek kutuları 5 mm'lik şeritler halinde kesilmiş ve CL sınıfı zemin

örneğine kuru ağırlığının %2, 4, 6, 8 ve 10'u oranında karıştırılmıştır. %8 Al katkısı ile Kaliforniya taşıma oranında (CBR) %274 oranında artış olduğu belirtilmiştir. Serbest şişme oranının 4 günlük kür süresinden %10'luk Al katkısı ile %58 oranında bir düşüş gösterdiği ifade edilmiştir.

Diğer çalışmalardan farklı olarak Hataf ve ark. [44], karides kabuğu atıklarından sentezlenen, biyolojik olarak uyumlu bir kitosan çözeltisi kullanarak killi zeminlerin stabilizasyonunu araştırmıştır. Çalışmanın sonunda kitosan katkısının kil partiküllerinin yüzeyler arası etkileşimini arttırdığı ve bunun da mekanik özelliklerin gelişmesine yol açtığı ifade edilmiştir. Hataf ve ark. [44], ıslak koşulda kitosan çözeltisinin ilk günlerde partiküller arasında ekstra bir etkileşim sağladığını ancak, zamanla verimliliğini kaybettiğini ve bağlanma dayanımının kuru şartlarda verimsiz olduğunu bildirmiştir.

2.2. Atık Camların Kullanıldığı Çalışmalar

Alternatif katkı malzemeleri olarak çalışmalarda yer alan atık camlar ile ilgili literatür araştırması yapıldığında atık camların özellikle çimento ve beton endüstrilerinde kullanımı üzerine birçok çalışmanın mevcut olduğu görülmektedir. Bu çalışmalarda atık camların; agrega olarak [45, 46], çimento yerine [47, 48] ve aynı karışımda hem agrega olarak hem de çimento yerine [49] kullanıldığı görülmektedir.

Pike ve Hubbard [45], agrega olarak farklı cam formlarının (kuvars, opal, cam elyafı ve cam) çimento ile kullanımını incelemiştir. Araştırmacılar, bu agregalar ile hazırlanan çimentoda yıkıcı alkali-silika reaksiyonu (ASR) nedeniyle çatlaklar geliştiğini bulmuşlardır.

Johnston [50], düşük ve yüksek alkali çimento içeriği ile birlikte maksimum tane büyüklüğü 19 mm olan kırılmış camın agrega olarak kullanımını incelemiştir. Araştırmacı, Pike ve Hubbard [45] tarafından elde edilen sonuçlar ile uyumlu olarak alkali-silika reaksiyonunun üretilen çimentoda çatlakların oluşmasına neden olduğunu belirtmiştir.

Takata ve ark. [51], atık camın tane boyutunun üretilen çimentonun özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada, tane büyüklüğü 4.75-0.15 mm olacak şekilde öğütülen

atık cam şişeler, doğal agrega ile kısmi yer değiştirme yapılarak farklı yüzdelerde kullanılmıştır. Sonuçlarda, alkali-silika reaksiyonuna (ASR) bağlı genişlemenin, atık cam agregasının tane boyutlarının arttırılması ve atık cam yüzdesi ile arttığı belirtilmiştir. Alkali-silika reaksiyonunun zararlı bir etkisinin görülmediği atık cam agregasının tane büyüklüğü ve yüzdesinin optimum değerlerinin sırasıyla 1,18 mm'den küçük ve %20 olduğu bildirilmiştir.

Benzer şekilde, Idir ve ark. [52], 0,9-1 mm'den küçük tane büyüklüğünde ve %20 oranında atık cam agregasının kullanıldığı koşullarda alkali-silika reaksiyonu nedeniyle herhangi bir genişleme olmadığını belirtmiştir. Araştırmacılar, daha küçük tane boyutlarında (ortalama çap 150 µm'ye eşit) daha yüksek atık cam agrega yüzdesinin (% 40'a kadar) güvenle kullanılabileceğini vurgulamıştır.

Çalışmalarda atık cam agregasının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Atık camın betonun özelliklerine olan etkisinin belirlenmesi için atık cam agregalı betonun sıkışma, çekme ve eğilme dayanımı farklı araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

Castro ve Brito [53], çalışmalarında betonun sıkışma dayanımının atık cam yüzdesi arttıkça azaldığını bulmuştur. Topçu ve Canbaz [54], atık cam yüzdesi % 60'a çıktığında sıkışma dayanımının %49 oranında azaldığını belirtmiştir. Özellikle iri taneli atık cam agreganın kalitesiz şeklinin, agrega ve çimento hamuru arasındaki yapışma kuvvetinde azalmaya neden olarak betonun sıkışma dayanımının da azalmasına yol açtığı düşünülmektedir.

Bununla birlikte, Batayneh ve ark. [55] tarafından elde edilen sonuçlar, atık cam agrega yüzdesinin %20'ye kadar arttırılmasıyla sıkışma dayanımının arttığını göstermiştir. Benzer sonuçlar, Ismail ve Al-Hashmi [56], Mageswari ve Vidivelli [57], Değirmenci ve ark. [58] tarafından da bulunmuştur. Ancak, Idir ve ark. [52], betonun sıkışma dayanımının, puzolanik özelliklerindeki artıştan dolayı atık cam agregasının tane boyutlarından da etkilendiğini bulmuşlardır. Deneysel sonuçlar, atık cam parçacıklarının boyutu azaldıkça sıkışma dayanımının arttığını göstermiştir. Atık cam agregalı betonun sıkışma dayanımındaki 30-35 MPa'lık artış, 80 µm tane büyüklüğünde elde edilmiştir.

Farklı çalışmalardan elde edilen deneysel sonuçlar, betonun eğilme dayanımının atık cam agrega yüzdesinin artmasıyla birlikte azaldığını, bu duruma cam parçacık yüzeyindeki yapışma kuvvetindeki azalmanın yol açtığını göstermektedir [46, 54]. Ancak, Batayneh ve ark. [55] ve Mageswari ve Vidivelli [57] çalışmalarında ince taneli atık cam agregasının %20'ye varan oranlarda arttırılmasıyla betonun eğilme mukavemetinde bir artış olduğu sonucuna varmıştır. Aynı araştırmacılar tarafından atık cam agregasının %20'ye kadar arttırılması ile birlikte betonun çekme dayanımında da artış olduğu belirtilmiştir.

Topçu ve Canbaz [54], atık cam agregası arttıkça çekme dayanımının düştüğünü bulmuştur. Benzer sonuçlar Park ve ark. [59] tarafından da elde edilmiştir.

Shao ve ark. [47], çalışmalarında, beton karışımındaki çimento ile kısmi yer değiştirme yaparak %30 oranında atık cam kullanmış ve atık camın tane boyutunun çimento ve betonun özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Atık soda kireci camları, 150 µm, 75 µm ve 38 µm olmak üzere farklı tane boyutlarında kullanılmıştır. Araştırmacılar tarafından, kaba tane boyutu nedeniyle 150 µm büyüklüğündeki atık camların puzolanik olarak kabul görmediği sadece 38 µm'lik camların puzolanik malzeme olma şartını yerine getirdiği belirtilmiştir. Araştırmacılar, 38 µm partikül büyüklüğünde %30 oranında atık cam kullanmanın Portland çimentosunun özelliklerini iyileştirebileceği sonucuna varmıştır.

Khmiri ve ark. [60] çalışmalarında, çimento ile kısmi yer değiştirmeli olarak kullanılan %20 oranında atık camın tane boyutunun, camın puzolanik özellikleri ve betonun özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Atık soda-kireç camları, dört farklı tane büyüklüğünde (< 100 µm, < 80 µm, < 40 µm ve < 20 µm olmak üzere) kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, atık camın tane boyutu azaldıkça sıkışma dayanımının arttığını göstermiştir. 20 µm'den küçük boyutlarda öğütülmüş atık camın puzolanik özellikler gösterdiği ve atık camın çimento ile %20 oranında kısmi yer değiştirmesinin beton özelliklerini geliştirdiği belirtilmiştir.

Schwarz ve ark. [61], betonda çimento yerine farklı yüzdelerde (% 5, 10 ve 20) atık camın kullanımını araştırmıştır. Araştırmacılar tarafından sıkışma dayanımı test sonuçlarına göre atık camın optimum yüzdesinin %10 olduğu belirtilmiştir. Deneysel sonuçlar, atık

cam katkılı betonun sıkışma dayanımının, cam içermeyen betondan daha düşük olduğunu göstermiştir.

Shayan [49] ve Shayan ve Xu [62], beton üretiminde atık camın kısmi çimento ve aynı karışımda agrega olarak kullanılması üzerinde çalışmışlardır. Agrega olarak tane büyüklüğü 0,15 - 12 mm aralığında olan kaba ve ince taneli atık cam kullanılırken; çimento yerine kullanılan atık cam tozu 10 µm 'den daha küçük tane büyüklüğünde seçilmiştir. Deneysel sonuçlar, atık cam katkılı betonun sıkışma dayanımının cam içermeyene göre daha iyi olduğunu göstermiştir. Ayrıca cam tozu miktarının artırılmasıyla birlikte puzolanik reaksiyona bağlı olarak alkali-silika reaksiyonu etkilerinin azaldığı belirtilmiştir. Sonuçlar, %30 oranında cam tozunun çimento yerine ve %50 oranında cam agreganın doğal agrega yerine kullanımının üretilen betonun özelliklerini etkilemeden güvenle tercih edilebileceğini göstermiştir.

Güçlü bir silika kaynağı olarak zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde potansiyel bir etkiye sahip atık camların katkı malzemesi olarak kullanımı son yıllarda araştırmacıların dikkatini çekmeye başlamıştır. Ancak, şişen killerin stabilizasyonunda toz veya lif formundaki atık camların tek başına veya diğer katkı malzemeleri ile birlikte kullanımı üzerine sınırlı sayıda araştırma mevcuttur. Atık camların stabilizasyon işlemlerinde kullanıldığı çalışmalar aşağıda özet şeklinde sunulmuştur.

Wartman ve ark. [63, 64] ve Grubb ve ark., [65], deniz ve nehir çökelleri ile ince taneli taş ocağı malzemeleri gibi yüksek oranda sıkıştırılabilir malzemelerin mühendislik özelliklerinin geliştirilmesinde öğütülmüş camın etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, öğütülmüş cam ilavesiyle ince taneli zeminlerin düşük hidrolik iletkenliğini koruduğunu, sürtünme dayanımının ise önemli ölçüde arttığını bulmuşlardır. Sonuç olarak, araştırmacılar bu tür modifiye edilmiş zeminlerin düşük geçirgenliğe sahip dolgu malzemesi için uygun bir seçenek sunduğunu belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda araştırmacılar, cam tozu katkısı ile stabilize edilen zeminin jeoteknik ve inşaat mühendisliği uygulamalarında, dolgu, alt tabaka ve istinat gibi yapılarda kullanılabilmesine işaret etmişlerdir.

Malasavage ve ark. [66], 9.5 mm'den küçük boyutlarda öğütülmüş camın (CG) yüksek plastisiteli zeminlerin (CH) fiziksel ve dayanım özelliklerini iyileştirme potansiyelini değerlendirmek için bir laboratuvar çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, kaolinit-bentonit karışımı veya “model kil” (MC), doğal olarak bulunan yağlı killerin özelliklerini temsil etmek üzere seçilmiştir. Testler, daha önce Grubb ve ark., [65] tarafından değerlendirilen CG kullanılarak %100 MC ve 80/20, 60/40, 40/60, 20/80 CG-MC karışımları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Standart (2.8 kN/m^3) ve modifiye (2.5 kN/m^3) proktor testi sonuçları göz önüne alındığında maksimum kuru yoğunluktaki en önemli artış ve nem içeriğinde azalma (%14 ve %12), %40 öğütülmüş cam katkısı (CG) ile elde edilmiştir. % 40'luk bir öğütülmüş cam içeriği ile etkin sürtünme açısı yaklaşık 5° artarken sıkıştırılabilirlik yaklaşık %33 oranında azalmıştır. Daha az büyüklükte olmak üzere benzer iyileşmeler artan CG (%20) içeriği ile birlikte görülmüştür.

Arabani ve ark. [67], Çimento ile stabilize edilen öğütülmüş cam (CG) ve kumlu zemin karışımlarının (SM) çeşitli uygulamalarda ve dolgu malzemeleri olarak kullanım potansiyellerini değerlendirmek için kapsamlı bir laboratuvar çalışması yürütmüşlerdir. Karışımlar ağırlıkça %5 ve %7 oranında çimento ile stabilize edilmiştir. Testler, %100 zemin (USCS sınıflandırma SP) numuneleri ve 20/80, 40/60, 60/40 oranında cam tozu-kumlu zemin karışımları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Cam tozu ilavesi, ağırlıkça %5 ve %7 çimento içeren karışımların kuru yoğunluğunu arttırırken optimum su içeriği değerinde bir azalma ile sonuçlanmıştır. Tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) testi sonuçları, cam tozu katkısının dayanımı artırabileceğini göstermiştir. Ayrıca karışımlar üzerinde doğrudan makaslama ve CBR testleri uygulanmıştır. Çalışmanın sonunda araştırmacılar, stabilize edilmiş cam tozu-zemin karışımlarının sergilediği çok yönlü özelliklerin birden fazla tasarım parametresini (örn. mukavemet, oturma veya daha yüksek CG veya SM içeriği) karşılamak üzere potansiyel olarak optimize edilebilen dolgu ve taban tasarımına olanak tanıdığını belirtmişlerdir.

Kulkarni ve ark. [68], Hindistan'da ana çökeller olarak bilinen ‘Black Cotton Soil’ topraklarını güçlendirmek için sürdürülebilir katkı maddeleri olarak atık cüruf ve cam liflerin etkisini araştırmıştır. Araştırmacılar, zemine uygulanan farklı yüzdelerde cüruf katkısı ile optimum nem içeriği ve şişme indeksinde azalma olduğunu, maksimum kuru yoğunluk ve kür koşullarındaki CBR değerinde ise artış elde edildiğini belirtmiştir. Çalışmada, optimum cüruf yüzdesi ve değişen yüzdelerde 6 mm'lik cam lif katkısı ile

stabilize edilen toprağın maksimum kuru yoğunluğu ve CBR değerinde artış olduğu gözlenmiştir. Ayrıca zemine eklenen 12 mm'lik lif 6 mm'lik life göre daha iyi bir performans göstermiş ve CBR değerinin lif uzunluğunun artması ile birlikte arttığı sonucuna varılmıştır.

Nuruzzaman ve Hossain [69], Soda kireci cam tozunun killi zeminlerde iyileştirme potansiyelini gözlemek amacıyla bir araştırma gerçekleştirmiştir. Cam tozu ile stabilize edilmiş zemin örnekleri üzerinde kompaksiyon, atterberg limitleri, konsolidasyon ve serbest basınç testleri uygulanmıştır. Ayrıca tane boyu dağılımı ve özgül ağırlık tespiti yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre cam tozunun ilavesiyle; maksimum kuru yoğunluğun arttığı, optimum nem içeriğinin azaldığını, likit limit ve plastisite indeksinin düştüğü, plastik limitin ise arttığı, ek olarak sıkışma ve şişme indeksinin azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca tek eksenli sıkışma dayanımının kür süresi uygulanmadığı takdirde azaldığı bildirilmiştir.

Olufowobi ve ark. [70], toz halindeki camın killi zeminde stabilize edici etkisini değerlendirmişlerdir. Zemin örneğine %15 çimento ve değişik oranlarda (%1, 2, 5, 10 ve %15) atık cam tozu eklenmişlerdir. ASSHTO sınıflandırma sistemi kullanılarak zemini değerlendirmek için nem içeriği, özgül ağırlık, tane boyu dağılımı ve Atterberg limit testleri gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara dayanarak, zemin örneğinin drenaj ve alt tabaka malzemesi olarak kullanılması bakımından 'kötü ile zayıf' zemin türü olarak tanımlanan A-6 grubuna karşılık geldiğini belirtmişlerdir. Daha sonra doğal zemin ve cam tozu katkılı zemin örnekleri üzerinde Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve doğrudan makaslama deneylerini uygulamışlardır. Sonuçlar, toz haline getirilmiş camın eklenmesiyle maksimum kuru yoğunluk değerlerinde %5'e kadar olan katkı içeriğinde kademeli olarak artış sağlandığını, katkı içeriğinin %10 ve %15 oranına çıkarılmasıyla birlikte azalma olduğunu göstermiştir. En yüksek CBR değerleri, ıslak ve kuru koşullardaki numuneler için sırasıyla %14.90 ve % 112.91 olmak üzere %5 cam tozu içeriğinde ve 5 mm'lik penetrasyon ile elde edilmiştir. Maksimum kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri, %10 cam tozu içeriğinde sırasıyla 15 ve 17 olarak elde edilmiştir.

Ikara ve ark. [71], Nijerya'nın ağırlıklı olarak kuzey ve doğu bölgelerinde bulunan, nem içeriğindeki değişime bağlı olarak şişme-büzülme eğilimi gösteren ince taneli silt ve kil içerikli 'Black Cotton Soil' çökellerinin stabilize edilmesinde çimento ile birlikte atık cam kullanımını araştırmıştır. Çalışmada, yol ve dolgu malzemeleri olarak kullanılmak üzere çimento ile stabilize edilmiş topraklarda ilave olarak atık cam kullanımının uygunluğu değerlendirilmiştir. Katkı maddesi olarak atık camlar öğütüldükten sonra ortalama tane büyüklüğü 300 µm'den küçük olacak şekilde kullanılmıştır. Stabilizasyon işlemini gerçekleştirmek amacıyla çimento ağırlıkça %2, 4, 6 ve %8, atık cam tozu ise ağırlıkça %5, 10, 15 ve %20 olmak üzere toprağa eklenmiştir. Atık camın çimento ile stabilize edilmiş toprak örnekleri üzerindeki etkinliğini test etmek için standart proktor, Kaliforniya taşıma oranı (CBR), tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) gibi laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar tarafından elde edilen sonuçlar, atık cam içeriğindeki artışla birlikte plastisite indeksi (PI), likit limit (LL) ve plastik limit (PL) değerlerinde azalma görülürken maksimum kuru yoğunlukta ise artış olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar tarafından 7 günlük kür süresi sonunda örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımında kaydadeğer bir artış olduğu belirtilmiş ve en yüksek değer 1152 kN/m² ile %8 çimento ve %20 cam tozu katkılı örnekte elde edildiği bildirilmiştir. Benzer şekilde % 53.8'lik en yüksek CBR değeri %8 çimento ve %20 cam tozu içeren optimum karışımda elde edilmiştir. Çalışma sonucunda katkı maddesi olarak atık camların 'Black Cotton Soil' topraklarını güçlendirmek için kullanım potansiyeli olduğu belirtilmiştir.

Fauzi ve ark. [72], çalışmalarında atık plastik-yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve öğütülmüş atık camın alt tabakaların iyileştirilmesinde katkı maddesi olarak kullanımıyla ilgili mühendislik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Araştırma kapsamında Kuantan'daki çeşitli bölgelerden alınan killi zeminlerde; standart kompaksiyon, dört günlük ıslak Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve üç eksenli sıkışma deneylerini uygulamışlardır. 4 günlük kürlenmiş CBR testi için zemin örnekleri optimum su içeriğinde hazırlanmıştır. Zemin örneklerine sırasıyla ağırlıkça %4, %8 ve %12 oranlarında katkı yapılmıştır. Örneklerin kimyasal element içeriği, taramalı elektron mikroskopu ve enerji-dağılımlı x-ışını spektroskopisi (SEM-EDS) ile araştırılmıştır. Deney sonuçları, atık HDPE ve cam içeriği arttıkça stabilize kil örneklerinin mühendislik özelliklerinin ve CBR'nin arttığını göstermektedir.

Al-Neami ve ark. [73], öğütülmüş camın, kohezyonlu zeminin jeoteknik özelliklerine olan etkisini araştırmıştır. Çalışmada kullanılan kohezyonlu zemine değişen yüzdelerde (%2, 4, 6 ve 8) katkı ilave edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, %4 oranında öğütülmüş camın kohezyonlu zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Katkı oranı arttıkça plastik limitte artış görülürken özgül ağırlık ve likit limitte ise azalma olduğu kaydedilmiştir. Ayrıca kuru birim ağırlık artarken optimum nem içeriğinde azalma görülmüştür. Zemine uygulanan cam katkısının makaslama dayanımı ve taşıma gücünde artış sağladığı belirtilmiştir.

Çanakcı ve ark. [74], 2016 yılında yaptıkları çalışmada, killi zemine atık soda kireci cam tozu ekleyerek zeminin mühendislik özelliklerindeki değişimi gözlemlemiştir. Çalışmada kullanılan cam şişe atıkları öğütülmüş ve 200 nolu (75 um) elekten geçirilerek zemine kuru ağırlığının %3, 6, 9 ve %12 oranında katılmıştır. Doğal örnek ve cam tozu ile stabilize edilen toprak örnekleri üzerinde standart proktor, Kaliforniya taşıma oranı (CBR), tek eksenli sıkışma dayanımı ve şişme deneyleri uygulanarak elde edilen bulgular karşılaştırılmıştır. Cam tozu katkılı toprak örneklerinin dayanımı üzerinde kür süresinin etkisi de araştırılmıştır. Zeminin CBR değerindeki en yüksek artış %140 ile %12 oranında cam tozu katkısı ile elde edilmiştir. %12 oranında cam tozu katkısının zeminin şişme değerinde %70 oranında düşüş sağladığı belirtilmiştir. Araştırmacılar, tek eksenli sıkışma dayanımındaki en önemli değişimin %143 oranında artış ile %6 cam tozu katkılı toprakta olduğunu bildirmiştir. Ayrıca kür süresinin tek eksenli sıkışma dayanımında pozitif etki oluşturduğu belirtilmiştir.

Bağrıaçık [75], killi zeminlerin taşıma gücünü arttırmak ve konsolidasyon oturmasını azaltmak amacıyla cam lif katkısı ile stabilizasyon işlemini araştırmıştır. Araştırmacı, bu amaçla yol alt katmanındaki kohezyonlu zeminlerde cam lif katkısının etkisini belirlemek üzere zemine %5, 10, 12, 15, 17 ve %20 oranında lif ekleyerek karışımlar hazırlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre, tüm cam lif kombinasyonlarının zeminin mühendislik özelliklerinde belirgin bir iyileşme sağladığı bildirilmiştir. Zemine eklenen %17'lik cam lifin, tek eksenli sıkışma dayanımını 129 kPa'dan 199 kPa'ya çıkardığı tespit edilmiştir. Bu çalışma, kohezyonlu zeminlerin stabilizasyonu için en uygun katkı içeriğinin %17 cam lif içeren karışım olduğunu göstermiştir.

Benny ve ark. [76], atık cam tozunun jeoteknik uygulamalardaki kullanımını ve killi zeminlerde atık cam tozu katkısının makaslama dayanımı, sıkışabilirlik ve CBR değerleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla toz haline getirdikleri cam materyali killi zemine %2, %4, %6, %8 ve %10 gibi farklı oranlarda eklemişler ve maksimum zemin dayanımına karşılık gelen yüzdeyi bulmuşlardır. Buradan hareketle, zemine %8'e kadar atık cam tozu eklemenin kohezyon, içsel sürtünme açısı ve serbest basınç değerlerinde optimum iyileşme sağladığını bildirmişlerdir. Çalışmanın sonunda zayıf zeminlerde atık cam tozu katkısının oldukça iyi ve ekonomik bir iyileştirme tekniği olduğunu vurgulamışlardır.

Mishra [77], Daha iyi ve düzgün bir otoyol inşa etmek için öncelikli olarak yol yapımında kullanılan zeminin alt tabaka gücünün artırılması gerektiğini belirtmiştir. Çalışmasında cam tozunu katkı maddesi olarak kullanmış ve bu alanda yapılmış çalışmaların yeterli olmadığını belirterek cam tozunun zeminin mühendislik özelliklerine olan etkisini daha iyi değerlendirebilmek için uygun oranlarda cam tozu katkısı ile hazırlanan karışımlarda; CBR, atterberg limitleri ve dayanım testleri uygulamıştır. Araştırmacı, cam tozu katkısının zeminin özellikle CBR ve makaslama dayanımı değerlerinde kaydadeğer bir artış sağladığı yorumunda bulunmuştur. CBR ve kompaksiyon testlerinde maksimum değerler %5 cam içeriği ile elde edilirken makaslama dayanımı testi için maksimum değeri elde etmenin %10 cam içeriğinde mümkün olduğu bildirilmiştir.

Salamatpoor ve Salamatpoor [78], temiz kumların (SP sınıfı) stabilize edilmesindeki yöntemlerden birinin öğütülmüş atık cam ve çimento katkısı olduğunu belirtmiştir. Kumlu zemini stabilize etmek amacıyla, kum- öğütülmüş cam ve çimento karışımlarını laboratuvar testlerine tabi tutmuşlardır. Hazırlanan karışımlar ağırlıkça %3, %5 ve %10 oranında çimento ile stabilize edilmiştir. Öğütülmüş cam ile farklı bileşimlerde hazırlanan karışımlar % 100 SP (kötü derecelenmiş kum) ve camın kuma olan oranı 10/90, 30/70 ve 50/50 (G/S) olarak sıralanmıştır. Çimento ile stabilize olmuş cam-zemin kombinasyonları; drenajlı üç eksenli, doğrudan makaslama, serbest basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, öğütülmüş cam yüzdesinin artırılması ile optimum nem içeriğinin azaldığını ve maksimum kuru yoğunluğun ise arttığını göstermektedir. Aynı zamanda, bağıl yoğunluk ile dayanım parametreleri c ve ϕ önemli derecede artmıştır. Kumlu zeminin özelliklerini geliştiren öğütülmüş camın minimum değerinin %10 olduğu bildirilmiştir. Ayrıca %10 çimento ile stabilize edilen kumlu zemine %10,

30 ve 50 oranında öğütülmüş cam ekleyerek numunelerin makaslama dayanımı sırasıyla %70, %98 ve %244'e çıkmıştır. Tüm sonuçlar birleştirildiğinde zemine yapılan öğütülmüş cam katkısının, uygulama kolaylığı sağlayarak uygun olmayan zemin parametrelerini düzeltmede ve inşaat işlerinde operasyonel maliyetleri düşürmede yardımcı olacağı vurgulanmıştır.

Parihar ve ark. [79], yüksek miktarda kil içeriği, düşük makaslama dayanımı, şişme-büzülme gibi özellikleri ile bilinen ve inşaat sonrası yapılarda çatlak oluşumu, oturma gibi ciddi mühendislik problemleri oluşturan 'Black Cotton Soil' topraklarının iyileştirilmesinde atık camların kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmada, 425 mikronluk tane boyutunda öğütülmüş atık cam farklı miktarlarda kullanılarak stabilize edilmiş toprağın atterberg limitleri, kompaksiyon parametreleri, CBR değerleri ve şişme gibi mühendislik özellikleri üzerinde karşılaştırmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar, atık cam katkısının toprağın plastik limit ve büzülme limiti değerlerinde sırasıyla %8 ve %15 oranında bir artışa yol açtığını ve ardından düşme eğiliminin oluştuğunu göstermiştir. Atık cam ilavesiyle likit limitin ise sürekli olarak azaldığı belirtilmiştir. %8'lik cam katkısı ile toprağın serbest şişme indeksi %50'den %5'in altına düşürülürken %8'den daha yüksek miktarda katkı uygulandığında şişme indeksinin kısmen arttığı görülmüştür. Cam içeriğinin %9'a kadar artmasıyla birlikte toprağın maksimum kuru yoğunluğunda artış, optimum nem içeriğinde ise azalma görülürken %9'dan daha yüksek oranlardaki cam katkısının eğilimleri tersine çevirdiği gözlemlenmiştir. Öğütülmüş camın kür koşullarında bekletilmeyen örneklerin CBR değerlerinde neredeyse %100'lük bir artış sağladığı ancak, kür koşullarında bekletilmiş toprak örneklerinin CBR değerlerinde camın çok az etkisi olduğu belirtilmiştir. Toprağın maksimum kuru yoğunluk, optimum nem içeriği, serbest şişme indeksi ve CBR değerlerinde maksimum iyileşme sağlayan cam konsantrasyonunun %6 - %9 aralığında olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar tarafından, atık camların 'Black Cotton Soil' topraklarının stabilizasyonu için uygun bir malzeme olduğu, toprağın mühendislik özelliklerinde iyileşme sağlayarak aynı zamanda çevre kirliliğini azaltacağı sonucuna varılmıştır.

Bilondi ve ark. [80], çalışmalarında killi toprakların mekanik davranışını iyileştirmek için geri dönüştürülebilir cam tozu bazlı jeopolimer kullanımının fizibilitesini araştırmıştır. Bu amaçla atık camlar öğütüldükten sonra ve 200 no'lu (75 um) elekten geçirilerek toprak örneklerine ağırlıkça %3, 6, 9, 12, 15, 20 ve %25 oranlarında katılmıştır.

Araştırmacılar, alkali aktivatör olarak NaOH kullanmış ve farklı konsantrasyonlarda çözeltiler hazırlayarak (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 M) toprak-cam tozu karışımlarına eklemiştir. Çalışmada cam tozu içeriği, molar konsantrasyonlar, kür süresi ve sıcaklığı gibi farklı parametrelerin etkileri de incelenmiştir. Araştırmacılar, hazırladıkları örnekler üzerinde taramalı elektron mikroskobu ve enerji-dağılımlı x-ışını spektroskopisi (SEM-EDS) analizleri yaparak örneklerin mikroyapısal özelliklerindeki değişimi de incelemiştir. Çalışma sonucunda araştırmacılar tarafından;

- Cam tozu bazlı jeopolimer ile stabilize edilen tüm örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımında (UCS) doğal örneğe kıyasla artış elde edildiği, ayrıca UCS değerindeki artışı sağlayan optimum cam tozu katkısının %15 olduğu,
- Artan kür süresi ile birlikte stabilize edilmiş örneklerin UCS değerlerinde artış görüldüğu, en yüksek UCS değerinin 91 günlük kür süresi sonunda elde edildiği ancak, 28 günden sonra dayanımdaki artışların çok belirgin olmadığı,
- NaOH'ın molar konsantrasyonunda 1 M'den 3 M'ye kadar olan artışın dayanımı arttırdığı ancak, daha yüksek konsantrasyonlar için (4 M'den 8 M'ye kadar), dayanımda düşüş görüldüğu,
- Jeopolimerizasyonun uygun bir şekilde gerçekleşmesi için optimum NaOH konsantrasyonunun 3 molar olduğu, bununla birlikte NaOH hazırlama maliyetine ek olarak 2 molar konsantrasyonlu numunelerin UCS değerleri göz önüne alındığında, 2M konsantrasyonunda NaOH kullanılmasının alkali çözelti hazırlamak için uygun olduğu,
- Cam tozu gibi zengin bir silika kaynağının (amorfl bir fazda) toprağın stabilizasyonu ve jeopolimer jel oluşumu için gerekli olduğu,
- İlk sentez sıcaklığında 25 °C'den 70 °C'ye olan artışın, stabilize edilmiş numunelerin sıkışma dayanımını arttırdığı ancak, saha koşullarında kürlenme için ortam sıcaklığının kullanılmasının biyolojik-çevresel ve ekonomik problemler açısından daha uygun olduğu,
- SEM görüntüleri ve EDX analizi sonuçlarının stabilize edilmiş örneklerde jeopolimer jel oluşumunu doğruladığı,
- Jeopolimer ile stabilize edilmiş toprak örneklerinin mekanik davranışındaki iyileşmenin jeopolimerik bağların etkisinden ve bu örneklerin homojenliğindeki artıştan kaynaklandığı,

- Bu araştırma ile cam tozu bazlı jeopolimerik bağlayıcı kullanmanın killi toprakların stabilizasyonu üzerindeki olumlu etkisinin gösterildiği, cam tozu bazlı jeopolimerlerin çevre dostu bir toprak stabilizatörü olduğu belirtilmiştir.

Bilondi ve ark. [81], benzer bir çalışmada, killi toprakların mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla ön madde olarak geri dönüştürülebilir cam tozu ve alkali aktivatör olarak kalsiyum karbür kalıntısının (CCR) kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmada kullanılan atık camlar öğütüldükten sonra ve 200 no'lu (75 um) elekten geçirilerek toprak örneklerine ağırlıkça % 3, 6, 9, 12, 15 ve %20 oranlarında katılmıştır. Alkali aktivatör olarak seçilen kalsiyum karbür kalıntısı (CCR) 3 gün boyunca 70 °C'lik etüvde kurutulup 40 no'lu elekten geçirildikten sonra toprak-cam tozu karışımlarına eklenmiştir. Toprak örneklerinin mekanik davranışlarını araştırmak için tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi uygulayan araştırmacılar tarafından cam tozu ve CCR içeriği, ilk sentez sıcaklığı, kür süresi gibi farklı parametrelerin etkileri de incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu ve enerji-dağılımlı x-ışını spektroskopisi (SEM-EDS) kullanılarak örnekler üzerinde mikroyapısal çalışmalar da yapılmıştır. Çalışma sonucunda araştırmacılar tarafından;

- Cam tozu içeriğinin %9'dan yüksek olduğu koşullarda, kalsiyum karbür kalıntısı-cam tozu jeopolimeri ile stabilize edilen örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımının (UCS) doğal örneğe kıyasla çok daha yüksek olduğu,
- Stabilize edilen örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımlarının, kalsiyum karbür kalıntısı ve cam tozu içeriğinin sırasıyla %7 ve %15'lik optimum değerlere yükseltilerek önemli ölçüde iyileştiği, ayrıca optimum değerlerden daha yüksek veya daha düşük konsantrasyonların numunelerin dayanımlarında düşüşe yol açtığı,
- Stabilize edilmiş numunelerin kür süresini arttırmanın tek eksenli sıkışma dayanımını da arttırdığı, ilk 28 günlük kür süresi için dayanım değerlerindeki artış oranının uzun süreli kür koşullarından daha önemli olduğu,
- 7 ve 28 günlük kür süreleri için ilk sentez sıcaklığının 25 °C'den 70 °C 'ye yükseltilmesi ile birlikte jeopolimerik numunelerin UCS değerlerinde artışlar görüldüğü, bununla birlikte yüksek bir başlangıç sentezi sıcaklığının numunelerin UCS değerlerine olan etkisinin 28 günlük kür süresi için daha az etkili olduğu,
- Kalsiyum karbür kalıntısı-cam tozu jeopolimeri ile stabilize edilen örneklerin büzülme miktarlarında stabilize edilmemiş örneklere kıyasla önemli ölçüde

düşüşler olduğu, cam tozu miktarının artırılması ile birlikte büzülme deformasyonu değerlerinin de azaldığı,

- SEM-EDS yöntemi ile yapılan mikroyapısal çalışma sonuçlarının, killi toprağı stabilize etmek için alkali aktivatör olarak kalsiyum karbür kalıntısı kullanımının uygun olduğunu ve temel jeopolimer olarak cam tozunun kullanılabileceğini doğruladığı,
- Yeniden kullanılan kalsiyum karbürün, çimento tüketimi ve ilgili çevre kirliliğini azaltabilecek yeşil çimentonun (jeopolimerik malzemeler) kullanımını geliştirmek için uygun bir alternatif alkali aktivatör olduğu belirtilmiştir.

2.3. Ankara Kili İle İlgili Çalışmalar

Geçmiş yıllarda Ankara Kili ile ilgili jeolojik, jeoteknik ve hidrojeolojik alanlarda birçok çalışma yapılmıştır. Ancak, Ankara Kili'nin stabilizasyonuna yönelik yapılan çalışmaların sayısı daha azdır. Bu bölümde tez çalışmasının kapsamı dikkate alınarak Ankara Kili'nin jeoteknik ve jeomühendislik özelliklerine yönelik çalışmalardan bir derleme sunulmuştur.

Doruk [5], ODTÜ yerleşkesinden aldığı Ankara Kili örnekleri üzerinde yaptığı deneyler sonucunda aynı koşullar altında örselenmiş örneklerin örselenmemiş örneklere oranla daha fazla şiştiğini saptamıştır. Ayrıca doğal su içeriğinin artması ile şişmenin azaldığını, kil içeriğinin ve plastisite indeksi değerinin artmasının ise şişmeyi arttırdığını vurgulamıştır.

Yüncü [82], örselenmiş Ankara Kili örnekleri üzerinde yaptığı çalışmada, zeminde silt tane boyutundaki malzeme içeriğinin artması ile şişme potansiyelinin azaldığını bildirmiştir. Araştırmacı, Ankara Kili'nin şişme-büzülme davranışı gösterdiğini belirterek bu tip zeminlerde yapı inşası sonrasında yapıların zarar görebileceğini, inşaattan önce zeminin sıkıştırılması veya kaldırılması gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca Ankara Kili'nin doğal su içeriği, kuru birim hacim ağırlık ve yapısal özelliklerini içeren çok sayıdaki veriyle ve istatistiksel analizlerden yararlanılarak incelenmesi önerilmiştir.

Ulusay [83], Ankara'nın kuzey ve orta bölgelerinden aldığı toprak ve kayaç örnekleri üzerinde jeomekanik deneyler uygulamış ve zeminleri sınıflandırmıştır. Bu

sınıflandırmaya dayanarak 1/15000 ölçekli mühendislik jeolojisi haritası hazırlayan araştırmacı, Ankara’da üzerinde yerleşim yerlerinin yoğun olduğu Pliyosen yaşlı göl çökellerinde şişme-büzülme, oturma gibi sorunlar olabileceğini vurgulamıştır.

Üner [6], Ankara ilindeki iki farklı zemin türünün (alüvyal kil ve Ankara Kili) mühendislik özelliklerini incelemiştir. Yanal ve düşey yönlerde örneklemeler yapan araştırmacı, Ankara kili ve alüvyal kilden toplam 8 adet örselenmemiş örnek üzerinde ödometre deneyi uygulamıştır. Her iki zemin türünde de yanal yöndeki şişmenin düşey yöndeki şişmeden daha fazla ve Ankara Kili’nin şişme potansiyelinin alüvyal kilin şişme potansiyelinden daha yüksek olduğunu belirtmiştir.

Kasapoğlu [84], Ankara kenti zeminlerinin mühendislik özelliklerini inceleyerek 1/15000 ölçekli mühendislik jeolojisi haritası hazırlamıştır. Pliyosen yaşlı akarsu ve göl çökellerindeki killi zeminlerde XRD analizlerini gerçekleştiren Kasapoğlu [84], bu tür zeminlerde simektit içeriğinin oldukça yüksek olduğunu bildirmiştir. Şev stabilitesi, şişme-büzülme gibi sorunların oluşabileceğine değinen araştırmacı, özellikle yeraltı suyunun yüzeye yakın olduğu kesimlerde inşa edilecek yapıların etkilenebileceğini belirtmiştir.

Kiper [85], Etimesgut-Batıkent yöresindeki Üst Pliyosen çökellerinin jeomühendislik özellikleri ve konsolidasyonu üzerinde yaptığı doktora çalışmasında bu zeminlerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması’nda CH grubuna denk geldiğini ve ön yüklemeye uğramış, aşırı konsolide killer olduğunu belirtmiştir. Çalışmada, bu bölgedeki zeminlerde önemli bir oturma sorunu oluşmayacağı ancak, zemine 3,5 kg/cm²’den fazla basınç aktarılması durumunda mühendislik sorunlarına karşı önlem alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Çokça [7], yılında yaptığı çalışmada, metilen mavisi değeri (MBV) ve kil içeriğine bağlı yeni bir şişme potansiyeli sınıflaması önermiştir. Araştırmacı, Ankara’daki göl çökelleri ile güncel çökellerden aldığı örselenmiş örnekler üzerinde hidrometre, atterberg limitleri, şişme, metilen mavisi deneyleri ve X-ışınları kırınım analizleri yaparak zeminlerin şişme potansiyelini belirlemiştir. Çalışmasının sonucunda Çokça [7], metilen mavisi deneyinin killerin mineralojik bileşiminin belirlenmesinde dolaylı bir yöntem olarak kullanılabileceğini de belirtmiştir.

Ergüler [86], Ankara Kili'nin şişme parametreleri ve anizotropisini inceleyerek zeminin şişme potansiyelini görgül yaklaşımlarla ortaya koymaya çalışmıştır. Aktif zon derinliğini yüzeyden 2 m olarak belirleyen araştırmacı, örselenme ile birlikte şişmenin arttığını vurgulamış ve ödometre deneyleri sonucunda yanal yönde şişme basıncının düşey yöne oranla daha fazla olduğunu belirtmiştir. Elde edilen deney sonuçları, su içeriğinin %30'u aşmasıyla birlikte kilin şişme basıncının önemli ölçüde azaldığını göstermiştir.

Ergüler ve Ulusay [8], suda bekletilen toprak örneklerinin 24 ve 72 saat sonraki su içeriğine dayanan $w_{\max 24,72}$ olarak isimlendirdikleri parametrenin belirlenmesine yönelik bir yöntem önermişlerdir. İstatistiksel değerlendirmeler bu çalışmada önerilen $w_{\max 24,72}$ adlı parametrenin Ankara Kili'nin şişme basıncı ve miktarını tahmin etmek için çok güçlü bir parametre olduğunu göstermiştir. Ergüler ve Ulusay [87], kilin şişme basıncı ve miktarı ile önerilen parametre arasındaki ilişkiye dayalı olarak Ankara merkez ve güneybatı kesimlerini kapsayan bir şişme potansiyeli haritası hazırlamışlardır. Ankara Kili'nin yüksek-çok yüksek aktiviteye ve yüksek şişme basıncına sahip olduğunu belirten araştırmacılar, buna bağlı olarak hafif yapıların zarar görebileceğini bildirmişlerdir. Ergüler ve Ulusay [87], özellikle $w_{\max 24,72}$, likit limit, metilen mavisi değeri (MBV), simektit içeriği ve kuru birim hacim ağırlık gibi parametrelerin zeminin şişme potansiyelini daha kesin bir şekilde tahmin etmek için kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

Ankara Kili'nin stabilizasyonu üzerine çok az çalışma yapıldığını vurgulayan Tono ve ark. [88], kilin fiziksel, şişme, dayanım ve konsolidasyon özelliklerini iyileştirmek amacıyla laboratuvar ölçekli modellerde kireç sütunu tekniğini uygulamıştır. Stabilize edilen numunelerin özelliklerini sütuna uzaklık ve kür süresi açısından değerlendiren araştırmacılar, kireç migrasyonu için en etkin zonun 28 gün kür süresi ile sütun çapının ortalama 2 katı mesafede oluştuğunu belirtmiştir. Çalışma sonucunda, bu tekniğin uygulanması ile %40 - %80 aralığında dayanım artışı, ön konsolidasyon basıncında yükselme ve sıkıştırılabilirlik özelliklerinde azalma sağlandığı bildirilmiştir. Ayrıca kireç sütunu tekniğinin zeminin şişme basıncında %40 - %75 arasında bir düşüşe neden olduğu belirtilmiştir.

Tonoz ve ark. [89], benzer bir çalışmada simektit içeriği bakımından zengin Ankara Kili'ne toz halinde sönmemiş kireç ekleyerek kilin fiziksel, şişme ve dayanım özelliklerini iyileştirmeye çalışmışlardır. Ağırlıkça %2-%10 aralığında değişen 5 farklı kireç/kil karışımının performanslarını laboratuvar ölçeğinde test eden araştırmacılar, 3, 7, 14 ve 28 gün boyunca kür koşullarında beklendikleri kireç katkılı toprak örneklerinin mühendislik özelliklerini doğal örneklerle karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, zemine uyguladıkları kireç katkısı ile 28 günlük kür sonrasında tek eksenli sıkışma dayanımının (UCS) %84 oranında arttığını bildirmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, kür süresi 28 günden daha kısa uygulandığında, kireçle stabilize edilmiş numunelerin UCS değerlerinin doğal numunelerden yüksek olduğunu göstermiştir. Çalışma sonucunda, Ankara Kili'nde puzolanik reaksiyonların flokülasyondan daha yavaş gerçekleştiği, şişme göz önüne alındığında, %4 kireç içeriği ve 28 günlük kür süresinin optimum stabilizasyon sağladığı belirtilmiştir.

Özdemir [90], 9 ve 19 mm uzunluklarındaki F tipi polifiber liflerin Ankara Kili'nin bazı mühendislik özelliklerine olan etkisini araştırmak için bir dizi laboratuvar deneyi yapmıştır. Başlangıçta sınıflandırma deneyleri yaparak Ankara Kili'nin mühendislik parametrelerini belirleyen Özdemir [90], daha sonra kil içerisine ağırlıkça %0.1, %0.2, %0.3 ve %0.4 oranlarında katkı malzemeleri eklemiştir. Hazırladığı örnekler üzerinde standart proktor ve CBR deneylerini uygulayan araştırmacı sonuçları değerlendirdiğinde, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim ağırlık değerlerinin ve ortalama CBR yüzdesinin katkı oranları ile değişmediğini bildirmiştir. Üç eksenli sıkışma deneyi sonrasında genel olarak 9 ve 19 mm uzunluğundaki her iki katkıda da kilin kohezyon değerinin azaldığı, içsel sürtünme açısı değerinin ise önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir. Ayrıca 9 mm'lik fiberlerin üç farklı çevre basıncı (1-2-3 kg/cm²) altında kilin dayanımını genel olarak arttırdığı, 19 mm'lik fiberin ise (3 kg/cm² hariç) diğer iki çevre basıncında kilin dayanımını azalttığı bildirilmiştir. Ayrıca çeşitli yüklemeler altında her iki katkının da genel olarak oturma miktarını azalttığı fakat şişmeyi etkilemediği belirtilmiştir.

Avşar ve ark. [9], simektit grubu kil minerallerini içeren ve yüksek şişme potansiyeline sahip olan Ankara Kili'nin yüzeydeki ve sığ derinliklerdeki hafif yapıları hasara uğrattığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar, Ankara kilinin şişme parametrelerinin hem yanal hem de düşey yönlerde belirlenerek, şişme yönserliğinin araştırılmasının mühendislik uygulamaları açısından önem taşıdığını vurgulamışlardır. Çalışmada,

Ankara ili yerleşiminin güneybatısındaki 100. Yıl, Karakusunlar, Öveçler ve Söğütözü gibi bazı semtler örnekleme alanı olarak seçilmiş ve kilin yanal ve düşey yönlerdeki şişme parametreleri farklı laboratuvar teknikleriyle belirlenip karşılaştırılmış, ayrıca taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak kilin mikro yapısının şişme yönserliği üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Avşar ve ark. [9], şişme basıncının düşey yönde daha büyük olduğu saptamış olup, yanal ve düşey yönlerdeki şişme basıncı oranlarının 0.34 ile 0.98 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar tarafından elde edilen SEM analiz sonuçları, Ankara Kili'ndeki kil minerallerinin yatay ve/veya yataya yakın yapraklanmaya sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca bu dizilimin, yapraklanmanın yönüne dik yöndeki şişme parametrelerinin (düşey yöndeki) yanal yöndeki şişme parametrelerinden daha yüksek olduğuna işaret ederek deney sonuçlarını desteklediği belirtilmiştir.

Yılmaz ve Özaydın [91], Ankara Kili-çimento karışımlarının mekanik davranışını değerlendirmek için deneysel bir araştırma yapmıştır. Çalışmada kolemanit cevheri atıkları ile modifiye edilmiş aktif belit çimentosunun zemin stabilizasyonu uygulamalarında kullanımı değerlendirilmiştir. Temel olarak belit çimentosu-kil ve portland çimentosu-kil karışımlarının; kompaksiyon özellikleri, tek eksenli sıkışma dayanımı, eksenel gerilme davranışı ve üç eksenli sıkışma deneyi parametreleri karşılaştırılmıştır. Belit ve portland çimentoları killi zemine ağırlıkça %1, 2.5, 5, 7.5 ve %10 oranlarında eklenmiştir. Standart proktor enerjisi ile sıkıştırılan örnekler üzerinde 1, 7, 14 ve 28 günlük kür sürelerinin etkileri de araştırılmıştır. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonuçları; %5'ten daha az çimento kullanımının dayanım üzerinde çok az etkiye sahip olduğunu ve her iki çimento türü ile hazırlanan karışımların esnek bir yenilme modeli sergilediğini göstermiştir. %5'e eşit veya daha büyük oranda çimento kullanımında ise dayanımın önemli ölçüde geliştiği, özellikle belit çimentosu-kil karışımları için kırılğan bir gerilme-deformasyon davranışının görüldüğü belirtilmiştir. Ayrıca üç eksenli sıkışma deneyi sonuçları belit çimentosunun drenajsız kohezyon değeri üzerindeki etkisinin, portland çimentosuna göre (%10 çimento içeriği ve 28 gün kürlenme süresi için) belirgin şekilde daha büyük olduğunu göstermiştir.

Yılmaz [92], farklı polipropilen liflerinin ve C sınıfı uçucu külün Ankara Kili'nin gerilme-deformasyon ve makaslama dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmak için deneysel bir program uygulamıştır. Araştırmacı çalışmasında iki farklı uzunluktaki (6.0

mm ve 19.0 mm) iki tür lifi (fibrillenmiş polipropilen lif ve çok filamentli polipropilen lif) ve iki lif dozajını (kuru toprak ağırlığının %0.5'i ve %1'i) dikkate almıştır. İlk olarak stabilize edilmemiş toprağın ve farklı yüzdelerde hazırlanan uçucu kül-toprak karışımlarının (%2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20 ve %30 uçucu kül katkılı) kompaksiyon özellikleri değerlendirilmiştir. 1, 7, 14, 28 ve 90 günlük kür sürelerinin sonunda doğal toprağın ve beş farklı uçucu kül-toprak karışımının (%5, 10, 15, 20 ve %30 katkılı) tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, doğal toprak ve iki farklı uçucu kül-toprak karışımına (%10 ve %30 katkılı) farklı uzunluk ve yüzdelerde olmak üzere iki tür polipropilen lif eklenmiştir. Araştırmacı tarafından toplam 17 farklı lif-uçucu kül-toprak karışımı hazırlanmış ve 28 günlük kür süresi sonunda tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar, tek eksenli sıkışma dayanımındaki artışın %30 uçucu kül ile ağırlıkça %1 ve 19 mm uzunluğundaki fibrillenmiş türde polipropilen lif içeren karışım için %218 olduğunu göstermiştir. Üç eksenli sıkışma deneyi sonuçlarına göre %1 oranında çok filamentli polipropilen lifin, uçucu kül olmadan tek başına içsel sürtünme açısını 2.3 kat arttırdığı ancak, kohezyon değerindeki etkisinin önemsiz olduğu belirtilmiştir. %1 çok filamentli lif - %10 uçucu kül karışımları için içsel sürtünme açısı sabit kalırken kohezyon değerinin 20 kPa kadar arttığı ifade edilmiştir. Ayrıca %1 fibrillenmiş lif - %30 uçucu kül içeren karışımların yenilme zarfı eğiminin 200 kPa'nın ötesinde 1.6 kat daha dikleştiği ancak, kohezyonun hafifçe azaldığı belirtilmiştir. Araştırmacı, zemine %1 oranında 19 mm'lik çok filamentli lif eklemenin esnekliği arttırdığını ve uçucu kül içeriğinin %10'un üzerine çıkmasıyla birlikte kür süresine bağlı olmaksızın örneklerin yenilme modelinin esnekten kırılıgana doğru değiştiğini belirtmiştir. Ayrıca diğer lif türüne göre 19 mm'lik çok filamentli lifin her iki yüzde değerinin (%0.5 ve %1) esnekliği daha fazla arttırdığını ifade etmiştir.

Binal ve ark. [93], 2016 yılında yaptıkları çalışmada, Yeniköy termik santralinden temin ettikleri yüksek alkali uçucu külü, ağırlıkça %5, %15 ve %25 oranlarında zemin numunelerine ekleyerek Ankara Kili'nin jeomekanik özelliklerinde oluşan değişiklikleri araştırmışlardır. Çalışmada, kür süresinin uçucu kül katkılı toprak örneklerinin fiziksel-mekanik özellikleri üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Araştırmacılar, 1, 7 ve 28 gün boyunca kür koşullarında beklettikleri örnekler üzerinde Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve serbest şişme indeksi deneylerini uygulamışlardır. Çalışma sonucunda killi zemine %25 oranında uçucu kül eklemenin serbest şişme indeksi değerinde %92.6 oranında bir düşüş oluşturduğunu bildiren araştırmacılar, CBR değerinde ise belirgin bir artış

olduğunu belirtmiştir. CBR değeriindeki bu artışın %25 oranında uçucu kül katkısı için 68.7 kat olduğu ifade edilmiştir. Ankara Kili'nin %10 veya daha fazla miktarda Yeniköy uçucu külü ile stabilize edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Kılıç ve ark. [94], Batıkent yerleşim alanındaki yüksek plastisiteli killerin şişme ve dayanım özelliklerinin, ağırlıkça farklı oranlardaki kireç, jips ve kireç-jips karışımlarının kullanılarak iyileştirilmesine yönelik bir çalışma yapmıştır. Araştırmacılar, zemine %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında katkı maddeleri ekleyerek hazırladığı örneklerin şişme yüzdesi, şişme basıncı ve tek eksenli sıkışma dayanımını belirlemiştir. Çalışma sonucunda %6 oranında kireç katkısının optimum iyileşmeyi sağladığını belirten araştırmacılar, 90 günlük kür süresi sonunda şişme yüzdesi ve şişme basıncında sırasıyla %99.55 ve %98.98 oranında düşüş görülürken tek eksenli sıkışma dayanımında %191.87 oranında bir artış elde edildiğini bildirmişlerdir. Zemine sadece jips katılması halinde şişme ve dayanım özelliklerinin olumsuz etkilendiği, kireç içerisine jips katılması halinde iyileştirme performansının azaldığı belirtilmiştir.

3. YÖNTEM

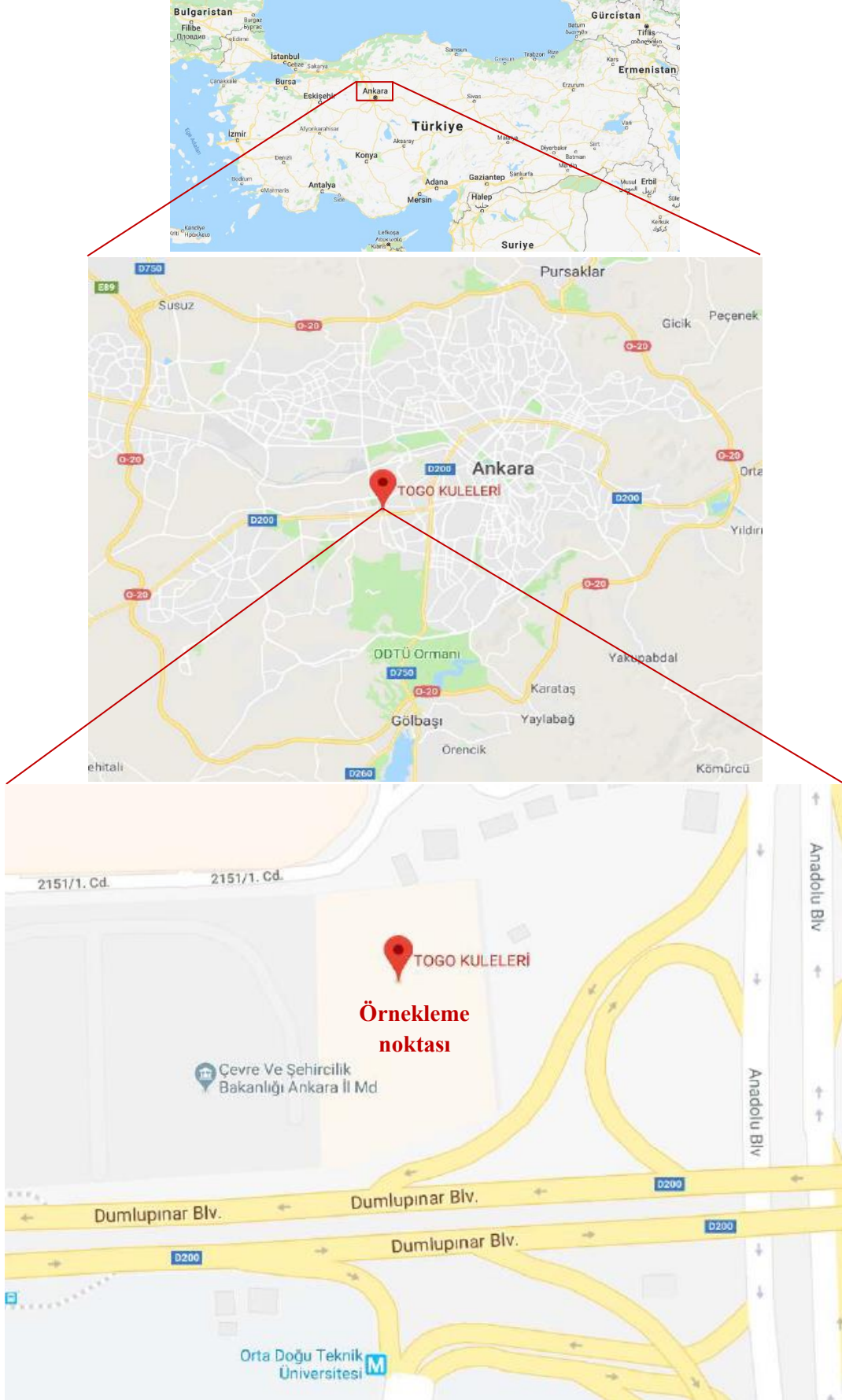
Tez çalışması kapsamında Ankara Kili'nin stabilizasyonunu sağlamak için deneylerde atık cam tozu ve alkali katkı maddeleri kullanılmıştır. Örneklerin serbest şişme indeksi, makaslama dayanımları, ıslanma-kuruma ve donma-çözülme çevrimleri sonrası tek eksenli sıkışma dayanımlarındaki değişimler tespit edilmiştir.

3.1. Örnek Alımı

Tez çalışmasında kullanılan Ankara Kili; Çankaya ilçesine bağlı Mustafa Kemal Mahallesi, Dumlupınar Bulvarı'ndaki Togo Kuleleri İnşaat alanından, 5-6 metre derinlikten 39°54'34.3"K enlem ve 32°47'03.4"D boylam koordinatlarından örselenmiş örnek olarak alınmıştır (Şekil 3.1). Laboratuvara getirilen nemli toprak numuneleri öncelikle havada kurumaya bırakılmış ve daha sonrasında uygulanacak deneylerin koşullarına uygun şekillerde etüvde kurutulmuştur. Örneğin alındığı lokasyon Şekil 3.2'deki haritada verilmiştir.



Şekil 3.1. Örnekleme alanından alınmış toprak örneğine ait görüntü.



Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan toprak örneğinin alındığı lokasyon.

3.2. Deneylerde Kullanılan Ankara Kili'nin Özelliklerinin Belirlenmesi

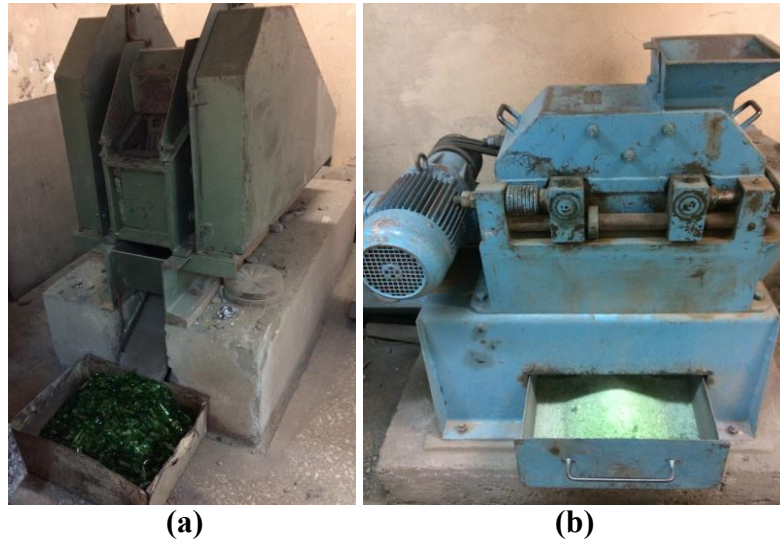
Ankara Kili'nin özelliklerini belirlemek amacıyla tane boyu dağılımı analizi yapılarak toprağın Atterbeg limitleri ve özgül ağırlığı tespit edilmiştir. Ayrıca toprağın mineral içeriği XRD analizi ile belirlenmiştir.

3.3. Katkı Malzemelerinin Hazırlanması

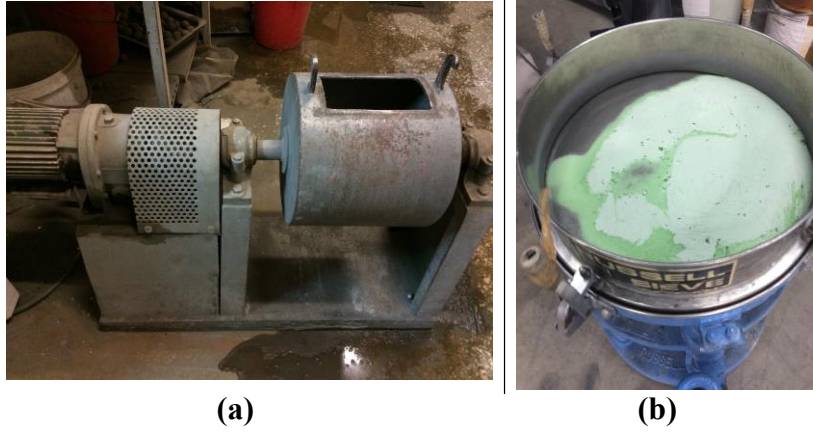
3.3.1. Atık Cam

Çalışmada killi zemini stabilize etmek için alternatif bir malzeme olarak atık cam şişeler tercih edilmiştir. Tüketim sonrası büyük miktarlarda açığa çıkan yeşil renkli soda şişeleri kullanılmıştır. Atık soda şişeleri, toz halde malzeme elde etmek için H.Ü., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., Cevher Hazırlama Laboratuvarında bulunan ekipmanlar kullanılarak birkaç aşamada öğütülmüştür.

İlk olarak cam şişeler çeneli kırıcı yardımıyla iri parçalar şeklinde kırıldıktan sonra daha küçük boyutlara geçiş yapmak için ikinci aşama olarak merdaneli kırıcı kullanılmıştır. Merdaneli kırıcıda belirli bir tane boyutuna getirilen atık camlar daha ince taneli malzeme elde etmek amacıyla son aşama olarak bilyalı değirmende en az 10 dk boyunca öğütülmüştür. Öğütülen camlar 50 no'lu (300 µm) elekten geçirildikten sonra toz halde malzeme elde edilmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.3. Cam öğütme aşamaları a) çeneli kırıcı, b) merdaneli kırıcı.



Şekil 3.4. a) Bilyalı değirmen, b) Öğütülen camların eleme işlemi.



Şekil 3.5. Öğütme işleminden sonra elde edilen farklı tane boylarında camlar.

Camın en yaygın şekli şişelerin de yapımında kullanılan soda-kireç camlarıdır. Bu camların en önemli bileşenleri SiO_2 , Na_2O , CaO ve Al_2O_3 'tir. Çizelge 3.1.'de soda-kireç camlarının çeşitli özelliklerine yer verilmiştir.

Çizelge 3.1. Soda kireç camının çeşitli özellikleri [95].

Özellikler	Değer
Silika (SiO_2)	%74
Sodyum oksit (Na_2O)	%13
Kireç (CaO)	%10.5
Alümina (Al_2O_3)	%1.3
Diğer bileşenler	%1.2
Yoğunluk (20°)	2.52 g/cm^3
Young Modülü (20°)	72 GPa

Çalışmada katkı malzemesi olarak kullanılan cam tozunun çeşitli ölçeklerde oluşturulmuş SEM görüntüleri ve EDS spektrumuna deneysel çalışmalar ve elde edilen veriler bölümünde yer verilmiştir.

3.3.2. Alkali aktivatörler

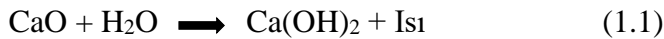
Son yıllarda yapılan çalışmalarda, çimento gibi bağlayıcılık özelliği kuvvetli malzemelerin bir diğer şekli jeopolimer olarak isimlendirilmektedir [96]. Polimerizasyon sürecinde, malzemede bulunan silika ve alüminanın belli bir miktarının çözülmesi ile hammadde partiküllerinin yüzey hidrolizini yükseltmek için güçlü bir alkali ortam gereklidir. Bu ortam ise aktivatör olarak adlandırılan alkali çözeltilerle elde edilebilmektedir [97]. Özellikle Si ve Al oksitlerinin çözülmesinde alkali çözeltilerin etkisi büyüktür.

Jeopolimerler, alüminosilikat içeren malzemelerin; sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), potasyum silikat veya sodyum silikat gibi güçlü alkali çözeltiler ile reaksiyonu sonucunda oluşmaktadır [98]. Jeopolimerizasyon veya alkali aktivasyon, çimento özelliğindeki kompozitlerde camsı yapıları değiştiren kimyasal bir süreçtir [97].

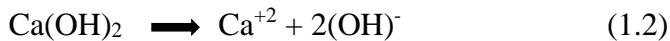
Çalışmada atık cam tozunu aktive etmek ve jeopolimer oluşumunu desteklemek amacıyla alkali aktivatör olarak kireç (CaO) ve sodyum hidrosit (NaOH) kullanılmıştır.

3.3.2.1. Sönmemiş Kireç (CaO)

CaO su ile karıştırıldığında büyük miktarda ısı (300-400°C) açığa çıkararak (1.1)'deki gibi bir kimyasal reaksiyon meydana gelmektedir. Bu işleme kirecin söndürülmesi işlemi ve Ca(OH)₂'ye sönmüş kireç denilmektedir [99].

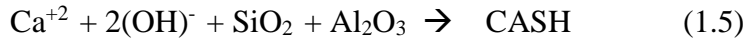


Kirecin zemin taneleri arasındaki boşluk suyunda (1.2)'de verildiği gibi iyonlaşması ortamdaki Ca⁺² iyonu konsantrasyonunu artırırken, OH⁻ iyonları da ortamın pH değerini yükseltirler.



Kirecin ortama verdiği Ca⁺² iyonu ve silisyum, alüminyum ve/veya demir iyonları arasındaki puzolanik reaksiyonlar sonucunda kalsiyum silika hidrat (CSH), kalsiyum

alümina hidrat (CAH) ve kalsiyum alümina-silika hidrat (CASH) gibi yüksek dayanımlı çimentolaşma ürünleri oluşmaktadır [100]. Çimentolaşma aşamasındaki puzolanik reaksiyonlara ait denklemler (1.3), (1.4) ve (1.5)'te verilmiştir.



Çimentolaşma ürünleri CSH, CAH ve CASH puzolanik reaksiyonlar sonucu ilk meydana geldiklerinde jel kıvamındadır. Oluşan bu jel, zemin tanelerini çevreleyip boşlukları doldurmaktadır. Zaman geçtikçe CSH, CAH ve CASH jelleri kristalleşerek sertleşmektedir. Yüksek dayanımlı, sert ve suda erimeyen bu kristal yapılar zeminin dayanımında iyileşme sağlayan ürünlerdir.

Bu bilgiler doğrultusunda çalışmada kullanılan atık camın aktivesini arttırmak ve yüksek dayanımlı çimentolaşma ürünleri elde edebilmek amacıyla CaO kullanımı tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan kireç toz haline getirildikten sonra toprak-cam tozu karışımlarına eklenmiştir. Homojen bir karışım elde etmek için kireç, cam tozu ve toprak kuru halde iyice karıştırıldıktan sonra optimum su içeriğinde örnekler hazırlanmıştır.

3.3.2.2. Sodyum Hidroksit (NaOH)

NaOH, alkali aktivatör olarak kullanılan en yaygın malzemelerden biridir ve NaOH ile hazırlanan çözeltilerin yüksek pH elde etmek için sıklıkla tercih edildiği bilinmektedir. Xu ve Van Deventer [101], amorf fazda, zengin silika ve alümina kaynağına sahip olan puzolanik bir malzemenin alkali bir aktivatörde çözünebileceğini belirtmiş ve bunun da jeopolimerizasyon için temel oluşturabileceğinden bahsetmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda yüksek pH değerine sahip NaOH çözeltisinin, atık cam tozu bünyesinde bulunan amorf silikanın çözünmesi için gerekli alkali ortamı sağlayabileceği düşünülmüştür.

Alkali çözeltiler arasında sodyum hidroksit çözeltisinde Al^{+3} ve Si^{+4} iyonlarının çözülme ihtimali daha yüksektir [96]. Bundan dolayı NaOH, jeopolimerik malzemelerin yapısına ve basınç dayanımına önemli bir etki yapmaktadır [102].

Çalışmada katkı malzemesi olarak kullanılan cam tozunun aktivesini sağlamak amacıyla 2 molar NaOH çözeltisi kullanılmıştır. NaOH su içinde çözünürken sıcaklığı arttırması sebebiyle alkali çözelti kullanımdan bir gün önce hazırlanmıştır. Alkali çözelti, optimum su içeriğinde toprak-cam tozu karışımlarına ilave edildikten sonra homojen bir karışım elde edilene kadar iyice karıştırılmıştır.

3.4. Serbest Şişme İndeksinin Belirlenmesi

Cam tozu katkısı ve beraberinde kullanılan alkali maddelerin killi zeminlerin şişme özelliklerine olan etkisini yorumlamak amacıyla Hint Standardı, IS: 2720'de [103] belirtildiği şekilde deneyler sürdürülmüştür. 105 °C'de kurutulmuş toprak örnekleri öğütüldükten sonra 40 no'lu (0.425 mm) elekten geçirilmiştir. Elek altında kalan malzemedan alınan 10 g örnek 100 ml saf su içerisinde, 10 g örnek 100 ml gazyağı (kerosen) içerisinde olacak şekilde 24 saat bekletilmiştir. Toprak örneklerinin hacim değişimleri kaydedilmiş ve aşağıdaki eşitlik yardımıyla serbest şişme indeksleri hesaplanmıştır.

$$\text{Serbest Şişme İndeksi (\%)}: \frac{V_d - V_k}{V_k} * 100$$

V_d : Saf su içeren tüpteki örnek hacmi

V_k : Kerosen içeren tüpteki örnek hacmi

İlgili standarda bağlı olarak zeminlerin şişebilirlik derecesinin belirlenmesinde kullanılan serbest şişme indeksi değerleri Çizelge 3.2.'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Serbest şişme indeksi ve şişebilirlik derecesi.

Serbest Şişme İndeksi (%)	Şişebilirlik Derecesi
<20	Düşük
20-35	Orta
35-50	Yüksek
>50	Çok yüksek

3.5. pH Ölçümleri

Toprak örneklerinin pH ölçümleri ASTM D4972–01’de [104] belirtilen hususlar dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler için havada kuruyan toprak örnekleri 10 no’lu (2 mm) elekten geçirildikten sonra 10 g ağırlığında tartılmıştır. 10 g ağırlığındaki toprak numunelerinin üzerlerine 10 ml saf su ekleyip karıştırıldıktan 1 saat sonra pH metre ve turnusol kağıdı kullanarak ölçümler yapılmıştır.

3.6. Standart Proktor Deneyi

Doğal zeminin ve katkı malzemesi içeren toprak örneklerinin optimum nem içeriğini belirlemek üzere ASTM D698’de [105] belirtilen adımlar izlenerek standart proktor deneyleri yapılmıştır.

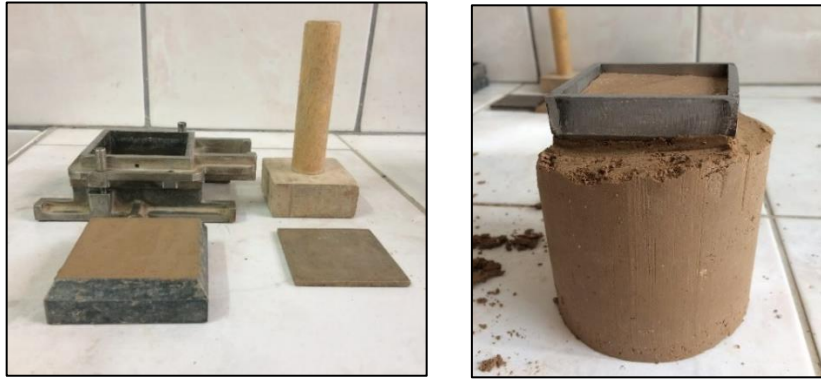
Deneylerde 4 no’lu (4.75 mm) elekten geçirilen etüvde kurutulmuş toprak örneklerine cam tozu farklı yüzdelerde eklenerek su ilave edilmiş ve homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlar proktor kalıbına birbirine eşit üç tabaka halinde yerleştirilerek her tabakaya 25 vuruş yapılmıştır (Şekil 3.6). Deney en az 5 farklı nem içeriği ile tekrarlanmıştır. Kompaksiyon eğrileri çizilerek optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 3.6. Standart proktor deneyinden görüntüler.

3.7. Doğrudan Makaslama Deneyi

Killi zeminlerde cam tozu katkısı ile yapılan stabilizasyon işleminin başarısını test etmek ve ilerleyen aşamalarda kullanılacak optimum cam tozu yüzdesine karar verebilmek amacıyla katkısız (%0), %15 ve %25 cam tozu katkısı içeren toprak örneklerinin makaslama dayanımı parametreleri belirlenmiştir. Doğrudan makaslama deneyi için örnekler standart proktor kalıbında 3 katman, 25 vuruş olacak şekilde optimum su içeriklerinde sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan örnekler 14 gün boyunca kür koşullarında bekletilmiştir. Kür koşullarını tamamlayan toprak örnekleri boyutları 6*6*2 cm olan kare şeklindeki metal kalıplara örselemeden alınmış ve makaslama kutusuna yerleştirilmiştir (Şekil 3.7). Deneylere drenajsız koşullarda, 1, 2, 3 kg'lık yüklemeler altında ve yükleme hızı 0.5 mm/dk olacak şekilde devam edilmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.7. Örneğin makaslama deneyi için hazırlanması.



Şekil 3.8. Örneğin makaslama dayanımının ölçülmesi.

3.8. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımlarının Belirlenmesi

Numunelerin tek eksenli sıkışma dayanımları belirlenirken ASTM D-2166 standardı [106] dikkate alınmıştır. Numuneler 76.78*152.74 mm boyutundaki kelepçeli metal kalıplarda proktor sıklığında hazırlanmıştır. Örnek hazırlarken kullanılan metal kalıpların standart proktor kalıbından farklı boyutlarda olması nedeniyle eş enerji miktarı ile sıkıştırma yapabilmek için aşağıdaki eşitlik kullanılarak katman başına düşen darbe sayısı hesaplanmıştır.

Standart proktor testi için kompaksiyon enerjisi (E):

$$E = \frac{\text{Çekiç ağırlığı} * \text{Düşme yüksekliği} * \text{Katman başına darbe sayısı} * \text{Katman sayısı}}{\text{Kalıp hacmi}}$$

$$E = \frac{2.495 \text{ kg} * (9.81 \text{ m/s}^2) * (0.3048 \text{ m}) * 25 * 3}{947.87 * 10^{-6} \text{ m}^3}$$

E = 590,292.15 Nm/m³ olarak hesaplanmıştır.

$$590,292.15 \text{ Nm/m}^3 = \frac{2.495 \text{ kg} * (9.81 \text{ m/s}^2) * (0.3048 \text{ m}) * D * 3}{707.19 * 10^{-6} \text{ m}^3}$$

$$D = 18.65$$

Eşitlik yardımıyla 76.78*152.74 mm boyutlarındaki kalıplarda sıkıştırma yapmak için katman başına düşen darbe sayısı 18 olarak bulunmuştur. Birbirine eşit 3 katman şeklinde oluşturulmuş optimum su içeriğindeki toprak örneklerine 2.5 kg ağırlığındaki proktor çekicinin 30 cm mesafeden 18 defa düşürülmesi şeklinde proktor sıklığı sağlanmıştır. %97±2 nem oranı ve 22±2°C'lik kür koşullarında bekletilen örnekler 14 gün sonunda nem dolabından çıkartıldıktan sonra ortam koşullarında bekletilmeden doğrudan deneye tabi tutulmuştur (Şekil 3.9). Deneye başlarken her numunenin ağırlık, çap ve boyları kaydedilmiştir. Deneyde 4.5 kN'luk yük halkası kullanılmış ve yükleme hızı olarak 0.5 mm/dk uygulanmıştır. Deney sonrası kırılan örneklerden parçalar alınarak su içerikleri tayin edilmiştir.



Şekil 3.9. Nem dolabında bekletilen örneklerden bir görünüm.

Örnek hazırlama aşamasında %15 cam tozu ile birlikte %5 CaO içeren toprak örneğini kalıptan çıkarırken örnek iç yüzeyinde çatlakların oluştuğu görülmüştür. %15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprak için kompaksiyon parametrelerinin ayrıca belirlenmesinin gerekli olduğu düşünülmüş ve standart proktor deneyi yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir (Şekil 3.10).

Önceki araştırmacılar, deneysel gözlemlerine dayanarak optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluğun, zemine jeopolimer bazlı malzemeler eklendiğinde nispeten sabit kaldığını bildirmiştir [107, 108]. Bilondi ve ark. [80], çalışmalarında bu bilgiyi esas alarak doğal zemin (stabilize edilmeyen) ve stabilize edilmiş örnekler için kompaksiyon koşullarını eşit olarak seçmiştir. %15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprak örneğinin standart proktor deneyi sonuçları değerlendirildiğinde literatürdeki bilgiler ile uyumlu olarak kompaksiyon parametrelerinin nispeten sabit kaldığı gözlemlenmiş ve doğal zeminin parametrelerine yakın değerler elde edilmiştir. Bu sonuçlardan hareketle %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örneği için ayrıca bir deney yapılmaksızın kompaksiyon koşulları doğal zemin ile eşit olarak seçilmiştir.



Şekil 3.10. CaO içerkli örnek hazırlanırken karşılaşılan olumsuzluk.

3.9. Islanma-Kuruma Döngüleri

Katkı malzemeleri ile stabilize edilen toprak örnekleri ıslanma-kuruma döngülerine tabi tutularak doğal koşullar altında dayanımlarındaki değişimler öngörölmeye çalışılmıştır. Döngü koşullarında duraylılığını kaybetmeyen toprak örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımları tespit edilmiştir. Islanma-kuruma döngülerinin ASTM D 559-89'da [109] belirtildiği şekilde 48 saatlik bir döngünün 5 saati suda olacak şekilde 12 döngü olarak yapılması düşünölmüştür. Sudan çıkarılan örnekler 71 °C'lik sıcaklıkta etüvde kurutulmuştur.

3.10. Donma-Çözölme Döngüleri

Deneylerin ASTM D560-89'da [110] belirtildiği gibi 48 saatlik 12 döngü şeklinde uygulanması planlanmıştır. Bu uygulama esnasında örnekler 24 saat -18 °C'de dondurulmuş daha sonra ise ortalama %97±2 nem oranı ve 22±2°C'lik sıcaklık koşullarındaki nem dolabında 24 saat çözölme üzere bekletilmiştir.

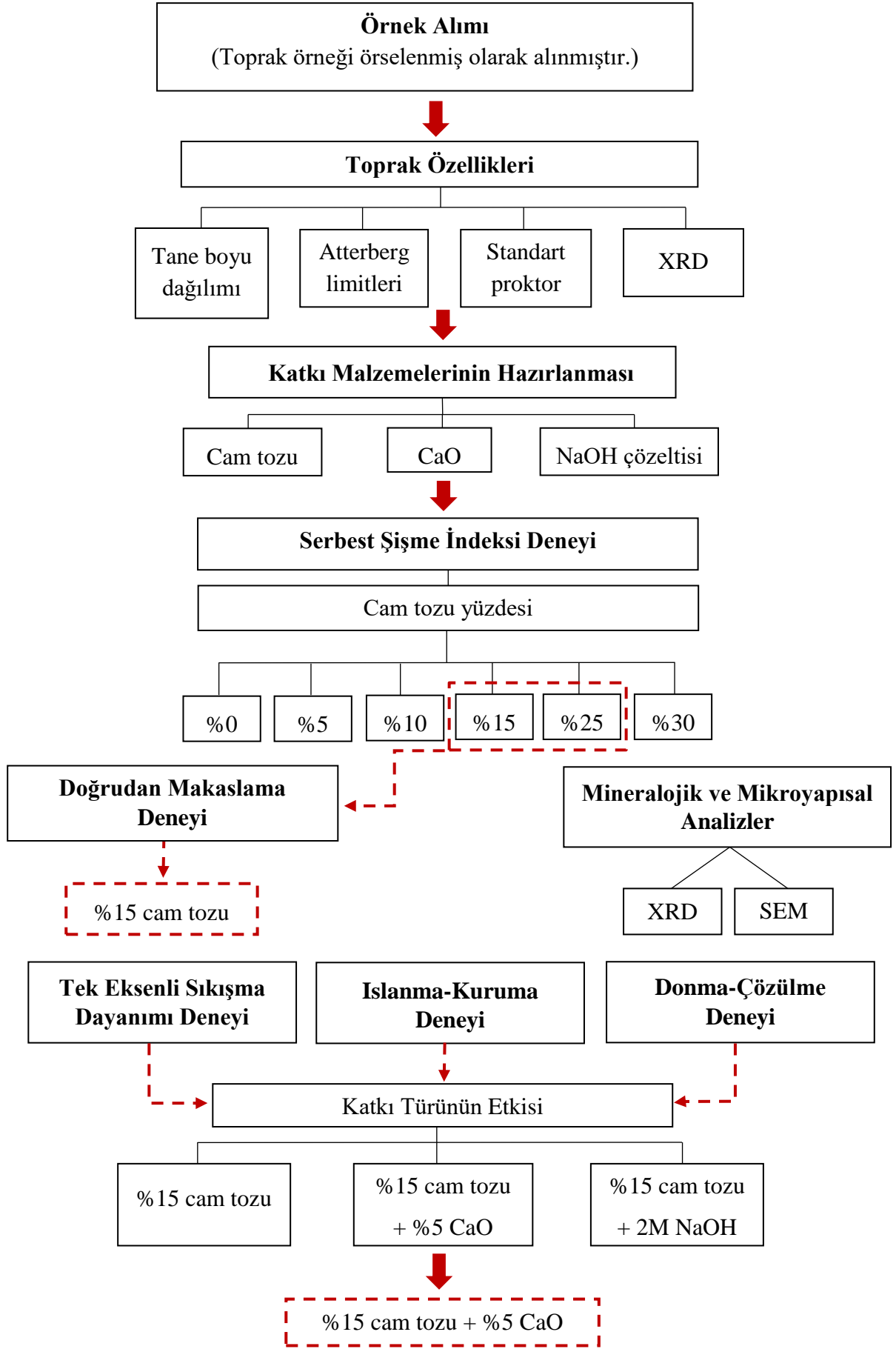
3.11. XRD Analizleri

Çalışmada kullanılan killi toprağın stabilizasyon işlemi öncesi ve sonrasındaki mineralojik bileşiminin belirlenmesi amacıyla X-Işınları kırınım (XRD) analiz yöntemi kullanılmıştır. Toprak örneklerinin standart (5°-70° arası), normal (5°-30° arası), etilen glikol (5°-30° arası), 350 °C ısıt (5°-30° arası) ve 550 °C ısıt (5°-30° arası) olmak üzere detay kil XRD çekimleri yapılmıştır.

3.12. SEM Analizleri

Toprak örneklerinin mikroyapısal analizleri SEM-EDS tekniği kullanılarak yapılmıştır. SEM yöntemi çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlarla yüzeyin taranması prensibine dayanmaktadır. SEM numuneleri, yüksek çözünürlüklü görüntü elde etmek için vakum ortamında oluşturulan ve aynı ortamda elektromanyetik lenslerle odaklanan ince elektron demeti ile incelenerek analiz edilmiştir. SEM görüntüleri oluşturulmadan önce elektronların numune üzerinde kolaylıkla hareket etmesini sağlamak için numuneler karbon ile kaplanmıştır. SEM görüntüleri oluşturulan numuneler mikroyapısal ve morfolojik açıdan incelenmiştir.

Deneysel çalışmalar sırasında takip edilen yöntemin aşamaları Şekil 3.11’de verilmiştir. Tez çalışması kapsamında uygulanan deney programı ve örnek sayılarına ilişkin bilgiler Çizelge 3.3’te ayrıca sunulmuştur.



Şekil 3.11. Yöntem aşamaları.

Çizelge 3.3. Deney programı ve örnek sayıları.

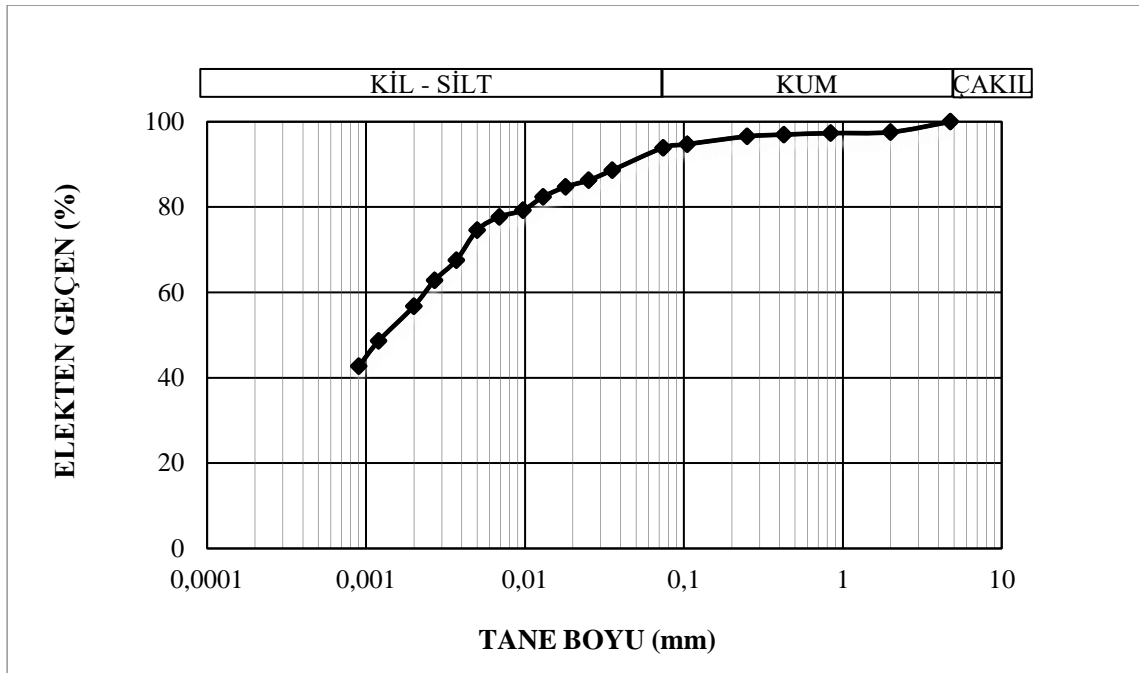
Yapılan Deneyler ve Analizler		Örnek Türü ve Sayısı								Toplam Örnek Sayısı
		Katkısız	Cam tozu katkı					Cam tozu + alkali aktivatör katkı		
			%0	%5	%10	%15	%25	%30	%15 cam tozu +%5 CaO	
İndeks ve sınıflandırma deneyleri	Tane boyu dağılımı	1								10
	Atterberg limitleri	6	-	-	-	-	-	-	-	
	Özgül ağırlık	3								
Diğer deneyler ve analizler	Serbest şişme indeksi	2	1	1	1	1	1	1	3	11
	pH ölçümleri	1	-	-	1	-	-	1	1	4
	Standart proktor	1	-	1	1	1	-	1	-	5
	Doğrudan makaslama	3	-	-	3	3	-	-	-	9
	Tek eksenli sıkışma dayanımı	3	-	-	3	-	-	3	3	12
	Islanma-kuruma	3	-	-	3	-	-	3	3	12
	Donma-çözülme	3	-	-	3	-	-	3	3	12
	XRD	1	-	-	1	-	-	1	1	4
SEM	3			1			1	1	6	

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ELDE EDİLEN VERİLER

4.1. Çalışmada kullanılan Toprağın İndeks ve Sınıflandırma Deneyleri

4.1.1. Tane Boyu Dağılımı Analizi

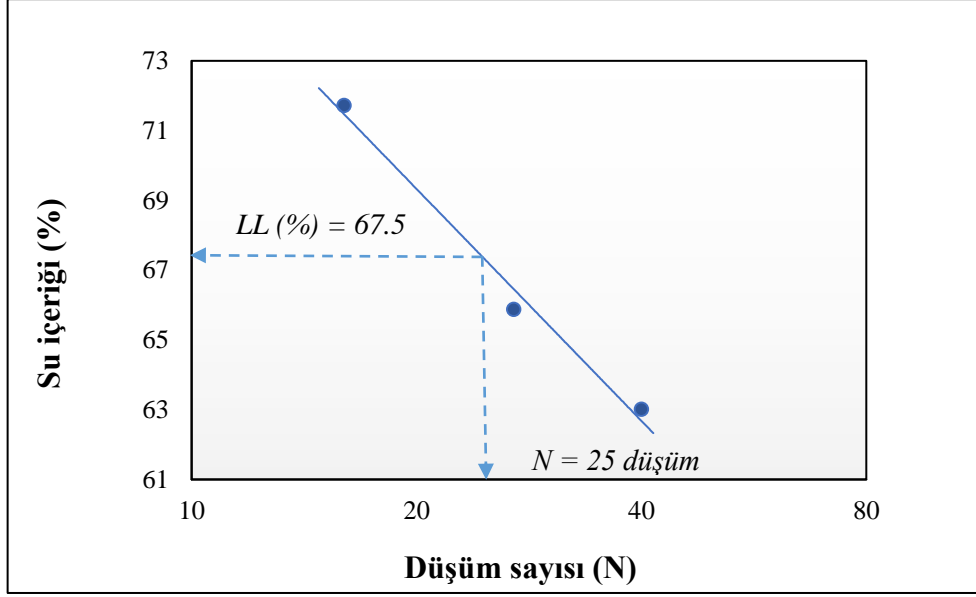
Tez çalışması kapsamında kullanılan toprağın tane boyu dağılımı, elek analizi ve hidrometre deneyi olmak üzere iki aşamada değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre toprağın % 6.1'inin kum, % 93.9'unun ince taneli malzeme (kil-silt) içerdiği saptanmıştır. Toprağın tane boyu dağılımı Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Tane boyu dağılımı eğrisi.

4.1.2. Atterberg Limitleri

Atterberg limitlerinin belirlenmesi Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te, toplu sonuçlar ise Çizelge 4.1'de verilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre çalışmada kullanılan toprak Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'nde (USCS) CH sınıfındadır. ASTM Mühendislik Amaçları için Toprak Sınıflandırması Standardı'na göre (ASTM D2487) [111] CH sınıflandırması bu kilin yüksek plastisiteli, inorganik bir kil olduğunu belirtmektedir.



Şekil 4.2. Casagrande likit limit deneyi verileri.



Şekil 4.3. Atterberg limitleri deneylerine ait görüntüler.

Çizelge 4.1. Deneylerde kullanılan kil için Atterberg limitleri ve parametreleri.

Atterberg Limitleri ve Parametreleri	
Likit Limit (LL) (%)	67.5
Plastik Limit (PL) (%)	33.7
Plastisite İndeksi (PI)	33.8

4.1.3. Özgül Ağırlık

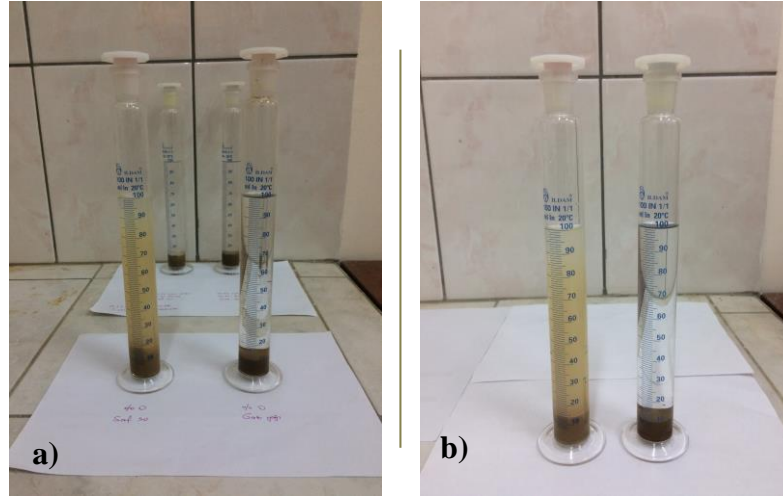
Deney sırasında elde edilen veriler Çizelge 4.2’de sunulmuş olup, zeminin özgül ağırlık değeri (G_s) 2.66 olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.2. Özgül ağırlık deneyi verileri.

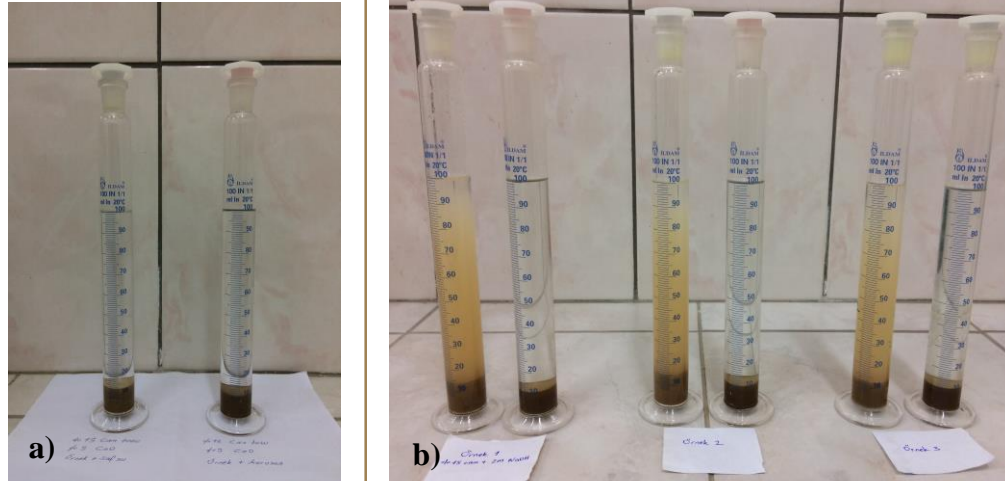
ÖZGÜL AĞIRLIK DENEYİ				
ÖRNEK NO		1	2	3
Piknometre Ağırlığı (W_0)	g	69,7	55,9	73,4
Piknometre + Örnek (W_1)	g	94,6	80,8	98
Piknometre + Su + Örnek (W_2)	g	185,28	171,13	188,94
Piknometre + Su (W_3)	g	169,64	155,7	173,6
$G_s = \frac{(W_1 - W_0)}{[(W_3 - W_0) - (W_2 - W_1)]}$		2,69	2,63	2,66
Zeminin Özgül Ağırlığı (G_s) =		2,66		

4.2. Serbest Şişme İndeksinin Belirlenmesi

%0, %5, %10, %15, %25, %30 cam tozu katkılı örnekler ve %15 cam tozu+%5 CaO içeren örnekler hazırlanırken katkı malzemeleri toprağa kuru halde eklenerek 10 g’lık karışımlar hazırlanmış ve deneye devam edilmiştir. %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak için 14 günlük kür koşullarında bekletilen örneklerden alınan parçalar 105 °C’lik etüvde kurutularak 40 no’lu elekten geçirildikten sonra deney gerçekleştirilmiştir. Örneklerin 24 saat sonundaki hacim değişimlerini gösteren fotoğraflara ise Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de yer verilmiştir.



Şekil 4.4. a) Katkısız (%0), b) %15 cam tozu katkılı örneğin 24 saat sonundaki hacim değişimi.

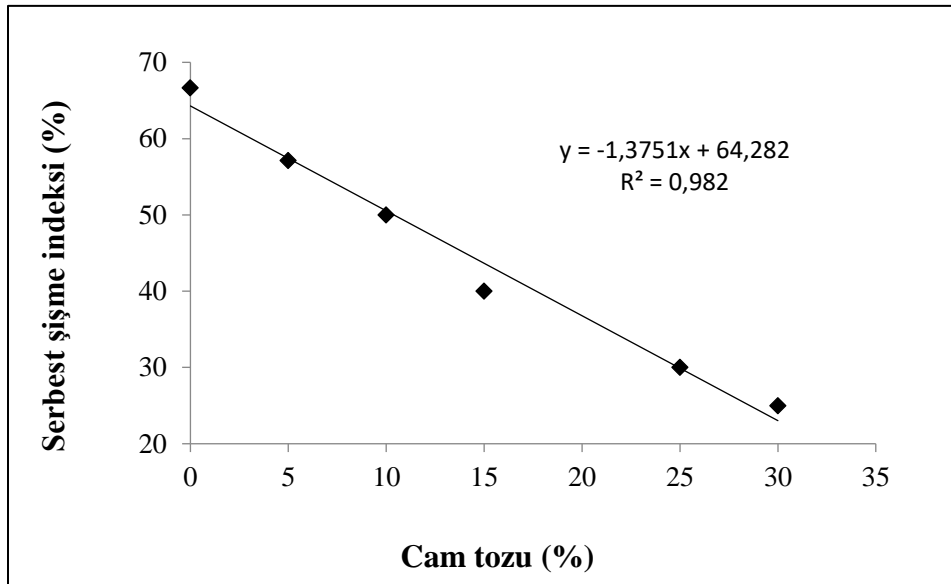


Şekil 4.5. a) %15 cam tozu+%5 CaO, b) %15 cam tozu+2M NaOH katkılı örneklerin 24 saat sonundaki hacim değişimleri.

Toprak örneğine uygulanan %30'luk cam tozu katkısı ile serbest şişme indeksi değeri %66.7'den %25'e düşmüştür. Elde edilen şişme indeksi değerlerine göre çok yüksek şişebilirlik derecesine sahip olan doğal zeminin orta düzeye doğru bir geçiş gösterdiği kaydedilmiştir (Çizelge 4.3, Şekil 4.6).

Çizelge 4.3. Katkısız (%0) ve cam tozu katkılı örneklere ait deney verileri.

SERBEST ŞİŞME İNDEKSİ DENEYİ						
Cam tozu (%)	%0	%5	%10	%15	%25	%30
V _d : Saf su içeren tüpteki örnek hacmi (mL)	17.5	16.5	15	14	13	12.5
V _k :Kerosen içeren tüpteki örnek hacmi (mL)	10.5	10.5	10	10	10	10
Serbest şişme indeksi (%)	66.7	57.1	50	40	30	25
Şişebilirlik derecesi	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta



Şekil 4.6. Cam tozu yüzdesi – serbest şişme indeksi değişimi.

Sönmemiş kireç (CaO) ile aktive edilmiş cam tozunun şişme indeksi üzerine olan etkisinin sadece cam tozu ile yapılan katkılara göre daha etkili olduğu tespit edilmiştir. CaO katkısı ile örneğin şişebilirlik derecesi 'düşük' sınıfına gerilemiştir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. Cam tozu ve kireç (CaO) katkılı örneklere ait veriler.

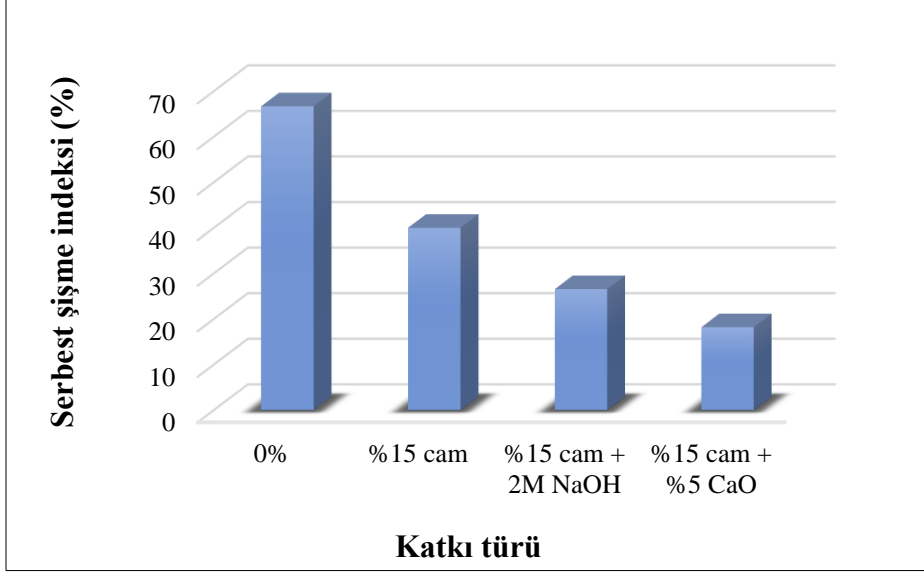
Katkı türü (%)	%15 cam tozu + %5 CaO	%15 cam tozu + %10 CaO
V_d : Saf su içeren tüpteki örnek hacmi (mL)	13	12
V_k :Kerosen içeren tüpteki örnek hacmi (mL)	11	11.5
Serbest şişme indeksi (%)	18.2	4.3
Şişebilirlik derecesi	Düşük	Düşük

15 cam tozu + 2M NaOH katkılı örneklerin serbest şişme indeksinin belirlenmesi sırasında izlenen adımların diğerlerinden farklı olması sebebiyle üç ayrı örnek hazırlanarak deney gerçekleştirilmiş ve ortalama değer hesaplanmıştır. Örneklere ait veriler Çizelge 4.5’te sunulmuştur. NaOH ile aktive edilmiş cam tozu katkısı içeren zeminin şişebilirlik derecesinin orta-düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.5. Cam tozu ve NaOH katkılı örneklere ait veriler.

Katkı türü (%)	%15 cam tozu + 2M NaOH		
	1	2	3
Örnek no			
V_d : Saf su içeren tüpteki örnek hacmi (mL)	14	14	12.5
V_k :Kerosen içeren tüpteki örnek hacmi (mL)	11	10.5	10.5
Serbest şişme indeksi (%)	27.3	33.3	19
Şişebilirlik derecesi	Orta	Orta	Düşük
Ortalama şişme indeksi : 26.5			

Katkı türlerinin zeminin şişme özelliğine olan etkisi Şekil 4.7’de grafik şeklinde sunulmuştur.



Şekil 4.7. Katkı türlerine göre serbest şişme indeksindeki değişimin grafiksel gösterimi.

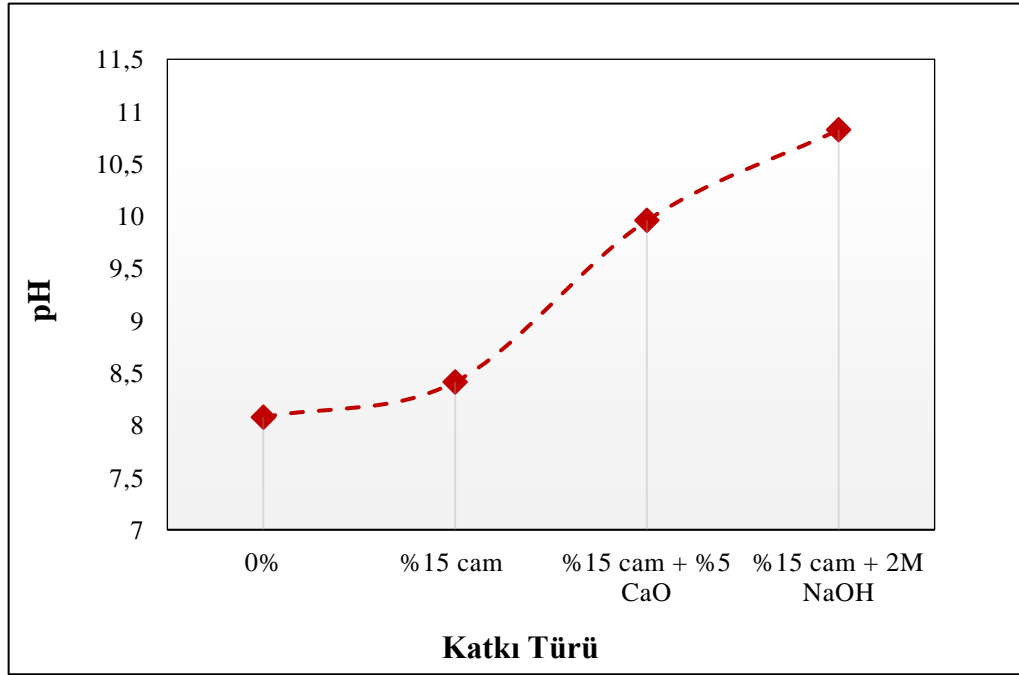
4.3. pH Ölçümleri

Karışımlar hazırlanırken kullanılan saf suyun pH değeri 7.290 olarak ölçülmüştür. Katkisiz (0%) toprak örneğinin pH değeri 8.077 iken %15 cam tozu, %15 cam tozu+%5 CaO ve %15 cam tozu+2M NaOH katkılı örneklerin pH değerleri ise sırasıyla; 8.414, 9.958 ve 10.825 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. pH metre ile yapılan ölçümler.

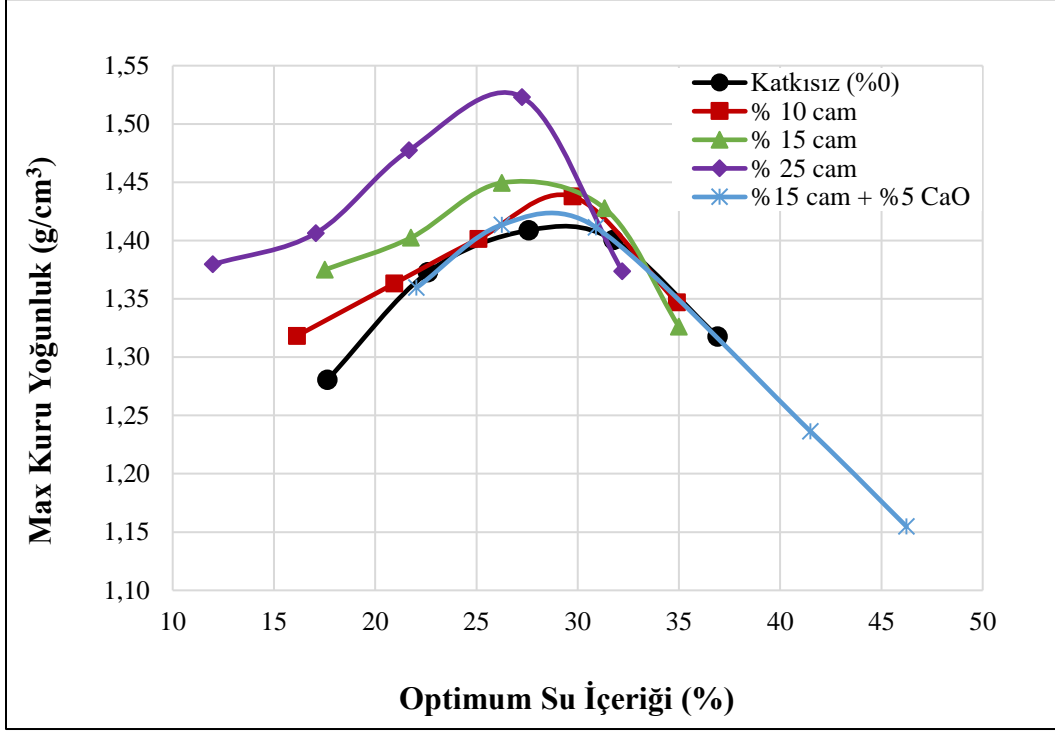
Katkı türüne göre toprakta gözlemlenen pH değişiminin grafiksel gösterimi Şekil 4.9'da sunulmuştur.



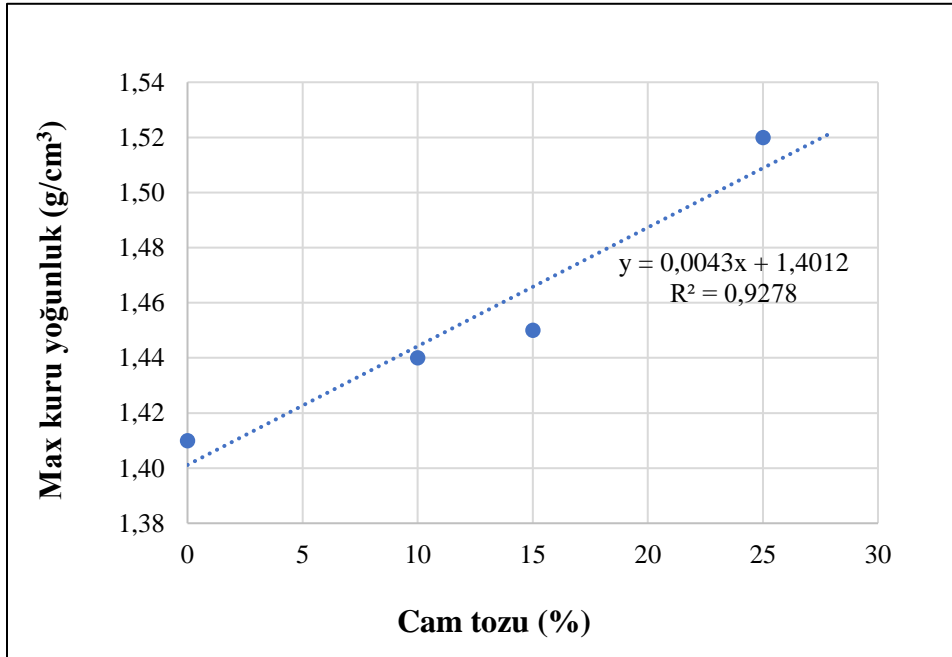
Şekil 4.9. Katkı türüne göre toprakta pH değişimi.

4.4. Standart Proktor Deneyi

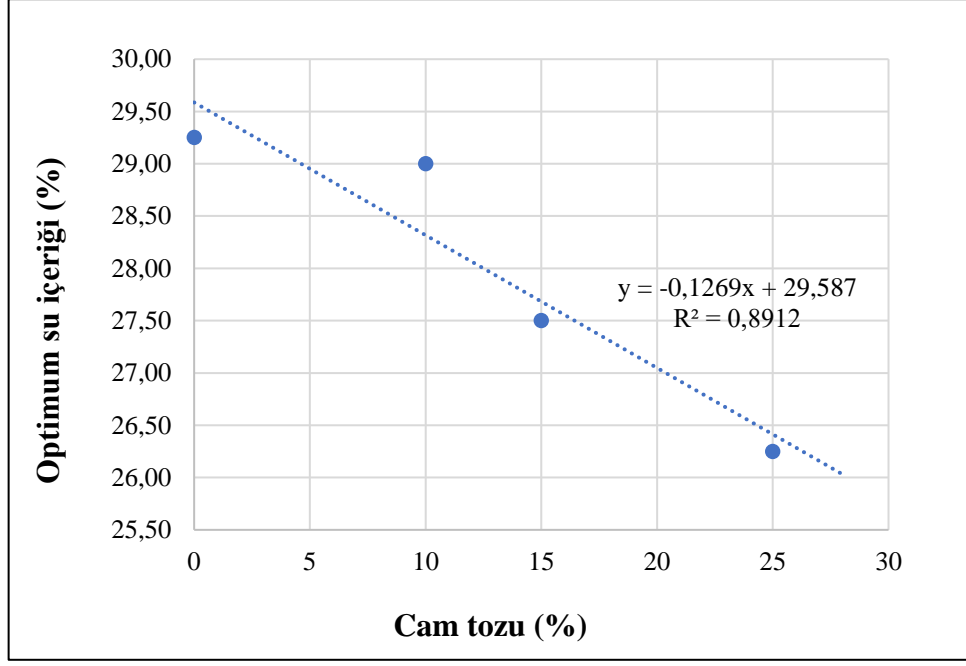
Numunelerin kompaksiyon özelliklerinin belirlenmesi için ASTM D698'de [105] belirtilen adımlar izlenerek standart proktor deneyleri yapılmıştır. Doğal zeminin ve katkı malzemesi içeren toprak örneklerinin kompaksiyon parametreleri karşılaştırılmıştır. Doğal zemin ve katkı malzemesi içeren örneklere ait kompaksiyon eğrileri Şekil 4.10'da verilmiştir. Katkı malzemesi olarak kullanılan cam tozunun kompaksiyon parametrelerine olan etkisi ise Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de sunulmuştur. Zemine eklenen cam tozu yüzdesi arttıkça zeminin maksimum kuru yoğunluk değerinde artış görülürken optimum su içeriği ise azalmaktadır.



Şekil 4.10. Doğal zemin ve katkıli örneklere ait kompaksiyon eğrileri.



Şekil 4.11. Cam tozu yüzdesi – maksimum kuru yoğunluk değişimi.

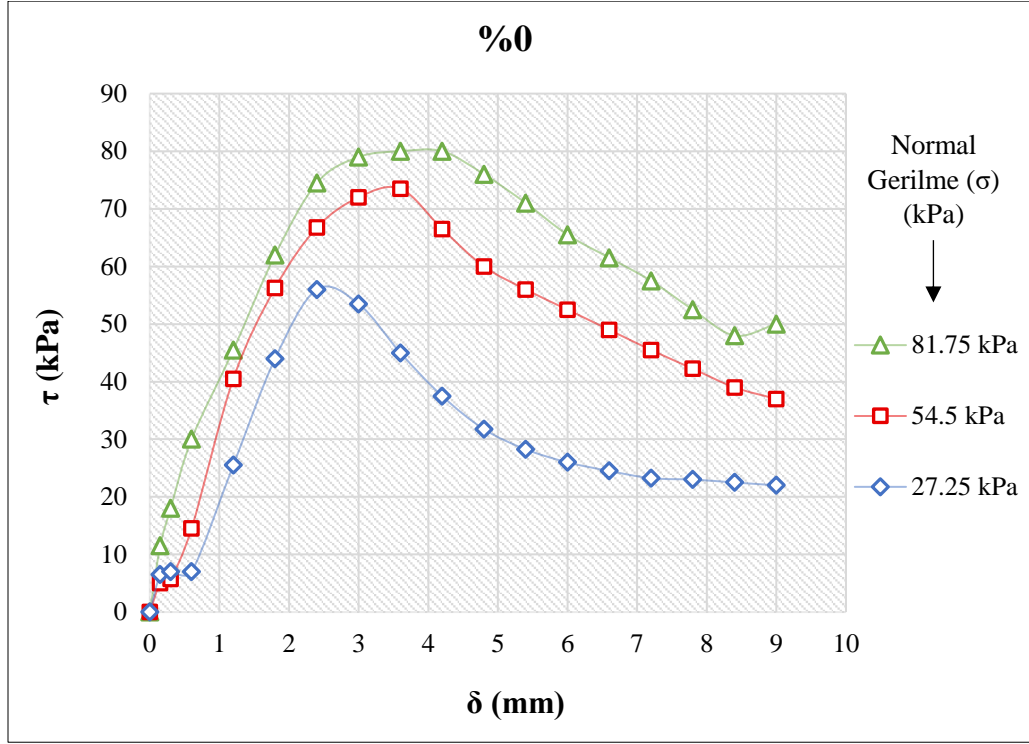


Şekil 4.12. Cam tozu yüzdesi – optimum su içeriği değişimi.

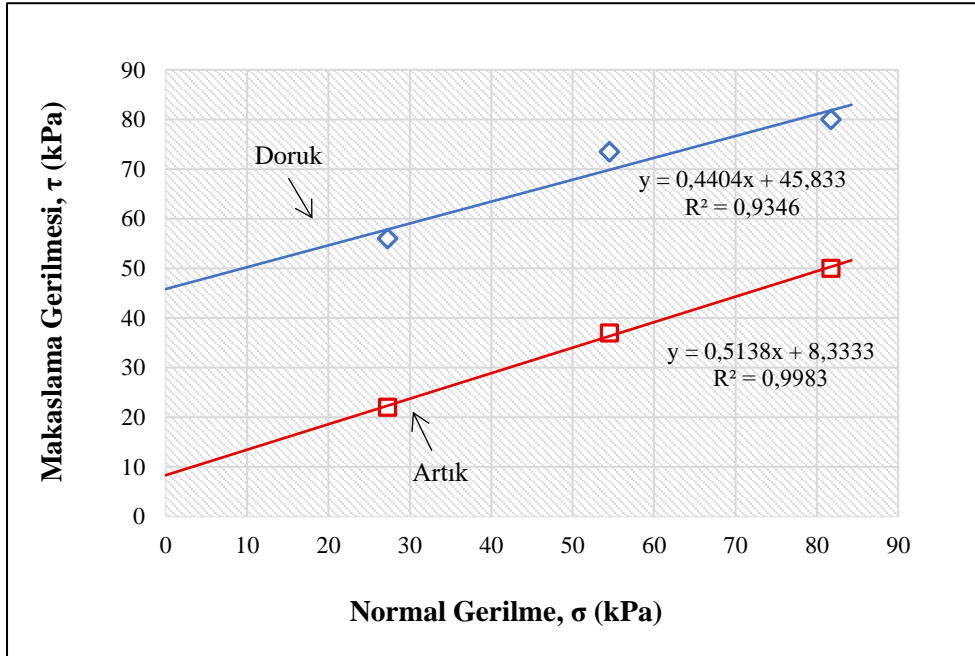
4.5. Doğrudan Makaslama Deneyi

Makaslama deneyleri %0, %15 ve %25 katkılı örneklerde gerçekleştirilmiştir. Her bir örnek için makaslama gerilmesi (τ) - makaslama yer değiştirmesi (δ) grafikleri ile doruk ve artık makaslama için yenilme zarfları çizilmiştir. Örneklere ait yenilme zarfı grafiklerinden doruk ve artık makaslama için kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri belirlenmiştir.

Katkısız (%0) toprak örneğine ait makaslama gerilmesi (τ) - makaslama yer değiştirmesi (δ) grafiği Şekil 4.13'te, doruk ve artık makaslama için yenilme zarfları Şekil 4.14'te sunulmuştur. Toprak örneğine ait doğrusal yenilme zarfından doruk makaslama için kohezyon (c_p) değeri 46 kPa, içsel sürtünme açısı (ϕ_p) ise 23.8 derece olarak hesaplanmıştır. Artık makaslama için kohezyon (c_r) 8 kPa olarak bulunurken içsel sürtünme açısı (ϕ_r) ise 27.2 derece olarak belirlenmiştir (Şekil 4.14).

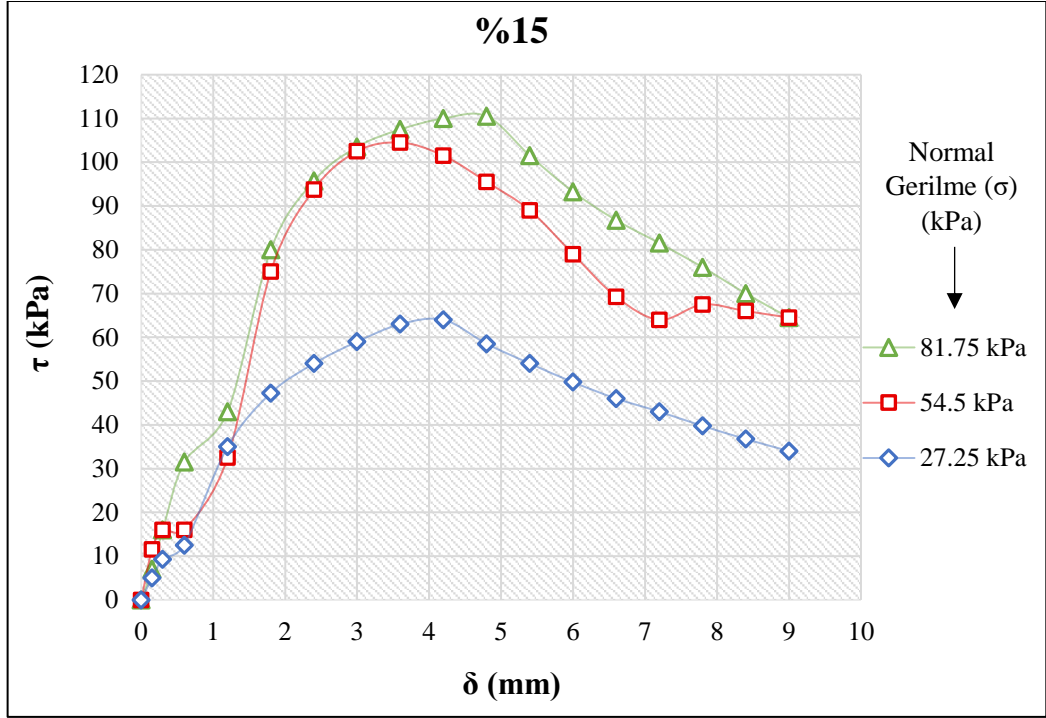


Şekil 4.13. Katkısız (%0) örneğe ait makaslama gerilmesi (τ) – makaslama yer değiştirmesi (δ) grafiği.

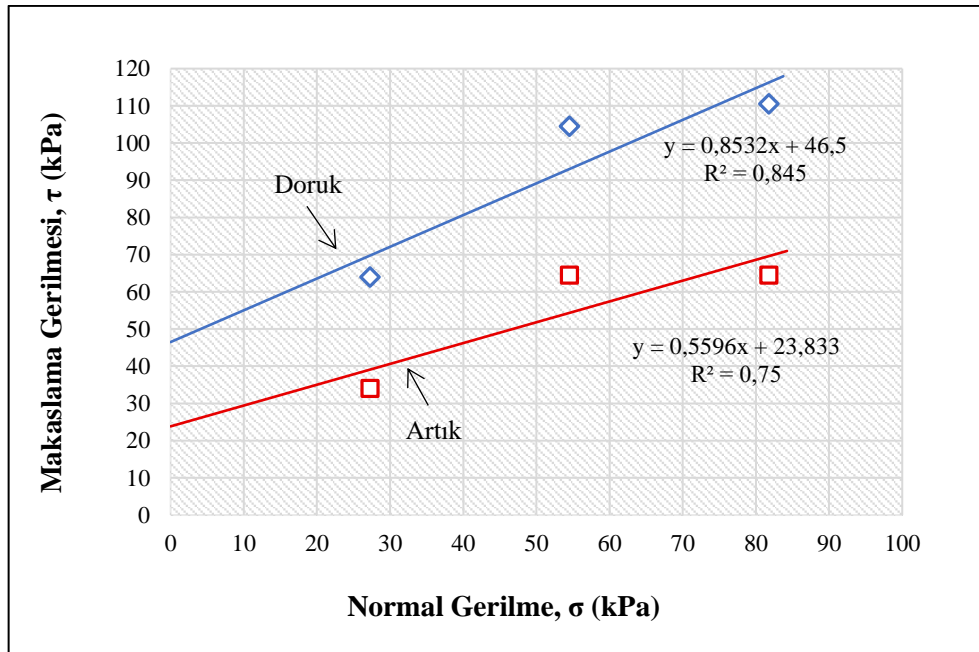


Şekil 4.14. Katkısız (%0) örneğe ait doruk ve artık makaslama için τ - σ grafiğinde yenilme zarfları.

%15 cam tozu katkılı toprak örneğine ait makaslama gerilmesi (τ) - makaslama yer değiştirmesi (δ) grafiği Şekil 4.15'te, doruk ve artık makaslama için yenilme zarfları Şekil 4.16'da sunulmuştur.



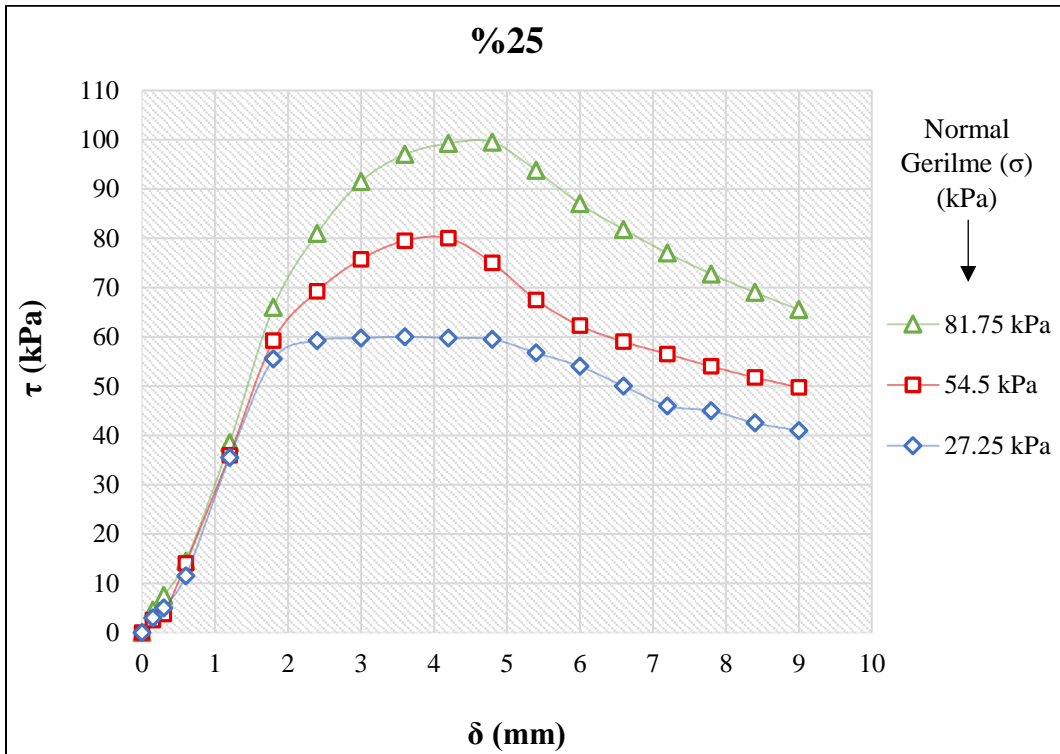
Şekil 4.15. %15 cam tozu katkılı örneğe ait makaslama gerilmesi (τ) - makaslama yer değiştirmesi (δ) grafiği.



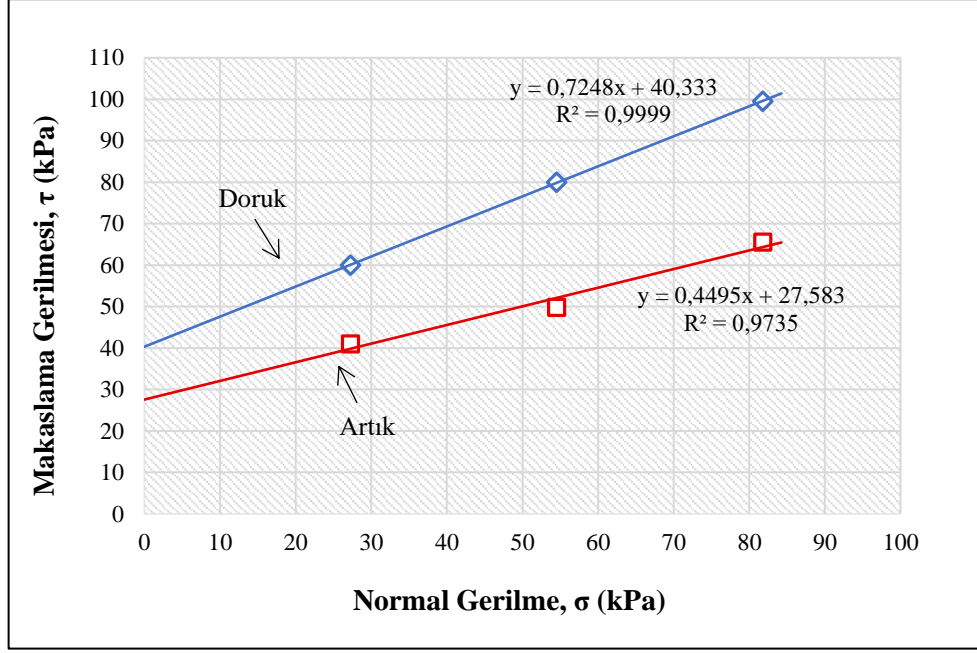
Şekil 4.16. %15 cam tozu katkılı örneğe ait doruk ve artık makaslama için τ - σ grafiğinde yenilme zarfları.

%15 cam tozu katkılı örneğine ait doğrusal yenilme zarfından doruk makaslama için kohezyon (c_p) değeri 46.5 kPa, içsel sürtünme açısı (ϕ_p) ise 40.5 derece olarak hesaplanmıştır. Artık makaslama için kohezyon (c_r) 24 kPa olarak bulunurken içsel sürtünme açısı (ϕ_r) ise 29.2 derece olarak belirlenmiştir (Şekil 4.16).

%25 cam tozu katkılı toprak örneğine ait makaslama gerilmesi (τ) - makaslama yer değiştirmesi (δ) grafiği Şekil 4.17’de, doruk ve artık makaslama için yenilme zarfları Şekil 4.18’de sunulmuştur. %25 cam tozu katkılı örneğine ait doğrusal yenilme zarfından doruk makaslama için kohezyon (c_p) değeri 40.5 kPa, içsel sürtünme açısı (ϕ_p) ise 35.9 derece olarak hesaplanmıştır. Artık makaslama için kohezyon (c_r) 27.9 kPa olarak bulunurken içsel sürtünme açısı (ϕ_r) ise 24.2 derece olarak belirlenmiştir (Şekil 4.18).



Şekil 4.17. %25 cam tozu katkılı örneğe ait makaslama gerilmesi (τ) – makaslama yer değiştirmesi (δ) grafiği.



Şekil 4.18. %25 cam tozu katkılı örneğe ait doruk ve artık makaslama için $\tau - \sigma$ grafiğinde yenilme zarfları.

Doğrudan makaslama deneyine ait toplu sonuçlar Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda toprağa eklenen %15 oranında cam tozu katkısının doruk makaslama için kohezyon değerinde önemli bir değişiklik oluşturmaksızın içsel sürtünme açısında 16.7 derecelik bir artış sağladığı tespit edilmiştir. Aynı katkı türünde artık makaslama için kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinde artış olduğu görülmüştür.

Zemine %25 oranında cam tozu katkısı eklemenin doruk makaslama için kohezyon değerinin düşmesine yol açtığı ancak, içsel sürtünme açısında 12.2 derecelik bir artış sağladığı gözlemlenmiştir. %25 cam tozu katkısı ile artık makaslama için kohezyon değerinde artış görülürken içsel sürtünme açısında ise düşüş olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.6. Doğrudan makaslama deneyi doruk makaslama parametreleri.

<i>Doruk Makaslama İçin Parametreler</i>		
<i>Örnek türü</i>	<i>Kohezyon (c_p) (kPa)</i>	<i>İçsel sürtünme açısı (ϕ_p)°</i>
Katkısız (%0)	46	23.8
%15 cam tozu katkılı	46.5	40.5
%25 cam tozu katkılı	40.5	35.9

Çizelge 4.7. Doğrudan makaslama deneyi artık makaslama parametreleri.

<i>Artık Makaslama İçin Parametreler</i>		
<i>Örnek türü</i>	<i>Kohezyon (c_r) (kPa)</i>	<i>İçsel sürtünme açısı (ϕ_r)°</i>
Katkısız (%0)	8	27.2
%15 cam tozu katkılı	24	29.2
%25 cam tozu katkılı	27.9	24.2

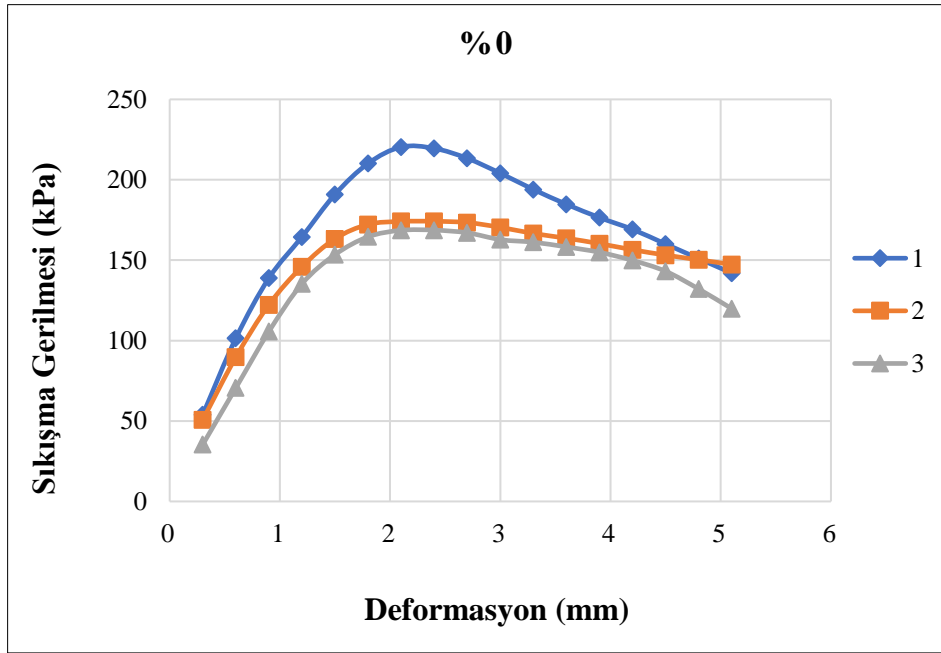
4.6. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı

Katkı malzemelerinin zeminin tek eksenli sıkışma dayanımına olan etkilerini değerlendirmek üzere her bir toprak türü için en az üç adet örnek üzerinde deney gerçekleştirilmiştir. Deney sonunda toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafikleri çizilerek dayanım değerleri tespit edilmiş olup yoğunluk ve su içeriği parametreleri de belirlenmiştir.

Katkısız (%0) toprak örneklerine ait deney sonrası görüntüleri Şekil 4.19'da, deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği Şekil 4.20'de, deney sonrası belirlenen parametreler ise Çizelge 4.8'de sunulmuştur.



Şekil 4.19. Katkısız (%0) toprak örneklerinin deney sonrası görüntüleri.



Şekil 4.20. Katkısız (%0) toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.

Deney sonunda katkısız (%0) toprak örneğinin tek eksenli sıkışma dayanımı değeri (UCS) 187.8 kPa olarak belirlenmiştir. Örneğe ait yoğunluk ve su içeriği değerleri sırasıyla; 1.8 g/cm³ ve %29.3 olarak hesaplanmıştır.

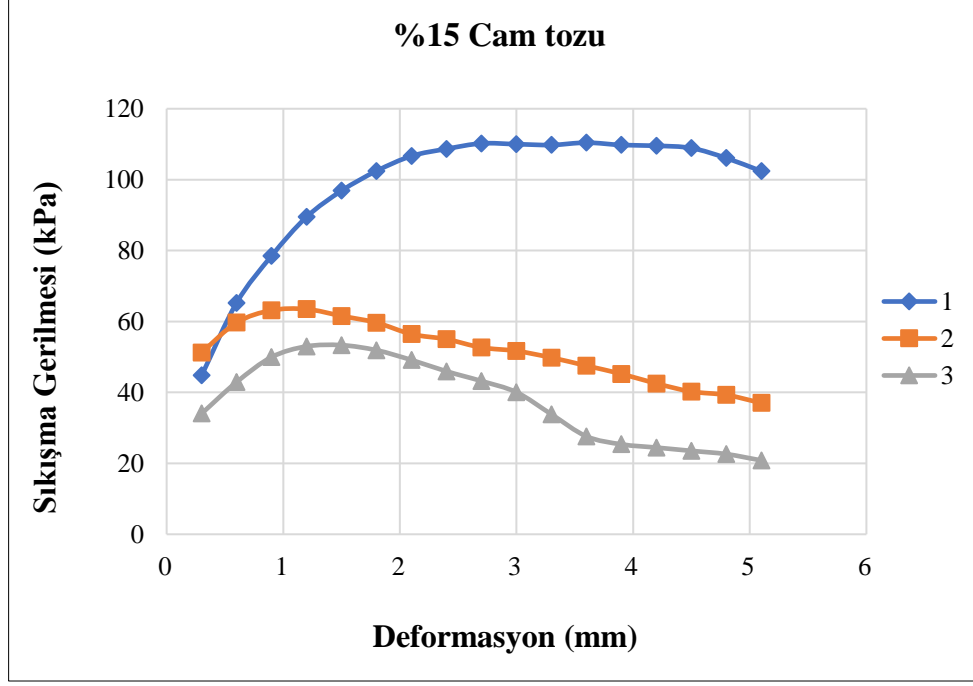
Çizelge 4.8. Katkısız toprak örneklerine ait tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi parametreleri.

<i>Katkısız (%0)</i>			
<i>Örnek no</i>	<i>Dayanım (UCS) (kPa)</i>	<i>Yoğunluk (g/cm³)</i>	<i>Su içeriği (%)</i>
1	220.4	1.8	29.4
2	174.2	1.7	29.3
3	168.7	1.8	29.3
<i>Ortalama</i>	<i>187.8</i>	<i>1.8</i>	<i>29.3</i>

%15 cam tozu katkılı toprak örneklerine ait deney sonrası görüntüler Şekil 4.21’de, deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği Şekil 4.22’de, deney sonrası belirlenen parametreler ise Çizelge 4.9’da sunulmuştur.



Şekil 4.21. %15 cam tozu katkılı toprak örneklerinin deney sonrası görüntüleri.



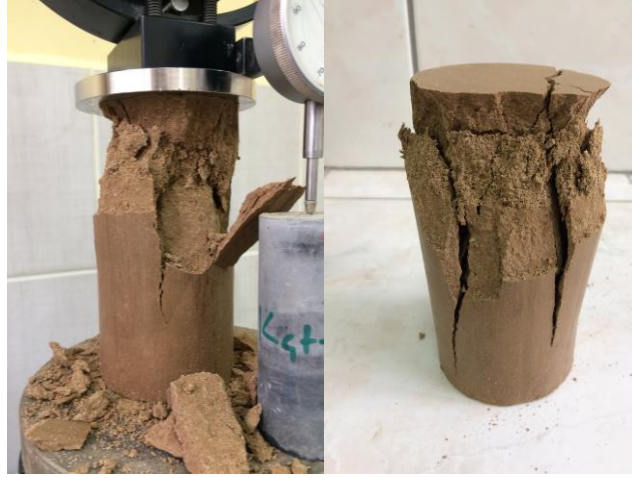
Şekil 4.22. %15 cam tozu katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.

Çizelge 4.9. %15 cam tozu katkılı toprak örneklerine ait tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi parametreleri.

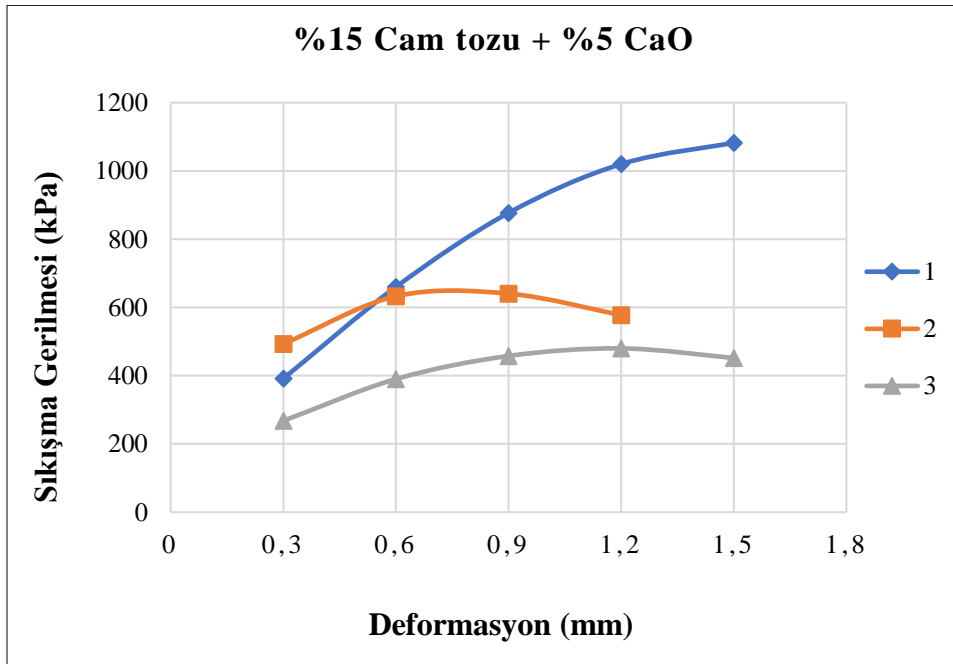
<i>%15 Cam tozu katkılı</i>			
<i>Örnek no</i>	<i>Dayanım (UCS) (kPa)</i>	<i>Yoğunluk (g/cm³)</i>	<i>Su içeriği (%)</i>
1	110.4	1.8	29.5
2	63.5	1.8	29.4
3	53.3	1.8	28.6
<i>Ortalama</i>	<i>75.7</i>	<i>1.8</i>	<i>29.2</i>

Deney sonunda %15 cam tozu katkılı toprak örneğinin tek eksenli sıkışma dayanımı değeri (UCS) 75.7 kPa olarak belirlenmiştir. Örneğe ait yoğunluk ve su içeriği değerleri sırasıyla; 1.8 g/cm³ ve %29.2 olarak hesaplanmıştır. Zemine eklenen %15 oranında cam tozu katkısının tek eksenli sıkışma dayanımını olumsuz yönde etkilediği gözlenmiştir.

%15 cam tozu + %5 CaO katkıli toprak örneklerine ait deney sonrası görüntüler Şekil 4.23'te, deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği Şekil 4.24'te, deney sonrası belirlenen parametreler ise Çizelge 4.10'da sunulmuştur.



Şekil 4.23. %15 cam tozu + %5 CaO katkıli toprak örneklerinin deney sonrası görüntüleri.



Şekil 4.24. %15 cam tozu + %5 CaO katkıli toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.

Çizelge 4.10. %15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneklerine ait tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi parametreleri.

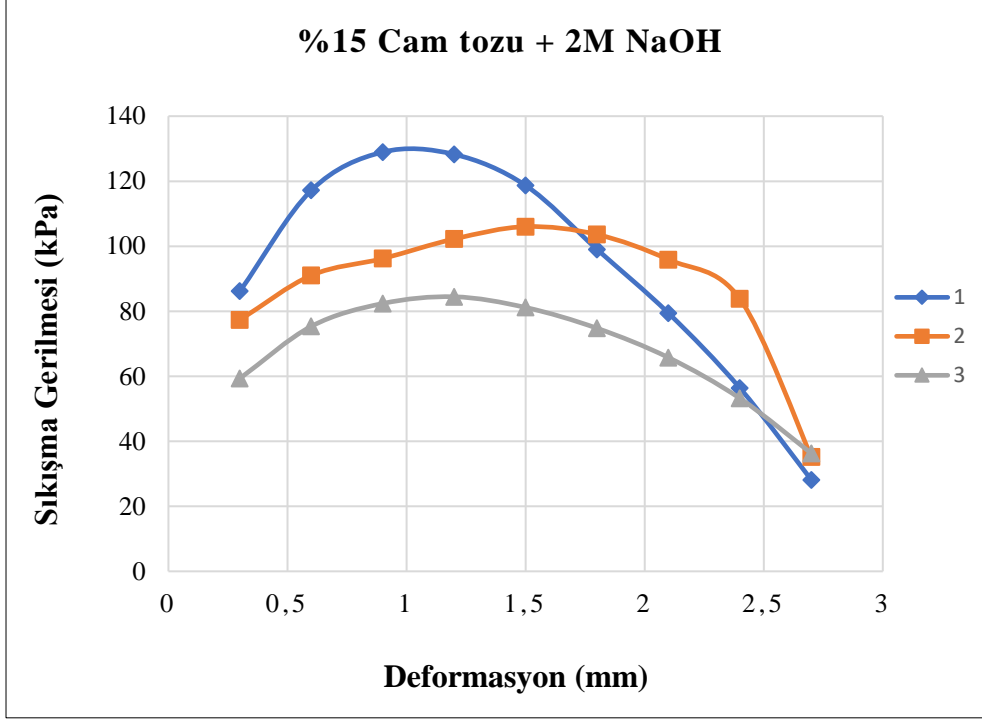
<i>%15 cam tozu + %5 CaO</i>			
<i>Örnek no</i>	<i>Dayanım (UCS) (kPa)</i>	<i>Yoğunluk (g/cm³)</i>	<i>Su içeriği (%)</i>
1	1081.9	1.8	31.9
2	640.5	1.8	29.6
3	479.9	1.8	29.6
<i>Ortalama</i>	<i>734.1</i>	<i>1.8</i>	<i>30.3</i>

Deney sonunda %15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneğinin tek eksenli sıkışma dayanımı değeri (UCS) 734.1 kPa olarak belirlenmiştir. Örneğe ait yoğunluk ve su içeriği değerleri sırasıyla; 1.8 g/cm³ ve %30.3 olarak hesaplanmıştır. Zeminin %15 cam tozu+%5 CaO katkısı ile stabilizasyonu sağlandığında tek eksenli sıkışma dayanımında önemli bir artış olduğu gözlemlenmiştir.

%15 cam tozu + 2M NaOH katkılı toprak örneklerine ait deney sonrası görüntüler Şekil 4.25’de, deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği Şekil 4.26’da, deney sonrası belirlenen parametreler ise Çizelge 4.11’de sunulmuştur.



Şekil 4.25. %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örneklerinin deney sonrası görüntüleri.



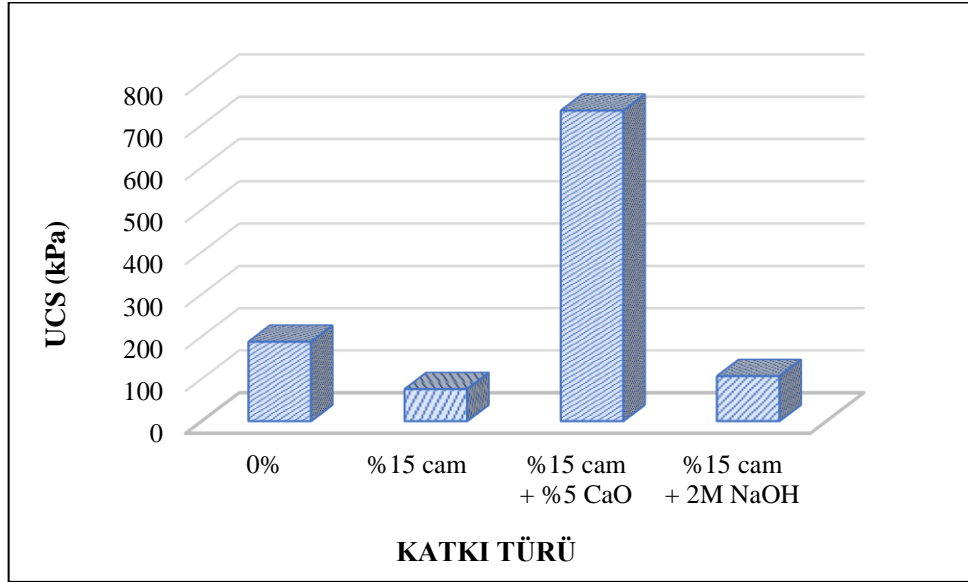
Şekil 4.26. %15 cam tozu + 2M NaOH katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.

Çizelge 4.11. %15 cam tozu + 2M NaOH katkılı toprak örneklerine ait tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi parametreleri.

%15 cam tozu + 2M NaOH			
Örnek no	Dayanım (UCS) (kPa)	Yoğunluk (g/cm³)	Su içeriği (%)
1	129	1.9	30.1
2	106	1.9	30.5
3	84.4	1.9	31.1
Ortalama	106.5	1.9	30.6

Deney sonunda %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örneğinin tek eksenli sıkışma dayanımı değeri (UCS) 106.5 kPa olarak belirlenmiştir. Örneğe ait yoğunluk ve su içeriği değerleri sırasıyla; 1.9 g/cm³ ve %30.6 olarak hesaplanmıştır. Zemine %15 cam tozu+2M NaOH katkısı eklemenin tek eksenli sıkışma dayanımını olumsuz yönde etkilediği gözlenmiştir.

Katkı türüne göre toprak örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımındaki değişimin grafiksel gösterimi Şekil 4.27’de sunulmuştur. Deney sonuçları değerlendirildiğinde %15 cam tozu ve %15 cam tozu+2M NaOH katkı türlerinde tek eksenli sıkışma dayanımlarının (UCS) sırasıyla % 59.7 ve % 43.3 oranında azaldığı belirlenmiştir. %15 cam tozu+%5 CaO ile stabilize edilen örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımında % 291 oranında artış olduğu kaydedilmiştir.



Şekil 4.27. Katkı türüne göre örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımındaki değişimin grafiksel gösterimi.

4.7. Islanma-Kuruma Deneyi

Deneye katkı malzemesi içermeyen toprak örnekleri ile başlanılmış ve örnekler ilk aşama olan ıslanma döngüsüne tabi tutulmuştur. Ancak, toprak örneklerinin suya bırakıldığı ilk 10 dk içerisinde üst kısımlardan parçalanmaya başladığı görülmüş ve 30 dk sonra örnekler tamamen dağılmıştır (Şekil 4.28, Şekil 4.29).



Şekil 4.28. İlk 10 dk içinde toprak örneklerinin üst kısımlarında başlayan dağılmalar.



Şekil 4.29. 30 dk sonra toprak örneklerinin su içinde yığılması.

Zemine uygulanan katkıli stabilizasyon işleminin ıslanma-kuruma çevrimi koşullarındaki etkisini test etmek amacıyla deneylere %15 cam tozu, %15 cam tozu+%5 CaO ve %15 cam tozu+2M NaOH katkıli toprak örnekleri ile devam edilmiştir. 14 gün kür koşullarında bekletilmiş toprak örnekleri ıslanma-kuruma döngülerine tabi tutulmuş ve döngüler esnasında duraylılığını kaybetmeyen örneklerin ağırlık, çap ve boy değerleri kaydedilmiştir.

%15 cam tozu katkıli toprak örneğinin 1. ıslanma-kuruma döngüsünün ilk aşamalarında suya bırakıldığı ilk 10 dk içerisinde üst kısımlardan parçalanmaya başladığı gözlenmiş ve yaklaşık 1 saat sonra örnekler tamamen dağılmıştır. Katkisiz toprak örneğinde olduğu gibi %15 cam tozu katkıli örnek de ıslanma döngüsü aşamasında yeterli düzeyde duraylılık gösterememiştir (Şekil 4.30).

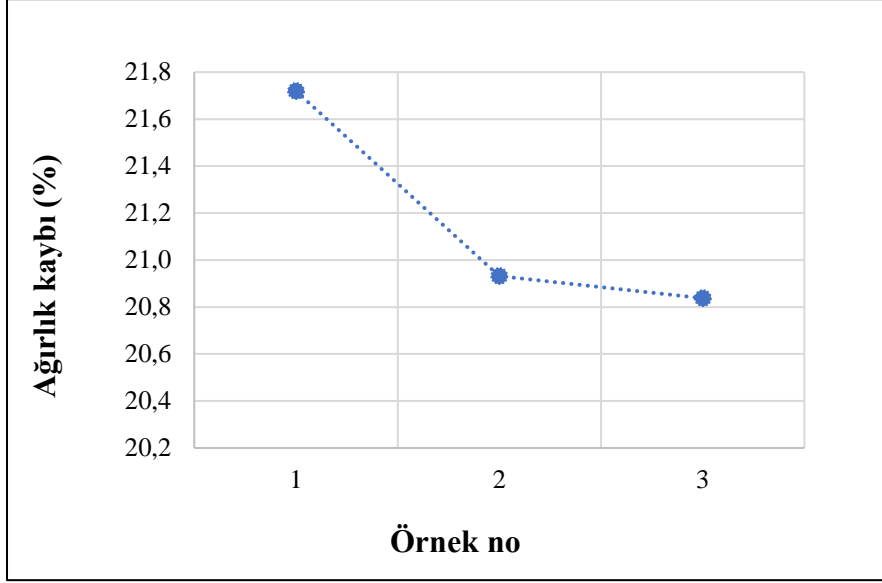


Şekil 4.30. %15 cam tozu katkılı örneklerin ıslanma döngüsü aşamasında dağılmaya başlaması.

%15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örnekleri de aynı şekilde döngülere tabi tutulmuş olup örneklerin 2. ıslanma-kuruma döngüsünün ilk aşamasında su içine bırakıldıktan 5 saat sonra parçalandığı görülmüştür (Şekil 4.33). Örnekler ıslanma-kuruma çevrimi koşullarında beklenen düzeyde duraylılık gösterememiştir. %15 cam tozu+2M NaOH katkılı örneklerin 1. ıslanma-kuruma döngüsü sonundaki görüntüsü Şekil 4.31’de, döngü sonunda oluşan ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi Şekil 4.32’de sunulmuştur.



Şekil 4.31. %15 cam tozu + 2M NaOH katkılı örneklerin 1. ıslanma-kuruma döngüsü sonundaki görüntüsü.



Şekil 4.32. %15 cam tozu + 2M NaOH katkılı toprak örneklerinde 1. ıslanma-kuruma döngüsü sonunda oluşan ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi.

%15 cam tozu+2M NaOH ile stabilize edilen zeminin 1. ıslanma-kuruma döngüsünden sonra oluşan ağırlık kaybı %21,2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.33. %15 cam tozu+2M NaOH katkılı örneklerin 2. döngü ıslanma aşaması ve sudan çıkarıldığında oluşan parçalanmalar.

%15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneklerinde 1. döngüden sonra çatlak oluşumları görülmüş (Şekil 4.34). 2. ıslanma-kuruma döngüsü aşamasında 5 saat sonunda sudan çıkarılırken örneklerden birinin üst kısımdan parçalandığı görülmüştür (Şekil 4.35). Benzer bir durumla karşılaşmamak için diğer iki örnekte 2. ıslanma-kuruma döngüsü tamamlanarak deney sonlandırılmıştır.



Şekil 4.34. %15 cam tozu+%5 CaO katkıli örneklerin 1. İslanma-kuruma döngüsü sonundaki görüntüsü.



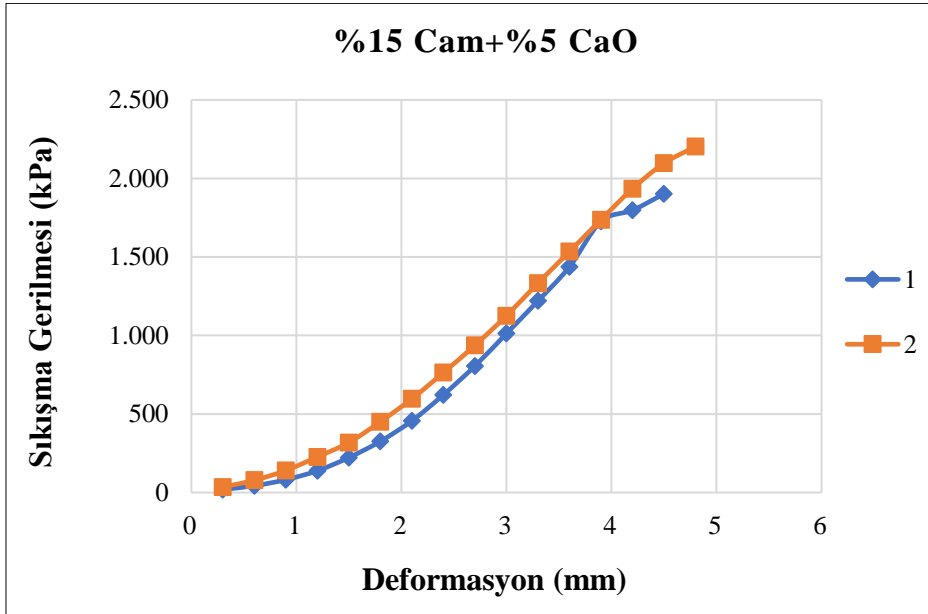
Şekil 4.35. %15 cam tozu+%5 CaO katkıli örnekler 2. İslanma-kuruma döngüsü aşamasında sudan çıkarıldığında.

2 ıslanma-kuruma döngüsü sonunda duraylılığını koruyan %15 cam tozu+%5 CaO katkıli toprak örneklerinin ağırlık kaybı ve tek eksenli sıkışma dayanımları belirlenmiştir. Örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımları belirlenirken 4.5 kN'luk yük halkası kullanılmış ve yükleme hızı olarak 0.5 mm/dk uygulanmıştır (Şekil 4.36). Deney sonrası kırılan örneklerden parçalar alınarak nem içeriğindeki değişim belirlenmiştir.



Şekil 4.36. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonrası kırılan örneklerin görüntüsü.

Islanma-kuruma döngüsü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımı deneyine tabi tutulan %15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği Şekil 4.37’de, deney sonrası belirlenen parametreler ise Çizelge 4.12’de sunulmuştur.

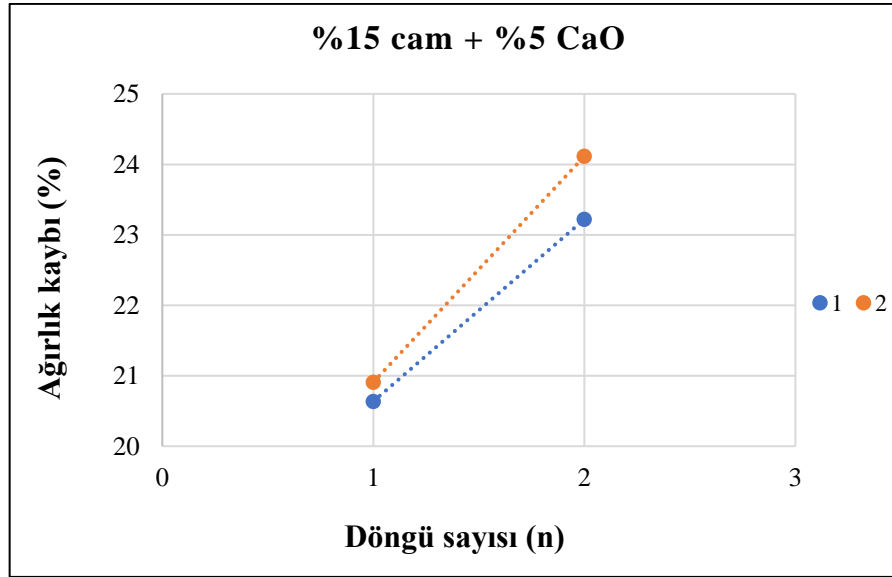


Şekil 4.37. Islanma-kuruma sonrası %15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.

Çizelge 4.12. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonrası %15 cam tozu+%5 CaO katkıli toprak örneklerine ait parametreler.

%15 cam tozu + %5 CaO katkıli			
Örnek no	Dayanım (UCS) (kPa)	Yoğunluk (g/cm³)	Su içeriği (%)
1	1901.65	1.52	2.13
2	2203.06	1.51	2.38
Ortalama	2052.36	1.52	2.26

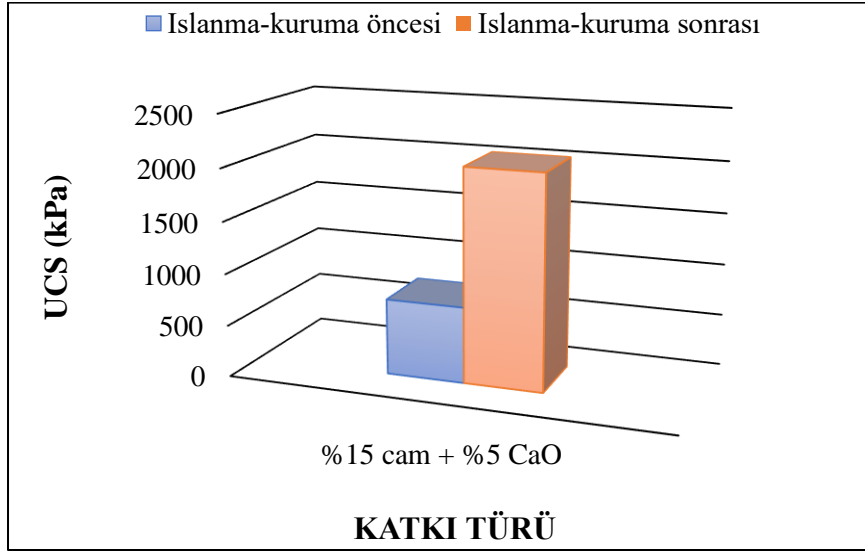
2 ıslanma-kuruma döngüsü sonunda %15 cam tozu+%5 CaO katkıli toprak örneğinin tek eksenli sıkışma dayanımı değeri (UCS) 2052.4 kPa olarak belirlenmiştir. Deney sonunda örneğe ait yoğunluk ve su içeriği değerleri sırasıyla; 1.5 g/cm³ ve %2.3 olarak hesaplanmıştır. İki ıslanma-kuruma döngüsü sonunda %15 cam tozu+%5 CaO katkıli toprak örneklerinde meydana gelen ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi Şekil 4.38’de sunulmuştur.



Şekil 4.38. %15 cam tozu + %5 CaO katkıli toprak örneklerinde ıslanma-kuruma döngülerine bağlı ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi.

Döngü sayısı-ağırlık kaybı grafiği incelendiğinde %15 cam tozu+%5 CaO katkıli toprak örnekleri için 2 ıslanma-kuruma sonunda oluşan ağırlık kaybı %23.7 olarak belirlenmiştir. %15 cam tozu+%5 CaO katkıli örneğin 2 ıslanma-kuruma döngüsü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımının başlangıç değerine göre değişimi Şekil 4.39’da

sunulmuştur. Islanma-kuruma döngüleri sonunda örneğin dayanımında % 179.6 oranında artış olduğu belirlenmiştir.

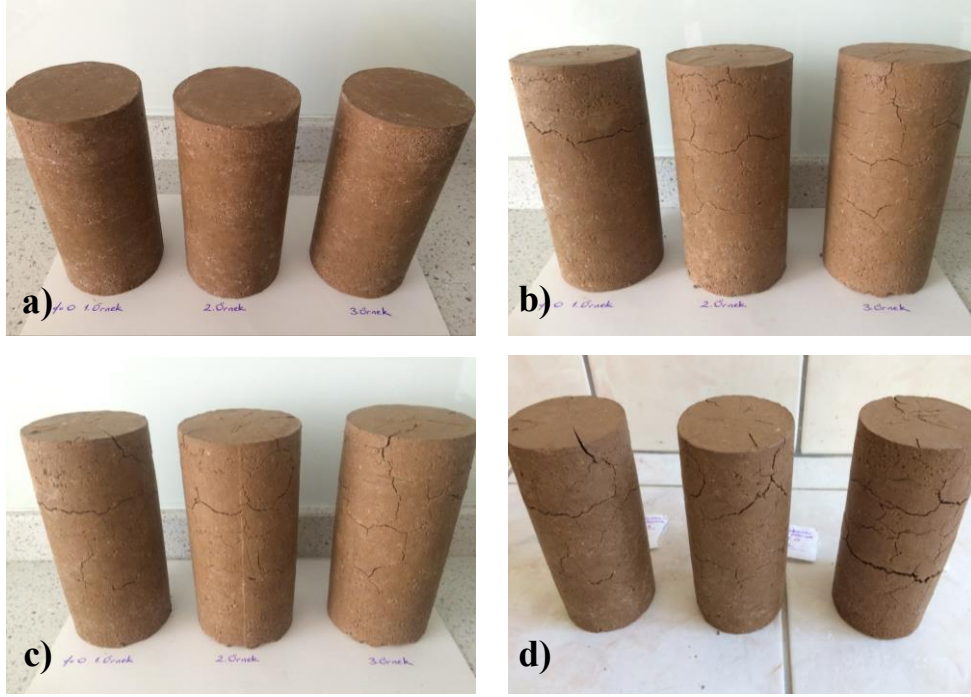


Şekil 4.39. %15 cam tozu +%5 CaO katkılı örneğin 2 ıslanma-kuruma döngüsü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımının başlangıç değerine göre değişimi.

4.8. Donma-Çözülme Deneyi

Döngüler ilk olarak katkısız (%0) toprak örneklerinde uygulanmıştır. Katkı malzemesi içermeyen toprak örneklerinde 3 donma-çözülme döngüsü şeklinde ilerleme sağlanabilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla katkı malzemesi içeren toprak örneklerinde de 3 donma-çözülme döngüsü olacak şekilde devam edilmiştir. Döngülerin sonunda toprak örneklerinin ağırlık kaybı ve tek eksenli sıkışma dayanımları belirlenmiştir. Örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımları belirlenirken 4.5 kN'luk yük halkası kullanılmış ve yükleme hızı olarak 0.5 mm/dk uygulanmıştır. Deney sonrası kırılan örneklerden parçalar alınarak su içerikleri belirlenmiştir.

Donma-çözülme döngüleri ile birlikte örneklerin yüzeyinde çatlakların gelişmiş ve döngüler ilerledikçe çatlakların yoğunluğu artmıştır. Katkı malzemesi içermeyen toprak örneklerinin donma-çözülme deneyi öncesi ve her bir döngü sonunda çekilen fotoğrafları Şekil 4.40'da sunulmuştur. Katkısız toprak örneklerinin 3. döngü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımı belirlenirken çekilen fotoğraflara Şekil 4.41'de yer verilmiştir.

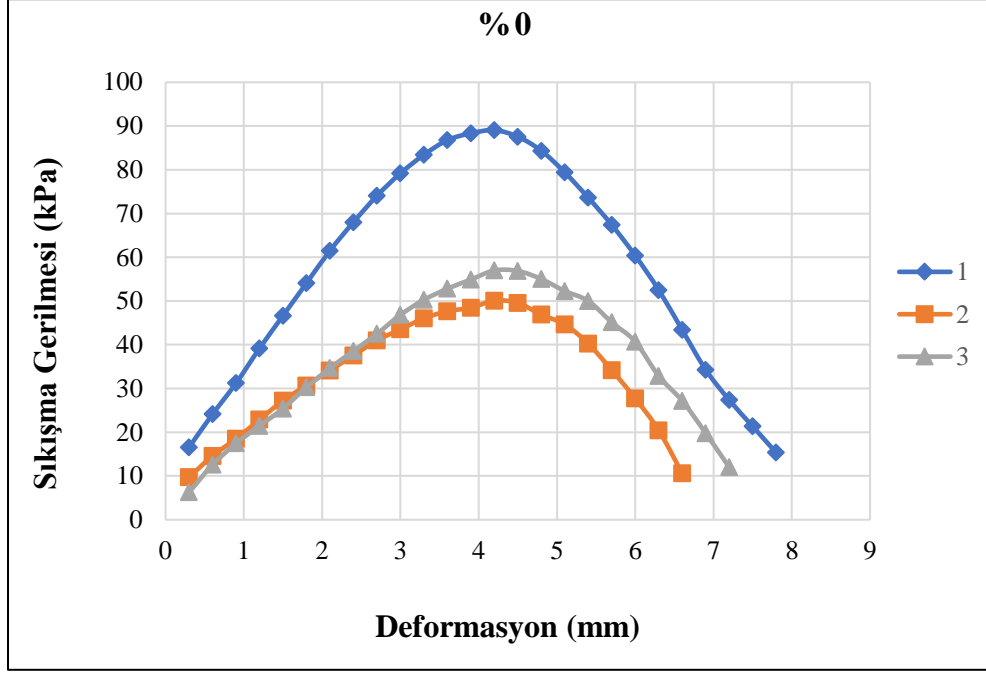


Şekil 4.40. Katkısız (%0) toprak örneklerinin a) deney öncesi, b) 1. döngü, c) 2. döngü, d) 3. döngü sonundaki görünümü.



Şekil 4.41. Katkısız (%0) toprak örneklerinin deney sonundaki görüntüleri.

Donma-çözülme döngüsü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımı deneyine tabi tutulan katkısız (%0) toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği Şekil 4.42’de, deney sonrası belirlenen parametreler ise Çizelge 4.13’te sunulmuştur.

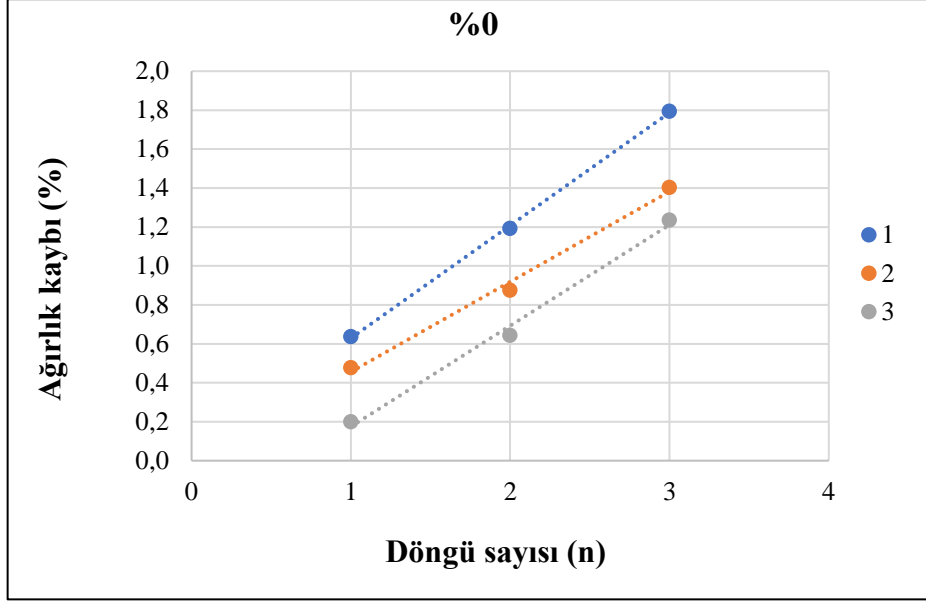


Şekil 4.42. Donma-çözülme sonrası katkısız (%0) toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.

Çizelge 4.13. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonrası katkısız toprak örneklerine ait parametreler.

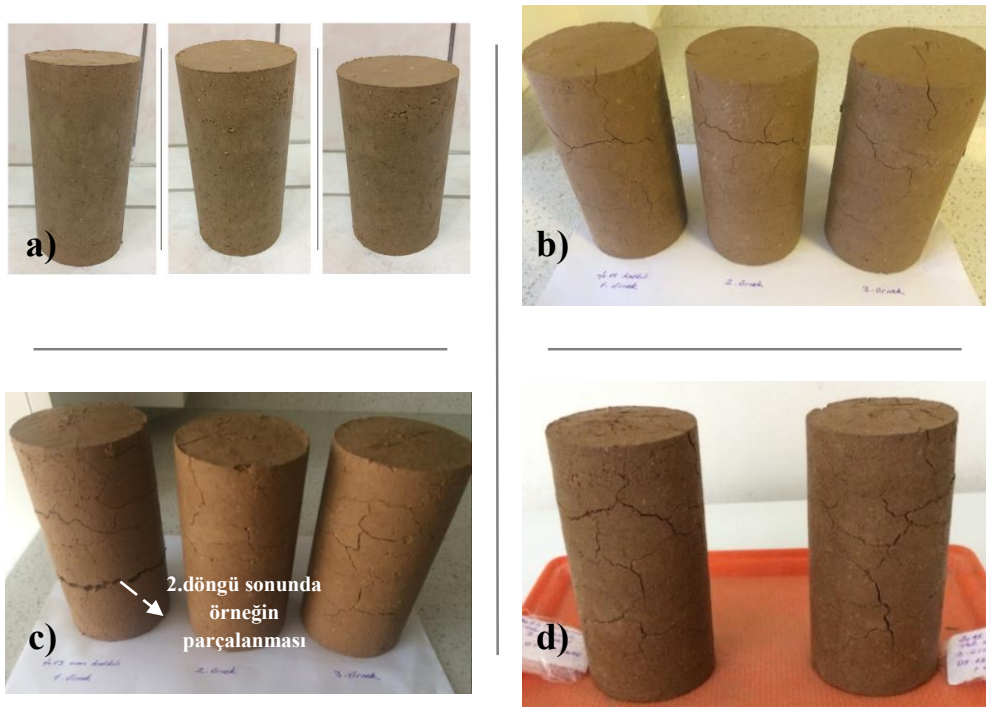
<i>Katkısız (%0)</i>			
<i>Örnek no</i>	<i>Dayanım (UCS) (kPa)</i>	<i>Yoğunluk (g/cm³)</i>	<i>Su içeriği (%)</i>
1	89	1.7	28.2
2	50.1	1.7	30
3	57	1.7	29.1
<i>Ortalama</i>	<i>65.4</i>	<i>1.7</i>	<i>29.1</i>

3 donma-çözülme döngüsü sonunda katkısız toprak örneğinin tek eksenli sıkışma dayanımı değeri (UCS) 65.4 kPa olarak belirlenmiştir. Deney sonunda örneğe ait yoğunluk ve su içeriği değerleri sırasıyla; 1.7 g/cm³ ve %29.1 olarak hesaplanmıştır. Donma-çözülme döngüleri sonunda katkısız (%0) toprak örneklerinde meydana gelen ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi Şekil 4.43'te sunulmuştur. 3 donma-çözülme döngüsü sonunda katkısız toprak örneğinde gelişen ağırlık kaybı ortalama %1.5 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.43. Katkısız (%0) toprak örneklerinde donma-çözülme döngülerine bağlı ağırlık kayıpları.

%15 cam tozu katkıli toprak örneklerinin donma-çözülme deneyi öncesi ve her bir döngü sonunda çekilen fotoğrafları Şekil 4.44'de sunulmuştur.



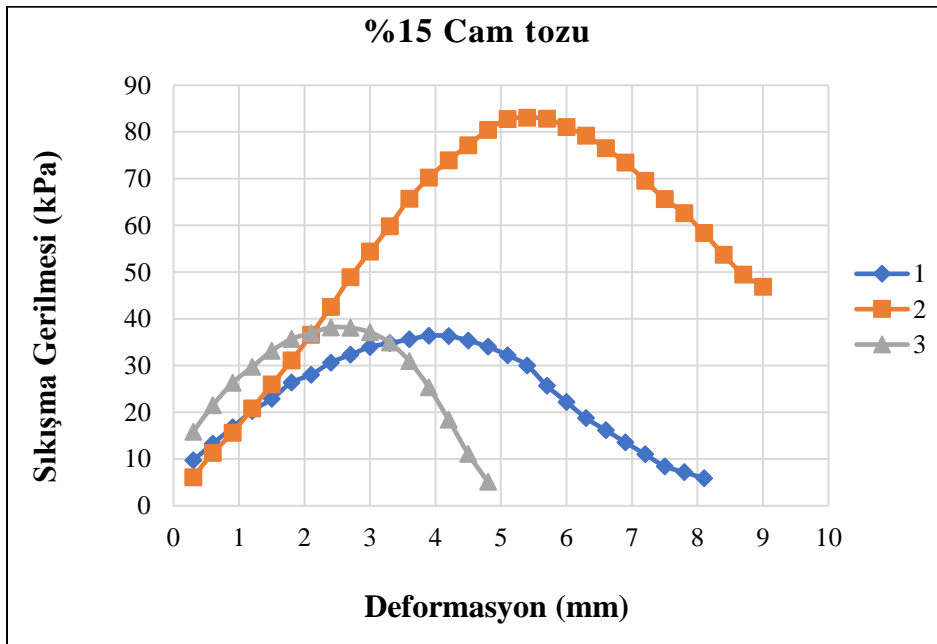
Şekil 4.44. %15 cam tozu katkıli toprak örneklerinin a) deney öncesi, b) 1. döngü, c) 2. döngü, d) 3. döngü sonundaki görünümü.

2.donma-çözülme döngüsü sonunda %15 cam tozu katkılı 1. toprak örneğinde parçalanma ve ayrılmaların başladığı görülmüştür (Şekil 4.44 (c)). 1. Örnek yerine tekrar hazırlık yapılarak deney telafi edilmiştir. %15 cam tozu katkılı toprak örneklerinin 3. döngü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımı belirlenirken çekilen fotoğraflara Şekil 4.45'te yer verilmiştir.



Şekil 4.45. 15 cam tozu katkılı toprak örneklerinin deney sonundaki görüntüleri.

Donma-çözülme döngüsü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımı deneyine tabi tutulan %15 cam tozu katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği Şekil 4.46'da, deney sonrası belirlenen parametreler ise Çizelge 4.14'te sunulmuştur.

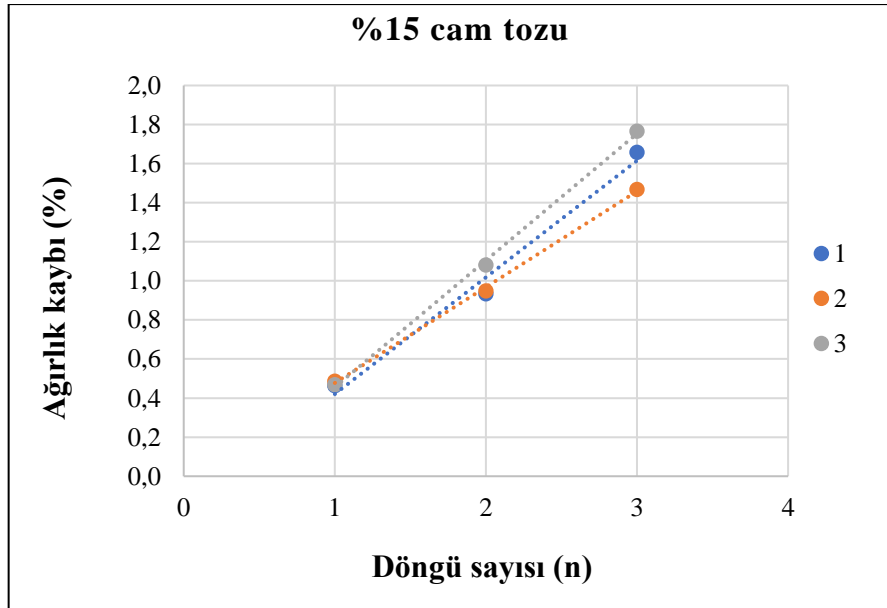


Şekil 4.46. Donma-çözülme sonrası %15 cam tozu katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.

Çizelge 4.14. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonrası %15 cam tozu katkılı toprak örneklerine ait parametreler.

%15 Cam tozu katkılı			
Örnek no	Dayanım (UCS) (kPa)	Yoğunluk (g/cm³)	Su içeriği (%)
1	36.4	1.8	30.1
2	83	1.8	28.8
3	38.2	1.8	28.2
Ortalama	52.5	1.8	29

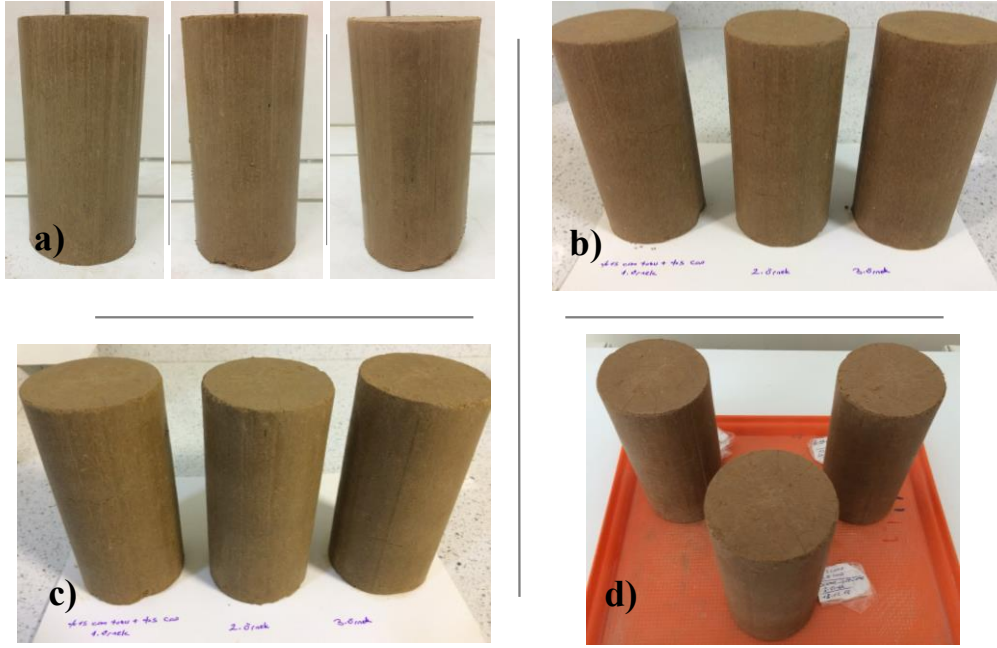
3 donma-çözülme döngüsü sonunda %15 cam tozu katkılı toprak örneğinin tek eksenli sıkışma dayanımı değeri (UCS) 52.5 kPa olarak belirlenmiştir. Deney sonunda örneğe ait yoğunluk ve su içeriği değerleri sırasıyla; 1.8 g/cm³ ve %29 olarak hesaplanmıştır. Donma-çözülme döngüleri sonunda %15 cam tozu katkılı toprak örneklerinde meydana gelen ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi Şekil 4.47’de sunulmuştur.



Şekil 4.47. %15 cam tozu katkılı toprak örneklerinde donma-çözülme döngülerine bağlı ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi.

3 donma-çözülme döngüsü sonunda %15 cam tozu katkılı toprak örneğinde gelişen ağırlık kaybı ortalama %1.6 olarak hesaplanmıştır.

%15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneklerinin donma-çözülme deneyi öncesi ve her bir döngü sonunda çekilen fotoğrafları Şekil 4.48’de sunulmuştur.



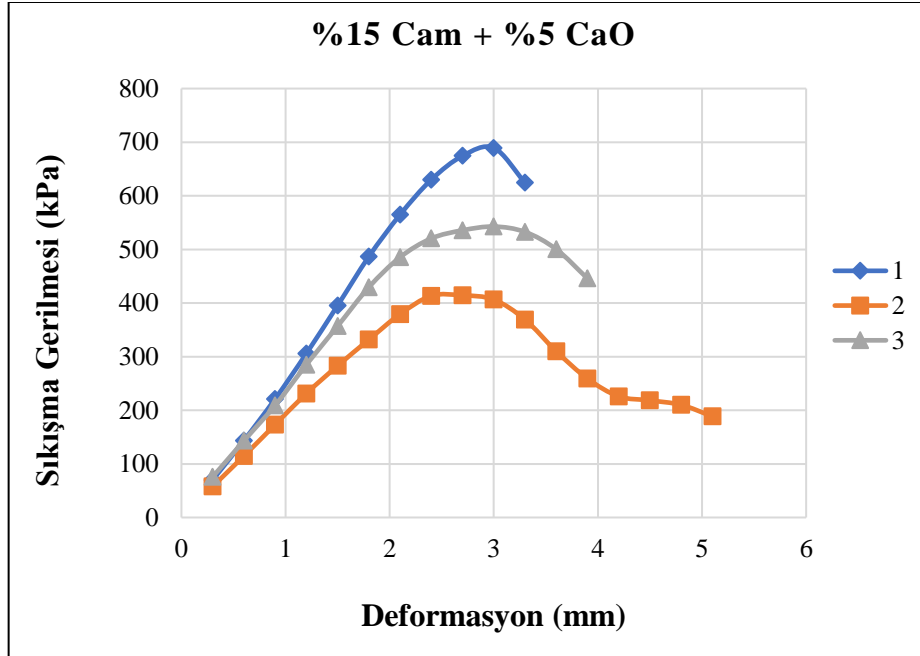
Şekil 4.48. %15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprak örneklerinin a) deney öncesi, b) 1. döngü, c) 2. döngü, d) 3. döngü sonundaki görünümü.

%15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneklerinin 3. döngü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımı belirlenirken çekilen fotoğraflara Şekil 4.49’da yer verilmiştir.



Şekil 4.49. %15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprak örneklerinin deney sonundaki görüntüleri.

Donma-çözülme döngüsü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımı deneyine tabi tutulan %15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği Şekil 4.50’de, deney sonrası belirlenen parametreler ise Çizelge 4.15’te sunulmuştur.



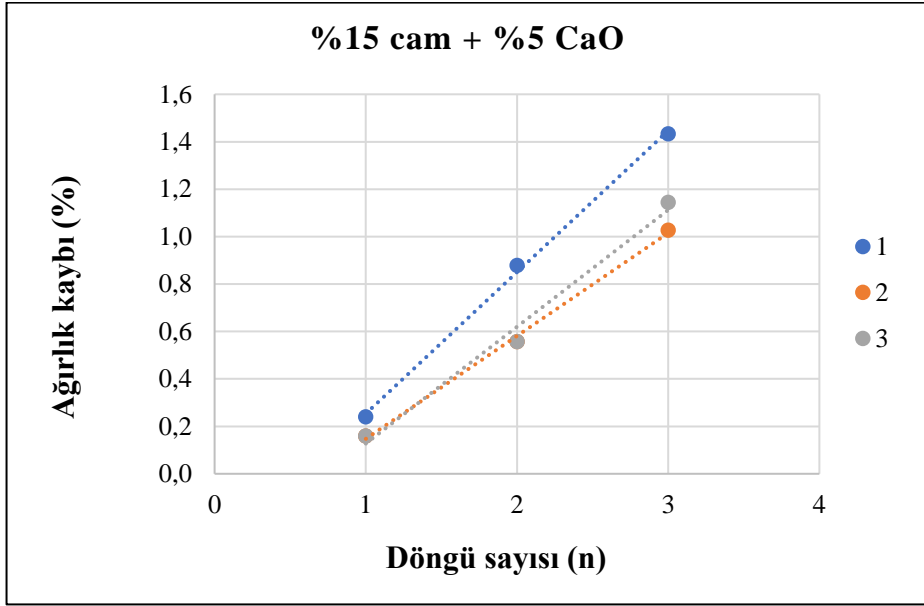
Şekil 4.50. Donma-çözülme sonrası %15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.

Çizelge 4.15. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonrası %15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprak örneklerine ait parametreler.

<i>%15 cam tozu + %5 CaO katkılı</i>			
<i>Örnek no</i>	<i>Dayanım (UCS) (kPa)</i>	<i>Yoğunluk (g/cm³)</i>	<i>Su içeriği (%)</i>
1	689.2	1.8	29.3
2	414.4	1.8	30.4
3	542.6	1.8	29.3
Ortalama	548.7	1.8	29.7

3 donma-çözülme döngüsü sonunda %15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneğinin tek eksenli sıkışma dayanımı değeri (UCS) 548.7 kPa olarak belirlenmiştir. Deney sonunda örneğe ait yoğunluk ve su içeriği değerleri sırasıyla; 1.8 g/cm³ ve %29.7 olarak hesaplanmıştır.

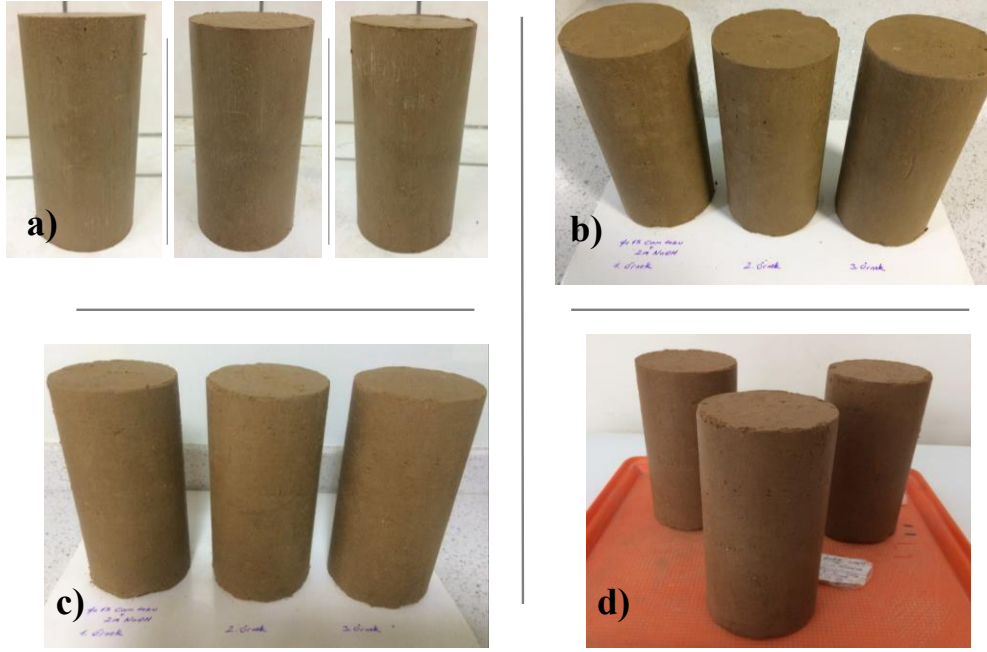
Donma-çözülme döngüleri sonunda %15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneklerinde meydana gelen ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi Şekil 4.51’de sunulmuştur.



Şekil 4.51. %15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneklerinde donma-çözülme döngülerine bağlı ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi.

3 donma-çözülme döngüsü sonunda %15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneğinde gelişen ağırlık kaybı ortalama %1.2 olarak hesaplanmıştır.

%15 cam tozu + 2M NaOH katkılı toprak örneklerinin donma-çözülme deneyi öncesi ve her bir döngü sonunda çekilen fotoğrafları Şekil 4.52’de sunulmuştur. %15 cam tozu+ 2M NaOH katkılı toprak örneklerinin 3. döngü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımı belirlenirken çekilen fotoğraflara ise Şekil 4.53’te yer verilmiştir.

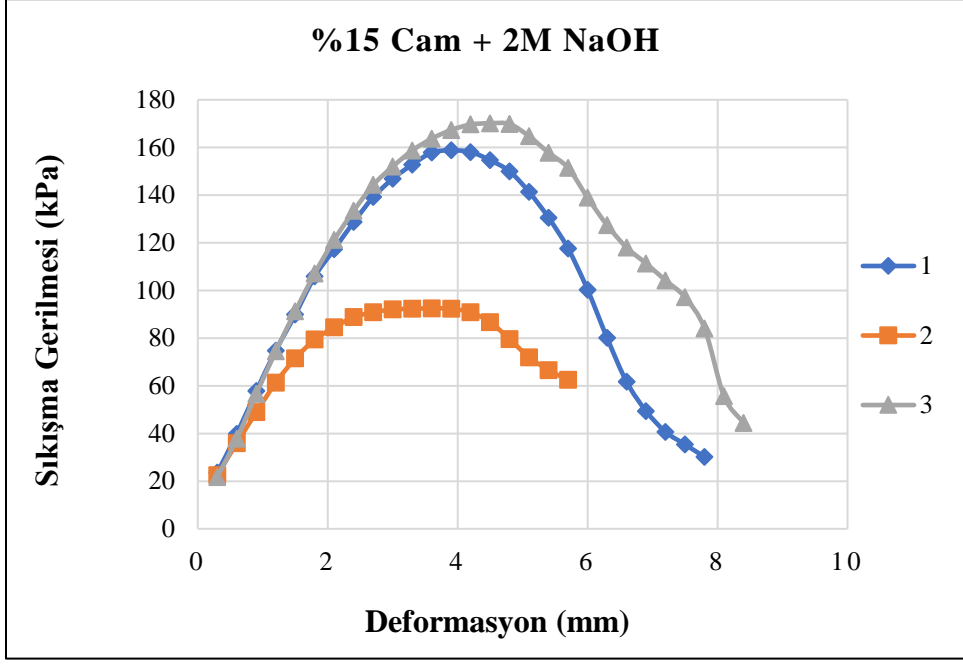


Şekil 4.52. %15 cam tozu + 2M NaOH katkılı toprak örneklerinin a) deney öncesi, b) 1. döngü, c) 2. döngü, d) 3. döngü sonundaki görünümü.



Şekil 4.53. %15 cam tozu + 2M NaOH katkılı toprak örneklerinin deney sonundaki görüntüleri.

Donma-çözülme döngüsü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımı deneyine tabi tutulan %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği Şekil 4.54'te, deney sonrası belirlenen parametreler ise Çizelge 4.16'da sunulmuştur.

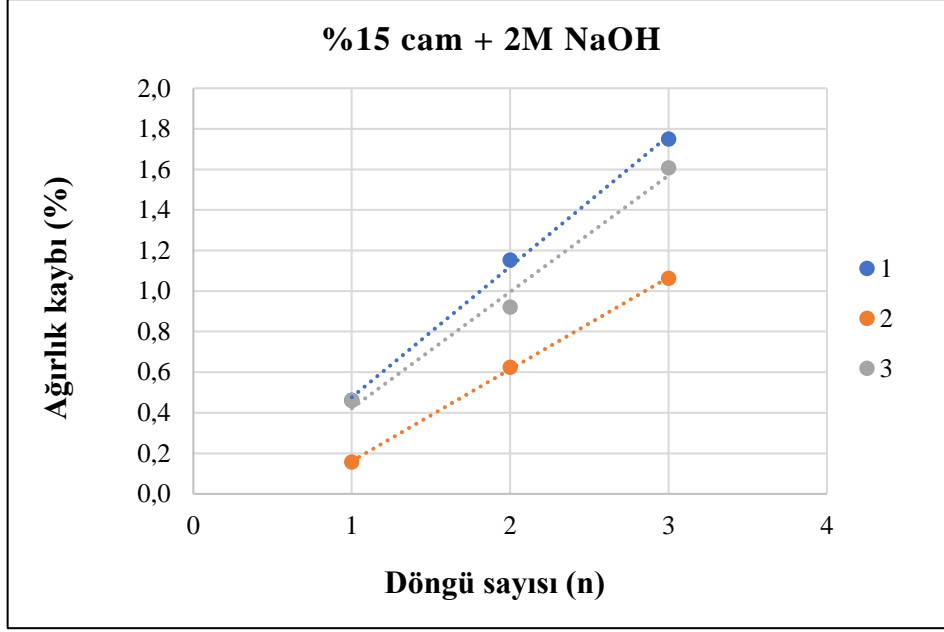


Şekil 4.54. Donma-çözülme sonrası %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örneklerine ait deformasyon-sıkışma gerilmesi grafiği.

Çizelge 4.16. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonrası %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örneklerine ait parametreler.

%15 cam tozu + 2M NaOH katkılı			
Örnek no	Dayanım (UCS) (kPa)	Yoğunluk (g/cm³)	Su içeriği (%)
1	158.8	1.9	29.9
2	92.5	1.8	30.6
3	170.2	1.8	29.6
Ortalama	140.5	1.8	30

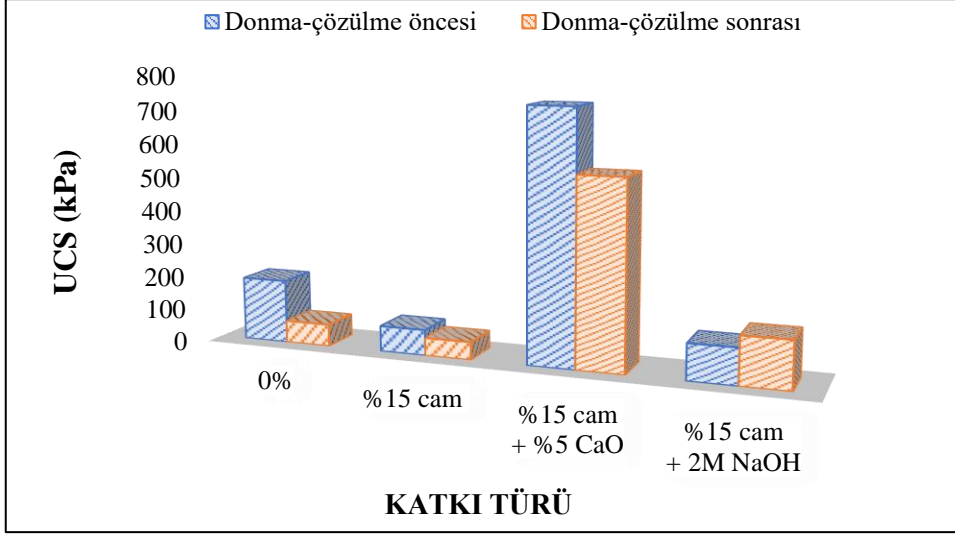
3 donma-çözülme döngüsü sonunda %15 cam tozu + 2M NaOH katkılı toprak örneğinin tek eksenli sıkışma dayanımı değeri (UCS) 140.5 kPa olarak belirlenmiştir. Deney sonunda örneğe ait yoğunluk ve su içeriği değerleri sırasıyla; 1.8 g/cm³ ve %30 olarak hesaplanmıştır. Donma-çözülme döngüleri sonunda %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örneklerinde meydana gelen ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi Şekil 4.55'te sunulmuştur. 3 donma-çözülme döngüsü sonunda %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örneğinde gelişen ağırlık kaybı ortalama %1.5 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.55. %15 cam tozu+ 2M NaOH katkılı toprak örneklerinde donma-çözülme döngülerine bağlı ağırlık kayıplarının grafiksel gösterimi.

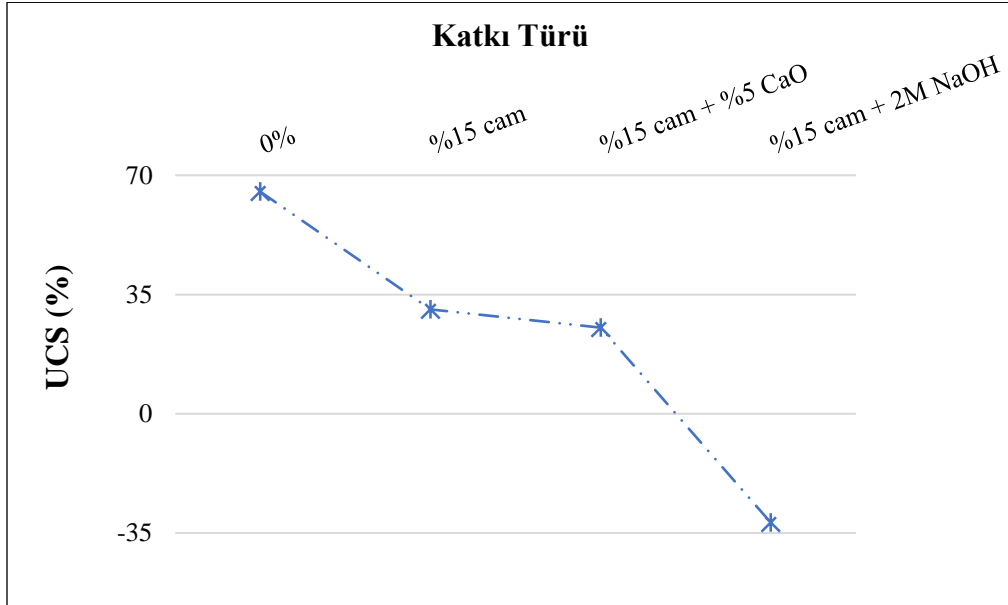
Döngü sayısı-ağırlık kaybı grafikleri incelendiğinde örneklere ait ağırlık kaybı değerlerinin donma-çözülme döngüsünün ilerlemesiyle birlikte arttığı belirlenmiştir. Donma-çözülmenin 3. döngüsü sonrası örneklerin ağırlık kaybı değerlerindeki en yüksek değişim % 1.6 ile %15 cam tozu katkılı örnekte görülürken en düşük değişim ise % 1.2 oranında %15 cam tozu + %5 CaO katkılı örnekte olmuştur.

Numunelerin donma-çözülme döngüleri sonunda tek eksenli sıkışma dayanımlarının başlangıç değerlerine göre değişimi Şekil 4.56'daki grafikte sunulmuştur. 3 donma-çözülme döngüsü sonrası en düşük tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) değeri 52.5 kPa ile %15 cam tozu katkılı örnekte, en yüksek dayanım değeri ise 548.7 kPa ile %15 cam tozu + %5 CaO katkılı örnekte elde edilmiştir.



Şekil 4.56. Toprak örneklerinin donma-çözülme döngüleri sonunda tek eksenli sıkışma dayanımlarının başlangıç değerlerine göre değişimi.

Donma-çözülme döngüleri sonunda toprak örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri genellikle azalma eğilimindedir. Şekil 4.57'deki grafik yardımıyla başlangıç değerlerine göre tek eksenli sıkışma dayanımındaki en yüksek yüzdesel değişimin %65.2 ile katkısız örnekte, en düşük değişimin ise %25.2 ile %15 cam tozu + %5 CaO katkılı örnekte olduğu belirlenmiştir. Diğer örneklerin aksine %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örneğinin donma-çözülme döngüsü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımında başlangıç değerine göre %32 oranında artış olduğu saptanmıştır.



Şekil 4.57. Donma-çözülme döngüleri sonunda örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımlarındaki azalmanın yüzdesel değişimi.

4.9. XRD Analizleri

Stabilizasyon işleminin öncesi ve sonrasındaki mineralojik bileşiminin belirlenmesi amacıyla katkısız toprak ve katkı malzemesi ile stabilize edilen örneklerin XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

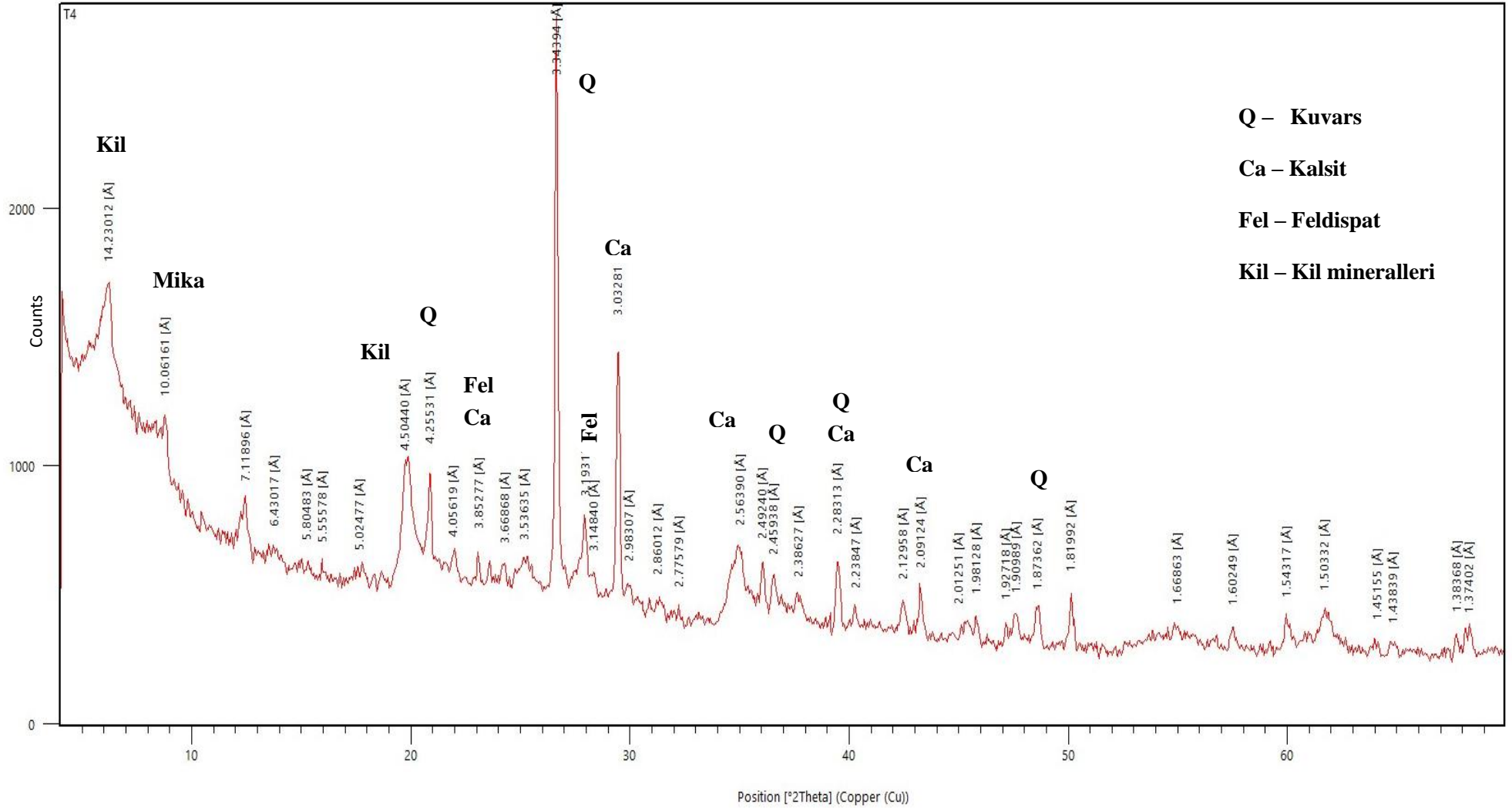
Katkısız toprakta yapılan tüm kayaç analizinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.58’de verilmiş olup toprakta başlıca kil mineralleri, mika, kuvars, kalsit ve feldispat minerallerinin varlığı tespit edilmiştir. Katkısız toprak örneğine ait kil fraksiyonu incelendiğinde toprağın önemli bir kısmını simektit mineralinin oluşturduğu ve beraberinde illit, klorit, ve kaolinit minerallerinin de bulunduğu saptanmıştır (Şekil 4.59–4.62). Toprakta bulunan kil minerallerinin dağılımı Çizelge 4.17’de verilmiştir.

Katkısız toprak örneğinin kil fraksiyonu sonucunda klorit minerali normal, etilen glikollü, 350-550 °C ısı çekimlerinde sırasıyla 14.47622 A°, 14.66880 A°, 14.40002 A° ve 14.33427 A°’daki pikleri ile tanımlanmıştır. İllit minerali normal çekimde 10.11126 A°, etilen glikolde 10.15947 A°, 350 °C’de 10.10984 A° ve 550 °C’de 10.08597 A°’da pik vermiştir. Kaolinit mineralinin pikleri normal çekimde 7.19714 A°’da, etilen glikollü çekimde ise 7.22965 A°’da gözlemlenmiştir. Ayrıca 550 °C’de kaolinite ait piklerin yıkıldığı görülmektedir (Şekil 4.62). Detay kil çekimlerinde 3.58 A°’da gözlenen pik kaoliniti karakterize eden bir diğer unsurdur. Etilen glikollü çekimlerde 17.37201 A°’luk pik toprak içerisinde simektit mineralinin bulunduğu işaret etmektedir (Şekil 4.60).

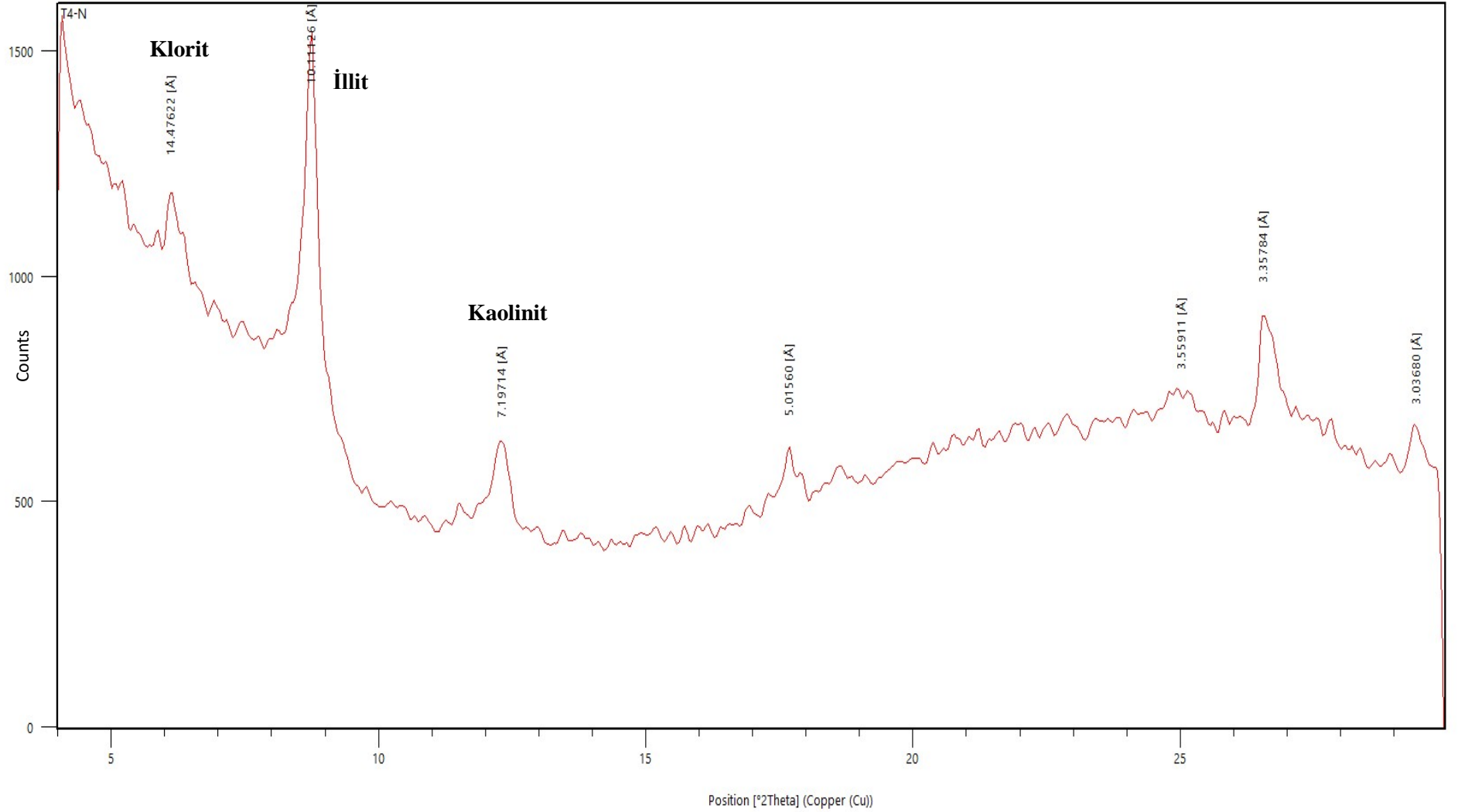
Çizelge 4.17. Stabilize edilmemiş toprakta bulunan kil mineralleri.

<i>Kil minerali türü</i>	<i>Miktar (%)</i>
Kaolinit	8.5
Klorit	10.2
İllit	35.6
Simektit	45.8

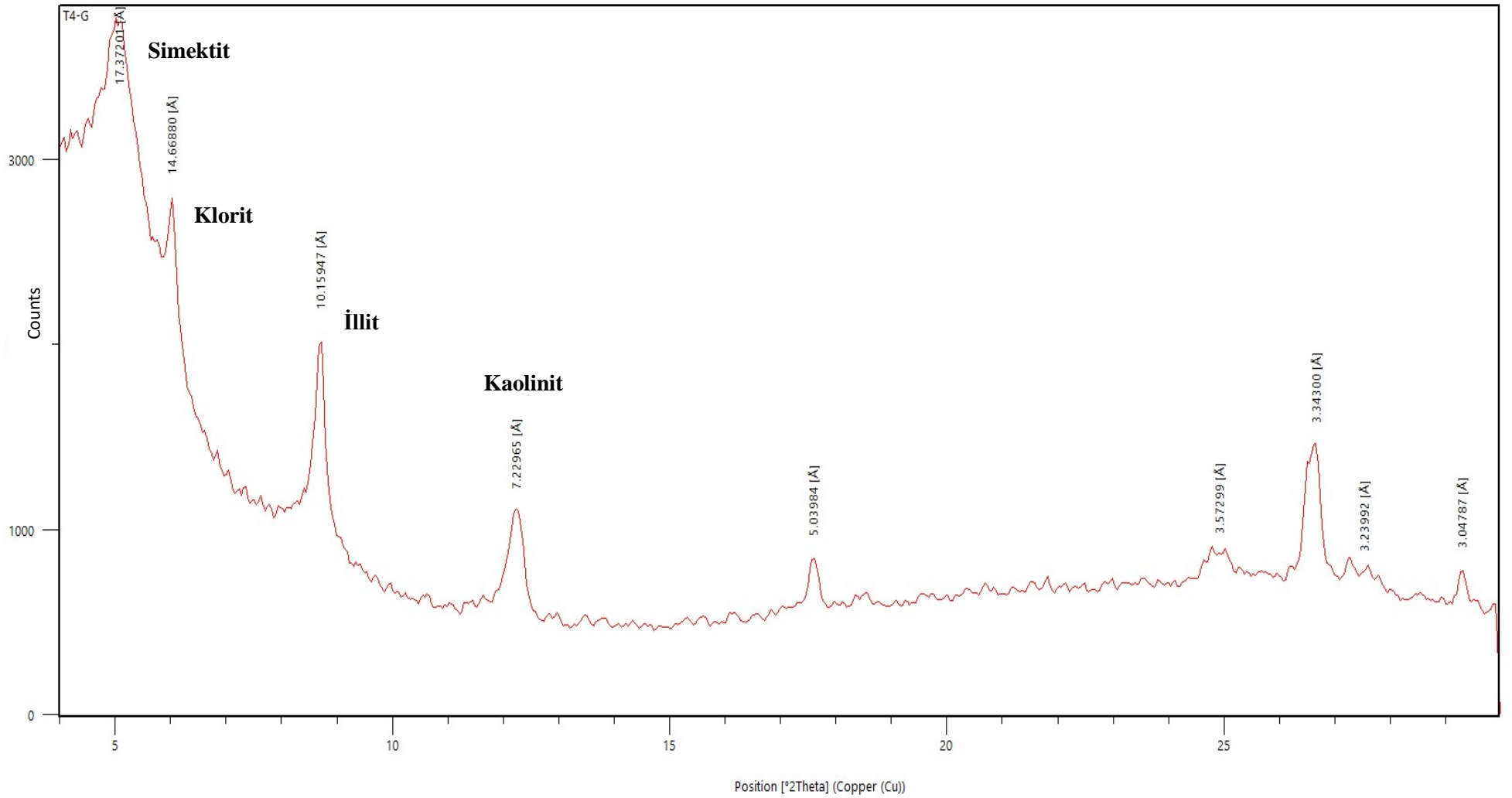
%15 cam tozu, %15 cam tozu+%5 CaO ve %15 cam tozu+2M NaOH katkıları ile stabilize edilen toprak örneklerine ait XRD grafikleri sırasıyla; Ek-1, Ek-2 ve Ek-3’te sunulmuştur.



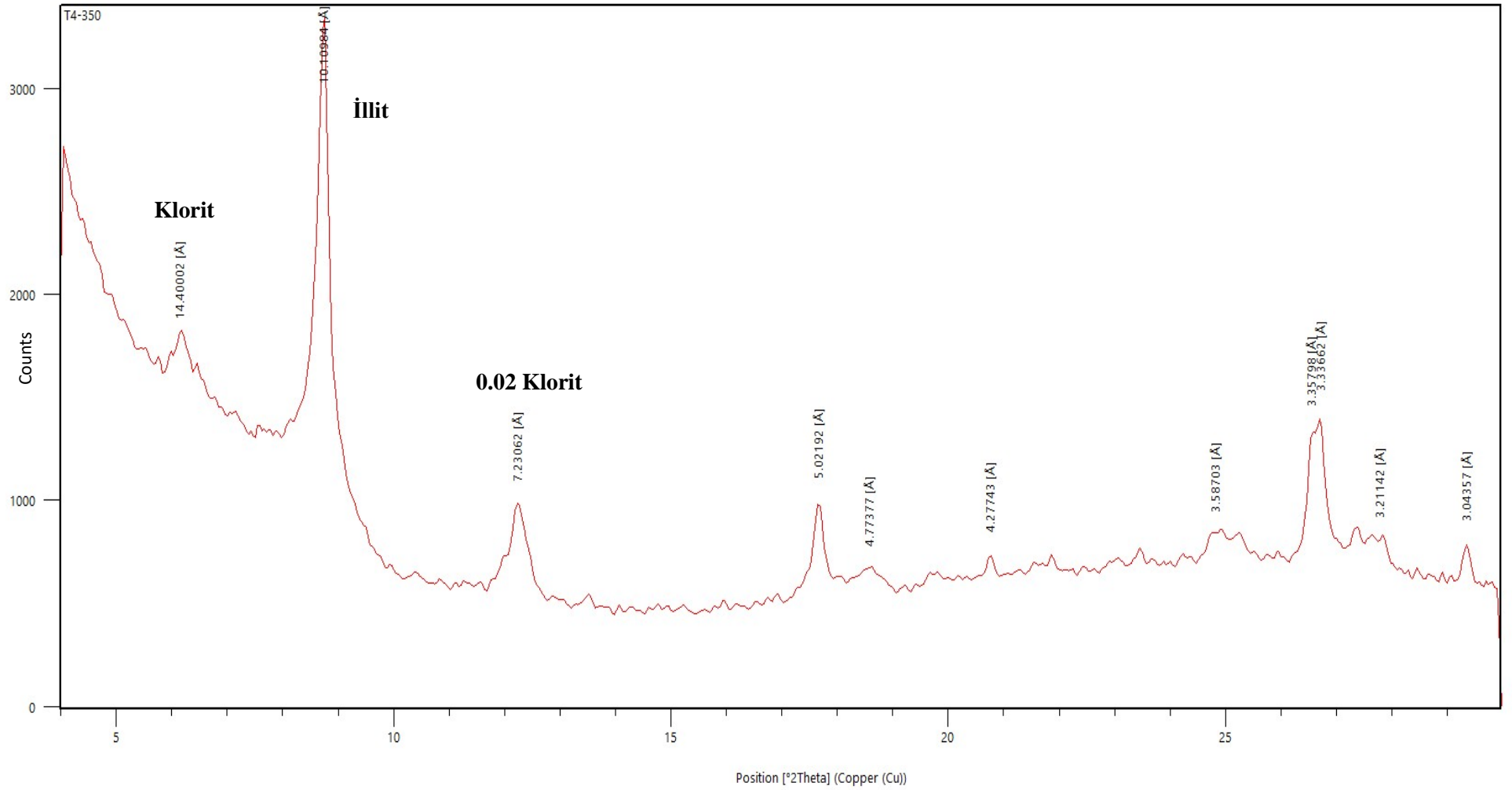
Şekil 4.58. Stabilize edilmemiş toprağa ait tüm kayaç analizi sonuçları.



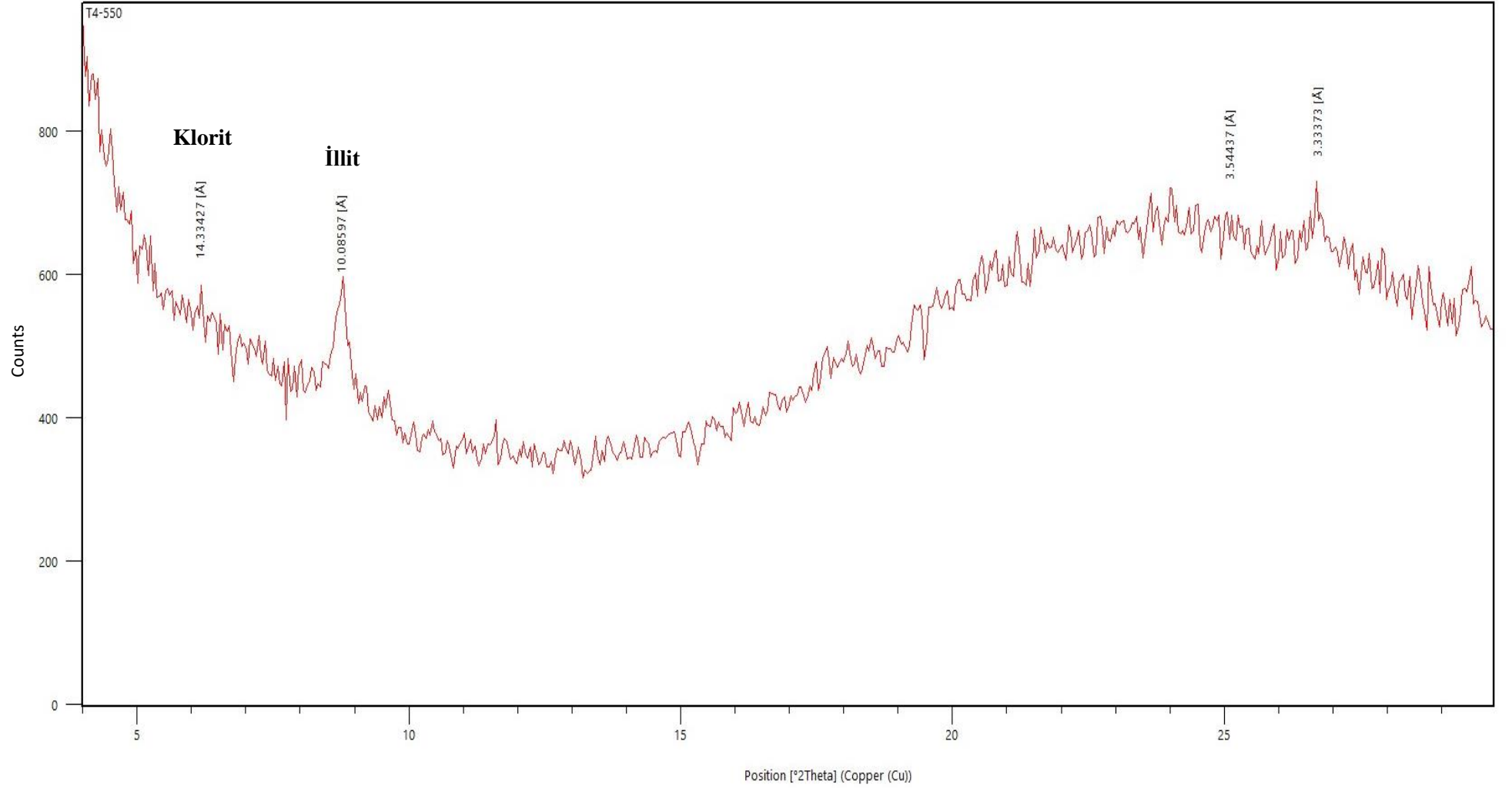
Şekil 4.59. Stabilize edilmemiş toprağa ait kil fraksiyonu (normal).



Şekil 4.60. Stabilize edilmemiş toprağa ait kil fraksiyonu (etilen glikol).



Şekil 4.61. Stabilize edilmemiş toprağa ait kil fraksiyonu (350°C ısıt).

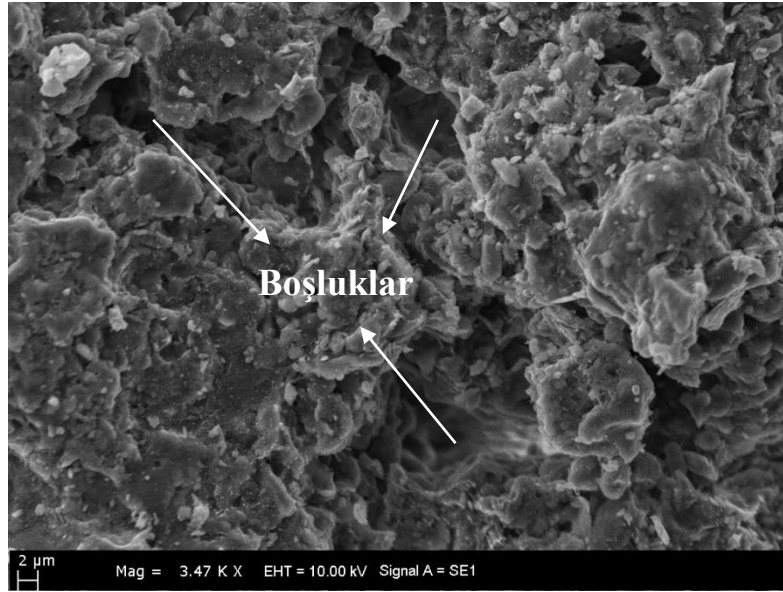


Şekil 4.62. Stabilize edilmemiş toprağa ait kil fraksiyonu (550°C ısıt).

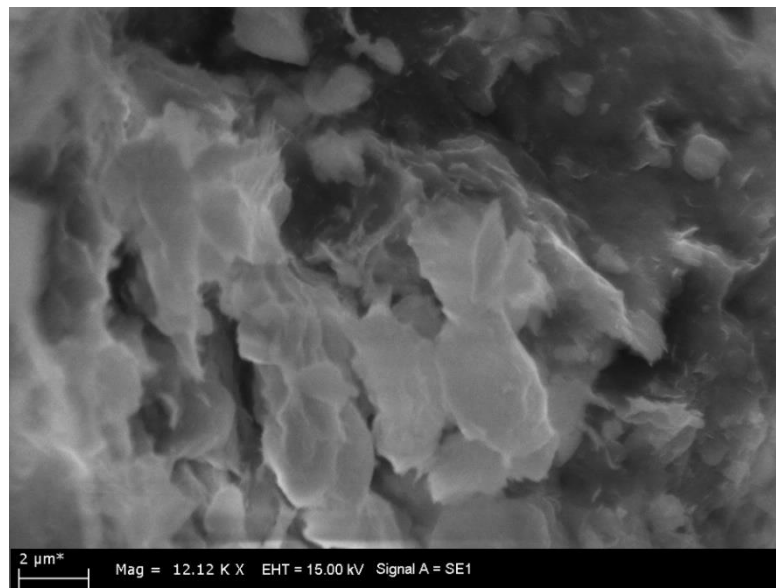
4.10. SEM Analizleri

Stabilizasyon işlemi öncesi ve sonrasında toprak örnekleri üzerinde SEM çalışmaları gerçekleştirilerek örnekler mikroyapısal açıdan incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan doğal toprağın sıkıştırma ve kür süresi uygulanmadan oluşturulmuş SEM görüntüleri Şekil 4.63 ve Şekil 4.64'te sunulmuştur. Stabilizasyon işlemi uygulanmayan doğal toprağın dokusu incelendiğinde heterojen bir yüzey ve geniş ölçekli boşlukların mevcut olduğu görülmüştür.



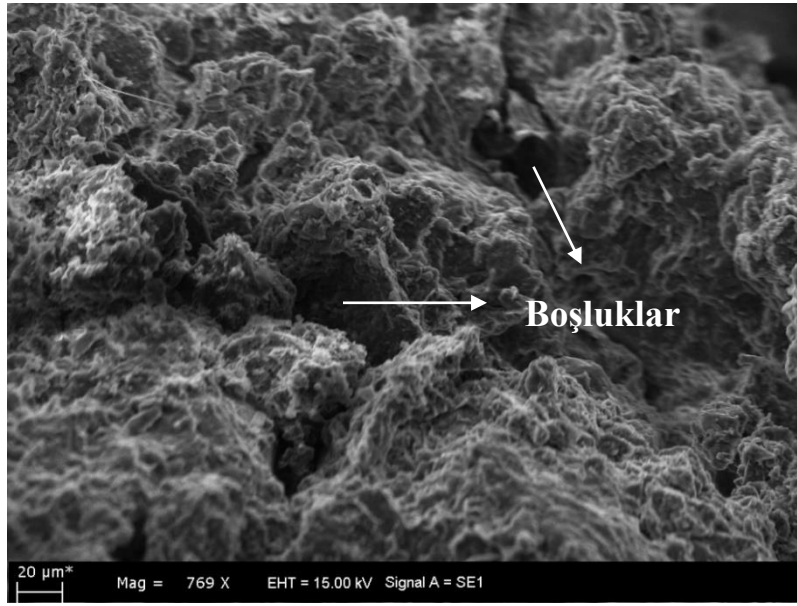
Şekil 4.63. Katkısız (%0) toprağın SEM görüntüsü.



Şekil 4.64. Katkısız (%0) toprak örneğinin yakınlştırılmış SEM görüntüsü.

Katkısız (%0) toprağın yüzeyi yakından incelendiğinde kil minerallerini temsil eden yapıların mevcut olduğu, özellikle bal peteği görünümlü dokuların simektit mineraline işaret edebileceği anlaşılmıştır.

14 gün kür koşullarında bekletilmiş katkısız (%0) toprak örneğine ait SEM görüntüsü Şekil 4.65'te, EDS analizi sonuçları Çizelge 4.18 ve Şekil 4.66'da sunulmuştur. 14 gün sonunda katkısız toprak örneğinin yüzeyi incelendiğinde boşluklu bir yapının hakim olduğu görülmüştür.

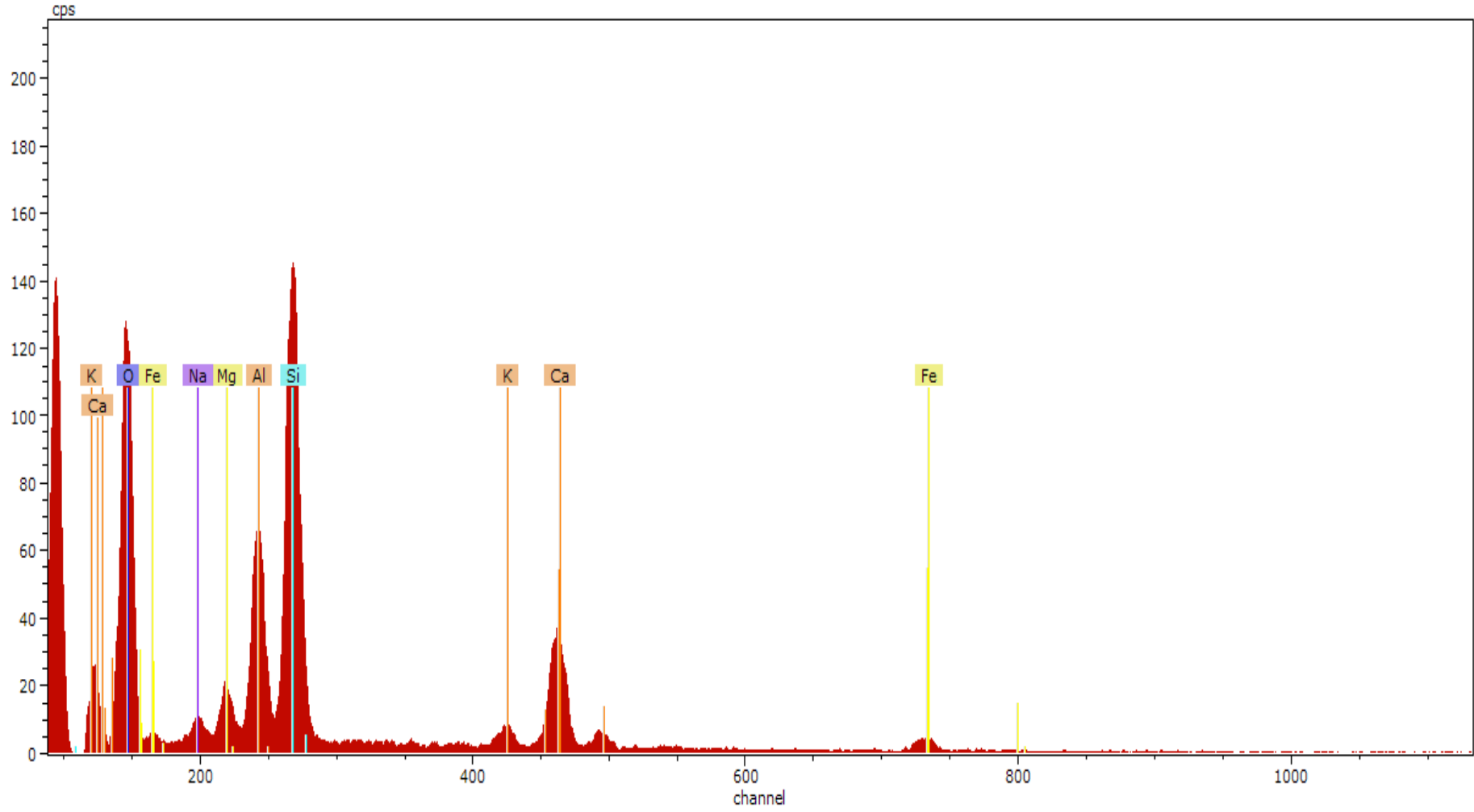


Şekil 4.65. Katkısız (%0) toprak örneğinin SEM görüntüsü (14 gün sonunda).

Çizelge 4.18. Katkısız (%0) örneğin içerdiği element türleri ve miktarları.

Spectrum: HD17_03- 27

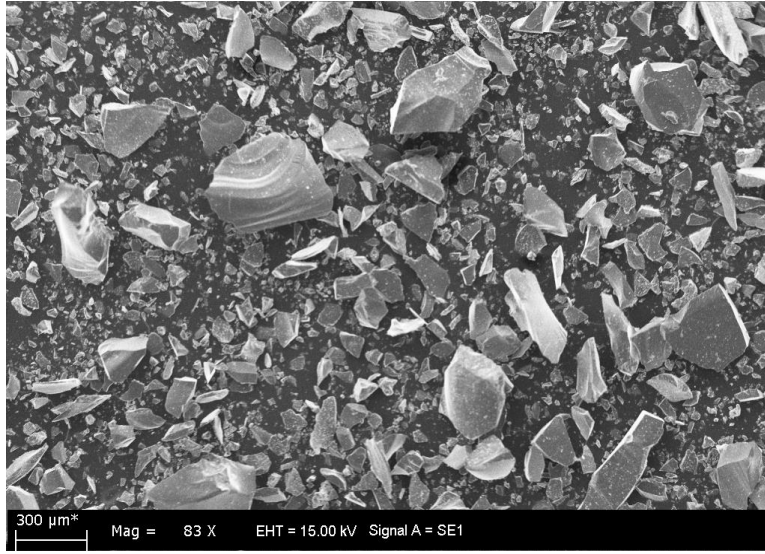
Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oxide	Oxid. C [wt.-%]
Sodium	K-series	1.40	1.42	1.28	Na ₂ O	2.26
Magnesium	K-series	2.17	2.21	1.89	MgO	4.31
Aluminium	K-series	8.15	8.29	6.38	Al ₂ O ₃	18.44
Silicon	K-series	19.94	20.27	14.99	SiO ₂	51.04
Potassium	K-series	1.15	1.17	0.62	K ₂ O	1.66
Calcium	K-series	8.74	8.89	4.60	CaO	14.63
Iron	K-series	4.98	5.06	1.88	FeO	7.66
Oxygen	K-series	51.81	52.68	68.36	O	17.68
Total:		98.34	100.00	100.00		



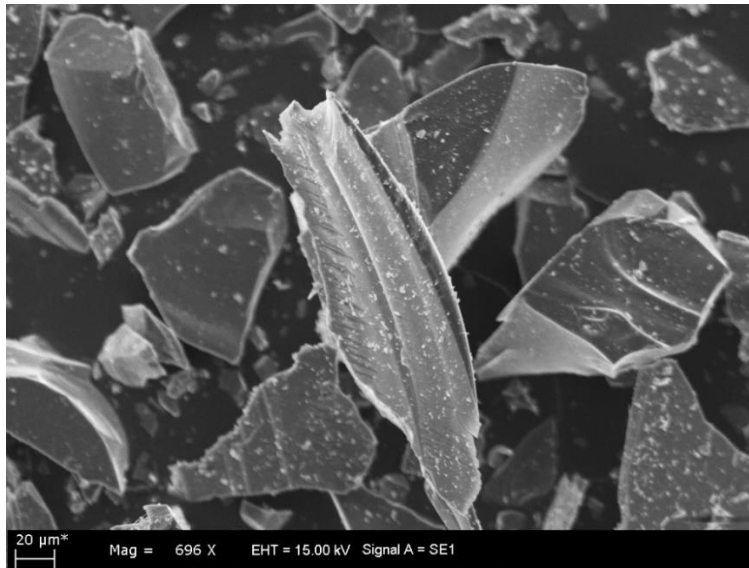
Şekil 4.66. Katkısız (%0) örneğin EDS spektrumu.

Katkısız örneğin EDS spektrumu, toprağın noktasal kaynaklı kimyasal bileşiminin temel olarak Si, Al, O ve Ca elementlerinden oluştuğunu bunların yanı sıra, Fe, Mg ve Na gibi elementlerin de bulunduğunu göstermektedir (Şekil 4.66).

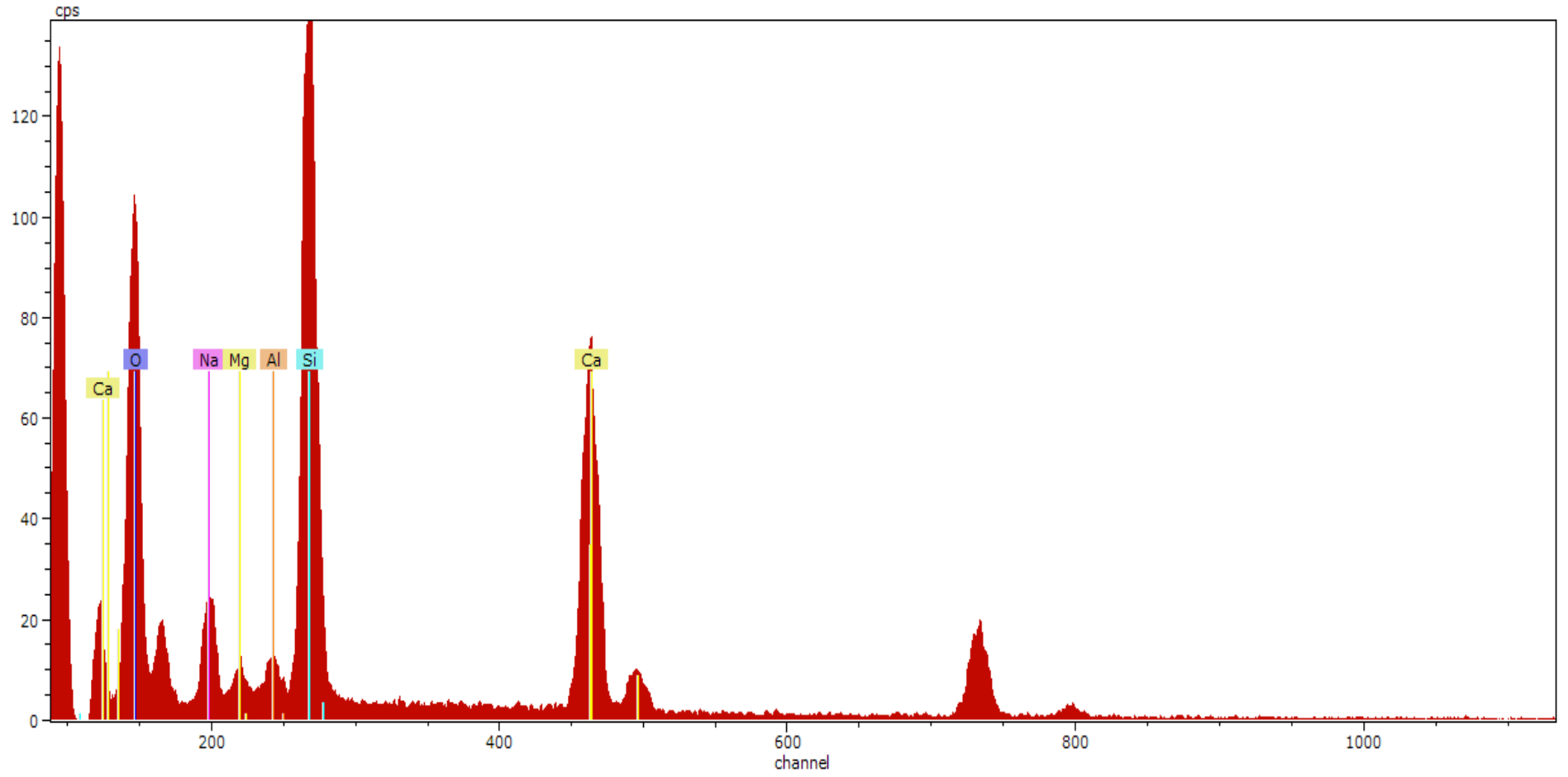
Çalışmada katkı malzemesi olarak kullanılan cam tozunun çeşitli ölçeklerde SEM görüntüleri kaydedilmiş ve EDS tekniği kullanılarak içerdiği element türü ve miktarları belirlenmiştir. Cam tozunun SEM görüntüleri Şekil 4.67 ve Şekil 4.68’de, EDS analizi sonuçları Şekil 4.69’da ve Çizelge 4.19’da sunulmuştur. Numuneye ait SEM görüntüleri incelendiğinde camı oluşturan parçacıklarının amorf bir yapı sergilediği görülmektedir (Şekil 4.67, Şekil 4.68).



Şekil 4.67. Cam tozunun SEM görüntüsü (Büyütme: 83).



Şekil 4.68. Cam tozunun SEM görüntüsü (Büyütme: 696).



Şekil 4.69. Cam tozunun EDS spektrumu.

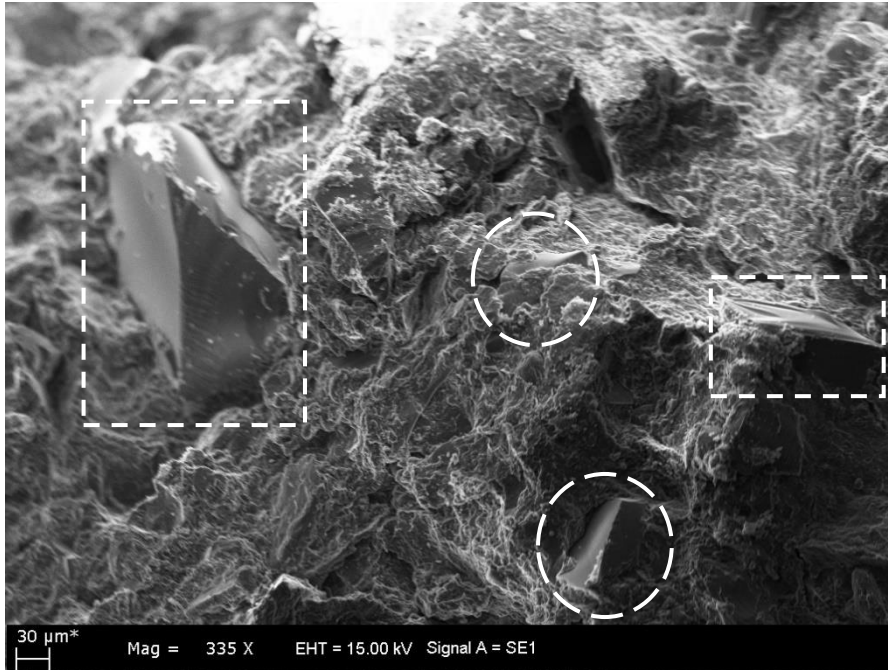
Çizelge 4.19. Cam tozunun içerdiği element türleri ve miktarları.

Spectrum: HD17_03- 18

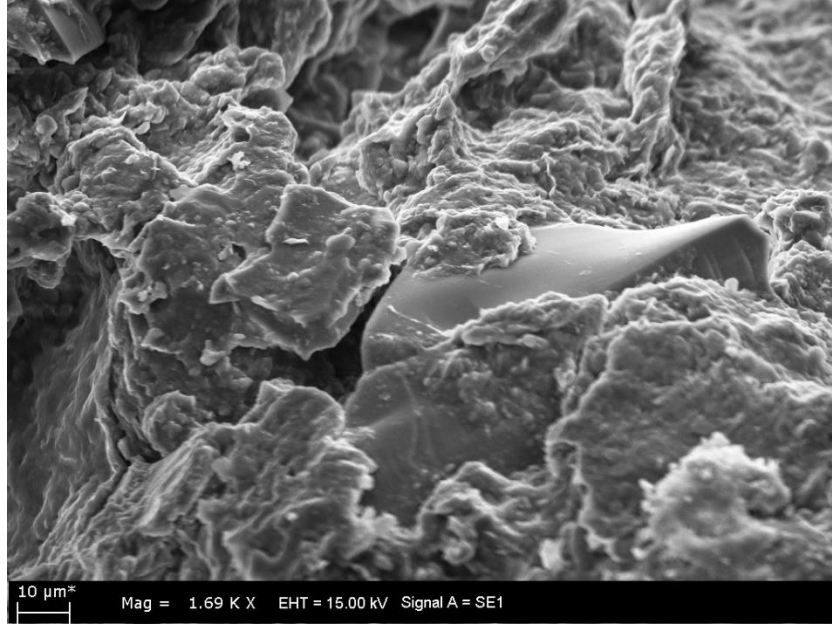
Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oxide	Oxid. C [wt.-%]
Sodium	K-series	7.53	6.93	6.04	Na2O	10.56
Magnesium	K-series	2.10	1.93	1.59	MgO	3.62
Aluminium	K-series	1.33	1.22	0.91	Al2O3	2.62
Silicon	K-series	32.72	30.09	21.48	SiO2	72.76
Calcium	K-series	7.18	6.60	3.30	CaO	10.45
Oxygen	K-series	57.86	53.22	66.68	O	13.03
Total:		108.72	100.00	100.00		

EDS spektrumu incelendiğinde Si, O, Na, Ca, Mg ve Al'nin cam tozunu oluşturan ana elementler olduğu tespit edilmiştir. İncelenen numunenin sahip olduğu element oksitlerinin noktasal yüzde değerleri; %72.76 SiO₂, %10.56 Na₂O, %10.45 CaO içeriği ile belirli miktarlarda MgO ve Al₂O₃ bileşiklerinin de bulunduğu işaret etmektedir.

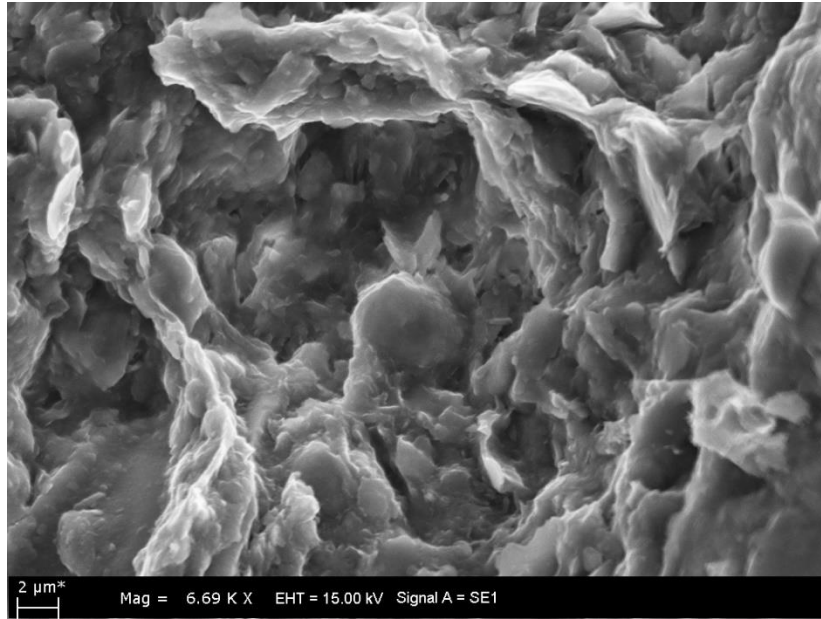
14 günlük kür süresi sonunda %15 cam tozu katkılı toprak örneğine ait SEM görüntülerine Şekil 4.70, Şekil 4.71 ve Şekil 4.72'de sunulmuştur. EDS analizi sonuçları ise Şekil 5.89'da yer almaktadır. Şekil 4.70'de numune yüzeyindeki işaretlenmiş alanlarda reaksiyona girmemiş cam parçacıklarının mevcut olduğu görülmektedir. Şekil 4.72'deki görüntüde kil minerallerinin yüzeyleri daha belirgin bir şekilde gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.70. %15 cam tozu katkılı örneğin SEM görüntüsü.

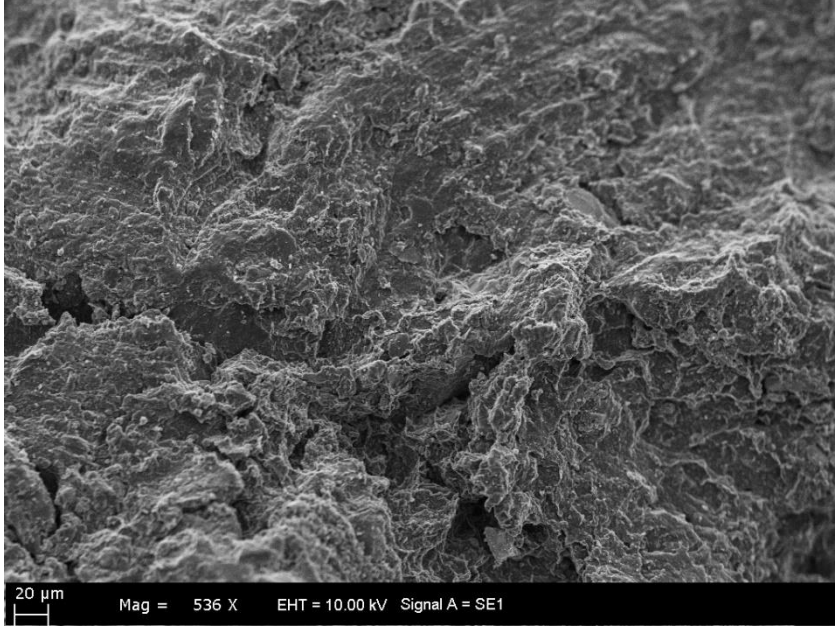


Şekil 4.71. %15 cam tozu katkılı örneğin yakınlaştırılmış SEM görüntüsü (Büyütme: 1690).

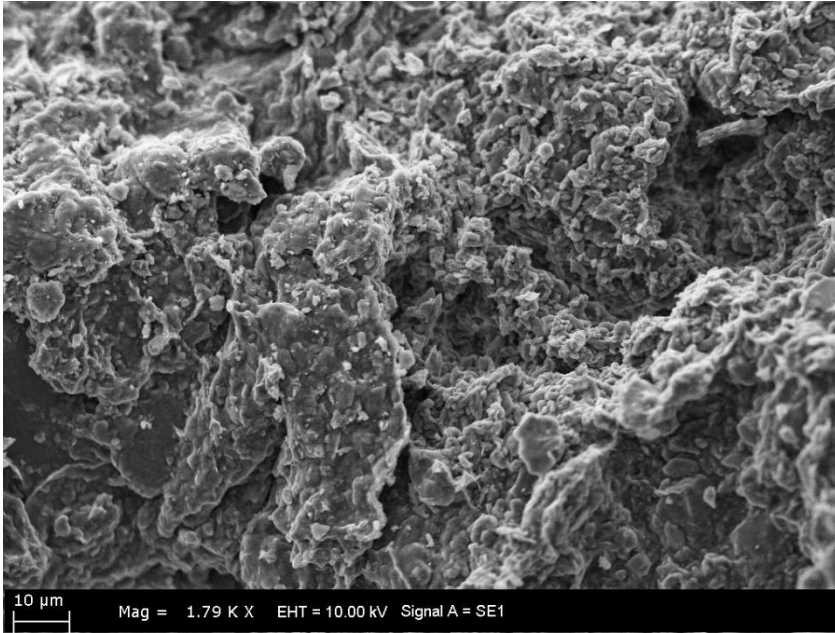


Şekil 4.72. %15 cam tozu katkılı örneğin yakınlaştırılmış SEM görüntüsü (Büyütme: 6690).

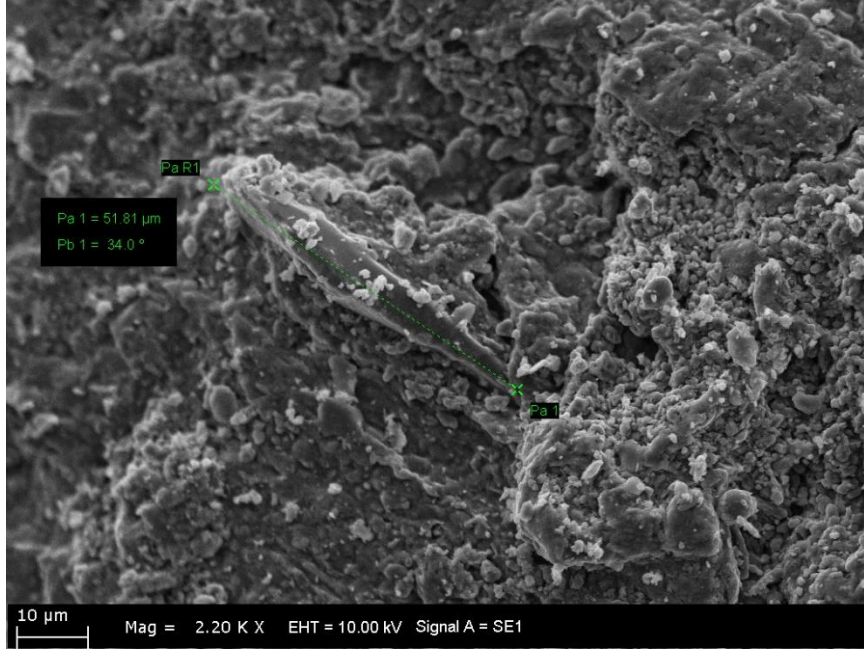
14 günlük kür süresi sonunda %15 cam tozu+%5 CaO katkıli toprak örneğine ait SEM görüntüleri Şekil 4.73, Şekil 4.74 ve Şekil 4.75'te sunulmuştur. Şekil 4.73'teki görüntü incelendiğinde taneler arası bağlanmanın güçlü olduğu daha sıkı bir yapının geliştiği görülmektedir. %15 cam tozu+%5 CaO katkısı ile stabilize edilen toprak örneğinin yüzeyinde de reaksiyona girmemiş cam parçacıklarına rastlanılmıştır (Şekil 4.75).



Şekil 4.73. %15 cam tozu + %5 CaO katkıli örneğin SEM görüntüsü.

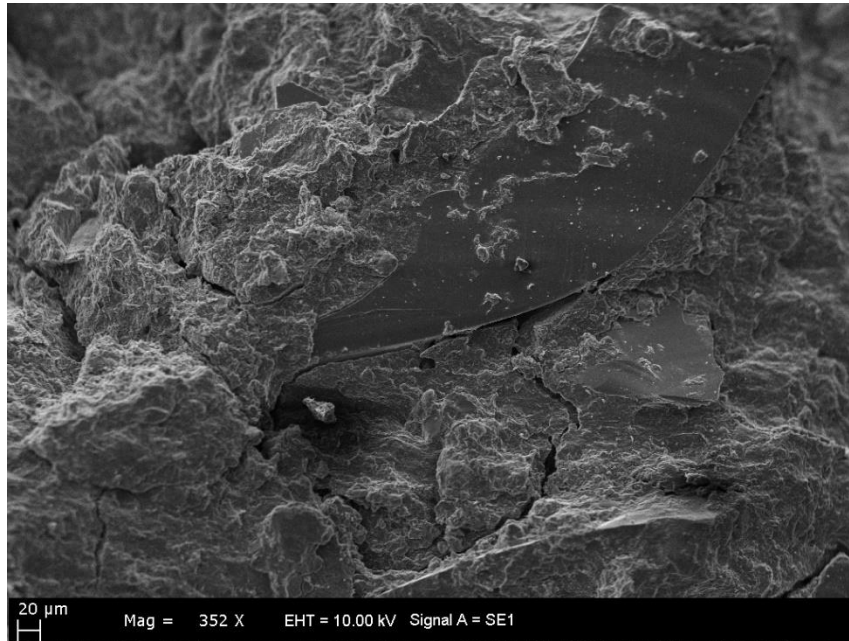


Şekil 4.74. Örnek yüzeyini temsil eden bir diğer SEM görüntüsü.

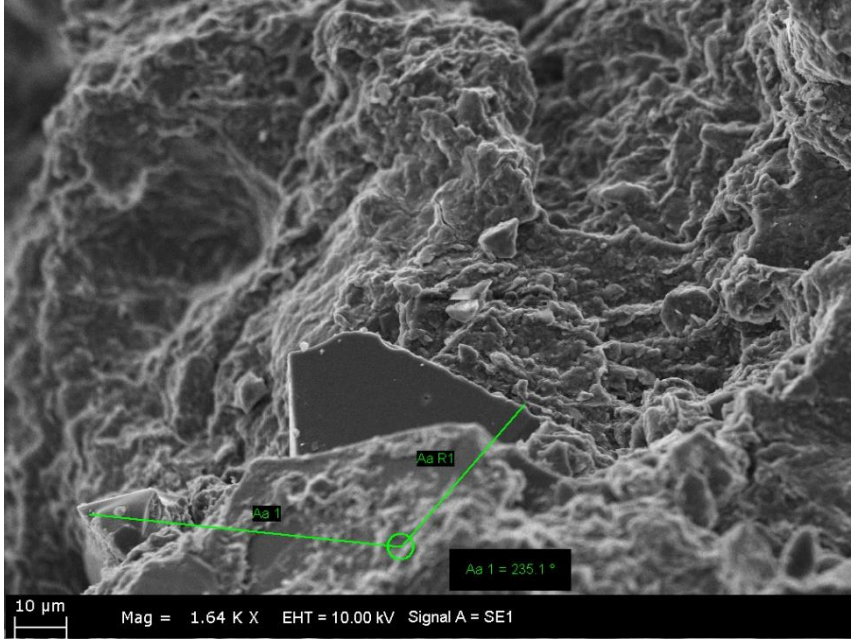


Şekil 4.75. %15 cam tozu+%5 CaO katkılı örneğin SEM görüntüsü (Büyütme: 2200).

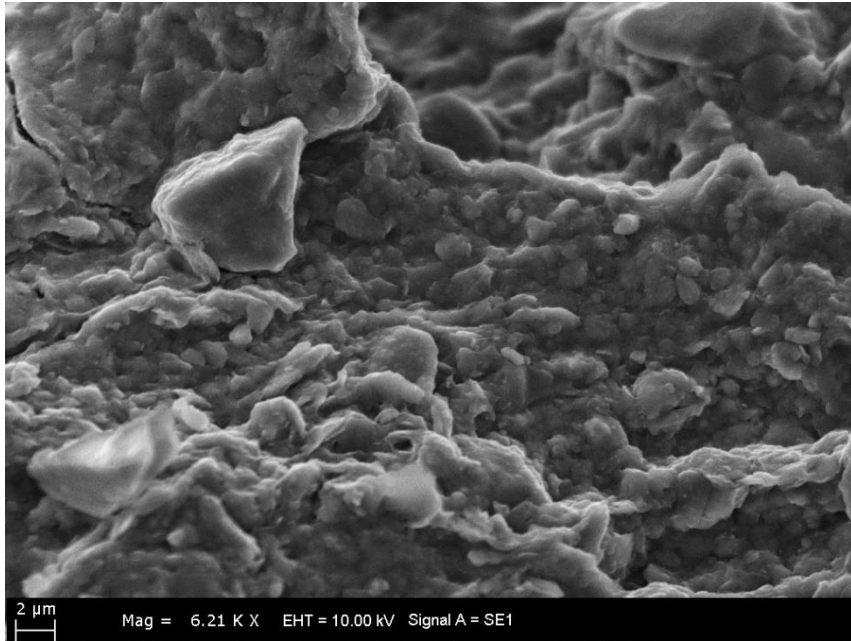
14 günlük kür süresi sonunda %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örneğine ait SEM görüntüleri Şekil 4.76, Şekil 4.77 ve Şekil 4.78’de sunulmuştur.



Şekil 4.76. %15 cam tozu+2M NaOH katkılı örneğin SEM görüntüsü.



Şekil 4.77. %15 cam tozu+2M NaOH katkılı örneğin SEM görüntüsü (Büyütme: 1640).



Şekil 4.78. Örnek yüzeyinin yakınlaştırılmış SEM görüntüsü (Büyütme: 6210).

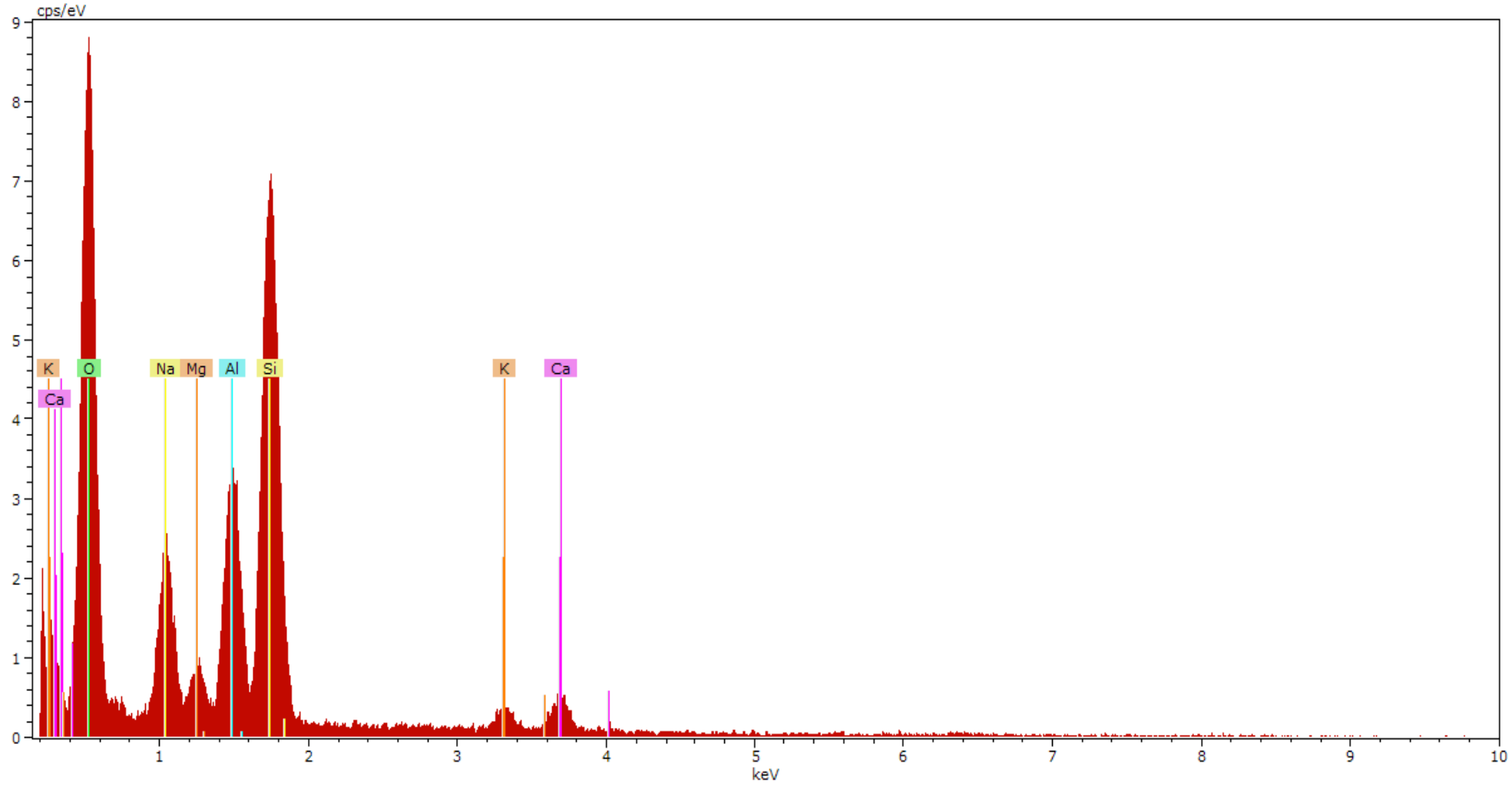
Elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde diğer katkı türlerinde olduğu gibi %15 cam tozu+2M NaOH katkılı örnek türünde de reaksiyona girmemiş parçacıkların mevcut olduğu tespit edilmiştir. Örneğe ait EDS analizi sonuçları Çizelge 4.20 ve Şekil 4.79’da sunulmuştur.

%15 cam tozu+2M NaOH katkılı örneğe ait EDS spektrumu incelendiğinde; noktasal elementel bileşimin Si, O, Na, Ca, Al ve Mg’den oluştuğu belirlenmiştir. Numunenin içerdiği element oksitlerinin noktasal yüzde değerleri incelendiğinde Na₂O içeriğinin belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu artış toprak örneğinin yüzeyinde NaOH birikimlerinin olabileceğine işaret etmektedir.

Çizelge 4.20. %15 cam tozu + 2M NaOH katkılı örneğin içerdiği element türleri ve miktarları.

Spectrum: C- 80

Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oxide	Oxid. C [wt.-%]
Sodium	K-series	11.19	10.58	8.98	Na ₂ O	17.63
Magnesium	K-series	2.85	2.69	2.16	MgO	5.52
Aluminium	K-series	2.82	2.67	1.93	Al ₂ O ₃	6.23
Silicon	K-series	25.45	24.06	16.72	SiO ₂	63.62
Calcium	K-series	4.28	4.05	1.97	CaO	7.01
Oxygen	K-series	59.18	55.95	68.24	O	23.61
Total:		105.78	100.00	100.00		



Şekil 4.79. %15 cam tozu+2M NaOH katkılı örneğin EDS spektrumu.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında atık cam tozu ve alkali katkı maddelerinin yüksek şişme potansiyeline sahip Ankara Kili'nin fiziksel ve mekanik parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Stabilizasyon işleminin serbest şişme indeksi, makaslama dayanımı üzerine etkileri ile ıslanma-kuruma ve donma-çözülme döngüleri sonrası tek eksenli sıkışma dayanımında yarattığı değişiklikler tespit edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular şu şekildedir:

- Serbest şişme indeksi deneyi sonuçlarına göre zemine eklenen cam tozu yüzdesi arttıkça şişme indeksi değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu koşullarda, SiO₂ ve CaO içeriğine sahip atık cam tozunun toprakta bulunan simektit mineralinin tetrahedral tabakası ile suya olan çekimi azaltan katyonik bağlar oluşturmak için potansiyel bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Ayrıca CaO ve NaOH ile aktive edilmiş cam tozunun şişme indeksi üzerine olan etkisinin sadece cam tozu ile yapılan katkılara göre daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Serbest şişme indeksi değerindeki en önemli değişim ise %72.7 oranında düşüş sağlayan %15 cam tozu + %5 CaO katkı türünde gözlemlenmiştir.
- Zemine eklenen cam tozu yüzdesi arttıkça zeminin maksimum kuru yoğunluk değerinde artış görülürken optimum su içeriği ise azalmaktadır. Ayrıca CaO ve NaOH gibi alkali maddeler ile aktive edilmiş cam tozu katkılı toprakların kompaksiyon parametrelerinin nispeten sabit kaldığı gözlemlenmiş ve doğal zeminin parametrelerine yakın değerler elde edilmiştir.
- Atık cam tozu katkısının zeminin makaslama dayanımı parametrelerine olan etkilerini belirlemek üzere %15 ve %25 katkılı örnekler için doğrudan makaslama deneyi gerçekleştirilmiştir. Katkısız toprak ile karşılaştırıldığında %15 oranında cam tozu katkısı ile doruk makaslama için zeminin kohezyonunda önemli bir değişiklik elde edilmezken içsel sürtünme açısında 16.7 derecelik bir artış sağlanmıştır. %25 oranında katkı ile ise kohezyonda düşüş içsel sürtünme açısında ise 12.2 derecelik bir artış elde edilmiştir. Sonuç olarak %25'lik katkıya göre %15'lik katkının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

- 14 günlük kür süresi sonunda tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) deneyi sonuçları değerlendirildiğinde; en yüksek dayanım değeri 734.1 kPa ile %15 cam tozu + %5 CaO katkısı ile stabilize edilen örnekte elde edilmiştir. %15 cam tozu + %5 CaO katkılı toprak örneğinin 14 gün sonunda tek eksenli sıkışma dayanımında % 291 oranında artış olduğu kaydedilmiştir. % 15 cam tozu ve % 15 cam tozu + 2M NaOH katkı türlerinde dayanım değerlerinin sırasıyla % 59.7 ve % 43.3 oranında azaldığı belirlenmiştir. Özellikle cam tozu-NaOH karışımının daha reaktif bir davranış göstermesi beklenirken bu katkı türüne ait UCS değerinde istenilen sonucun elde edilememesinde gerekli kür sıcaklığı ve NaOH konsantrasyonunun sağlanamadığı düşünülmektedir. Bilondi ve ark. [80], çalışmalarında killi zeminlerin stabilizasyonu amacıyla kullanılan cam tozu ve NaOH katkılarının optimum miktarlarının sırasıyla %15 ve 2 molar olduğunu belirtmiştir. Bu bilgiler ve çözelti hazırlamanın maliyeti dikkate alındığında NaOH konsantrasyonu 2 molar olarak düşünülmüş ancak, bu konsantrasyondaki çözeltinin cam tozunu aktive etmede optimum düzeyde olmayabileceği anlaşılmıştır. Bu nedenle ileride yapılacak çalışmalarda NaOH konsantrasyonunun yeniden değerlendirilerek deneylere devam edilmesi ve katkı malzemeleri ile zemin taneleri arasındaki reaksiyonların oluşumunu geciktiren etkenlerin (kür sıcaklığı vb.) üzerinde durulması önerilir.
- Islanma-kuruma çevrimi koşullarında atık cam tozu ile stabilize edilen toprak örneklerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler doğal zemin ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:
 - ✓ Suda dağılmaya karşı yeterli düzeyde duraylılık gösteremeyen katkısız toprak ve %15 cam tozu katkısı içeren toprak örneğinin 1.döngüde dağıldığı gözlenmiştir.
 - ✓ %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örnekleri ise 2. ıslanma-kuruma döngüsünün ıslanma aşamasında dağılmıştır. NaOH ile aktive edilmiş cam tozu katkılı zeminin ıslanma-kuruma çevrimi koşullarındaki duraylılığının çok zayıf olduğu anlaşılmıştır.
 - ✓ %15 cam tozu+%5 CaO katkısı ile stabilize edilen zeminin 2 ıslanma-kuruma döngüsü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımı 2052.4 kPa olarak belirlenmiştir. Islanma-kuruma sonrası örneğin dayanımında düşüş beklenirken bu durumun aksine dayanım değerinde % 179.6 oranında bir artış

olduğu saptanmıştır. Toprak rneklerinin su ile olan etkileşimi, katkı malzemeleri ve zemin taneleri arasındaki reaksiyonu hızlandırarak dayanımda belirgin artışların görülmesini sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, %15 cam tozu + %5 CaO katkı türü için örnek sayısının arttırılarak ıslanma-kuruma döngülerinin tekrarlanması ve dayanımdaki değişimlerin gözlemlenmesi gerektiği düşünülmektedir.

- Donma-zlme etkisiyle toprak örneklerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelebilecek değişimlerde atık cam tozu katkısının etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:
 - ✓ Donma-zlmenin 3. döngüsü sonrası örneklerin ağırlık kaybı değerlerindeki en yüksek değişim % 1.6 ile %15 cam tozu katkılı örnekte görülürken en düşük değişim ise % 1.2 oranında %15 cam tozu + %5 CaO katkılı örnekte olmuştur.
 - ✓ 3 donma-zlme döngüsü sonunda en düşük tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) değerı 52.5 kPa ile %15 cam tozu katkılı örnekten, en yüksek dayanım değerı ise 548.7 kPa ile %15 cam tozu+%5 CaO katkılı örnekten elde edilmiştir.
 - ✓ Donma-zlme döngüleri sonunda toprak örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri genellikle azalma eğilimindedir. Başlangıç değerlerine göre tek eksenli sıkışma dayanımındaki en yüksek değişim %65.2 ile katkısız örnekten, en düşük değişimin ise %25.2 ile %15 cam tozu + %5 CaO katkılı örnekten olduğu belirlenmiştir.
 - ✓ Diğer örneklerin aksine %15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprak örneğinin donma-zlme döngüsü sonunda tek eksenli sıkışma dayanımında başlangıç değerine göre %32 oranında artış olduğu saptanmıştır. Bu katkı türü için beklenenin dışında bir sonuç elde edilmiş olup, örnek sayısının arttırılması gerektiği düşünülmektedir.
 - ✓ Katkısız toprak örnekleri ile karşılaştırıldığında %15 cam tozu+%5 CaO ve %15 cam tozu+2M NaOH katkılı örneklerin yüzeyindeki çatlak yoğunluğunun daha az olduğu gözlenmiş ve bu zeminler için döngülerin ilerletilebileceği sonucuna varılmıştır. Deneysel veriler özellikle %15 cam

tozu+%5 CaO katkısı ile stabilize edilen zeminlerin donma-çözülme döngü koşullarında duraylılığını kaybetmediğini ve ilerleyen aşamalarda örneklerin stabilitesini koruyabileceğini göstermiştir.

- Örneklere ait XRD analiz sonuçları incelendiğinde stabilizasyon işlemi sonrasında toprağın mineralojik bileşiminde belirgin bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. Stabilizasyon işlemi sonrası oluşan ve dayanımda artış sağlayan kalsiyum alümina hidrat (CAH) ve kalsiyum silikat hidrat (CSH) mineralleri XRD çekimlerinde kesin bir şekilde saptanamamıştır. Benzer şekilde SEM analizlerinde de CAH ve CSH oluşumlarına yönelik bir bulguya rastlanılmamıştır.
- SEM analizleri sonucunda elde edilen görüntüler yorumlandığında katkısız toprak örneğinde heterojen bir yüzey ve boşluklu bir yapı gözlenirken stabilize edilmiş numunelerin yüzeyinde daha yoğun bir yapı ve daha az boşluk olduğu belirlenmiştir. %15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprak örneğinin sergilediği daha yoğun mikro yapı ve daha yüksek bağlanma derecesi bu örneklerin dayanımlarında gözlemlenen belirgin artışları destekler niteliktedir.
- %15 cam tozu + 2M NaOH katkılı örneğin noktasal elementel analiz sonuçları örnek yüzeyinde NaOH birikimlerinin olabileceğine işaret etmiştir. Bu doğrultuda örnek yüzeyinde bulunması halinde NaOH birikimleri, su ile olan etkileşimi azaltarak şişme miktarının düşürülmesinde katkı sağlayabilmektedir.
- %15 cam tozu+%5 CaO katkı türü stabilizasyon işlemi kapsamında denenen karışımlar arasında en iyi performansı göstermiştir. Bu katkı türü ile stabilize edilen zeminin fiziksel ve mekanik parametrelerinde olumlu yönde değişimlerin olduğu gözlenmiştir. Cam tozuna ek olarak CaO ile hazırlanan toprak örneklerinin daha az miktarda şiştiği belirlenerek tek eksenli sıkışma dayanımlarında diğer örneklerle göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Ayrıca %15 cam tozu ve %5 CaO ile stabilize edilen zeminin doğal koşullar altındaki duraylılığının diğer katkı türleri ile stabilize edilen örneklere göre daha üstün olduğu anlaşılmıştır.

- Sonuç olarak atık camlar, üretim aşamasında çevreye verdiği zarar ile bilinen çimento ve benzeri malzemelerin stabilizasyon uygulamalarında kullanımını azaltacak bir alternatif olarak görülmelidir. Zemin stabilizasyonunda atık camların değerlendirilmesi ile çevresel olarak katkı sağlamak ve stabilizasyon işlemlerinin maliyetini azaltmak mümkündür.
- Bu çalışma ile killi zeminlerin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak atık camların tek başına kullanımının fiziksel ve mekanik parametreler üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu anlaşılmıştır. Ancak, cam tozunun bünyesinde bulunan amorf silika ve alüminanın çeşitli alkali aktivatörler ile çözünmesi sağlandığında dayanımı ve bağlayıcılık özelliği yüksek jeopolimerlerin elde edilebileceği düşünülmektedir. İleriki çalışmalarda atık camın tane boyunun ve farklı konsantrasyonlarda alkali aktivatör kullanımının stabilizasyon işlemi üzerindeki etkisinin araştırılmasında fayda vardır.

6. KAYNAKLAR

- [1] F.H. Chen, Foundations on Expansive Soils, Elsevier Scientific Pub. Co., Amsterdam, **1988**.
- [2] W.S. Abdullah., K.A. Alshhibli and M.S. Al-Zou'bi, Influence of pore water chemistry on the swelling behaviour of compacted clays. Appl. Clay Sci., 15, pp. 447-462, **1999**.
- [3] J.C. Parker, D.F. Amos and D.L Kaster, An evaluation of several methods of estimating soil volume change Soil Soc. Am. J., 41, pp. 1059-1064, **1977**.
- [4] Y.J. Du, S.L. Li and S. Hayashi, Swelling–shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, China. Engineering Geology, 53 pp. 351-358, **1999**.
- [5] M. Doruk, Swelling Properties of Clays on the METU Campus. MSc Thesis, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, **1968**.
- [6] A.K. Uner, “A comparison of engineering properties of two soil types in the Ankara region”. MSc Thesis, METU Institute Of Science And Technology, Ankara, 112, **1977**.
- [7] E. Cokca, Swelling potential of expansive soils with a critical appraisal of the indentification of swelling of Ankara soils by methylene blue tests, PhD Thesis, METU Institute Of Science And Technology, 323, **1991**.
- [8] Z.A. Erguler, R. Ulusay, A simple test and predictive models for assessing swell potential of Ankara (Turkey), Engineering Geology, 67, 331-352, **2003a**.
- [9] E. Avsar, R. Ulusay, H. Sonmez, Assessments of swelling anisotropy of Ankara clay, Engineering Geology, 105, is. 1-2, 24-31, **2009**.
- [10] Holtz, W. G., Gibbs, H.J. Engineering Properties of Expansive Clays, ASCE Transactions, 121, 641-663, **1956**.
- [11] D.E.J. Jones and W.G. Holtz Expansive Soils – The hidden Disaster, Civil Engineering, Vol.43, Nov. 8, **1973**.
- [12] J.K. Mitchell, Fundamentals of Soil Behaviour 2nd Edition, John Wiley&Sons Inc., New York, 437 s., **1993**.
- [13] K. Özeydin, Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 22-23, **1989**.
- [14] P. B.V.S. Kota, D. Hazlett and L. Perrin, Sulfate-Bearing Soils: Problems with Calcium Based Stabilizers, Record No. 1546, Transportation Research Board, Washington, **1996**.
- [15] L.D. McCallister and T.M. Petry, Property Changes in Lime Treated Expansive Clays under Continous Leaching, Report No. DACA 39-88-M-0550, US Army Corps of Engineers, Wasghington, **1990**.

- [16] A.J. Puppala and S. Hanchanloet, Evaluation of a New Chemical Treatment Method on Strength and Resilient Properties of a Cohesive Soil, Transportation Research Board, Washington, Record No. 990389, **1999**.
- [17] M.R. Hausmann, Engineering Principles of Ground Modification, McGraw-Hill, New York, 632-635, **1990**.
- [18] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, “Ambalaj ve Ambalaj Atıkları İstatistikleri”, Ambalaj Bülteni. Bülten No: 14. **2017**.
- [19] United States Environmental Protection Agency (EPA), Advancing Sustainable Materials Management: 2015 Fact Sheet. Assessing Trends in Material Generation, Recycling, Composting, Combustion with Energy Recovery and Landfilling in the United States. July 2018. 23p., **2015**.
- [20] Austroads. Guide to pavement technology. Recycle Mater. Part 4E. Publication No. AGPT04E/09, New South Wales, **2009**.
- [21] M. Torres-Carrasco and F. Puertas. Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation. J. Clean. Prod., 90, pp. 397-408, [10.1016/j.jclepro.2014.11.074](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.074). **2015**.
- [22] W.F. Van Impe, Soil Improvement Techniques and Their Evolution, A.A. Balkema, Rotterdam, 125 s., **1989**.
- [23] P.C. Lambe, N.P. Khosla and N.N. Jayaratne, Soil Stabilization in Pavement Structures, Transportation Studies Research, North Carolina, Report No. 232411-88-1, **1990**.
- [24] D.E.J. McCaustland, Lime dirt in roads. Proc. Natl.Lime Assoc., 7: 12-18, **1925**.
- [25] C. McDowel, Stabilization of soils with lime, lime-flyash and other lime reactive materials. High. Res. Board, Bull.231, Washington, DC, 60-66, **1959**.
- [26] Anon, Lime Stabilization Construction Manual. Eighth Edition. National Lime Association, Arlington, VA., **1985**.
- [27] M. Al-Mukhtar, A. Lasledj and J.F. Alcover, Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C, Applied Clay Science 50, 191–198, **2010**.
- [28] Y. E.A. Mohamedzein and A.A. Al-Rawas, Cement-Stabilization of Sabkha Soils from Al-Auzayba, Sultanate of Oman, Geotech Geol Eng, 29 : 999–1008, **2011**.
- [29] M. Khemissa and A. Mahamedi, Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay, Applied Clay Science 95, 104–110, **2014**.
- [30] O.M. Ogundipe, Strength And Compaction Characteristics Of Bitumen-Stabilized Granular Soil. International Journal Of Scientific & Technology Research Volume 3, Issue 9, September, **2014**.
- [31] I. Yilmaz and B. Civelekoglu, Gypsum: An additive for stabilization for swelling clay soils, Applied Clay Science, 44, 166-172, **2009**.

- [32] A. Senol, T.B. Edil, M.S. Bın-Shafique, H.A. Acosta and C.H. Benson, Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes, *Resources, Conservation & Recycling*, Vol: 46, Issue 4, pg: 365-376, Thomas Telford, UK., **2006**.
- [33] J.M. Manso, O.V. López, J.A. Polanco and J. Setién, The use of ladle furnace slag in soil stabilization, *Construction and Building Materials* 40, 126–134, **2013**.
- [34] E. Kalkan, Effect of waste material-lime additives mixtures on mechanical properties of granular soils. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 71(1), 99-103, **2012**.
- [35] E. Kalkan, Utilization of red mud as a stabilization material for the preparation of clay liners. *Engineering geology* 87 (3-4): 220-229, **2006**.
- [36] R.M. Brooks, *Soil Stabilization with Fly Ash and Rice Husk Ash*, Department of Civil and Environmental Engineering, Temple University, Philadelphia, USA, **2009**.
- [37] M.A. Rahgozar, M. Saberian and J. Li, Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study, *Transportation Geotechnics* 14, 52–60, **2018**.
- [38] P.S. Singh and R.K. Yadav, Effect Of Marble Dust On Index Properties Of Black Cotton Soil, *International Journal of Engineering Research and Science&Technology*, Vol. 3, No. 3, ISSN 2319-5991, **2014**.
- [39] E. Ene and C. Okagbue, Some basic geotechnical properties of expansive soil modified using pyroclastic dust, *Engineering Geology* 107, 61–65, doi:10.1016/j.enggeo.2009.03.007, **2009**.
- [40] O. Igwe and E.J. Adepehin, Alternative Approach to Clay Stabilization Using Granite and Dolerite Dusts, *Geotech Geol Eng.* 35:1657–1664, DOI 10.1007/s10706-017-0200-5. **2017**.
- [41] J.S. Yadav and S.K. Tiwari, Effect of waste rubber fibres on the geotechnical properties of clay stabilized with cement, *Applied Clay Science* 149 97–110, **2017**.
- [42] S.G.L. Babu and S.K. Chouksey, Stress–strain response of plastic waste mixed soil, *Waste Management* 31, 481–488, doi:10.1016/j.wasman.2010.09.018. **2011**.
- [43] H. Canakci, F. Celik, M.O.A. Bizne and M.O.A. Bizne, Stabilization of Clay with Using Waste Beverage Can, *Procedia Engineering* 161, 595 – 599, **2016**.
- [44] N. Hataf, P. Ghadir and N. Ranjbar, Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer, *Journal of Cleaner Production* 170, 1493e1500, **2018**. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.256>.
- [45] R.G. Pike, D. Hubbard, Physicochemical studies of the destructive alkali-aggregate reaction in concrete, *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 59 (2), 127–132, **1957**. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.059.013>.

- [46] K.H. Tan, H. Du, Use of waste glass as sand in mortar. Part I. Fresh, mechanical and durability properties, *Cement and Concrete Composites* 35, 109–117, **2013**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.028>.
- [47] Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, D. Rodriguez, Studies on concrete containing ground waste glass, *Cement and Concrete Research* 30, 91–100, **2000**. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00213-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00213-6).
- [48] R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou, Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet, *Cement and Concrete Composites* 33, 19–29, **2011**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.013>.
- [49] A. Shayan, Value-added utilization of waste glass in concrete, IABSE Symposium, Melbourne, pp. 1–11, **2002**.
- [50] C.D. Johnston, Waste glass as coarse aggregate for concrete, *Journal of Testing and Evaluation* 2 (5), 344–350, **1974**. <http://dx.doi.org/10.1520/JTE10117J>.
- [51] R. Takata, S. Sato, T. Nonaka, H. Ogata, K. Hattori, Investigation on alkali–silica reaction utilizing waste glass in concrete and suppression effect by natural zeolite, 29th Conference on Our World in Concrete and Structures: 25–26 August, Singapore, **2004**.
- [52] R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou, Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars, *Construction and Building Materials* 24, 1309–1312, **2010**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.030>.
- [53] S. de Castro and J. de Brito, Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates, *Journal of Cleaner Production* 41, 7–14, **2013**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.021>.
- [54] IB. Topçu, M. Canbaz, Properties of concrete containing waste glass, *Cement and Concrete Research* 34, 267–274, **2004**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.07.003>.
- [55] M. Batayneh, I. Marie, I. Asi, Use of selected waste materials in concrete mixes, *Waste Management (New York, N.Y.)* 27, 1870–1876, **2007**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026>. 17084070.
- [56] Z.Z. Ismail, E.A. Al-Hashmi, Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete, *Waste Management (New York, N.Y.)* 29, 655–659, **2009**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.012>. 18848773.
- [57] M. Mageswari, B. Vidivelli, The use of sheet glass powder as fine aggregate replacement in concrete, *Open Civil Engineering Journal* 4, 65–71, **2010**. <http://dx.doi.org/10.2174/1874149501004010065>.
- [58] N. Degirmenci, A. Yilmaz and O. Cakir, Utilization of waste glass as sand replacement in cement mortar, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 18, 303–308, **2011**.

- [59] S.B. Park, B.C. Lee, J.H. Kim, Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate, *Cement and Concrete Research* 34, 2181–2189, **2004**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.006>.
- [60] A. Khmiri, M. Chaabouni, B. Samet, Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars, *Construction and Building Materials* 44, 74–80, **2013**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.040>.
- [61] N. Schwarz, H. Cam, N. Neithalath, Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash, *Cement and Concrete Composites* 30, 486–496, **2008**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.02.001>.
- [62] A. Shayan, A. Xu, Value-added utilisation of waste glass in concrete, *Cement and Concrete Research* 34, 81–89, **2004**. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00251-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00251-5).
- [63] J. Wartman, D.G. Grubb and A.S.M. Nasim, Select engineering characteristics of crushed glass, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16 (6), 526 – 539, **2004a**.
- [64] J. Wartman D.G. Grubb and P. Strenk, Engineering properties of crushed glass – soil blends, *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, M.K. Yegian and E. Kavazanjian (eds.), ASCE, Vol. 1, GSP 126, 732 – 739, **2004b**.
- [65] D.G. Grubb, P.M. Gallagher, J. Wartman, Y. Liu and M. Carnivale, Laboratory evaluation of crushed glass – dredged material blends, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132 (5), 562 – 576, **2006**.
- [66] N.E. Malasavage, P.M. Gallagher, D.G. Grubb, J. Wartman, M. Carnivale, Modifying A Plastic Clay With Crushed Glass: Implications For Constructed Fills, *Soils And Foundations*, Vol. 47, No. 6, 1017–1027, Dec., **2007**.
- [67] M. Arabani, H. Sharafi, M.R. Habibi and E. Haghshenas, Laboratory Evaluation of Cement Stabilized Crushed Glass–Sand Blends, *EJGE*, Vol. 17., 1777-1792, **2012**.
- [68] V.R. Kulkarni and G.K. Patil, Experimental Study of Stabilization of Black Cotton Soil by Using Slag and Glass Fibers, *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, Volume 1, Number 2; August, 2014 pp. 107-112, **2014**.
- [69] D. Nuruzzaman and M.A. Hossain, Effect of Soda Lime Glass Dust on the Properties of Clayey Soil, *Global Journal of Researches In Engineering*,14(5):210-219, **2014**.
- [70] J. Olufowobi, A. Ogundoku, B. Michael and O. Aderinlewo, Clay soil stabilization using powdered glass, *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 9, No. 5, 541 – 558, **2014**.

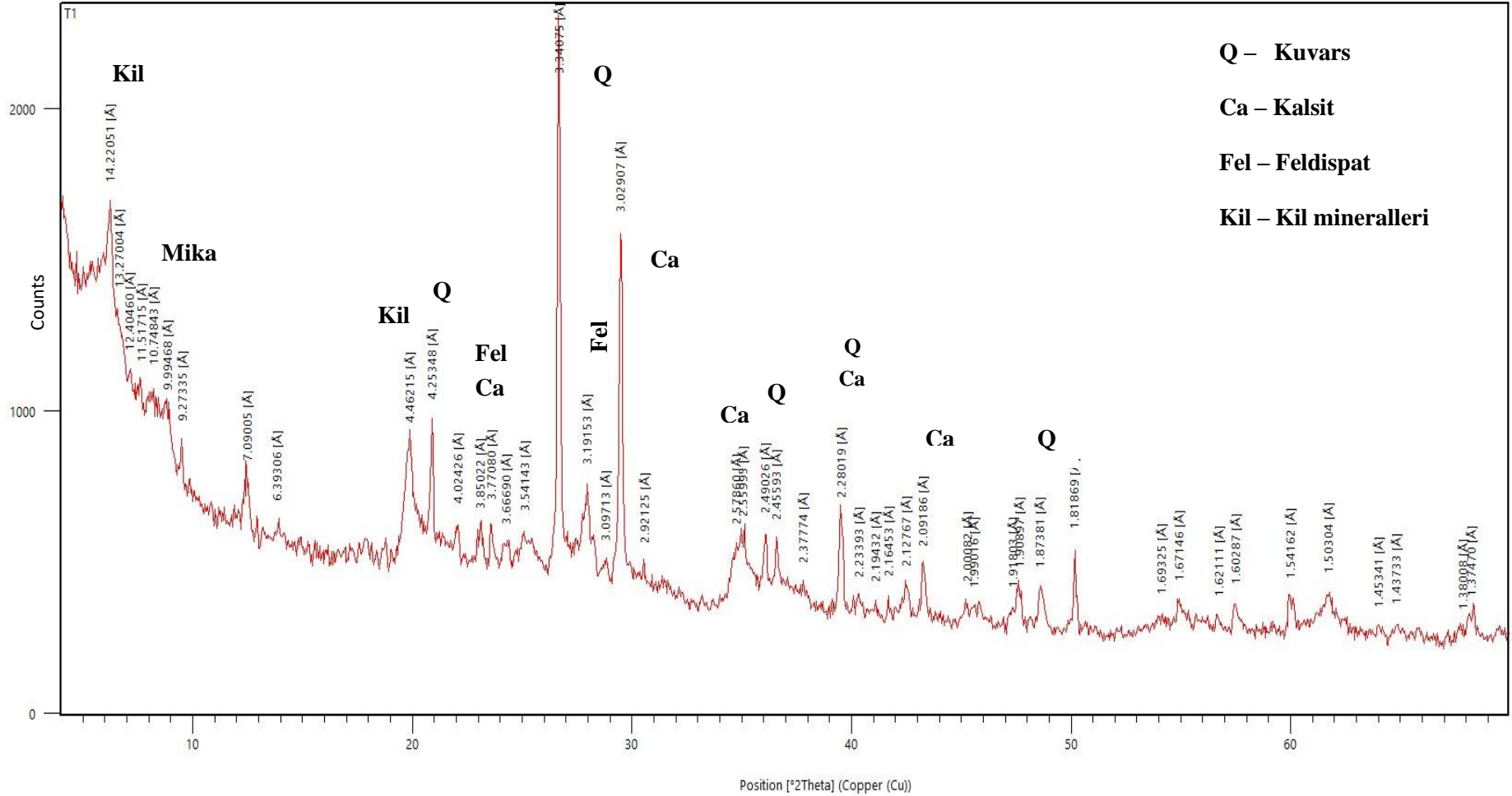
- [71] I.A.Ikara, A.M.Kundiri and A.Mohammed, "Effects of Waste Glass (WG) on the Strength Characteristics of Cement Stabilized Expansive Soil", American Journal of Engineering Research (AJER), Volume-4, Issue-11, pp-33-41, **2015**.
- [72] A. Fauzi, Z. Djauhari and U.J. Fauzi, Soil Engineering Properties Improvement by Utilization of Cut Waste Plastic and Crushed Waste Glass as Additive, IACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol. 8, No. 1., **2016**.
- [73] M. Al-Neami, K.Y.H. Alsoudany, A.A. Dawod, A. Elaf and E.A. Ehsan, Remediation of cohesive soils using waste glass, Conference of the International Journal of Arts & Sciences, CD-ROM. ISSN: 1943-6114 :: 09(01):125–138, **2016**.
- [74] H. Canakci, A. AL-Kaki, F. Celik, Stabilization of Clay with Waste Soda Lime Glass Powder, Procedia Engineering 161, 600 – 605, **2016**.
- [75] B. Bagriacik, Experimental Study about Soil Improvement with Glass Fibers, International Journal of Engineering Research, Volume No.6, Issue No.8, pp: 392-396, **2017**.
- [76] J.R. Benny, K.J. Jolly, J.M. Sebastian and M. Thomas, Effect of Glass Powder on Engineering Properties of Clayey Soil, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN: 2278-0181, Vol. 6, Issue 05, **2017**.
- [77] U. Mishra, Enhancement in Subgrade soil strength using Glass Powder as discrete fiber: A Review, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 04 Issue: 04 | Apr., e-ISSN: 2395 -0056, p-ISSN: 2395-0072. **2017**.
- [78] S. Salamatpoor and S. Salamatpoor, Evaluation of adding crushed glass to different combinations of cement-stabilized sand, International Journal of Geo Engineering, 8:8, **2017**.
- [79] N.S. Parihar, V.K. Garlapati and R. Ganguly, Stabilization of Black Cotton Soil Using Waste Glass, Handbook of Environmental Materials Management, pp 1-16, **2018**.
- [80] M.P. Bilondi, M.M. Toufigh and V. Toufigh, Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils, Constr. Build. Mater., 170, pp. 302-313, **2018**.
- [81] M.P. Bilondi, M.M. Toufigh and V. Toufigh, Using calcium carbide residue as an alkaline activator for glass powder-clay geopolymer, Constr. Build. Mater., 183, pp. 417-428, **2018**.
- [82] H. Yüncü, An Investigation of Volume Change of Ankara Clay. MSc. Thesis. Civil Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, **1972**.
- [83] R. Ulusay, Ankara Kenti Kuzey-Orta Bölgesinin Jeo-Mühendislik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, **1975**.

- [84] K.E. Kasapoğlu, Ankara Kenti Zeminlerinin Jeo-Mühendislik Özellikleri, Doçentlik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Beytepe, Ankara, **1980**.
- [85] O.B. Kiper, Etimesgut-Batıkent Yöresindeki Pliyosen Çökellerinin Jeo-mühendislik Özellikleri ve Konsolidasyonu, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, **1983**.
- [86] Z.A. Ergüler, Ankara Kilinin Şişme Davranışının ve Örselelenmenin Şişmeye Etkisinin İncelenmesi, Şişme Potansiyelinin Görgül Yaklaşımlarla Belirlenmesi, Yüksek Mühendislik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, **2001**.
- [87] Z.A. Ergüler, R. Ulusay, Engineering characteristics and environmental impacts of the expansive Ankara clay, and swelling maps for SW and central parts of the Ankara (Turkey) metropolitan area, *Environmental Geology*, 44, 979-992, **2003b**.
- [88] M.C. Tonoç, C. Gokceoglu and R. Ulusay, A Laboratory-scale investigation on the performance of lime columns in expansive Ankara (Turkey) Clay, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62, is. 2, 91-106, **2003**.
- [89] M.C. Tonoç, C. Gokceoglu and R. Ulusay, Effects of Lime Stabilization on Engineering Properties of Expansive Ankara Clay, *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe*, Lecture Notes in Earth Sciences, 104, 466-474, **2004**.
- [90] A. Özdemir, Ankara Kilinin Bazı Geoteknik Özelliklerine F Tipi Polifiber Malzemenin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2007**.
- [91] Y. Yılmaz and V. Ozaydin, Compaction and shear strength characteristics of colemanite ore waste modified active belite cement stabilized high plasticity soils, *Engineering Geology*, 155:45–53, **2013**.
- [92] Y. Yılmaz, Compaction and strength characteristics of fly ash and fiber amended clayey soil". *Engineering Geology*, 188:168-177, **2015**.
- [93] A. Binal, B. Bas and O.R. Karamut, Improvement of the Strength of Ankara Clay with Self cementing High Alkaline Fly Ash, *Procedia Engineering*, 161, 374-379, **2016**. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.577.
- [94] R. Kiliç, Ö. Küçükali and K. Ulamiş, Stabilization of high plasticity clay with lime and gypsum (Ankara, Turkey), *Bull Eng Geol Environ.*, **2015**. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0757-2>.
- [95] T.P. Seward and T. Vascott, High temperature glass melt property database for process modelling, Wiley-American Ceramic Society, **2005**.
- [96] U. Rattanasak and P. Chindapasirt, Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Minerals Engineering*, 22: 1073-1078, **2009**.

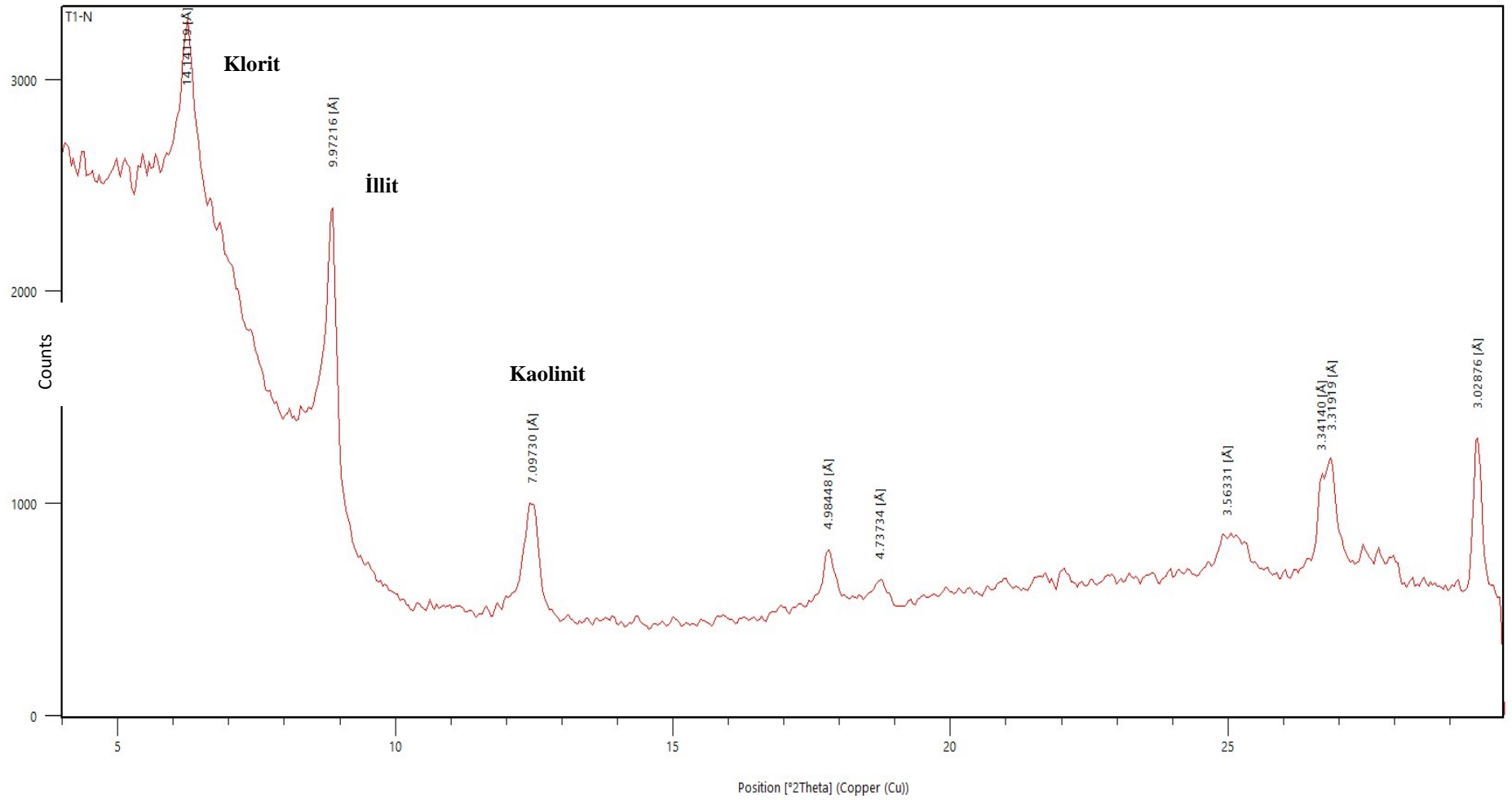
- [97] A.S. De Vargas, D.C.C Dal Molin, A.C.F Vilela, F.J. Da Silva, B. Pavao and H. Veit, The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers, *Cement & Concrete Composites*, 33: 653-660, **2011**.
- [98] A. Palomo, M.W. Grutzeck and M.T. Blanco, Alkali – activated fly ashes A cement for the future, *Cement and Concrete Research*, 29: 1323-1329, **1999**.
- [99] B. Baradan, Yapı Malzemesi II, Mühendislik Fakültesi Yayınları, No. 207, Dokuz Eylül Üniversitesi Matbaası, İzmir, 1-7, **2000**.
- [100] Z. Nalbantoglu and E.R. Tuncer, Compressibility and Hydraulic Conductivity of a Chemically Treated Expansive Clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 154-160, **2001**.
- [101] H. Xu and J.S.J. Van Deventer, The geopolymerisation of alumino-silicates minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59 (**2000**), pp. 247-266.
- [102] D. Papias, I.P. Giannopoulou and T. Perraki, Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Colloids Surf A*; 301: 246–254, **2007**.
- [103] IS: 2720 (Part XL) (1977) Determination of free swell index of soils, **1985**.
- [104] ASTM D 4972-01, Standard Test Method for pH of Soils:.. ASTM International, West Conshohocken, PA, **2007**.
- [105] ASTM D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil using Standard Effort, ASTM International, **2007**.
- [106] ASTM D2166, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, **2016**.
- [107] M. Zhang, H. Guo, T. El-Korchi, G. Zhang and M. Tao, Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer, *Constr. Build. Mater.* 47, 1468–1478, **2013**.
- [108] S.M. Horpibulsuk et al., Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations, *Constr. Build. Mater.* 24, 2011–2021, **2010**.
- [109] ASTM D 559-89, Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures. ASTM, Pennsylvania, **1994**.
- [110] ASTM D 560-89, Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures. ASTM, Pennsylvania, **1994**.
- [111] American Standards for Testing Material, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), Designation: D2487, **2006**.

EKLER

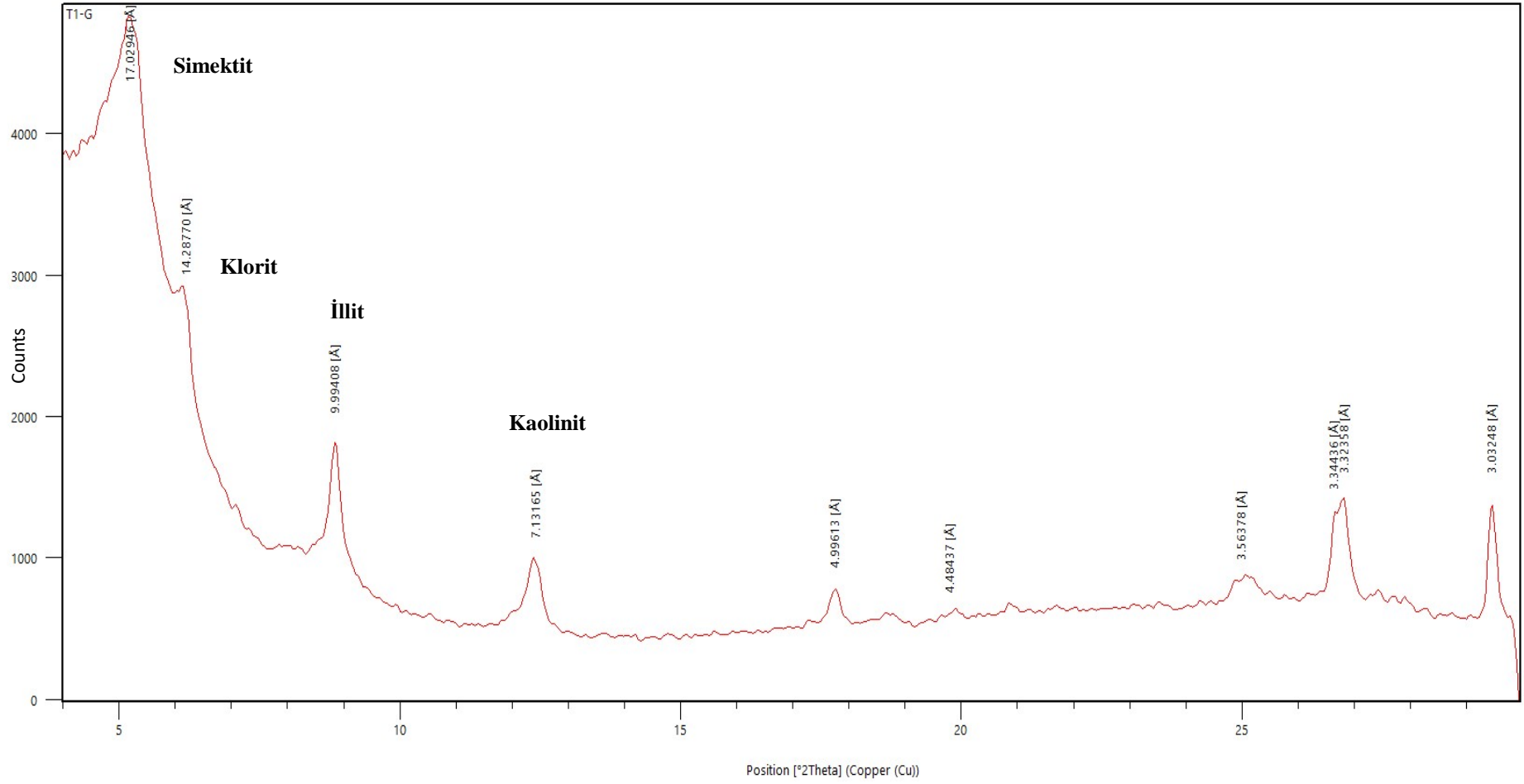
EK 1 - %15 Cam Tozu Katkılı Örneğin XRD Grafikleri



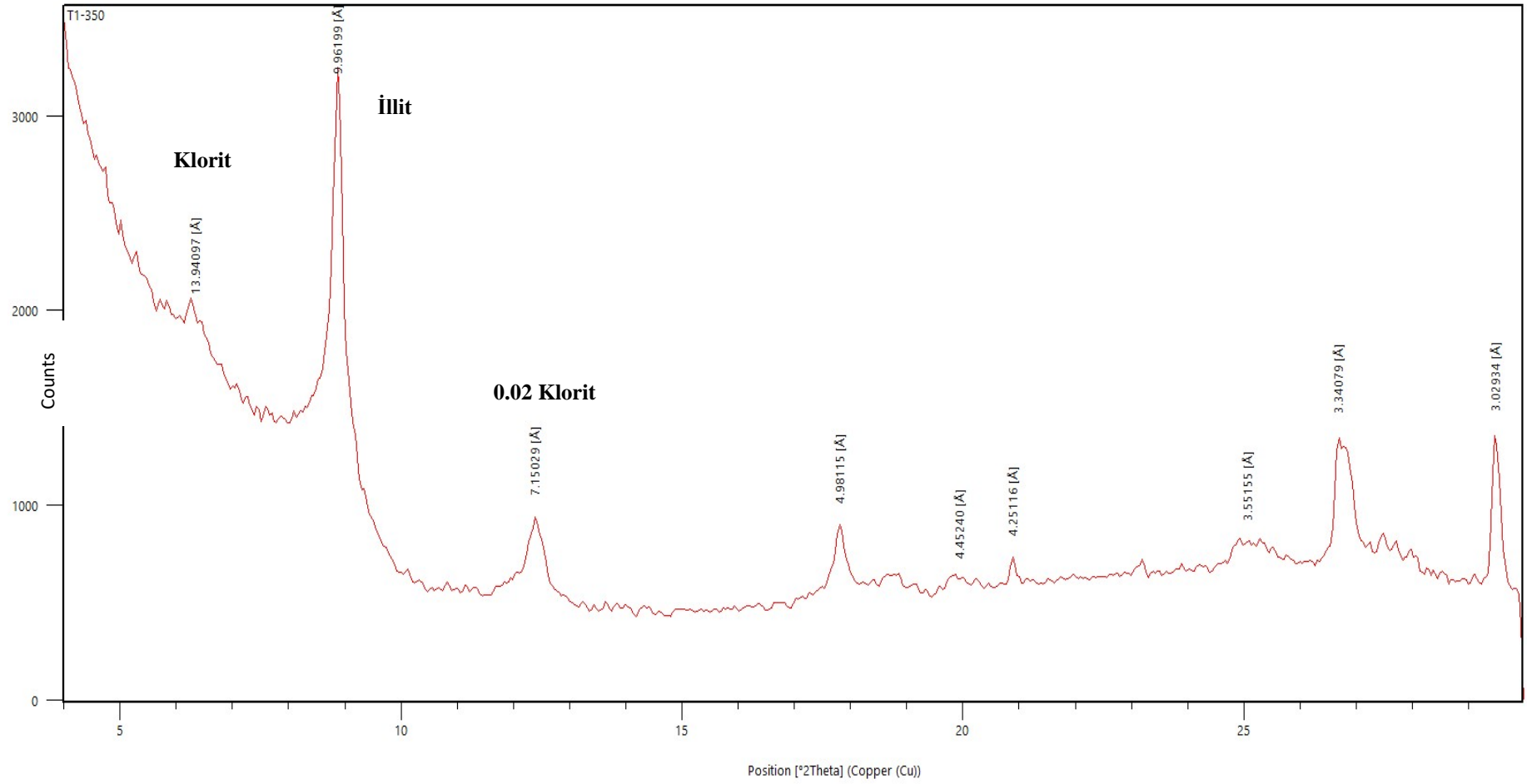
%15 cam tozu katkılı toprağa ait tüm kayaç analizi sonuçları.



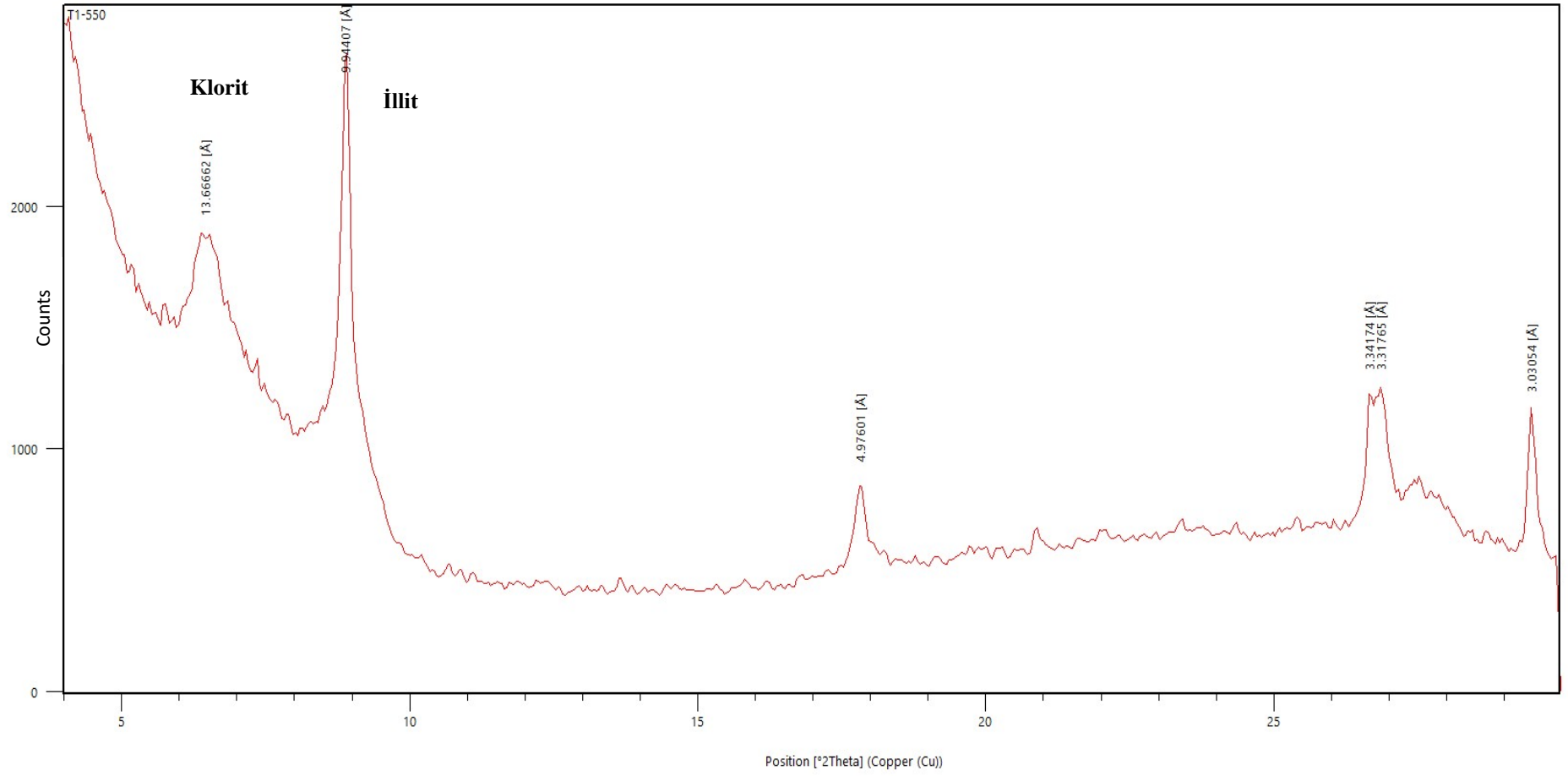
%15 cam tozu katkılı toprağa ait kil fraksiyonu (normal).



%15 cam tozu katkılı toprağa ait kil fraksiyonu (etilen glikol).

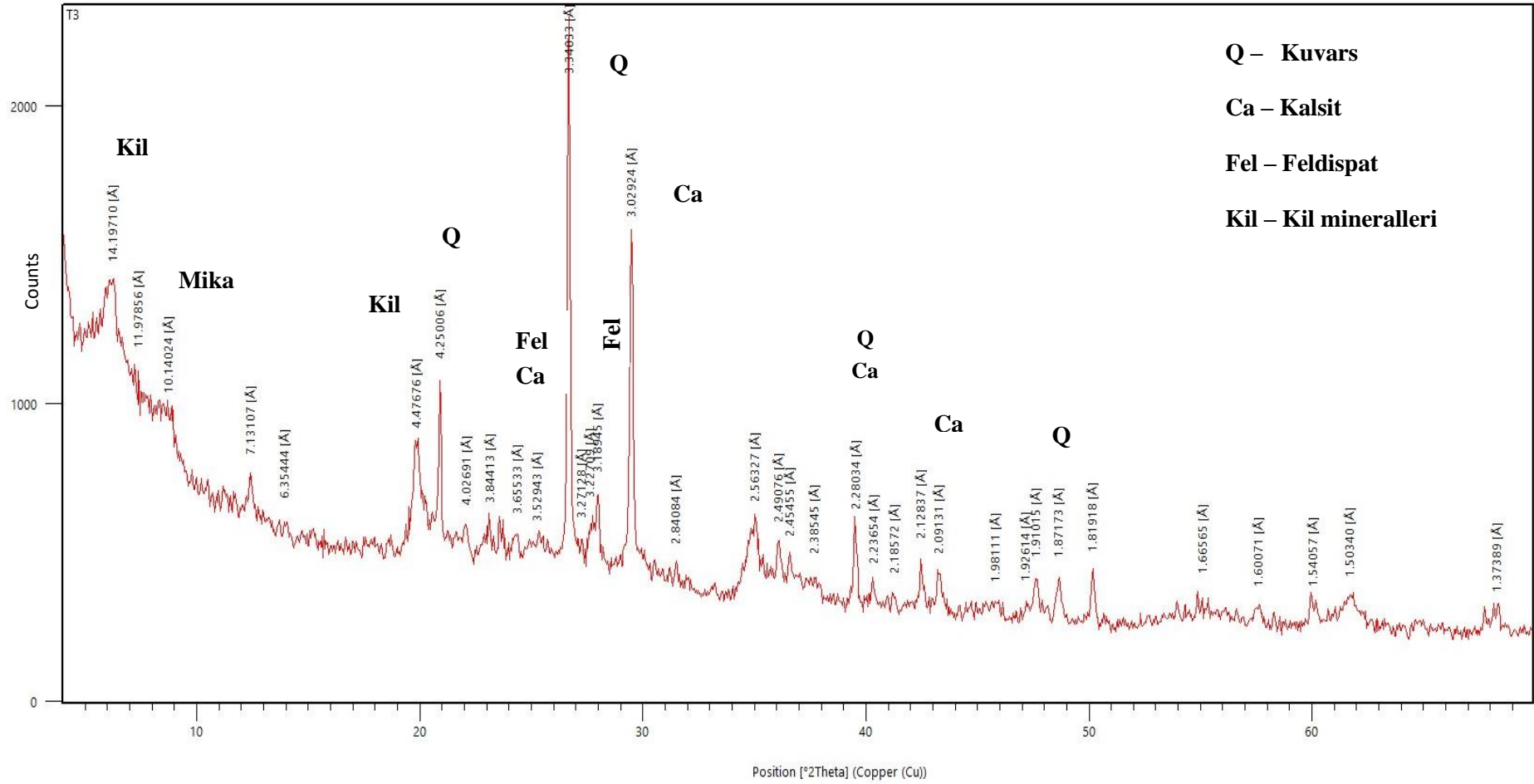


%15 cam tozu katkılı toprağa ait kil fraksiyonu (350°C ısı).

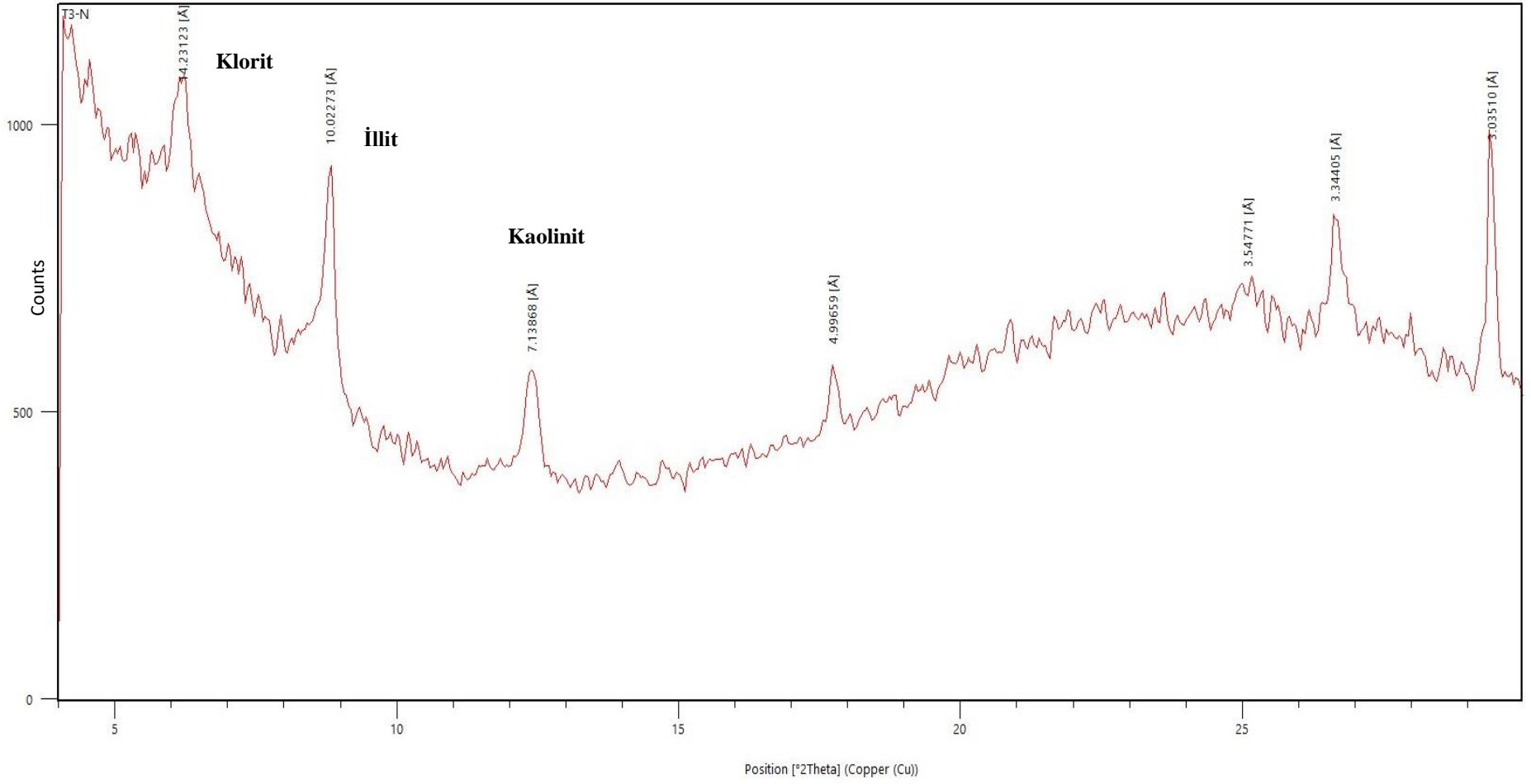


%15 cam tozu katkılı toprağa ait kil fraksiyonu (550°C ısı).

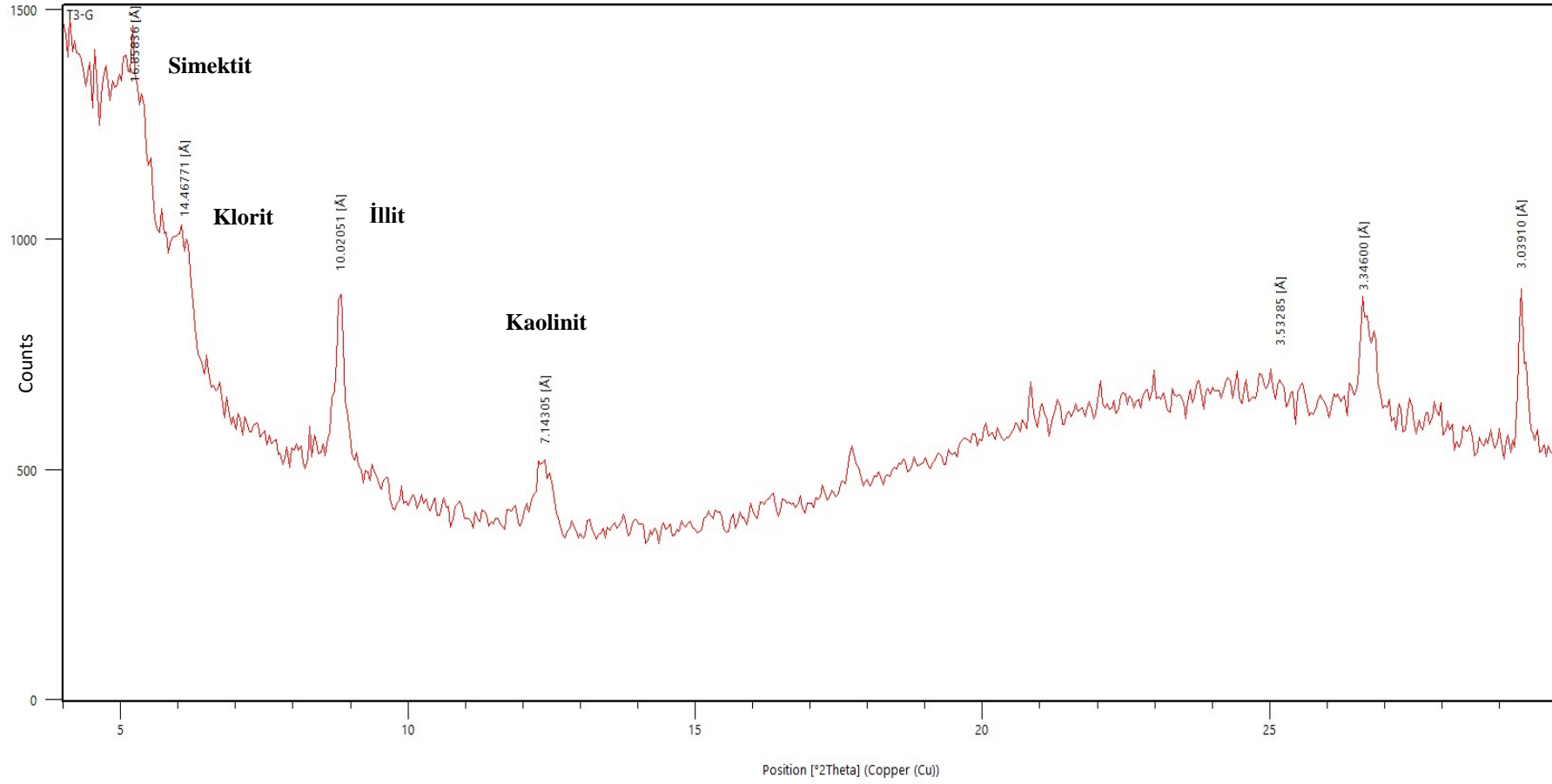
EK 2 - %15 cam tozu+%5 CaO Katkılı Örneğin XRD Grafikleri



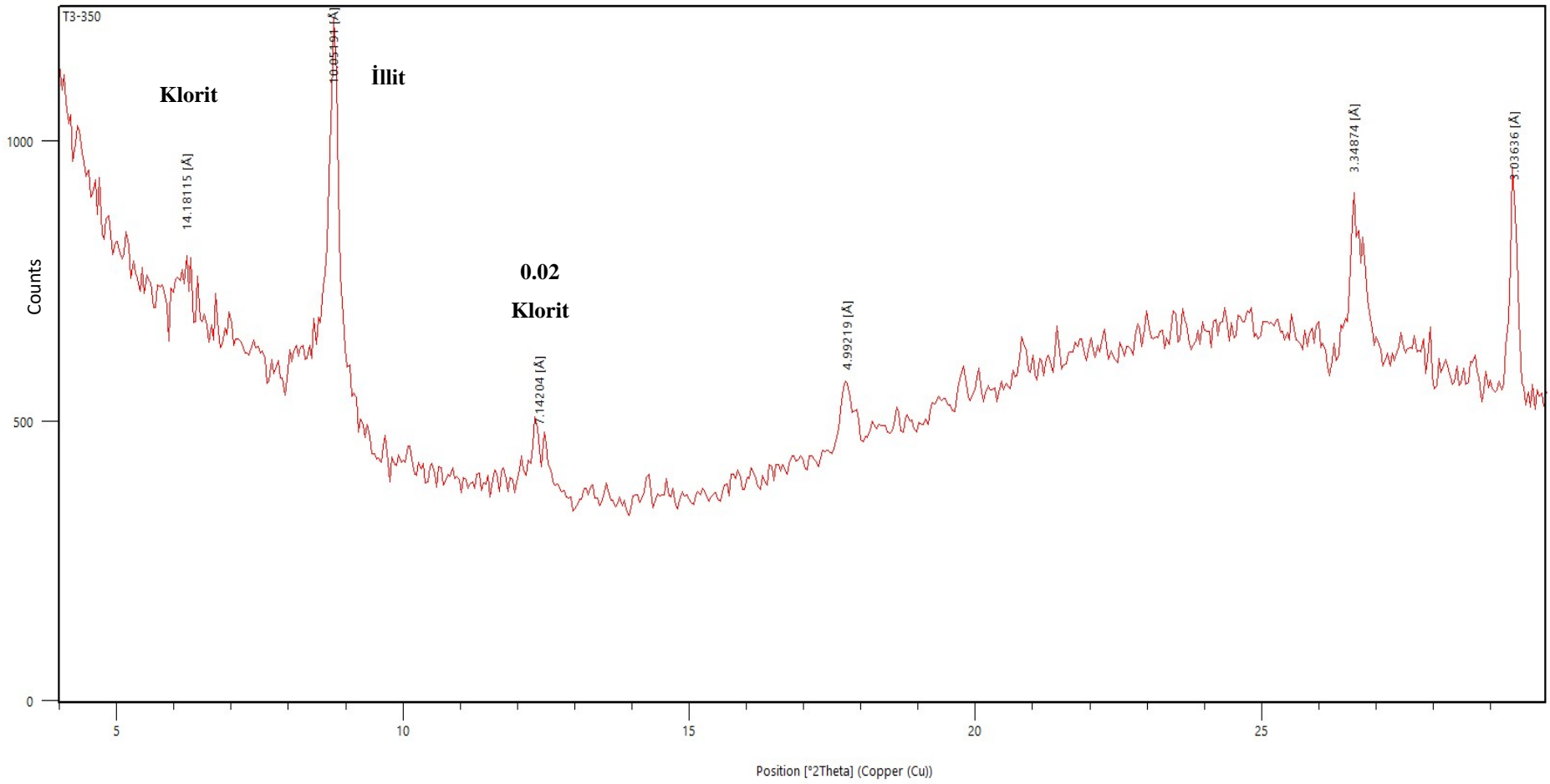
%15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprağa ait tüm kayaç analizi sonuçları.



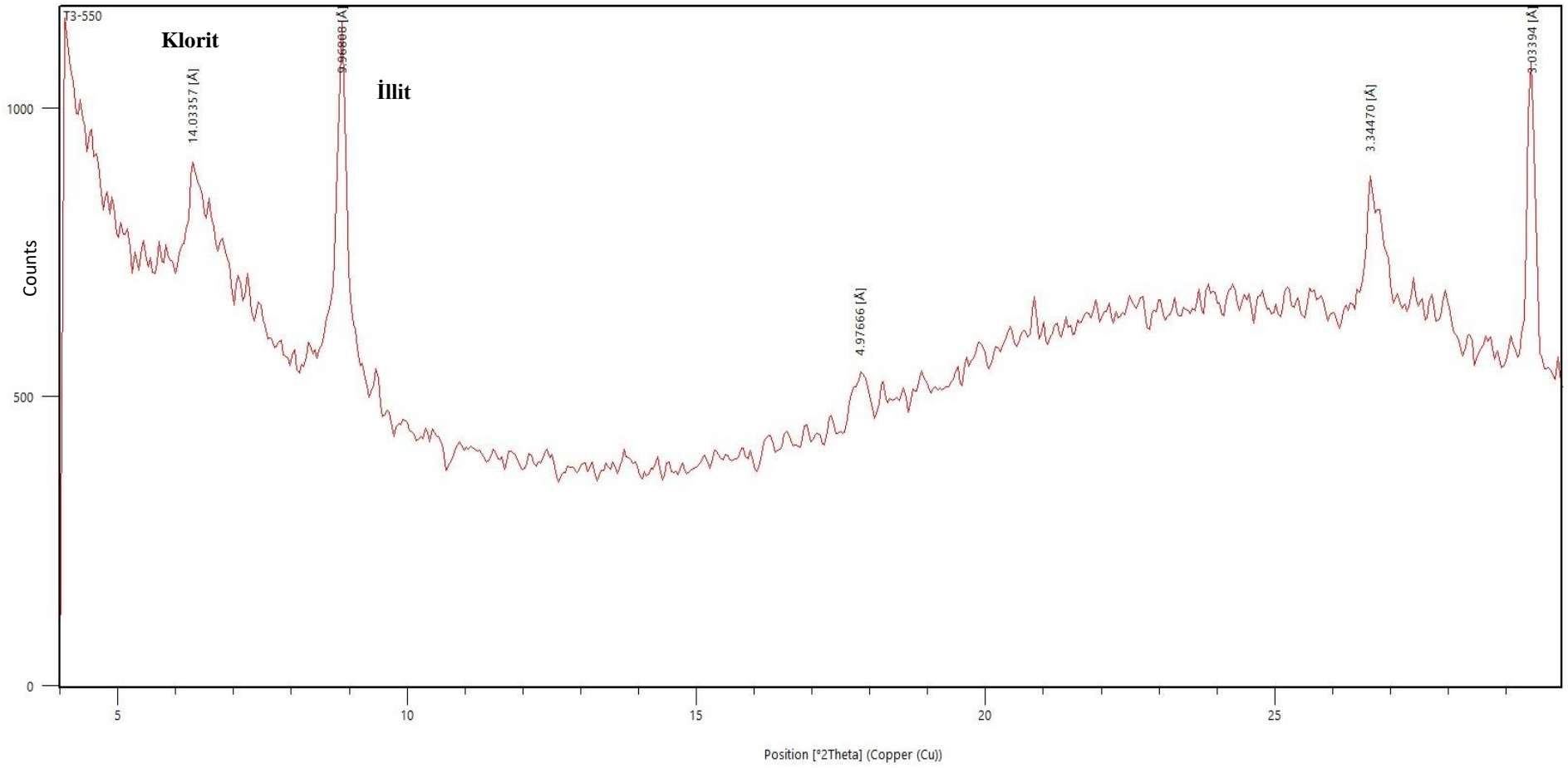
% 15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprağa ait kil fraksiyonu (normal).



% 15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprağa ait kil fraksiyonu (etilen glikol).

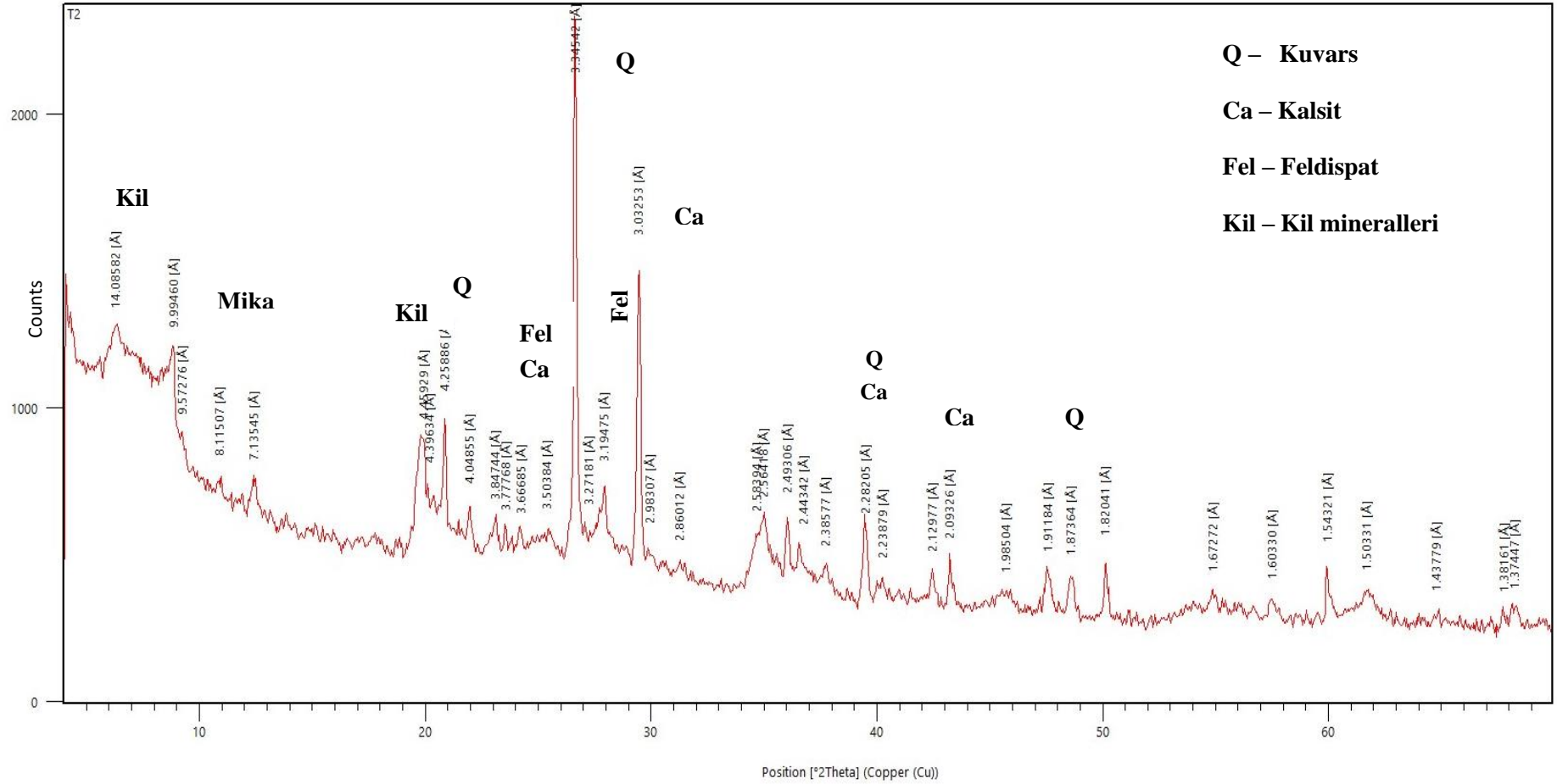


%15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprağa ait kil fraksiyonu (350°C ısı).

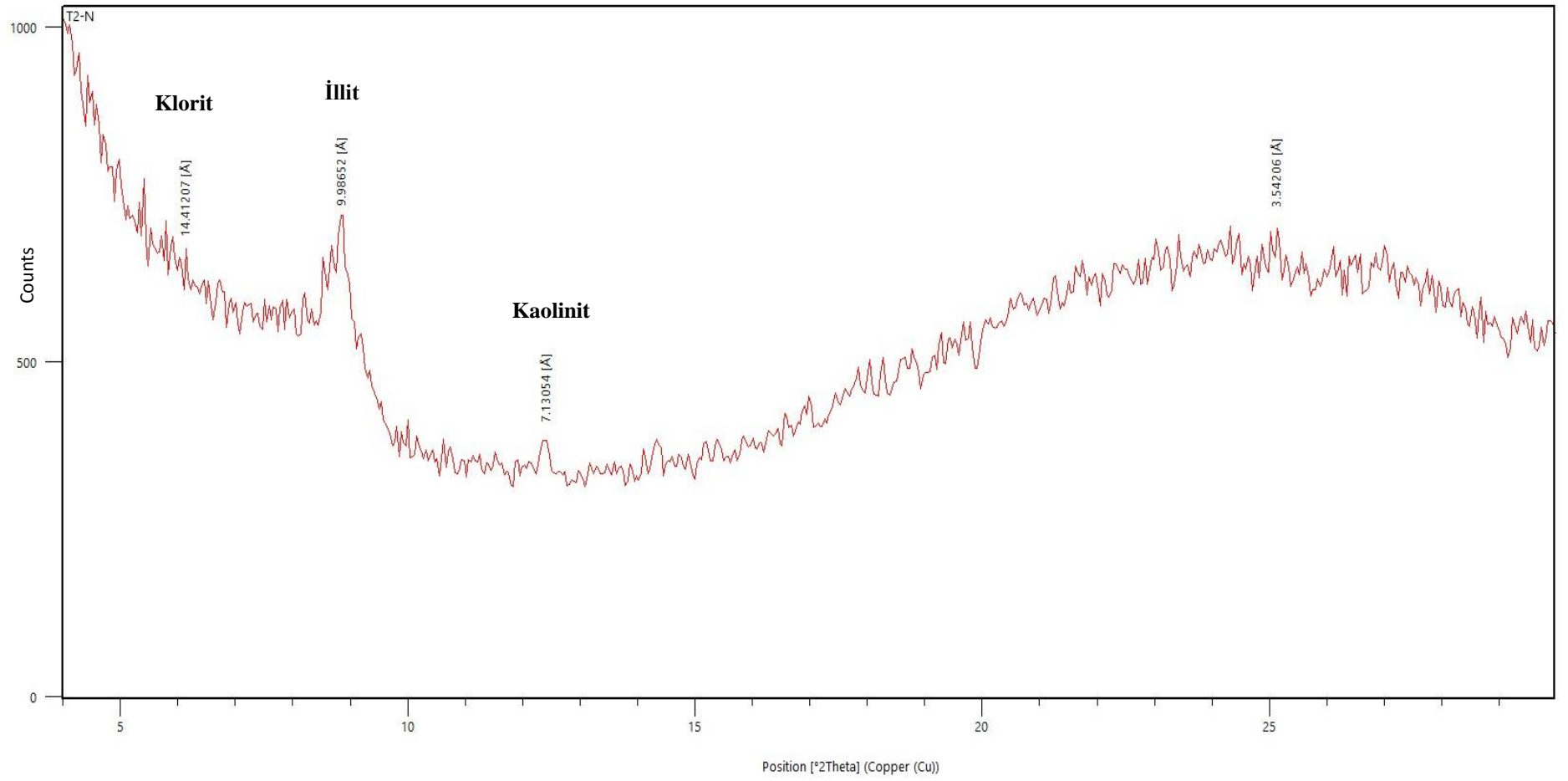


%15 cam tozu+%5 CaO katkılı toprağa ait kil fraksiyonu (550°C ısı).

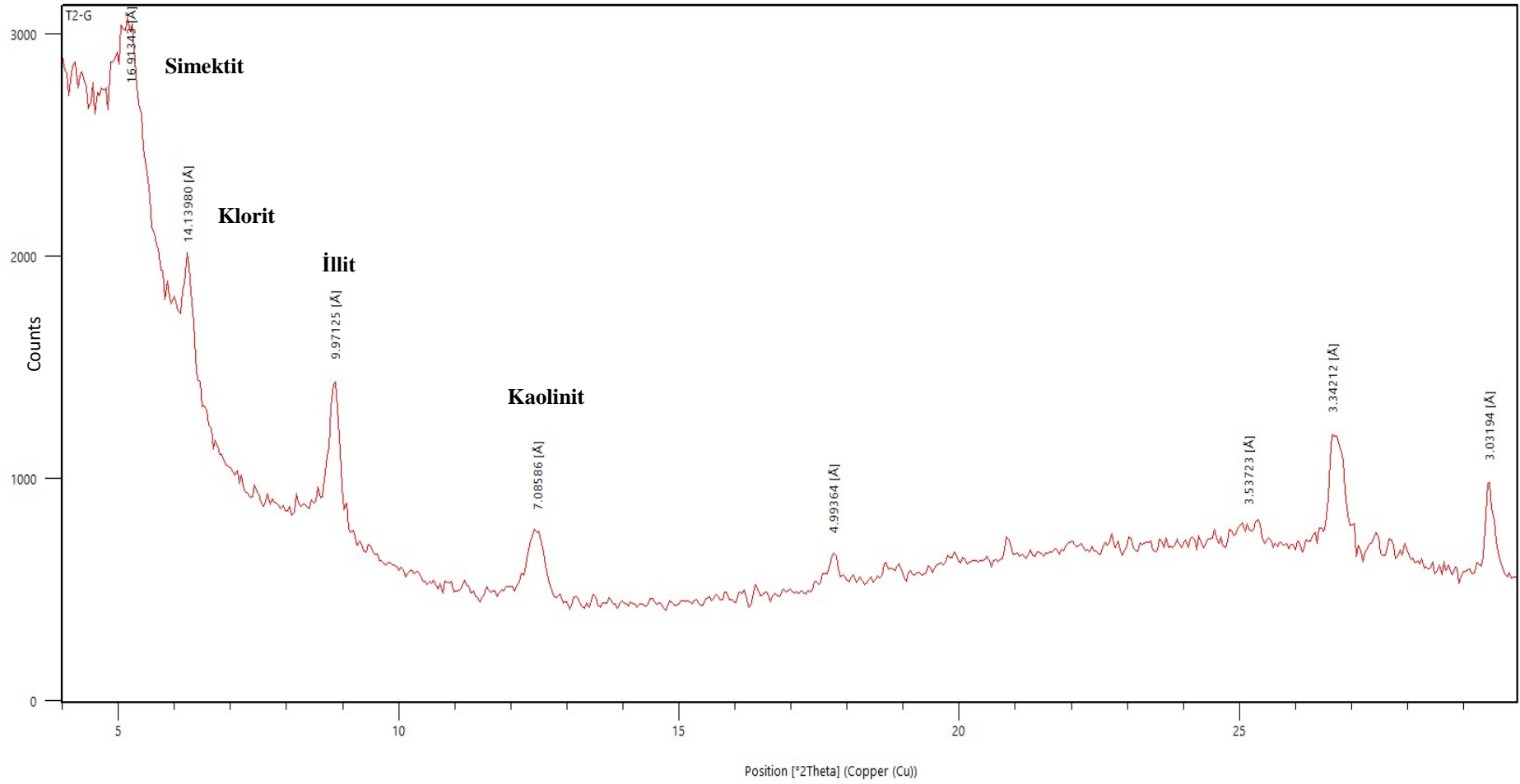
EK 3 - %15 cam tozu+2M NaOH Katkılı Örneğin XRD Grafikleri



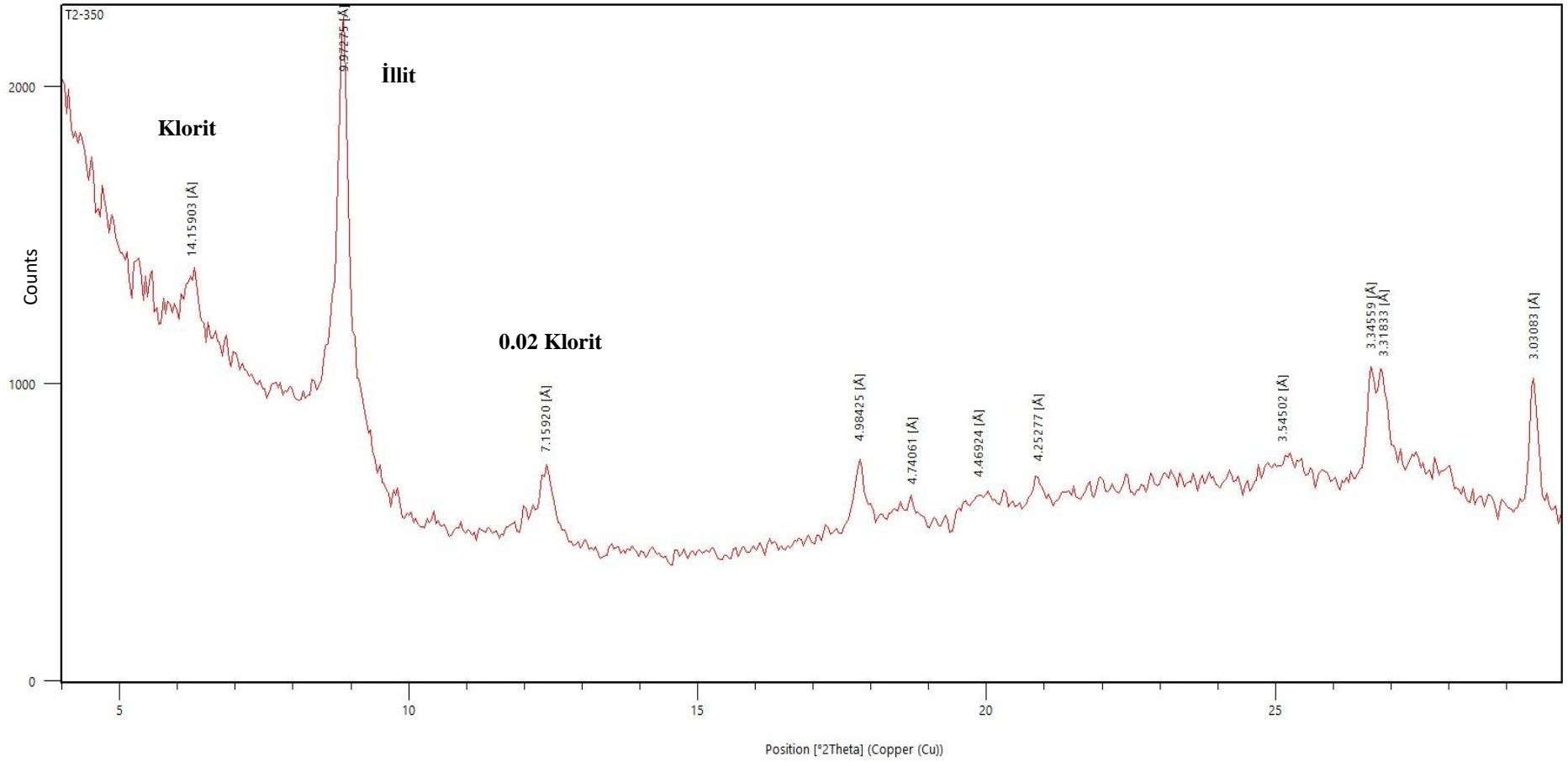
%15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprağa ait tüm kayaç analizi sonuçları.



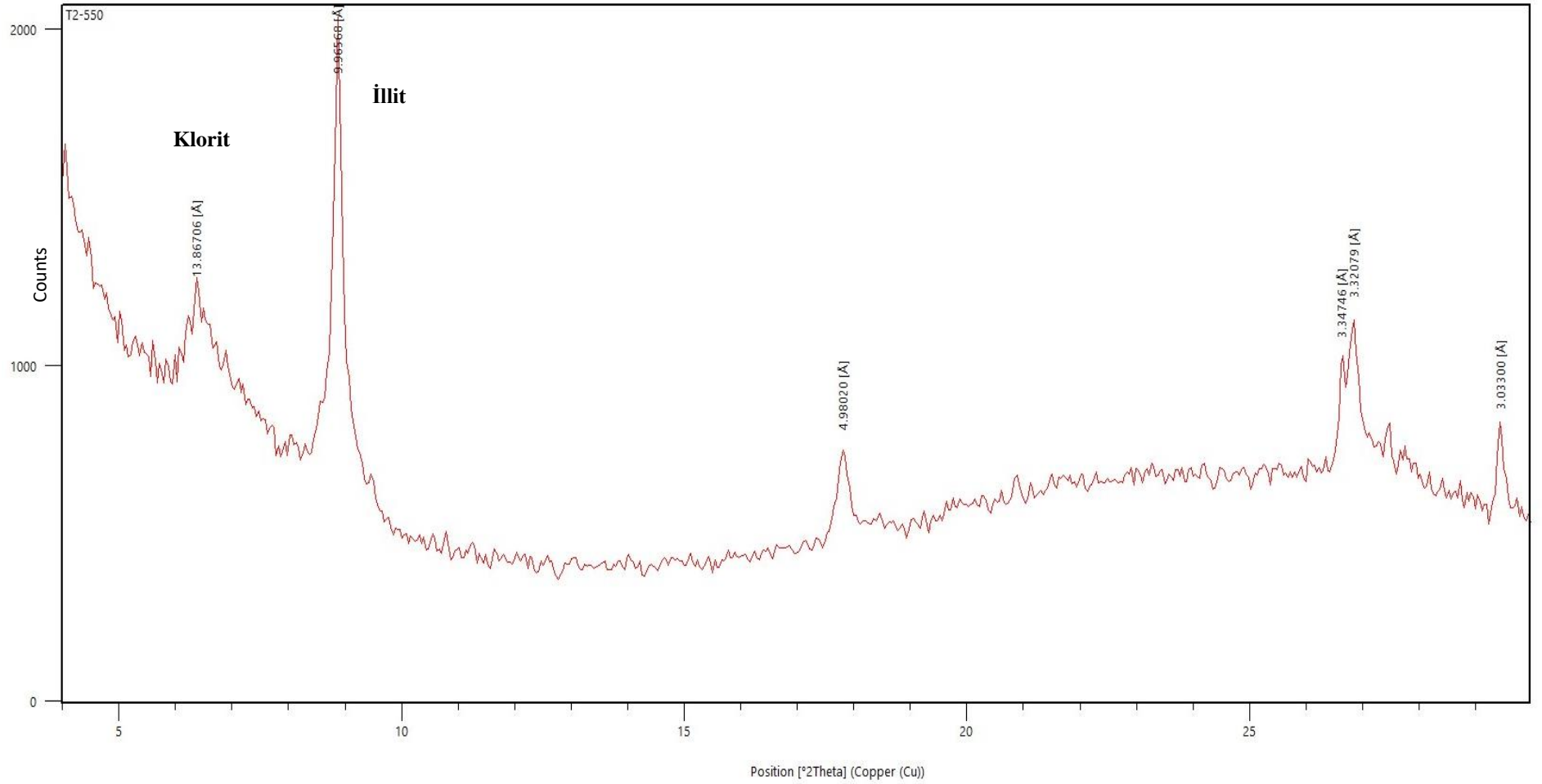
% 15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprağa ait kil fraksiyonu (normal).



% 15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprağa ait kil fraksiyonu (etilen glikol).



% 15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprağa ait kil fraksiyonu (350°C ısı).



% 15 cam tozu+2M NaOH katkılı toprağa ait kil fraksiyonu (550°C ısı).



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 09/07/2019

Tez Başlığı / Konusu: ŞİŞEN KİLLERİN STABİLİZASYONUNDA KATKI MALZEMESİ OLARAK ATIK CAM KULLANIMI

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 108 sayfalık kısmına ilişkin, 09/07/2019 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 9 'dur.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Aslıhan DADANLAR
Öğrenci No: N16125487
Anabilim Dalı: Jeoloji Mühendisliği
Programı: Jeoloji Mühendisliği - Yüksek Lisans
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

09.07.2019

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Dilek TÜRKER

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Aslıhan DADANLAR
Doğum yeri : Ankara
Medeni hali : Bekar
E-posta adresi : aslihandadanlar@gmail.com
Adresi : Osman Temiz Mah. 1036. Cadde Çankaya/Ankara

Eğitim Durumu

Lise : Sokullu Mehmet Paşa Lisesi
Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce - İyi

İş Tecrübesi

2017 / JT Jeoloji Mühendisliği Müş. Ltd. Şti.

Deneyim Alanları

Jeolojik-jeoteknik etüt raporlarının hazırlanması, sondaj kuyusu loglamaları.

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-